

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΖΩΙΚΗΣ
ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Περιβαλλοντικό αποτύπωμα παραγωγής τυριών: Μελέτη περίπτωσης
μικρής μονάδας παραγωγής τυριού»**

Αννέτα Σμέου

ΒΟΛΟΣ, 2026

UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF ICHTHYOLOGY AND AQUATIC ENVIRONMENT
DEPARTMENT OF FOOD SCIENCE AND NUTRITION

INTERDEPARTMENTAL POSTGRADUATE PROGRAMME
“TECHNOLOGY, QUALITY AND SAFETY OF ANIMAL ORIGIN
FOODS”

POSTGRADUATE MASTER’S THESIS

**“Environmental footprint of cheese production: A case study of a small-
scale cheese production unit”**

Anneta Smeou

VOLOS, 2026

**«Περιβαλλοντικό αποτύπωμα παραγωγής τυριών: Μελέτη περίπτωσης μικρής μονάδας
παραγωγής τυριού»**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) Ελένη Μαλισσιόβα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τεχνολογία και Ποιοτικός Έλεγχος
Γάλακτος και Γαλακτοκομικών Προϊόντων, Τμήμα Επιστήμης Ζωικής Παραγωγής, Σχολή

Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Επιβλέπουσα**,

2) Ιωάννης Μποζιάρης, Καθηγητής, Υγιεινή και Συντήρηση Ιχθυηρών, Τμήμα Γεωπονίας
Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο

Θεσσαλίας, **Μέλος**,

3) Αθανάσιος Μανούρας, Καθηγητής, Χημεία Τροφίμων με έμφαση στη Χημεία Φυσικών
Προϊόντων, Τμήμα Διατροφής και Διαιτολογίας, Σχολή Επιστημών Φυσικής Αγωγής,

Αθλητισμού και Διαιτολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

*Στους γονείς μου,
Γεωργία & Δαμιανό*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα της εργασίας αυτής, κα Ελένη Μαλισσιόβα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη βοήθειά της και τη διαρκή υποστήριξή της, τόσο κατά τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους, όσο και κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, καθώς και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής μου, αποτελούμενη από τους 1) κ. Ιωάννη Μποζιάρη, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και 2) κ. Αθανάσιο Μανούρα, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Μιχαήλ Κουρέα, Μηχανικό Περιβάλλοντος, μεταδιδακτορικό ερευνητή στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, για την άμεση και ανιδιοτελή βοήθειά του, όσον αφορά το πειραματικό κομμάτι και για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υπεύθυνη του τυροκομείου μελέτης για τη συγκατάθεση της και τη συνεργασία της, καθώς και τον υπεύθυνο ποιοτικού ελέγχου για τη διαρκή υποστήριξή του και την παροχή των απαραίτητων δεδομένων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου. Ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου για τη συνεχή στήριξη, την ανεξάντλητη υπομονή και την αγάπη τους, τα αδέρφια μου για τη βοήθεια και τη συμπαράστασή τους, καθώς και τον σύντροφό μου για την κατανόηση και τη στήριξή του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή τροφίμων ασκεί περιβαλλοντική πίεση λόγω της αυξανόμενης ζήτησης, της εντατικής χρήσης φυσικών πόρων και της απελευθέρωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό, ο αγροδιατροφικός τομέας και ειδικότερα η γαλακτοβιομηχανία έχουν αναδειχθεί ως κρίσιμοι τομείς για την εφαρμογή περιβαλλοντικής αξιολόγησης και σχεδιασμό βιώσιμων πρακτικών. Μεταξύ των γαλακτοκομικών προϊόντων, το τυρί παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η παραγωγή του απαιτεί μεγάλες ποσότητες νωπού γάλακτος και περιλαμβάνει ενεργοβόρες διεργασίες επεξεργασίας και συντήρησης.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας στην Ελλάδα, μέσω της εφαρμογής βασικών μεθοδολογικών στοιχείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), μέσω του δείκτη του αποτυπώματος άνθρακα. Η εργασία βασίζεται σε μελέτη περίπτωσης τυροκομείου που μεταποιεί αποκλειστικά γίδινο και πρόβειο γάλα και παράγει διάφορους τύπους τυριών, συμπεριλαμβανομένων προϊόντων Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ), όπως η φέτα και το μανούρι.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για λειτουργική μονάδα 1 kg συσκευασμένου τυριού, με όρια συστήματος «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης» (cradle to retail stores) και έτος αναφοράς το 2024. Περιλαμβάνονται τα στάδια της πρωτογενούς παραγωγής γάλακτος, της μεταφοράς του στο τυροκομείο, της βιομηχανικής επεξεργασίας, της συσκευασίας, της διαχείρισης αποβλήτων και της διανομής του τελικού προϊόντος. Η φάση της κατανάλωσης και της τελικής διάθεσης του προϊόντος δεν εξετάστηκε. Η εκτίμηση των εκπομπών βασίστηκε σε δευτερογενείς συντελεστές εκπομπών από τη βιβλιογραφία και διεθνείς κατευθυντήριες οδηγίες, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας πρωτογενών δεδομένων και πρόσβασης σε εμπορικές βάσεις δεδομένων LCA.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής τυριού εκτιμάται σε 15,42 kg CO₂-eq ανά kg τελικού προϊόντος. Η πλειονότητα των εκπομπών, με ποσοστό 98%, αποδίδεται στο στάδιο της πρωτογενούς παραγωγής γάλακτος, με τιμή 15,05 kg CO₂-eq, επιβεβαιώνοντας τη βιβλιογραφική διαπίστωση ότι η παραγωγή γάλακτος αποτελεί το κυρίαρχο στάδιο διαμόρφωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των γαλακτοκομικών προϊόντων. Αντιθέτως, το στάδιο της βιομηχανικής επεξεργασίας και της διανομής συνεισφέρει μόλις το 2% των συνολικών εκπομπών, με αποτύπωμα 0,37 kg CO₂-eq ανά kg τυριού.

Η ανάλυση των εκπομπών σε επίπεδο βιομηχανίας κατέδειξε ότι η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί το κύριο «κρίσιμο σημείο» του βιομηχανικού σταδίου, αντιπροσωπεύοντας το 78,40% των εκπομπών, ενώ ακολουθούν η χρήση υλικών συσκευασίας με ποσοστό 19,71%, η διαχείριση στερεών αποβλήτων με 1,65% και η κατανάλωση νερού με 0,24%. Η σχετικά χαμηλή συμβολή της βιομηχανικής φάσης αποδίδεται στη μικρή κλίμακα λειτουργίας της μονάδας, στη χαμηλή ενεργειακή ένταση, στην περιορισμένη διάρκεια ωρίμανσης για μεγάλο μέρος της παραγωγής και στην εξαίρεση του ορού γάλακτος από τα όρια του συστήματος.

Η εργασία αναγνωρίζει συγκεκριμένους περιορισμούς και παραδοχές που ενδέχεται να οδηγούν σε υποεκτίμηση του πραγματικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ιδίως σε επίπεδο βιομηχανίας, όπως η χρήση μέσων συντελεστών εκπομπών, η απουσία επιμερισμού περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε υποπροϊόντα και η συγκεντρωτική καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα για συγκριτική αξιολόγηση και εντοπισμό των βασικών πηγών εκπομπών.

Συνολικά, η παρούσα μελέτη συμβάλλει στην κάλυψη ερευνητικού κενού που αφορά την παραγωγή τυριών από γίδινο και πρόβειο γάλα σε βιομηχανίες μικρής κλίμακας στην Ελλάδα και παρέχει τεκμηριωμένη βάση για τον σχεδιασμό στρατηγικών μείωσης του

περιβαλλοντικού αποτυπώματος στον τυροκομικό κλάδο, καθώς και για την ανάπτυξη μελλοντικών, πιο αναλυτικών μελετών LCA.

Λέξεις κλειδιά:

Ανάλυση Κύκλου Ζωής, τυροκομείο, μικρή κλίμακα, γίδινο και πρόβειο γάλα, ΠΟΠ τυριά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα: έννοια, δείκτες και θεσμικό πλαίσιο εφαρμογής στην παραγωγή τυριού.....	4
2.2 Ο αγροδιατροφικός τομέας και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις.....	5
2.2.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωργικής και κτηνοτροφικής παραγωγής.....	5
2.2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής μονάδας κατά την επεξεργασία τροφίμων.....	6
2.2.3 Στρατηγικές βιώσιμης παραγωγής τροφίμων	7
2.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων	9
2.3.1 Κύριες πηγές ρύπανσης στη γαλακτοβιομηχανία	9
2.3.2 Μελέτες περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων γαλακτοκομικών προϊόντων	9
2.4 Η παραγωγή τυριού: τεχνολογική και περιβαλλοντική διάσταση	12
2.4.1 Η παραγωγή τυριού και οι κύριες διεργασίες	12
2.4.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τυριού	14
2.5 Μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος.....	17
2.5.1 Θεωρητικό πλαίσιο της Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)	17
2.5.2 Λογισμικά και εργαλεία υπολογισμού της LCA.....	19
2.5.3 Μεθοδολογικές παράμετροι συγκρισιμότητας μελετών αποτυπώματος άνθρακα	20
2.5.4 Ερευνητικό κενό και μελλοντικές προκλήσεις στην εφαρμογή της LCA για παραγωγή τυριού σε μικρές μονάδες	21
2.6 Σκοπός και στόχοι της μελέτης	23
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	24
3.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο – Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)	24
3.2 Ορισμός λειτουργικής μονάδας και ορίων συστήματος	24
3.2.1 Ορισμός λειτουργικής μονάδας.....	24
3.2.2 Ορισμός και περιγραφή ορίων συστήματος.....	25
3.3 Περιγραφή της μελετώμενης μονάδας (case study)	26
3.4 Συλλογή δεδομένων	27
3.4.1 Πρωτογενή δεδομένα	27
3.4.2 Δευτερογενή δεδομένα	27
3.5 Επεξεργασία δεδομένων και κανονικοποίηση.....	28

3.6 Υπολογισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων	29
3.6.1 Παραγωγή γάλακτος	29
3.6.2 Ενέργεια & καύσιμα.....	29
3.6.3 Νερό & συσκευασία & στερεά απόβλητα	30
3.8 Παραδοχές και περιορισμοί της μελέτης.....	31
3.8.1 Παραδοχές.....	31
3.8.2 Περιορισμοί.....	32
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	34
4.1 Κατανομή παραγωγής τυροκομικών προϊόντων	34
4.2 Κανονικοποίηση δεδομένων ερωτηματολογίου ανά λειτουργική μονάδα ανά έτος παραγωγής.	35
4.3 Συνολικό αποτύπωμα άνθρακα για την παραγωγή 1 kg τυριού.....	37
4.4 Κατανομή εκπομπών μεταξύ παραγωγής γάλακτος και βιομηχανίας	38
4. 4. 1 Εκπομπές στο στάδιο παραγωγής γάλακτος	38
4.4.2 Εκπομπές στο στάδιο λειτουργίας του τυροκομείου	39
4.4.2.1 Ομαδοποίηση εκπομπών ανά κατηγορία	41
4.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων	47
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	49
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67
Ελληνική βιβλιογραφία	67
Ξένα βιβλιογραφία	67
ABSTRACT	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού οδηγεί σε αυξημένες ανάγκες για θρέψη, και κατά συνέπεια, σε εντατική βιομηχανική παραγωγή τροφίμων (Canellada et al., 2018). Η βιομηχανία τροφίμων μεταποιεί τις πρώτες ύλες, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους, συμβάλλοντας στη διασφάλιση της επισιτιστικής ασφάλειας (IPCC, 2019). Παράλληλα, η βιομηχανία τροφίμων, εξαιτίας της εντατικής παραγωγής, αποτελεί σημαντική πηγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων (FAO, 2019). Αυτό οφείλεται στην κατανάλωση φυσικών πόρων, την παραγωγή εκπομπών και αποβλήτων (Finnegan et al., 2017). Δεδομένης της κλιματικής κρίσης και της ανάγκης για μετάβαση σε πιο βιώσιμα συστήματα αναπτύχθηκαν στρατηγικές μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ορθολογικής διαχείρισης των φυσικών πόρων και των εκροών του αγροδιατροφικού τομέα (Finnegan et al., 2017). Επιπλέον, η καταναλωτική τάση των καταναλωτών ασκεί επιπρόσθετη πίεση για μετάβαση σε πιο βιώσιμα συστήματα (European Commission, 2020).

Η γαλακτοβιομηχανία αποτελεί σημαντικό συντελεστή διαμόρφωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του αγροδιατροφικού τομέα (Canellada et al., 2018). Τα γαλακτοκομικά είναι τρόφιμα υψηλής θρεπτικής αξίας και βασικά στοιχεία μιας ισορροπημένης διατροφής (Palmieri et al., 2017). Συνεπώς, αποτελούν προϊόντα υψηλής ζήτησης, κυρίως στην Ευρώπη, με αναμενόμενη αυξητική τάση κατανάλωσης (Notarnicola et al., 2017). Μεταξύ των γαλακτοκομικών προϊόντων, το τυρί καταναλώνεται περισσότερο και προκύπτει κυρίως από μεταποίηση αγελαδινού, πρόβειου ή γίδινου γάλακτος (Soares et al., 2021). Στη βιβλιογραφία μελετάται η παραγωγή τυριού με σκοπό την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και το σχεδιασμό βιώσιμων πρακτικών με Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (LCA) (Salas-Vargas et al., 2021). Η LCA αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο αξιολόγησης των

περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων και το αποτύπωμα άνθρακα αποτελεί τον πιο κοινό δείκτη μελέτης (Canellada et al., 2018).

Οι μελέτες LCA για την παραγωγή τυριού, εντοπίζονται στην Κεντροανατολική Ευρώπη και αφορούν κυρίως τυριά από αγελαδινό γάλα και παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα (Soares et al., 2021). Οι μελέτες στη Μεσόγειο αφορούν τυριά από πρόβειο γάλα, παραγωγή Προϊόντων Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ) και παραγωγή σε μικρή κλίμακα (Ghinea & Leahu 2023; Vagnoni et al., 2017). Ωστόσο, είναι περιορισμένες, ιδίως οι μελέτες στην Ελλάδα (Feon et al., 2023).

Η Ελλάδα αποτελεί χώρα με σημαντική εκτροφή αιγοπροβάτων και κατά συνέπεια παραγωγή γίδινου και πρόβειου γάλακτος (ΕΛΣΤΑΤ, 2023). Η μεταποίηση του γίδινου και πρόβειου γάλακτος επιτρέπει την παραγωγή τυριού τύπου φέτα και μανούρι, τα οποία αποτελούν προϊόντα ΠΟΠ. Η φέτα αποτελεί την πλειονότητα των τυριών παραγωγής των γαλακτοβιομηχανιών στην Ελλάδα (ΕΛΣΤΑΤ, 2023). Η παραγωγή τυριού μπορεί να γίνει σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα, με τη μικρή κλίμακα να κυριαρχεί στην επικράτεια και την παραδοσιακή τυροκομική παραγωγή από κτηνοτρόφους να διατηρείται (Litopoulou-Tzanetaki & Tzanetakis, 2014; Dubeuf et al., 2010).

Τα αποτελέσματα μεταξύ των μελετών LCA για την παραγωγή τυριού, διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο τυριού, το είδος γάλακτος, την τεχνολογία, τη χρήση πόρων, τις εφαρμοζόμενες πρακτικές της χώρα και την κλίμακα παραγωγής (Soares et al., 2021; Canellada et al., 2018; Finnegan et al., 2017). Σε πολλές μελέτες δε λαμβάνονται υπόψιν οι ιδιαιτερότητες της παραγωγής σε μικρή κλίμακα επιβεβαιώνοντας ότι η περιβαλλοντική επίδοση των βιομηχανιών μικρής κλίμακας δεν έχει μελετηθεί επαρκώς (Santos Jr. et al., 2017). Παρά τη σημασία της τυροκομικής παραγωγής μικρής κλίμακας στην Ελλάδα και τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας των μονάδων αυτών, απουσιάζουν μελέτες που να εξετάζουν την

παραγωγή ελληνικών ΠΟΠ τυριών από γίδινο και πρόβειο γάλα σε βιομηχανίες μικρής κλίμακας (Soares et al., 2021; Feon et al., 2023).

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας στην Ελλάδα, μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Η εργασία αφορά μελέτη περίπτωσης τυροκομείου, που μεταποιεί αποκλειστικά γίδινο και πρόβειο γάλα και παράγει τυριά μεταξύ των οποίων φέτα και μανούρι που αποτελούν ΠΟΠ προϊόντα. Η ανάλυση LCA γίνεται με εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα. Στόχος είναι η σύγκριση των εκπομπών σε επίπεδο πρωτογενούς παραγωγής γάλακτος και βιομηχανικής παραγωγής, καθώς και ο εντοπισμός κρίσιμων σημείων σε επίπεδο βιομηχανίας, ώστε να διατυπωθούν πιθανές προτάσεις μετριασμού των εκπομπών και μελλοντικής έρευνας.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα: έννοια, δείκτες και θεσμικό πλαίσιο εφαρμογής στην παραγωγή τυριού

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Environmental Footprint, EF), αποτελεί προσέγγιση ποσοτικής αποτίμησης της κατανάλωσης φυσικών πόρων και της απελευθέρωσης εκπομπών που συνδέονται με ανθρώπινες δραστηριότητες, σε επίπεδο προϊόντος (Product Environmental Footprint, PEF) ή οργανισμού (Organisation Environmental Footprint, OEF) (Vanham et al., 2019; Cucek et al., 2015). Η ποσοτικοποίηση αυτή είναι απαραίτητη για την υποστήριξη της βιωσιμότητας στον τομέα παραγωγής, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Silverio et al., 2025). Παράλληλα, επιτρέπει τη σύγκριση των μελετών (Vanham et al., 2019), η οποία συχνά περιορίζεται λόγω έλλειψης ενιαίου, κοινά αποδεκτού ορισμού και τυποποιημένης μεθοδολογίας (Cucek et al., 2015). Εργαλείο αξιολόγησης των επιπτώσεων αυτών, αποτελεί η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) με τη χρήση επιμέρους δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Damiani et al., 2022).

Οι δείκτες EF αφορούν την κατανάλωση φυσικών πόρων, τη ρύπανση και την παραγωγή αποβλήτων (Damiani et al., 2022; Matustik & Koci, 2021). Στις μελέτες χρησιμοποιούνται ευρέως οι δείκτες, αποτύπωμα άνθρακα, υδάτινο και ενεργειακό αποτύπωμα, λόγω των διαθέσιμων δεδομένων και της συσχέτισής τους με τους στόχους βιωσιμότητας (Fang et al., 2016). Το αποτύπωμα άνθρακα (Carbon Footprint), υπολογίζεται κυρίως σε μελέτες παραγωγής τυριών και σχετίζεται με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG emissions) και το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential, GWP), το οποίο αντιστοιχεί στην κατηγορία επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Cucek et al., 2015). Υπάρχουν κι άλλοι δείκτες, όπως ο ευτροφισμός, η οξίνιση και η τοξικότητα, οι οποίοι

χρησιμοποιούνται σπανιότερα σε αγροδιατροφικές μελέτες, λόγω αυξημένων αβεβαιοτήτων και περιορισμένης διαθεσιμότητας αξιόπιστων δεδομένων (Fang et al., 2016). Ο συνδυασμός δεικτών, επιτρέπει πληρέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και λήψη αποφάσεων σε επίπεδο παραγωγικού σχεδιασμού και περιβαλλοντικής πολιτικής (Fang et al., 2016).

Οι στρατηγικές που προτείνονται ευθυγραμμίζονται με περιβαλλοντικές πολιτικές, όπως η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία που προωθεί κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 με μείωση GHG και η στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» με την εναρμόνιση με τα πλαίσια τιμολόγησης άνθρακα (Damiani et al., 2022). Στην περίπτωση ΠΟΠ προϊόντων, οι απαιτήσεις της νομοθεσίας σχετικά με την προέλευση πρώτων υλών και την παραγωγική διαδικασία, περιορίζουν τις επιλογές, επηρεάζοντας άμεσα το ΕΦ (Κανονισμός (ΕΕ) 1151/2012).

2.2 Ο αγροδιατροφικός τομέας και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις

2.2.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωργικής και κτηνοτροφικής παραγωγής

Ο αγροδιατροφικός τομέας, κατά τη γεωργική και κτηνοτροφική παραγωγή προκαλεί περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στις εκπομπές GHG, που περιλαμβάνουν τα αέρια CO₂, CH₄ και N₂O (Rokicki & Fayisa, 2026). Το CH₄, εκπέμπεται κυρίως από την εντερική ζύμωση των μηρυκαστικών και τη διαχείριση της κοπριάς (Fernandez-Amador et al., 2020). Το CO₂ απελευθερώνεται από την κατανάλωση ενέργειας και τη καύση αποβλήτων (Rokicki & Fayisa, 2026). Η κατανάλωση ενέργειας αποδίδεται κυρίως στη χρήση καυσίμων για τη λειτουργία γεωργικών μηχανημάτων, στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις μονάδες εκτροφής, καθώς και στην ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή και τη μεταφορά λιπασμάτων (Ritchie, 2019). Το N₂O απελευθερώνεται από τη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων

και κοπριάς στα εδάφη, τα οποία ρυπαίνουν το έδαφος και τα ύδατα εξαιτίας της συσσώρευσης νιτρικών και φωσφορικών (Fernandez-Amador et al., 2020).

Η κτηνοτροφία αποτελεί έναν από τους τομείς με υψηλότερο αποτύπωμα άνθρακα στο σύστημα τροφίμων, με τις εκπομπές των επιμέρους αερίων να μετατρέπονται και να εκφράζονται σε ισοδύναμα CO₂ με βάση το GWP σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών (Rokicki & Fayisa, 2026). Ενώ, επίσης έχει επιπτώσεις που αφορούν τον ευτροφισμό και την οξίνιση (Ritchie, 2019). Επιπρόσθετη περιβαλλοντική πίεση προκύπτει από την εντατική χρήση γης, όπως η υπερβόσκηση και η αλλαγή χρήσης γης, με τη μετατροπή δασών και λιβαδιών σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις ή βοσκοτόπους, τα οποία απειλούν με απώλεια βιοποικιλότητας (Ritchie, 2019). Ενώ, πίεση ασκεί και η άρδευση των καλλιεργειών τροφίμων για παραγωγή ζωοτροφών και η εκτροφή ζώων, που απαιτούν κατανάλωση υδάτινων πόρων (Ritchie, 2019).

Οι εκπομπές του κτηνοτροφικού τομέα, αφορούν την παραγωγή τροφίμων, όπως κρέας ζώων εκτροφής, αυγά, θαλασσινά, συμπεριλαμβανομένων των γαλακτοκομικών προϊόντων (Ritchie, 2019). Η Ελλάδα ξεχωρίζει για την γεωργική και κτηνοτροφική παραγωγή, ιδίως στην περιφέρεια καθιστώντας την ενδιαφέρον πεδίο μελέτης για τις περιβαλλοντικές της επιπτώσεις και την αντίστροφη επιρροή του αγροδιατροφικού τομέα από την κλιματική αλλαγή (Georgopoulou et al., 2024).

2.2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής μονάδας κατά την επεξεργασία τροφίμων

Στη βιομηχανία το προϊόν που συλλέγεται από το αγρόκτημα επεξεργάζεται για να γίνει τελικό προϊόν, με κατανάλωση πόρων και απελευθέρωση αποβλήτων και εκπομπών. Η κατανάλωση ενέργειας έχει μεγαλύτερο αποτύπωμα άνθρακα, εξαιτίας των θερμικών διεργασιών επεξεργασίας των τροφίμων, της ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των μηχανημάτων και την ψύξη, καθώς και από την καύση ορυκτών καυσίμων για μεταφορά (Finnegan &

Goggins, 2021). Η κατανάλωση ενέργειας δεν είναι ανάλογη του όγκου παραγωγής και αποτελεί κρίσιμο σημείο στις περισσότερες μελέτες γαλακτοκομικών σε επίπεδο βιομηχανίας (Finnegan & Goggins, 2021; Wang, 2013). Η χρήση υδάτινων πόρων γλυκού νερού οφείλεται στους εντατικούς καθαρισμούς CIP (Cleaning in Place), οι οποίοι είναι χαρακτηριστικοί για την παραγωγή τροφίμων, όπως το τυρί (Finnegan & Goggins, 2021) και στην επεξεργασία της πρώτης ύλης (Wang, 2013). Από τους καθαρισμούς προκύπτουν λύματα με υψηλό οργανικό φορτίο, ιδίως όταν απορρίπτονται υποπροϊόντα στο δίκτυο, όπως τυρόγαλα και καθιστά αναγκαία την επεξεργασία λυμάτων (Finnegan & Goggins, 2021). Γενικά, η βιομηχανία παράγει μεγάλες ποσότητες υποπροϊόντων, τα οποία αξιοποιούνται για την παραγωγή άλλων προϊόντων ή για την παραγωγή ενέργειας (Wang, 2013). Επιπλέον, παράγονται μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων, τα οποία με σκοπό τη βιώσιμη διαχείριση αποβλήτων, ανακυκλώνονται (Wang, 2013). Η χρήση συσκευασίας, λόγω των υλικών της, μπορεί να αποθηκεύσει βιογενή άνθρακα, καταναλώνει πόρους και τα απόβλητα που παράγονται μετά τη χρήση της απελευθερώνουν εκπομπές GHG (Finnegan & Goggins, 2021). Τέλος, άλλοι παράγοντες όπως η διαρροή ψυκτικού υγρού και η σπατάλη τροφίμων είναι επίσης σημαντικοί (Wang, 2013).

Η βιομηχανία τείνει να παράγει πολλά προϊόντα με αποτέλεσμα, να μοιράζονται ορισμένα στάδια της διαδικασίας και να έχουν διαφορετικούς ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας, καθιστώντας απαραίτητη τη κατανομή εισροών και εκροών, για κάθε προϊόν (Finnegan & Goggins, 2021).

2.2.3 Στρατηγικές βιώσιμης παραγωγής τροφίμων

Οι στρατηγικές βιώσιμης παραγωγής τροφίμων είναι περίπλοκες, πολυδιάστατες και απαιτούν συνδυαστική εφαρμογή μέτρων. Ενδεικτικά, η χρήση λιπασμάτων είναι αναγκαία εξαιτίας της

αυξανόμενης ζήτησης τροφίμων και οι εκπομπές μεθανίου από τα μηρυκαστικά εντάσσονται στα πλαίσια φυσιολογίας των ζώων αυτών, καθιστώντας αδύνατη την πλήρη εξάλειψή τους (Silverio et al., 2025). Η αντικατάσταση συμβατικών ζωοτροφών με τροφές υψηλής περιεκτικότητας σε σάκχαρα, φαίνεται να επηρεάζει τη ζύμωση και να μειώνει τις εκπομπές μεθανίου (Silverio et al., 2025). Η επιλογή μηδικής μεταξύ ενσίρωσης καλαμποκιού ή χόρτου μειώνει το αποτύπωμα άνθρακα (Laca et al., 2020). Άλλες πρακτικές είναι η διαχείριση της κοπριάς για παραγωγή βιοαερίου (Clairand et al., 2020).

Οι στρατηγικές βιώσιμης παραγωγής τροφίμων στα πλαίσια της βιομηχανίας, αφορούν την αντικατάσταση της ενέργειας με ανανεώσιμες ή χαμηλών εκπομπών άνθρακα τεχνολογίες και επιλογή προμηθευτών πρώτων υλών, που εφαρμόζουν βιώσιμες πρακτικές εκτροφής και διαχείρισης αποβλήτων (Silverio et al., 2025; Clairand et al., 2020). Επιπλέον, αφορούν την αντικατάσταση με νέο εξοπλισμό και ανάκτηση ενέργειας (Soares et al., 2021). Βιώσιμη πρακτική αποτελεί η χρήση ανακυκλωμένου νερού από τα λύματα, όπως συμβαίνει σε πολλές βιομηχανίες τροφίμων παγκοσμίως (Soares et al., 2021). Ενώ, τα καθαριστικά παρόλο που μειώνουν το κόστος και το χρόνο καθαρισμού, αυξάνουν την παραγωγή λυμάτων, καθιστώντας αναγκαίες τις βελτιώσεις στον καθαρισμό του εξοπλισμού, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Milani et al., 2011). Σημαντική είναι η βελτιωμένη διαχείριση των αποβλήτων με αξιοποίηση υποπροϊόντων όπως το τυρόγαλο για παραγωγή ζωοτροφών ή βιοαερίου (Silverio et al., 2025).

Μελέτες δείχνουν ότι ο συνδυασμός διατροφικών παρεμβάσεων και βέλτιστης αποδοτικότητας γεωργοκτηνοτροφικών πρακτικών είναι προτεινόμενη πρακτική (Ritchie, 2019). Η εφαρμογή των πρακτικών είναι απαραίτητη σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων, μέσω συστημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης και πρακτικών μείωσης της σπατάλης τροφίμων, όπως η επεξεργασία, η χρήση ανθεκτικότερων συσκευασιών και η κατάλληλη ψύξη (Ritchie, 2019).

2.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων

2.3.1 Κύριες πηγές ρύπανσης στη γαλακτοβιομηχανία

Η γαλακτοβιομηχανία αποτελεί σημαντικό σημείο μελέτης, καθώς ευθύνεται για το 4% των παγκόσμιων εκπομπών GHG (Kumar et al., 2021) και η ανάλυση LCA εστιάζει στην παραγωγή γάλακτος σε επίπεδο φάρμας και στη βιομηχανική επεξεργασία (Djekic et al., 2014). Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι στο στάδιο παραγωγής νωπού γάλακτος είναι καθοριστικό για τη διαμόρφωση του EF όλων των γαλακτοκομικών προϊόντων (Uctug, 2019) με συνεισφορές από 56% έως και 99%, ανάλογα την κατηγορία (Famiglietti et al., 2019).

Στο στάδιο της βιομηχανίας όλα τα γαλακτοκομικά προϊόντα καταναλώνουν ενέργεια, καθώς το γάλα υποβάλλεται σε παστερίωση, με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας να αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας έως 8% (Wang, 2013), με την επιλογή καυσίμου να είναι ιδιαίτερα καθοριστική (Uctug, 2019). Τα προϊόντα που προκύπτουν είναι ευπαθή, συντηρούνται σε ψύξη, ενώ τα τυριά υποβάλλονται σε ωρίμανση (Djekic et al., 2014). Οι εκπομπές έχουν ανάλογη σχέση με την κατανάλωση πόρων, ανάλογα με τη μέθοδο επεξεργασίας (Silverio et al., 2025; Uctug, 2019). Η γαλακτοβιομηχανία παράγει 4-11 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων, που ισοδυναμεί με 1 έως 3 φορές με τον όγκο του επεξεργασμένου γάλακτος (Ahmad et al., 2019; Boehm et al., 2018).

2.3.2 Μελέτες περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων γαλακτοκομικών προϊόντων

Μελετώντας στο σύνολο τα γαλακτοκομικά προϊόντα, το επεξεργασμένο γάλα και το γιαούρτι χαρακτηρίζονται με τις λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Uctug, 2019). Η παραγωγή γιαουρτιού απαιτεί παρόμοια ποσότητα νωπού γάλακτος με την παραγωγή επεξεργασμένου γάλακτος, ενώ η παραγωγή τυριού απαιτεί σχεδόν τετραπλάσια ποσότητα (Uctug, 2019). Η

παραγωγή τυριού περιλαμβάνει στάδια με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, ιδιαίτερα κατά την επεξεργασία και ωρίμανση (Silverio et al., 2025). Στη βιβλιογραφία παρατηρούνται διαφορές ως προς τις εκπομπές, ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας, τον τύπο τυριού, το τεχνολογικό επίπεδο επεξεργασίας, και τα όρια του LCA (Silverio et al., 2025). Παράγοντες όπως το είδος του γάλακτος, αγελαδινό, πρόβειο, κατσικίσιο ή βουβαλίσιο, το σύστημα εκτροφής και η απόδοση σε τυρί είναι καθοριστικοί (Soares et al., 2021). Τα πρόβεια τυριά παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές εκπομπών λόγω του μεγαλύτερου περιβαλλοντικού κόστους του πρόβειου γάλακτος συγκριτικά με το αγελαδινό (Canellada et al., 2018). Συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στη σύνθεση του τυριού, καθώς τυριά με υψηλότερη περιεκτικότητα σε λίπος και ξηρά ουσία παρουσιάζουν αυξημένες εκπομπές CO₂ eq (Canellada et al., 2018). Η μικρότερη απόδοση συνεπάγεται υψηλότερο αποτύπωμα (Egas et al., 2020). Η γεωγραφική περιοχή και η κλίμακα παραγωγής επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό το αποτύπωμα, με τις βιομηχανίες μικρής κλίμακας να έχουν ελαφρώς υψηλότερο αποτύπωμα ανά μονάδα προϊόντος (Canellada et al., 2018). Οι αξιολογήσεις αποκλειστικά σε επίπεδο βιομηχανίας έχουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το στάδιο παραγωγής γάλακτος (Silverio et al., 2025).

Άλλα γαλακτοκομικά προϊόντα, όπως το βούτυρο απαιτούν 20 φορές περισσότερο γάλα από το γιαούρτι (Uctug, 2019). Ενώ, προϊόντα όπως το συμπυκνωμένο γάλα ή το γάλα σε σκόνη απαιτούν έντονο θερμικό χειρισμό (Uctug, 2019). Συνολικά, η βιβλιογραφία συγκλίνει ότι το EF κατατάσσεται κατά αύξουσα σειρά από το γάλα σε γιαούρτι, τυρί, βούτυρο, συμπυκνωμένο γάλα ή το γάλα σε σκόνη (Uctug, 2019; Egas et al., 2020; Silverio et al., 2025).

2.3.3 Μελέτες περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής τυριού σε διαφορετικές συνθήκες

Οι μελέτες για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος εξετάζουν διαφορετικούς τύπους τυριών, όπως φρέσκα, ωρίμανσης, ημίσκληρα από αγελαδινό και γίδινο και πρόβειο γάλα (Finnegan et al., 2017). Από αυτές παρατηρείται ότι το φρέσκο τυρί έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τα ημίσκληρα τυριά (Finnegan et al., 2017). Στη βιβλιογραφία γίνεται σύγκριση του αποτυπώματος της παραγωγής τυριού από διαφορετικά είδη ζώων, όπως γάλα από αγελάδες Jersey και Holstein, με τη δεύτερη να κυριαρχεί για τυρί τύπου cheddar (Kristensen et al., 2015). Ακόμα, γίνεται σύγκριση ως προς την πρώτη ύλη, συγκεκριμένα της παραγωγής από φρέσκο γάλα ή από τυρόπηγμα με χαμηλότερη υγρασία σε τυρί τύπου μοτσαρέλας, με τη μοτσαρέλα υψηλότερης υγρασίας να είναι πιο βιώσιμη (Riva et al., 2014). Μεταξύ των γαλακτοκομικών προϊόντων η παραγωγή από αγελαδινό γάλα κυριαρχεί με το 85% της συνολικής παγκόσμιας προσφοράς γάλακτος προέρχεται από βοοειδή, με το γίδινο και πρόβειο γάλα να εξετάζεται κυρίως για την παραγωγή σε μικρότερη κλίμακα (Soares et al., 2021). Ακόμα, υπάρχουν μελέτες που εστιάζουν σε ΠΟΠ τυριά, όπως το Grana Padano στην Ιταλία (Bava et al., 2018) και το τυρί Minas στην Βραζιλία (Nigri et al., 2014). Οι χώρες μελέτης είναι οι ΗΠΑ και κυρίως ο Καναδάς και η Βραζιλία, ενώ στην Ευρώπη υπάρχουν μελέτες στην Κεντρική Ευρώπη με τις περισσότερες να χωροθετούνται στη Μεσόγειο και συγκεκριμένα στην Ιταλία, Ισπανία και Πορτογαλία (Canellada et al., 2018). Στην Ελλάδα οι μελέτες είναι πολύ περιορισμένες με τη βιβλιογραφία να εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής γίδινου και πρόβειου γάλακτος, με έμμεση σύνδεση με την φέτα που αποτελεί ΠΟΠ γίδινου και πρόβειου γάλακτος (Laliotis & Bizelis, 2025). Επίσης, υπάρχει η μελέτη με δεδομένα από 8 αγροκτήματα ενός συνεταιρισμού (Feon et al., 2023).

Οι μελέτες στη νότια Ευρώπη αφορούν κυρίως μικρά τυροκομεία και έχουν ως στόχο των εντοπισμό κρίσιμων σημείων στον κύκλο ζωής και σχεδιασμό βιώσιμων στρατηγικών. Ειδικότερα, σε επίπεδο βιομηχανίας, αποδεικνύουν ότι η ανακύκλωση και η χρήση ορού γάλακτος ως ζωοτροφή μειώνει τις επιπτώσεις (Canellada et al., 2018; Palmieri et al., 2017).

Η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε λιπαρά στο τυρί συνεπάγεται χαμηλότερες επιπτώσεις σε έξι κατηγορίες που επιβαρύνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Santos Jr. et al., 2017). Ενώ, υπάρχουν και μελέτες σύγκρισης που δείχνουν ότι μεταξύ διαφορετικών συστημάτων παραγωγής τυριού από πρόβριο γάλα, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές (Vagnoni et al., 2017).

2.4 Η παραγωγή τυριού: τεχνολογική και περιβαλλοντική διάσταση

2.4.1 Η παραγωγή τυριού και οι κύριες διεργασίες

Η παραγωγή τυριού χωρίζεται σε τεχνολογικά στάδια ανάλογα με το είδος τυριού που παρασκευάζεται και περιλαμβάνει μια σειρά διεργασιών που συνδέονται με εισροές και εκροές.

Κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή τυριού είναι το γάλα, η ποιότητα του οποίου επηρεάζεται από τη φυλή, το σύστημα εκτροφής και τη διατροφή (Sachan & Karnwal, 2022). Το γάλα παράγεται σε φάρμες, αποθηκεύεται υπό ελεγχόμενες συνθήκες ψύξης, συλλέγεται και μεταφέρεται στο τυροκομείο με ειδικά οχήματα ψύξης (Sachan & Karnwal, 2022). Στο τυροκομείο το γάλα διηθείται και διατηρείται σε δεξαμενή σε συνθήκες ψύξης. Η παστερίωση του γάλακτος γίνεται συνήθως σε εναλλάκτη θερμότητας πλάκας (Soares et al., 2021) και στη συνέχεια το παστεριωμένο γάλα ψύχεται, προστίθενται καλλιέργειες εκκίνησης και CaCl_2 (Mazaheri et al., 2021; Sachan & Karnwal, 2022). Το πήγμα κόβεται με ήπια θέρμανση, υποβάλλεται σε στράγγιση χωρίς πίεση, ακολουθεί αλάτιση και ωρίμανση (Sachan & Karnwal, 2022). Η συσκευασία γίνεται σε ξύλινα βαρέλια, μεταλλικά δοχεία ή πλαστικούς περιέκτες με άλμη με θερμοκρασία συντήρησης (Drosinos & Siana, 2001; Koukaliaroglou et al., 2009). Οι τεχνολογικές αυτές διεργασίες είναι κοινές για την παραγωγή τυριού τύπου φέτας και κατσικίσιου τυριού.

Η φέτα αποτελεί παραδοσιακό ελληνικό, λευκό τυρί άλμης, αναγνωρισμένο ως προϊόν Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ). Κύρια πρώτη ύλη αποτελεί το πρόβειο γάλα ή μίγμα πρόβειου και γίδινου γάλακτος, σε ποσοστό έως 30%. Το γάλα προέρχεται από συγκεκριμένες περιοχές της Ελλάδας, όπως Μακεδονία, Θράκη, Ήπειρος, Θεσσαλία, Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησος και Λέσβος (Anifantakis, 1991; Koukaliaroglou et al., 2009). Η ωρίμανση περιλαμβάνει διατήρηση του τυριού για 15 ημέρες σε θερμοκρασία έως 18 °C και ψύξη για τουλάχιστον 45 ημέρες σε άλμη, για σταθεροποίηση δομής και ανάπτυξη οργανοληπτικών χαρακτηριστικών αντίστοιχα (Sachan & Karnwal, 2022; Drosinos & Siana, 2001). Για την παραγωγή κατσικίσιου τυριού, κύρια διαφοροποίηση αποτελεί η σύσταση της πρώτης ύλης, η οποία επηρεάζει την απόδοση σε τυρί και την ποσότητα παραγόμενου τυρογάλακτος (Cabral et al., 2020).

Το κεφαλοτύρι παράγεται από πρόβειο ή μίγμα πρόβειου γίδινου γάλακτος με θέρμανση, μηχανική πίεση σε καλούπια και ωρίμανση που αντιστοιχεί τουλάχιστον σε 3 μήνες με υψηλή σχετική υγρασία (Pappa & Kondyli, 2025). Τα τυριά τυρογάλακτος, όπως μανούρι, μυζήθρα και ανθότυρο προκύπτουν από θέρμανση τυρογάλακτος, ύστερα από φυγοκέντρωση, στράγγιση χωρίς πίεση και χωρίς ωρίμανση, ενώ μεταφέρονται σε ψυκτικούς θαλάμους (Κώδικας Τροφίμων, Άρθρο 83, 2014). Τα τυριά αυτά συσκευάζονται σε πλαστικές συσκευασίες από πολυπροπυλένιο (PP) και πολυαιθυλένιο (PE), πλαστικές μεμβράνες ή συσκευασίες vacuum (Spreafico & Russo, 2021).

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκύπτει από την παραγωγή τυριού διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο τυριού (Silverio et al., 2025). Ενδεικτικά, τα τυριά τυρογάλακτος παρουσιάζουν διαφορετικό περιβαλλοντικό προφίλ, καθώς αξιοποιούν το τυρόγαλα ως κύρια πρώτη ύλη (Uctug, 2019). Παρότι απαιτούν θερμική ενέργεια για τη θέρμανση του τυρογάλακτος, δεν περιλαμβάνουν στάδιο ωρίμανσης (Walstra et al., 2005). Το κεφαλοτύρι, λόγω της μηχανικής πίεσης και της μεγαλύτερης διάρκειας ωρίμανσης, εμφανίζει αυξημένες

ενεργειακές απαιτήσεις, κυρίως λόγω της παρατεταμένης συντήρησης σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας (Silverio et al., 2025).

2.4.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τυριού

Για την παραγωγή τυριού, η παραγωγή γάλακτος συμβάλλει κατά 75–99% στις συνολικές εκπομπές CO₂ (Sachan & Karnwal, 2022). Εξετάζοντας το στάδιο της βιομηχανίας, οι εισροές αφορούν κυρίως πρώτες ύλες, ενέργεια, νερό και συσκευασίες και οι εκροές στερεά απόβλητα, υγρά και υποπροϊόντα (Sachan & Karnwal, 2022; Gonzalez-Garcia et al., 2013).

2.4.2.1 Κατανάλωση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αφορά ηλεκτρική, θερμική και ενέργεια για μεταφορές. Η ηλεκτρική ενέργεια αφορά τη λειτουργία των μηχανημάτων, της ψύξης, του φωτισμού και του εξαερισμού και κυμαίνεται από 0,2 έως 5,1 GJ t⁻¹ προϊόντος, με σημαντικές διακυμάνσεις (Soares et al., 2021; Gonzalez-Garcia et al., 2013). Τα συστήματα ψύξης καταναλώνουν σχεδόν το ήμισυ της ηλεκτρικής ενέργειας (Sachan & Karnwal, 2022). Η θερμική ενέργεια καταναλώνεται σε μεγαλύτερο μέρος σε επίπεδο εργοστασίου, από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ατμού και ζεστού νερού για διαδικασίες θέρμανσης, όπως η παστερίωση και για διαδικασίες καθαρισμού (Gonzalez-Garcia et al., 2013). Συγκεκριμένα, κατά την παστερίωση το γάλα θερμαίνεται με χρήση ενέργειας μέσω λέβητα που τροφοδοτείται από πετρέλαιο θέρμανσης (Gonzalez-Garcia et al., 2013). Οι εκπομπές είναι ανάλογες του καυσίμου, της κατάστασης των μηχανημάτων, της απόδοσης και των ελέγχων συντήρησης (Soares et al., 2021).

Μεταξύ των μελετών διαφορές ως προς την περιβαλλοντική επιβάρυνση προκύπτουν ανάλογα με την κλίμακα παραγωγής και τον βαθμό αυτοματισμού (Gonzalez-Garcia et al., 2013). Η

μικρή κλίμακα παραγωγής δεν είναι πάντα πιο φιλική προς το περιβάλλον, λόγω υψηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων, καθώς ο εξοπλισμός πρέπει να καθαρίζεται και να τίθεται σε λειτουργία ανεξάρτητα από τον όγκο (Gonzalez-Garcia et al., 2013). Περίπου 4 φορές μεγαλύτερη επίδραση των GHG συσχετίστηκε με τις μικρές μονάδες σε σύγκριση με τις μεγάλες μονάδες, εκ των οποίων η πλειοψηφία θα μπορούσε να αποδοθεί στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (Milani et al., 2011).

Οι μεταφορές παράγουν εκπομπές GHG κατά τη μεταφορά νοπού γάλακτος και τη διανομή τυριού, ανάλογες της απόστασης μεταφοράς, του καυσίμου και του φορτίου (Soares et al., 2021).

2.4.2.2 Κατανάλωση νερού

Η βιομηχανία τροφίμων καταναλώνει νερό μεταξύ 1,2 και 3,21 λίτρων νερού ανά λίτρο γάλακτος. Ο όγκος νερού που καταναλώνεται από τις βιομηχανίες ποικίλλει ανάλογα με τις εγκαταστάσεις, το επίπεδο τεχνολογίας, το σύστημα καθαρισμού και τη διαχείρισή του. Ο μεγαλύτερος όγκος νερού απαιτείται για δευτερεύουσες λειτουργίες, όπως ο καθαρισμός, το πλύσιμο, η απολύμανση και η ψύξη. Η χρήση του σχετίζεται με την παραγωγή τροφίμων και τη διασφάλιση συνθηκών υγιεινής. Πηγές άντλησης είναι τα υπόγεια και επιφανειακά νερά, από ποτάμια και λίμνες, η δημόσια παροχή και το ανακυκλωμένο νερό. (Soares et al., 2021)

2.4.2.3 Καθαριστικά

Τα απορρυπαντικά και απολυμαντικά προϊόντα χρησιμοποιούνται για δευτερεύουσες διαδικασίες στην παραγωγή τυριού, όπως απολύμανση και καθαρισμό. Περισσότερο χρησιμοποιείται το υδροξείδιο του νατρίου και το νιτρικό οξύ, ενώ λιγότερο το υποχλωριώδες νάτριο και το υδροξείδιο του καλίου. Στη βιβλιογραφία δεν είναι πάντα διαθέσιμες οι

συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται. (Soares et al., 2021) Σύμφωνα με τους Soares et al., 2021 δεν υπάρχει διαφορά στις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο τυρί λόγω της χρήσης διαφορετικών προϊόντων καθαρισμού στο γαλακτοκομείο, ωστόσο ο καθαρισμός με υδροξείδιο του νατρίου είναι κύρια αιτία συγκεκριμένων επιπτώσεων (Soares et al., 2021).

2.4.2.4 Παραγωγή λυμάτων

Οι καθαρισμοί των συστημάτων παραγωγής απαιτούν μεγάλο όγκο νερού και καθαριστικών, οδηγώντας σε σημαντικό όγκο λυμάτων και λάσπης, όταν υποβάλλονται σε βιολογική επεξεργασία λυμάτων. Τα λύματα γαλακτοκομικών προϊόντων έχουν υψηλό οργανικό φορτίο και θρεπτική σύνθεση, καθώς περιλαμβάνουν ορό γάλακτος. Οι βιομηχανίες μεγάλης κλίμακας διαθέτουν συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, ενώ στις μικρές γαλακτοβιομηχανίες υπάρχουν λειτουργικοί και οικονομικοί περιορισμοί. Σε μικρή κλίμακα, τα λύματα απορρίπτονται συχνά, απευθείας στην αποχέτευση και τελικά στη δημοτική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, ενώ χρησιμοποιούνται και λάκκοι για μείωση των εκπομπών. (Soares et al., 2021)

2.4.2.5 Παραγωγή στερεών αποβλήτων

Από τη βιομηχανία προκύπτουν οργανικά και μη στερεά απόβλητα από τη συσκευασία, τους ελέγχους και τις επιστροφές. Τα υλικά συσκευασίας συνήθως είναι πλαστικά, μέταλλα, χαρτόνια, ξύλα και χαρτιά, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν ή να χρησιμοποιηθούν σε νέες οικολογικά βιώσιμες συσκευασίες. Τα απόβλητα από τους ελέγχους είναι συνήθως σύριγγες και δοχεία, τα οποία αποστέλλονται σε μονάδες αποτέφρωσης, για να αποφευχθεί μόλυνση. Τα απούλητα προϊόντα εξαιτίας του τέλους του κύκλου ζωής τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση ενέργειας ή ως ζωοτροφές. (Soares et al., 2021)

2.4.2.6 Υποπροϊόντα

Υποπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής τυριού αποτελεί το τυρόγαλα. Το τυρόγαλα έχει πολλαπλές εφαρμογές στις βιομηχανίες ζωοτροφών και τροφίμων. Σε μικρές μονάδες ο ορός γάλακτος επεξεργάζεται εκτός των εγκαταστάσεων, ενώ σε μεγάλες βιομηχανίες μετατρέπεται σε σκόνη ορού γάλακτος και επεξεργάζεται περαιτέρω συνήθως για παραγωγή ζωοτροφών και τροφίμων. (Gonzalez-Garcia et al., 2013)

2.5 Μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος

2.5.1 Θεωρητικό πλαίσιο της Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

Η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τυριού γίνεται με Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), μέσω καταγραφής εισροών και εκροών σε κάθε στάδιο (Arzoumanidis et al., 2017). Ακολουθεί τα διεθνή πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006 (ISO, 2006a; ISO, 2006b), που καθορίζουν το θεωρητικό πλαίσιο, τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες οδηγίες εφαρμογής (Guinee, 2002). Ενώ, επιτρέπει τη διαχείριση της περιβαλλοντικής πίεσης χωρίς μετατόπιση επιπτώσεων μεταξύ σταδίων ή κατηγοριών (Guinee, 2002). Η LCA περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις τον ορισμό στόχου και πεδίου εφαρμογής, την ανάλυση απογραφής κύκλου ζωής (LCI), την εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (LCIA) και την ερμηνεία αποτελεσμάτων (Baumann & Tillman, 2004).

Ο ορισμός του στόχου, στις μελέτες παραγωγής τυριού αφορά κυρίως τη βελτιστοποίηση διεργασιών, τη συμμόρφωση με κανονισμούς ή τη συγκριτική αξιολόγηση προϊόντων (Finnegan, Goggins et 2021; Baumann & Tillman, 2004). Το πεδίο εφαρμογής, το οποίο αφορά τα όρια του συστήματος, συχνά είναι από τη «φάρμα έως την πύλη» (cradle to gate) (Canellada et al., 2018). Η προσέγγιση αυτή οριοθετείται από το αρχικό στάδιο παραγωγής έως το στάδιο

εξόδου από τη μονάδα παραγωγής, χωρίς την χρήση και την τελική διάθεση (Baumann & Tillman, 2004). Άλλες μελέτες έχουν όρια από το «φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης», που οριοθετούνται έως τη μεταφορά του τελικού προϊόντος στα καταστήματα λιανικής πώλησης (Canellada et al., 2018; Baumann & Tillman, 2004). Ωστόσο, περιορισμένες είναι οι μελέτες από το «φάρμα έως την τελική διάθεση» (cradle to grave), από την «πύλη έως την πύλη» ή από την «φάρμα έως τη φάρμα», λόγω δυσκολίας στη συγκέντρωση δεδομένων (Baumann & Tillman, 2004).

Η LCI περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη χρήση φυσικών πόρων και τις εκπομπές στο περιβάλλον. Στην περίπτωση του τυριού περιλαμβάνει συλλογή και ποσοτικοποίηση όλων των εισροών, γάλα, αλάτι, ενέργεια, νερό, υλικά συσκευασίας και εκροών τυρί, υποπροϊόντα, εκπομπές, υγρά και στερεά απόβλητα εντός των ορίων του συστήματος. Όταν η συλλογή πρωτογενών δεδομένων είναι δύσκολη ή δαπανηρή, η φάση αυτή συχνά ενισχύεται με τη χρήση βάσεων δεδομένων LCA όπως το Ecoinvent. Επίσης, καθορίζονται παραδοχές και περιορισμοί, όπως η έλλειψη πρωτογενών δεδομένων, γεωγραφικοί περιορισμοί, χρόνος και οι δείκτες που θα μελετηθούν. (Hauschild et al., 2017)

Η LCIA αξιολογεί τα αποτελέσματα της LCA με μετατροπή των εισροών και εκροών του συστήματος σε δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων, με τις επιπτώσεις να ομαδοποιούνται κυρίως σε πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη υγεία και στην εξάντληση φυσικών πόρων (Soares et al., 2021). Οι μέθοδοι LCIA μπορεί να εξετάζουν είτε μία μόνο κατηγορία, είτε πολλαπλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, παρέχοντας σχετικές συγκρίσεις πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Soares et al., 2021). Μελέτες όπως αυτή του Canellada et al., 2018 καλύπτει διαφορετικούς δείκτες ομαδοποιημένους σε πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Canellada et al., 2018).

Τέλος, η ερμηνεία αποτελεσμάτων παρέχει τα συμπεράσματα, τις προτάσεις και υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων σύμφωνα με το στόχο της μελέτης και το πεδίο εφαρμογής (Soares et al., 2021). Αναλυτικότερα, η φάση αυτή περιλαμβάνει τον εντοπισμό των σημείων με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση και ακολουθεί η πρόταση για μείωση επιπτώσεων (Curran, 2014). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα πρέπει να αναπαράγονται (Calderon et al., 2010).

2.5.2 Λογισμικά και εργαλεία υπολογισμού της LCA

Η αποτύπωση όλων των εισροών και εκροών ενός συστήματος, αντιστοιχεί σε μεγάλο όγκο δεδομένων, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών. Η επιλογή λογισμικού επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα της LCA, καθώς τα λογισμικά διαφοροποιούνται ως προς τη λειτουργικότητα, τη διαθεσιμότητα βάσεων δεδομένων, τη διεπαφή χρήστη και τις αρχές μοντελοποίησης (Silva et al., 2019). Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά σε μελέτες LCA τυριών είναι τα SimaPro και GaBi, ενώ το openLCA χρησιμοποιείται σταδιακά περισσότερο (Silva et al., 2019).

Το openLCA είναι δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα, συμβατό με εκτεταμένες διεθνείς βάσεις δεδομένων, όπως η Ecoinvent (Steubing et al., 2016). Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του openLCA (GreenDelta GmbH, 2026), ορίζονται οι βασικές ροές (flows) για την περιγραφή του συστήματος, ο κατάλληλος τύπος και η μονάδα μέτρησης, ώστε να διασφαλιστεί η συνέπεια στους υπολογισμούς. Ακολουθεί η δημιουργία των επιμέρους διεργασιών (processes), ορίζεται η κύρια διεργασία. Τέλος, δημιουργείται ένα product system με αναφορά στο τελικό προϊόν, το οποίο επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτύπωση των ροών και τον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών που αντιστοιχούν στη λειτουργική μονάδα της μελέτης. (GreenDelta GmbH, 2026)

Στην περίπτωση που υπάρχει πρόσβαση σε βάση δεδομένων, τα πρωτογενή δεδομένα εισάγονται στο λογισμικό ως ποσοτικά δεδομένα εισροών και εκροών στις αντίστοιχες διεργασίες και οι εκπομπές υπολογίζονται αυτόματα (GreenDelta GmbH, 2026). Ωστόσο, αν δεν υπάρχει πρόσβαση σε βάση δεδομένων, οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με διεθνώς αναγνωρισμένα πρωτόκολλα, όπου ο υπολογισμός του αποτυπώματος άνθρακα μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του πολλαπλασιασμού των δεδομένων δραστηριότητας με αντίστοιχους συντελεστές εκπομπών (IPCC, 2006). Στην περίπτωση αυτή το openLCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκέντρωση, την οργάνωση και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων (GreenDelta GmbH, 2026).

Οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν βάση δεδομένων και συγκεκριμένα την Ecoinvent, λόγω του εκταταμένου γεωγραφικού και θεματικού εύρους, της συνεχούς ενημέρωσής της και της ικανότητας αντικατάστασης παγκόσμιων δεδομένων με τοπικά (Steubing et al., 2016; Wernet et al., 2016). Η LCIA μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο επίπεδα, σε επίπεδα μεσαίου σημείου (midpoint) ή τελικού σημείου (endpoint). Οι δείκτες midpoint επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες δείκτες με τη μέθοδο ReCiPe Midpoint (H) V1.12, να παρέχει 18 δείκτες επιπτώσεων, ενώ οι δείκτες endpoint σε επιπτώσεις σε επίπεδο ανθρώπινης υγείας, περιβάλλοντος και πόρων, έχοντας μεγαλύτερη αβεβαιότητα (Canellada et al., 2018). Η προοπτική ιεραρχική (H) είναι πιο κοινή, ενώ άλλες είναι η ατομικιστική (I) και η ισότιμη (E). Η ReCiPe μετατρέπει εκπομπές και εκροές σε αριθμητικές βαθμολογίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. (Canellada et al., 2018)

2.5.3 Μεθοδολογικές παράμετροι συγκρισιμότητας μελετών αποτυπώματος άνθρακα

Στη βιβλιογραφία οι μελέτες LCA της παραγωγής τυριού εξετάζουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Canellada et al., 2018). Μεταξύ αυτών, υπάρχουν μελέτες που εστιάζουν

αποκλειστικά στο δείκτη αποτυπώματος άνθρακα, καθώς στόχος είναι η αποτίμηση της επίδρασης της παραγωγής τυριού στην κλιματική αλλαγή (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Για το λόγο αυτό οι εκπομπές GHG που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μετατρέπονται, μέσω της εφαρμογής του GWP σε ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq) (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Στις περισσότερες μελέτες, ο χρονικός ορίζοντας αναφοράς είναι τα 100 έτη (GWP100), γεγονός που επιτρέπει την έκφραση των αποτελεσμάτων σε κοινή μονάδα μέτρησης και τη συγκρισιμότητα μεταξύ διαφορετικών μελετών (Djekic et al., 2014; Flysjo et al., 2014; Finnegan et al., 2018).

Ωστόσο, για την συγκρισιμότητα των μελετών αποτυπώματος άνθρακα απαιτείται σαφής ορισμός κι άλλων κρίσιμων μεθοδολογικών παραμέτρων. Αρχικά, ορισμός λειτουργικής μονάδας, η οποία συνήθως είναι 1 kg τυριού στην πύλη ή 1 kg πρωτεΐνης/ξηράς ουσίας (Flysjo et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Η επιλογή της λειτουργικής μονάδας του 1 kg τυριού, επιτρέπει την κανονικοποίηση των δεδομένων, την ερμηνεία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανά μονάδα προϊόντος και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Οι μελέτες πρέπει να έχουν κοινά όρια συστήματος και κανόνες κατανομής, καθώς η μέτρηση του τυρογάλακτος είναι καθοριστική (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Επίσης, οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κοινές, καθώς διαφορές ως προς τη γεωγραφική προέλευση των συντελεστών είναι καθοριστικές (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018).

2.5.4 Ερευνητικό κενό και μελλοντικές προκλήσεις στην εφαρμογή της LCA για παραγωγή τυριού σε μικρές μονάδες

Δεν υπάρχουν πολλές δημοσιευμένες εργασίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής τυριού μικρής βιομηχανικής κλίμακας και μελέτες σύγκρισης της παραγωγής με

μεγάλη κλίμακας (Canellada et al., 2018). Στη μελέτη των Nigri et al. (2014), η παραγωγή μικρής κλίμακας είχε λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ στη μελέτη των Vagnoni et al. (2017) η κλίμακα δεν έχει καμία επίδραση στις εκπομπές GHG (Nigri et al., 2014; Vagnoni et al., 2017). Η παραγωγή μεγάλης κλίμακας υποστηρίζεται ότι εξοικονομεί πόρους, ενώ η παραγωγή σε μικρότερη κλίμακα, απαιτεί λιγότερη ενέργεια, εξαιτίας του μειωμένου αυτοματισμού (Canellada et al., 2018). Σύμφωνα με τους Santos Jr. et al., 2017, οι μικρές και μεσαίες βιομηχανίες έχουν αυξημένο μερίδιο αγοράς (Santos Jr. et al., 2017), με το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής γάλακτος να επεξεργάζεται σε επιμέρους μικρές μονάδες, ενώ ο χαρακτηρισμό μικρές να είναι ανάλογος του όγκου επεξεργασίας (Ghinea et al., 2023; Santos Jr. et al., 2017). Όλα τα παραπάνω, τονίζουν την ανάγκη για περαιτέρω ανάλυση σε διαφορετικές κλίμακες (Canellada et al., 2018).

Στη διεθνή βιβλιογραφία ερευνητικό κενό αποτελεί η κατανομή τυρογάλακτος, με τις μελέτες να χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους κατανομής, όπως οικονομική, χωρίς να αιτιολογούν πώς αλλάζουν τα αποτελέσματα. Στις μελέτες για παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα η κατανάλωση ενέργειας αφορά κυρίως συνεχή λειτουργία, με αποτέλεσμα να υπάρχει κενό για την κατανάλωση ενέργειας σε μικρή κλίμακα ασυνεχούς λειτουργίας με παραγωγή που κυμαίνεται ανάλογα με την εποχή του έτους (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη και ωρίμανση ποικίλει ανάλογα με το τυρί και το τεχνολογικό στάδιο παραγωγής και δεν ισχύουν για φρέσκα τυριά (Finnegan et al., 2018; Kim et al., 2013). Η διαχείριση λυμάτων και ορού γάλακτος ποικίλλει μεταξύ των μελετών, ενώ δεν υπάρχουν μελέτες που να αντικατοπτρίζουν την ελληνική πραγματικότητα (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018).

Οι μελέτες LCA που αφορούν την βόρεια Ευρώπη, βασίζονται σε αγελαδινό γάλα και συχνά χρησιμοποιούν δευτερογενή δεδομένα (Flysjo et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Έχουν γίνει ορισμένες μελέτες στη Μεσόγειο για την παραγωγή ΠΟΠ προϊόντων των αντίστοιχων χωρών

με χρήση πρόβειου γάλακτος (Bava et al., 2018; Riva et al., 2016). Ωστόσο είναι σημαντικά περιορισμένες οι μελέτες για την παραγωγή τυριών από γίδινο και πρόβειο γάλα, την παραγωγή σε μικρή κλίμακα στην Ελλάδα και την παραγωγή ΠΟΠ προϊόντων, όπως η φέτα και το μανούρι, κυρίως λόγω έλλειψης πρωτογενών δεδομένων. Χαρακτηριστικό σημείο αποτελεί ο ίδιος ο χαρακτηρισμός ΠΟΠ ο οποίος θέτει προϋποθέσεις ανυπέρβλητες για την παραγωγή των συγκεκριμένων προϊόντων και την ανάγκη για εντοπισμό κρίσιμων σημείων που θα μειώσουν την περιβαλλοντική πίεση διασφαλίζοντας τον χαρακτήρα του προϊόντος.

Παρά την ύπαρξη διεθνών μελετών και μελετών στα πλαίσια της Μεσογείου, παρατηρείται περιορισμένη έρευνα σε μικρής κλίμακας μονάδες φέτας στην Ελλάδα με χρήση πρωτογενών δεδομένων.

2.6 Σκοπός και στόχοι της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής τυριού ενός τυροκομείου μικρής κλίμακας στην Ελλάδα, με εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα και με την εφαρμογή βασικών μεθοδολογικών στοιχείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA).

Ειδικότερα, οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι η εκτίμηση και η σύγκριση του αποτυπώματος άνθρακα μεταξύ πρωτογενούς παραγωγής γάλακτος και βιομηχανικής παραγωγής τυριού. Επίσης, στόχος είναι ο εντοπισμός των κρίσιμων σημείων στο στάδιο της βιομηχανικής παραγωγής, ώστε να διατυπωθούν πιθανές προτάσεις μετριασμού των εκπομπών και μελλοντικής έρευνας. Τέλος, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην κάλυψη μέρους του ερευνητικού κενού που αφορά την παραγωγή τυριού από γίδινο και πρόβειο γάλα, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται ΠΟΠ προϊόντα, όπως η φέτα και το μανούρι, σε τυροκομείο μικρής κλίμακας στην Ελλάδα.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο – Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

Η μελέτη βασίζεται στην εφαρμογή βασικών μεθοδολογικών στοιχείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, και περιλαμβάνει τις φάσεις, τον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, την απογραφή κύκλου ζωής, την αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ερμηνεία αποτελεσμάτων. Η εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του IPCC και το GHG Protocol (IPCC, 2006), με υπολογισμό των εκπομπών ως γινόμενο των δεδομένων δραστηριότητας και των συντελεστών εκπομπών, ενώ η μετατροπή των επιμέρους αερίων του θερμοκηπίου σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq) έγινε με την εφαρμογή των συντελεστών Δυναμικού Υπερθέρμανσης του Πλανήτη για χρονικό ορίζοντα 100 ετών (GWP100).

3.2 Ορισμός λειτουργικής μονάδας και ορίων συστήματος

3.2.1 Ορισμός λειτουργικής μονάδας

Στην παρούσα μελέτη, ως λειτουργική μονάδα ορίστηκε το 1 kg συσκευασμένου τυριού, που παράγεται από τη βιομηχανία μελέτης κατά το έτος αναφοράς 2024. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας ο όρος «τυρί» περιλαμβάνει το σύνολο των επιμέρους τύπων τυριού που παράγονται από γίδινο και πρόβειο γάλα. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, τα επιμέρους προϊόντα αντιμετωπίστηκαν ως ενιαίο προϊόν. Η επιλογή αυτή υπαγορεύτηκε από τη διαθεσιμότητα των πρωτογενών δεδομένων, τα οποία καταγράφονται σε επίπεδο συνολικής λειτουργίας της μονάδας και δεν επιμερίζονται ανά κατηγορία προϊόντος. Η επιλογή του 1 kg τυριού ως λειτουργική μονάδα, επιτρέπει την κανονικοποίηση των δεδομένων, ώστε να εκτιμηθούν οι

περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μονάδα προϊόντος και να συγκριθούν με αντίστοιχες μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας.

3.2.2 Ορισμός και περιγραφή ορίων συστήματος

Στην παρούσα μελέτη, τα όρια συστήματος ορίστηκαν «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης» (cradle to retail stores), περιλαμβάνοντας όλα τα στάδια από την παραγωγή γάλακτος έως τη μεταφορά του τυριού στα καταστήματα λιανικής πώλησης.

Στάδια εντός ορίων συστήματος:

- Παραγωγή πρόβειου και γίδινου γάλακτος σε επίπεδο φάρμας.
- Μεταφορά του γάλακτος από τη φάρμα στο τυροκομείο.
- Τυροκόμηση σε επίπεδο βιομηχανίας με κατανάλωση ενέργειας για τη συνολική λειτουργία του τυροκομείου, του λέβητα και κατανάλωση νερού.
- Συσκευασία τυριού με τα αντίστοιχα υλικά συσκευασίας.
- Διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων που παράγονται εντός της μονάδας.
- Μεταφορά του τυριού από το τυροκομείο στα καταστήματα λιανικής.

Η επιλογή των συγκεκριμένων ορίων συστήματος βασίστηκε στα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα.

Στάδια εκτός ορίων συστήματος:

- Η φάση κατανάλωσης του τυριού
- Η φάση τελικής διάθεσης του τυριού

Τα παραπάνω εξαιρούνται, λόγω έλλειψης διαθέσιμων πρωτογενών δεδομένων.

3.3 Περιγραφή της μελετώμενης μονάδας (case study)

Το τυροκομείο που επιλέχθηκε για τη μελέτη περίπτωσης αποτελεί τυροκομείο μικρής κλίμακας, που βρίσκεται στην Κεντρική Ελλάδα, στην Περιφέρεια Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στην Περιφερειακή Ενότητα Λάρισας. Η μονάδα παράγει διάφορους τύπους τυριών όπως φέτα ΠΟΠ, κεφαλοτύρι, κατσικίσιο τυρί, μανούρι ΠΟΠ, ανθότυρο και μυζήθρα. Κατά το έτος αναφοράς 2024, η ετήσια παραγωγή του τυροκομείου αντιστοιχούσε σε 1.070.800 kg τυριού.

Η βιομηχανία μεταποιεί αποκλειστικά γίδινο και πρόβειο γάλα, το οποίο προμηθεύεται από τοπικές κτηνοτροφικές μονάδες. Μεταφέρει το γάλα με οχήματα τύπου βυτιοφόρο, χωρητικότητας 13.000 kg σε μέση απόσταση 56 km, τα οποία χρησιμοποιούν καύσιμο τύπου diesel. Το τυροκομείο έχει λέβητα, ο οποίος λειτουργεί με καύσιμο τύπου υγραερίου (LPG). Για τη συνολική λειτουργία του καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παρέχεται από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) και νερό το οποίο παρέχεται από το δημόσιο δίκτυο ύδρευσης. Για τη συσκευασία του τυριού χρησιμοποιεί πρωτογενείς συσκευασίες, οι οποίες περιλαμβάνουν μεταλλικά δοχεία και πλαστικές συσκευασίες τύπου PET και μεμβράνες/φιλμ, ανάλογα με το είδος του τυριού, ενώ για όλα τα προϊόντα χρησιμοποιούνται δευτερογενείς συσκευασίες από χαρτί. Τα στερεά απόβλητα, διαχειρίζονται ως αστικά στερεά απόβλητα, δηλαδή απομακρύνονται μέσω του δημοτικού συστήματος αποκομιδής και οδηγούνται σε χώρο υγειονομικής ταφής (XYTA). Τα υγρά απόβλητα υποβάλλονται σε επεξεργασία σε σύστημα βιολογικού καθαρισμού, σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (Sequencing Batch Reactor, SBR), πριν από την τελική διάθεσή τους σε υδάτινο αποδέκτη και συγκεκριμένα σε ποταμό. Η διανομή των τελικών προϊόντων πραγματοποιείται με οχήματα μεταφοράς τύπου φορτηγό-ψυγείο, χωρητικότητας 13.000 kg σε μέση απόσταση 380 km, που χρησιμοποιούν καύσιμο τύπου βενζίνης.

3.4 Συλλογή δεδομένων

3.4.1 Πρωτογενή δεδομένα

Τα πρωτογενή δεδομένα συλλέχθηκαν από το συνεργαζόμενο τυροκομείο, μέσω ερωτηματολογίου και προσωπικής συνέντευξης με τον υπεύθυνο ποιοτικού ελέγχου του τυροκομείου (Παράρτημα Ι). Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούν το έτος αναφοράς 2024.

Τα πρωτογενή δεδομένα καλύπτουν τις βασικές κατηγορίες εισροών και εκροών που σχετίζονται με την παραγωγή τυριού και περιλαμβάνουν:

- Ποσότητες και τύπους τυριών παραγωγής.
- Ποσότητες και σύσταση πρόβειου και γίδινου γάλακτος.
- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων για θερμική ενέργεια, πληροφορίες για πάροχο και είδος καυσίμου.
- Κατανάλωση νερού και πηγή υδροδότησης.
- Κατανάλωση καυσίμου, είδος καυσίμου, τύπος οχήματος και αποστάσεις για μεταφορές γάλακτος και τυριού.
- Ποσότητες και υλικά συσκευασίας ανά τύπο τυριού.
- Ποσότητες και τρόπο διαχείρισης υγρών και στερεών αποβλήτων, είδη στερεών αποβλήτων και διαχείριση του τυρόγαλου.

3.4.2 Δευτερογενή δεδομένα

Τα δευτερογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη αφορούν συντελεστές υπολογισμού εκπομπών ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq) για το έτος αναφοράς 2024, από τη διεθνή και εθνική βιβλιογραφία, λόγω αδυναμίας πρόσβασης σε εμπορική βάση δεδομένων.

Τα δευτερογενή δεδομένα περιλαμβάνουν:

- Συντελεστές εκπομπών για την παραγωγή νωπού πρόβειου και γίδινου γάλακτος, ημiekτατικών συστημάτων εκτροφής αιγοπροβάτων σε ορεινές ημiekτατικές εκμεταλλεύσεις στην Ελλάδα (Laliotis & Bizelis, 2025).
- Συντελεστές εκπομπών για την κατανάλωση καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας, εθνικούς συντελεστές που ανταποκρίνονται στα ελληνικά δεδομένα (ΥΠΕΝ, 2025).
- Συντελεστή για το υπολειπόμενο ενεργειακό μείγμα του παρόχου, εθνικούς συντελεστές που ανταποκρίνονται στα ελληνικά δεδομένα (ΔΑΠΕΕΠ, 2025).
- Συντελεστές εκπομπών για την κατανάλωση νερού, τη χρήση υλικών συσκευασίας και τη διαχείριση στερεών αποβλήτων, ευρείας χρήσης (DEFRA, 2025).
- Συντελεστές εκπομπών για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του τυροκομείου (IPCC, 2019).

Οι συντελεστές εκπομπών που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

3.5 Επεξεργασία δεδομένων και κανονικοποίηση

Τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούσαν συνολικές ετήσιες ποσότητες εισροών και εκροών, οι οποίες αντιστοιχούν στη συνολική ετήσια παραγωγή τυριού του τυροκομείου για το έτος αναφοράς 2024. Οι μέσες ετήσιες ποσότητες εισροών και εκροών κανονικοποιήθηκαν, μέσω διαίρεσης με τη συνολική ετήσια ποσότητα παραγόμενου τυριού και εκφράστηκαν ανά 1 kg τυριού.

Για τις μέσες ετήσιες ποσότητες υλικών συσκευασίας και στερεών αποβλήτων, όπου υπήρχαν διαθέσιμα επιμέρους δεδομένα, εφαρμόστηκε άμεση αντιστοίχιση ανά τύπο τυριού και εκφράστηκαν ανά 1 kg τυριού.

3.6 Υπολογισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων

3.6.1 Παραγωγή γάλακτος

Οι εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή πρόβειου και γίδινου γάλακτος υπολογίστηκαν με βάση τις ποσότητες γάλακτος που χρησιμοποιήθηκαν κατά το έτος αναφοράς για την παραγωγή 1 kg τυριού. Οι ποσότητες αυτές μετατράπηκαν σε γάλα διορθωμένο ως προς λίπος και πρωτεΐνη (Fat and Protein Corrected Milk, FPCM), ώστε να είναι συμβατές με τους επιλεγμένους συντελεστές εκπομπών, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο Παράρτημα III. Οι εκπομπές υπολογίστηκαν ως το γινόμενο της ποσότητας FPCM ανά kg τυριού και του αντίστοιχου συντελεστή εκπομπών για την παραγωγή πρόβειου και γίδινου γάλακτος (Παράρτημα III, VIII).

3.6.2 Ενέργεια & καύσιμα

Οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκαν για την ηλεκτρική ενέργεια, τα καύσιμα του λέβητα και τα καύσιμα μεταφοράς. Τα πρωτογενή δεδομένα μετατράπηκαν στις μονάδες αναφοράς των αντίστοιχων συντελεστών, οι οποίοι ορίζονται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2025). Οι εκπομπές των επιμέρους εκπομπών GHG (CO₂, CH₄ και N₂O), υπολογίστηκαν ξεχωριστά και στη συνέχεια μετατράπηκαν σε ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq) μέσω εφαρμογής των αντίστοιχων συντελεστών Δυναμικού Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential, GWP) και αθροίστηκαν, ώστε να προκύψει το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα ανά 1 kg τυριού (Παράρτημα IV, VII).

3.6.3 Νερό & συσκευασία & στερεά απόβλητα

Οι εκπομπές που σχετίζονται με την κατανάλωση νερού και τη χρήση υλικών συσκευασίας και τη διαχείριση στερεών αποβλήτων υπολογίστηκαν μετά από μετατροπή των δεδομένων στις αντίστοιχες μονάδες αναφοράς και εφαρμογή των συντελεστών εκπομπών του έτους αναφοράς (Παράρτημα V). Οι κανονικοποιημένες μέσες ετήσιες ποσότητες ανά 1 κιλό τυριού πολλαπλασιάστηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στις πηγές των δευτερογενών δεδομένων (DEFRA,2025). Οι σχετικοί υπολογισμοί παρουσιάζονται στο Παράρτημα V.

3.6.4 Υγρά απόβλητα

Οι εκπομπές που προκύπτουν από τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του τυροκομείου υπολογίστηκαν με χρήση των αντίστοιχων συντελεστών εκπομπών και της μεθοδολογίας που προτείνεται από τις κατευθυντήριες οδηγίες του IPCC, σύμφωνα με την προσέγγιση Βαθμού 1 (Tier 1). Οι αναλυτικοί υπολογισμοί παρατίθενται στο Παράρτημα VI.

3.7 Λογισμικό και μοντελοποίηση

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα openLCA (έκδοση 2.5.0). Για τη μοντελοποίηση της παραγωγής τυριού, δημιουργήθηκαν ροές (flows) για το τυρί, την ηλεκτρική ενέργεια, τα καύσιμα μεταφοράς, τα καύσιμα λέβητα, το νερό, τα υλικά συσκευασίας, τα στερεά και υγρά απόβλητα. Ορίστηκε η κατάλληλη μονάδα μέτρησης (kg, L, kWh) και ο τύπος κάθε ροής. Δημιουργήθηκαν διεργασίες (processes) για την παραγωγή τυριού, την παραγωγή γάλακτος, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, την κατανάλωση καυσίμων λέβητα, την κατανάλωση καυσίμων μεταφοράς γάλακτος και τυριού, τη χρήση

υλικών συσκευασίας, την κατανάλωση νερού και τις διεργασίες διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων, ενώ η παραγωγή τυριού (cheese production) ορίζεται ως κύρια διεργασία. Σε κάθε διεργασία αντιστοιχήθηκαν οι αντίστοιχες ροές, ενώ οι συνολικές εκπομπές που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη δραστηριότητα εισάχθηκαν ξεχωριστά ως στοιχειώδεις ροές (elementary flows) εκφρασμένες σε kg CO₂-eq ανά 1 kg τυριού. Τέλος, δημιουργήθηκε ένα product system για το τυρί, το οποίο συνδέει όλες τις επιμέρους διεργασίες σε ένα ενιαίο σύστημα. Επιπρόσθετα, στο openLCA εισήχθηκε το αρχείο που προσφέρεται, ως «ecoinvent_38_LCIA_methods_30112021» αποκλειστικά για λόγους πληρότητας και τυπικής συμβατότητας του μοντέλου (GreenDelta GmbH, 2026).

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο openLCA είχε απλοποιημένη δομή και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τη δομική αναπαράσταση του συστήματος και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Για την υποστήριξη των υπολογισμών και την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά το λογισμικό Microsoft Excel.

3.8 Παραδοχές και περιορισμοί της μελέτης

3.8.1 Παραδοχές

- Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα εκτιμήθηκε αποκλειστικά ως αποτύπωμα άνθρακα.
- Οι υπολογισμοί αποτελούν το γινόμενο των δεδομένων δραστηριότητας και του συντελεστή εκπομπών με GWP (100).
- Οι συντελεστές είναι εθνικοί και διεθνείς συντελεστές εκπομπών (ΥΠΕΝ, ΔΑΠΕΕΠ, DEFRA, IPCC) για το έτος αναφοράς 2024.
- Οι συντελεστές εκπομπών για την παραγωγή γάλακτος αφορούν ημικτατικά συστήματα εκτροφής αιγοπροβάτων στην Ελλάδα (Laliotis & Bizelis, 2025).
- Ο όρος τυρί αφορά όλους τους τύπους τυριών της μονάδας.

- Το τυρόγαλα και τα οργανικά στερεά απόβλητα λαμβάνονται και αξιοποιούνται από άλλη επιχείρηση.

3.8.2 Περιορισμοί

3.8.2.1 Έλλειψη και δεδομένων

- Δεν υπήρχαν διαθέσιμοι μετρητές ανά επιμέρους διεργασία και οι καταναλώσεις καταγράφηκαν σε επίπεδο συνολικής εγκατάστασης.
- Δεν υπήρχε πρόσβαση σε εμπορική βάση δεδομένων και χρησιμοποιήθηκαν δευτερογενείς βιβλιογραφικοί συντελεστές εκπομπών.

3.8.2.2 Κλίμακα παραγωγής

- Τα δεδομένα αφορούσαν μικρή κλίμακα παραγωγής.
- Τα δεδομένα αφορούν τυροκομείο μελέτης περίπτωσης, με συγκεκριμένες τεχνολογίες παραγωγής, μεταφοράς και προμηθευτές.

3.8.2.3 Απλουστεύσεις

- Το λογισμικό openLCA χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για απεικόνιση αποτελεσμάτων.
- Οι εκπομπές μεταφορών δε λαμβάνουν υπόψιν φορτίο ανά δρομολόγιο.
- Οι εκπομπές υπολογίστηκαν χωρίς τη χρήση βάσης δεδομένων.
- Δεν έγινε επιμερισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Τα διαθέσιμα δεδομένα επιτρέπουν τη μελέτη έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης.

Εκτός ορίων συστήματος:

- τυρόγαλα και οργανικά στερεά απόβλητα, καθώς παραλαμβάνονται από άλλη βιομηχανία επεξεργασίας.

- πρόσθετες πρώτες ύλες, όπως αλάτι, CaCl_2 , πυτιά, καλλιέργειες εκκίνησης και καθαριστικά, όπως NaOH , NaClO , H_3PO_4 , CH_3COOH , HNO_3 , λόγω έλλειψης αξιόπιστων συντελεστών εκπομπών.

3.8.2.4 Επιπτώσεις των περιορισμών στα αποτελέσματα

- Οι αποκλεισμοί σταδίων εκτός των ορίων συστήματος ενδέχεται να οδηγούν σε υποεκτίμηση του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα.
- Η χρήση δευτερογενών συντελεστών εκπομπών εισάγει αβεβαιότητα σχετικά με τη γεωγραφική και τεχνολογική αντιστοιχία των δεδομένων.
- Η έλλειψη μετρητών κατανάλωσης περιορίζει τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων.

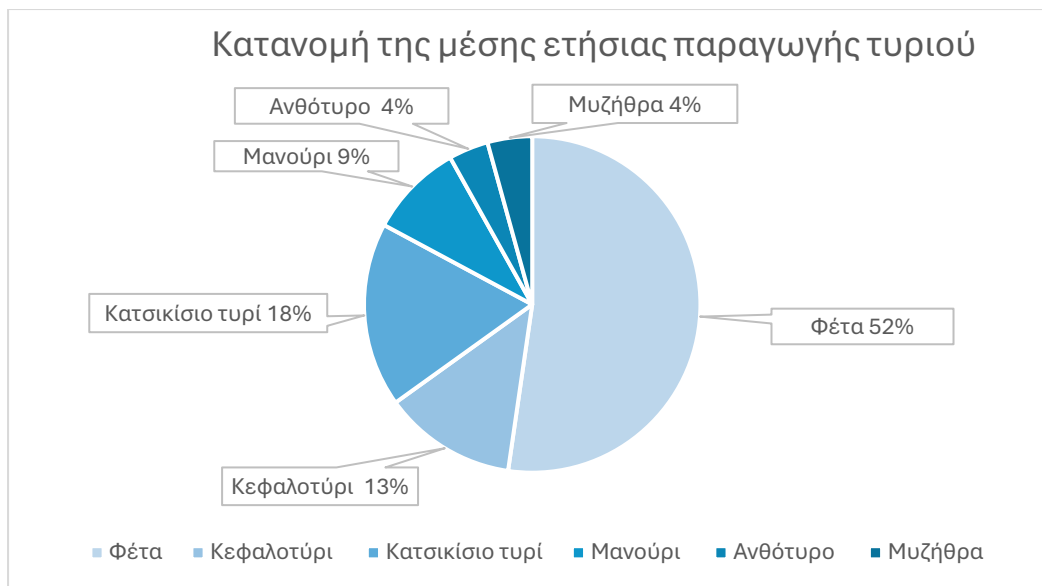
Παρά τους περιορισμούς της μελέτης, η επιλεγμένη μεθοδολογική προσέγγιση επιτρέπει την εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα ανά 1 kg τυριού.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία μελετά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τυριού σε τυροκομείο μικρής κλίμακας στην Ελλάδα από γίδινο και πρόβειο γάλα, με την εφαρμογή βασικών μεθοδολογικών στοιχείων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Η μελέτη επεξεργάστηκε πρωτογενή δεδομένα του τυροκομείου μελέτης και σε συνδυασμό με βιβλιογραφικούς συντελεστές εκπομπών, οδήγησε σε εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν ως ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq) σε GWP (100), με όρια συστήματος, «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης» και λειτουργική μονάδα το 1 kg συσκευασμένου τυριού που παράγει η μονάδα κατά το έτος αναφοράς 2024.

4.1 Κατανομή παραγωγής τυροκομικών προϊόντων

Από το ερωτηματολόγιο, που συμπληρώθηκε από τη μονάδα, προέκυψε η κατανομή της μέσης ετήσιας παραγωγής τυροκομικών προϊόντων για το έτος 2024. Η συνολική παραγωγή αντιστοιχούσε σε 1.070.800 kg τυριού και κατανέμονταν σε διαφορετικούς τύπους τυριών, όπως φέτα ΠΟΠ, κεφαλοτύρι, κατσικίσιο τυρί, μανούρι, ανθότυρο και μυζήθρα.



Εικόνα 1. Ποσοστιαία κατανομή των διαφόρων τύπων τυριών σε σχέση με τη συνολική μέση ετήσια παραγωγή τυριού (%).

Στην Εικόνα 1 φαίνεται η ποσοστιαία κατανομή των διαφορετικών τύπων τυριού σε σχέση με τη συνολική μέση ετήσια παραγωγή. Συγκεκριμένα, από την μέση ετήσια παραγωγή τυριού, 1.070.800 kg τυριού, η παραγωγή φέτας ΠΟΠ αντιστοιχούσε στο 52% της συνολικής παραγωγής, το κατσικίσιο τυρί στο 18%, το κεφαλοτύρι στο 13% και τα τυριά τυρογάλακτος στο 17%, με επιμέρους ποσοστά 9%, 4% και 4% για μανούρι, ανθότυρο και μυζήθρα αντίστοιχα (Εικ. 1).

4.2 Κανονικοποίηση δεδομένων ερωτηματολογίου ανά λειτουργική μονάδα ανά έτος παραγωγής.

Από την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων του ερωτηματολογίου (Παράρτημα Ι) προέκυψαν οι μέσες καταναλώσεις πρώτων υλών, ενέργειας, νερού, υλικών συσκευασίας και

οι παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων που αντιστοιχούν στη λειτουργική μονάδα του 1 kg τυριού (Πιν. 1).

Πίνακας 1. Μέσες ετήσιες καταναλώσεις και ποσότητες που αντιστοιχούν σε 1 kg τυριού για το έτος 2024 από το τυροκομείο μελέτης.

Πρώτες ύλες	
Γάλα (kg /kg τυριού/έτος)	
α. Πρόβειο	2,8093
β. Γίδινο	1,3191
Κατανάλωση Νερού	
Νερό (m ³ / kg τυριού/έτος)	0,0045
Κατανάλωση Ενέργειας	
Ηλεκτρική ενέργεια (kWh/ kg τυριού/έτος)	0,2412
Υγραέριο - LPG (L/ kg τυριού/έτος)	0,0553
Πετρέλαιο - Diesel (L/ kg τυριού/έτος)	
α. Γάλα	0,0248
β. Τυριά	0,0261
Χρήση Υλικών Συσκευασίας	
Υλικά συσκευασίας (kg/ kg τυριού/έτος)	
α. Χαρτί	0,0374
β. Πλαστικά (PET)	0,0003
γ. Μεμβράνες/φιλμ	0,0002
δ. Μεταλλικά κουτιά	0,0093
Απόβλητα	
Στερεά απόβλητα (kg/ kg τυριού/έτος)	
α. Πλαστικό από πολυστυρένιο	0,0006
β. Πλαστικά πολυστρωματικά	0,0056
γ. Μέταλλο	0,0088
δ. Χαρτί	0,0021
ε. Ξύλο	0,0031
Υγρά απόβλητα (m ³ / kg τυριού/έτος)	
α. Λύματα προς επεξεργασία	0,0043

4.3 Συνολικό αποτύπωμα άνθρακα για την παραγωγή 1 kg τυριού

Το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα για την παραγωγή 1 kg τυριού εκτιμήθηκε σε 15,42 kg CO₂-eq/kg τυριού. Η τιμή αυτή προκύπτει από το άθροισμα των εκπομπών που σχετίζονται με την πρωτογενή παραγωγή του γάλακτος και των εκπομπών σε επίπεδο βιομηχανίας για την παραγωγή και διάθεση του τελικού προϊόντος. Οι εκπομπές παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2, όπως υπολογίστηκαν στα παραρτήματα (Παράρτημα III, IV, V, VI) για την παραγωγή 1kg τυριού από τη βιομηχανία μελέτης για το έτος 2024.

Πίνακας 2. Ετήσιες εκπομπές (kg CO₂-eq) για την παραγωγή 1 kg τυριού για το έτος 2024 από το τυροκομείο μελέτης.

Πρώτες ύλες	
Γάλα (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	
α. Πρόβειο	11,889262
β. Γίδινο	3,163888
Κατανάλωση Νερού	
Νερό (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	0,000858
Κατανάλωση Ενέργειας	
Ηλεκτρική ενέργεια (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	0,065735
Υγραέριο - LPG (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	0,090900
Πετρέλαιο - Diesel (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	
α. Γάλα	0,065326
β. Τυριά	0,068765
Χρήση Υλικών Συσκευασίας	
Υλικά συσκευασίας (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	
α. Χαρτί	0,044601
β. Πλαστικά (PET)	0,001131
γ. Μεμβράνες/φιλμ	0,000726
δ. Μεταλλικά κουτιά	0,026646
Απόβλητα	
Στερεά απόβλητα (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	
α. Πλαστικό από πολυστυρένιο	0,000006
β. Πλαστικά πολυστρωματικά	0,000049
γ. Μέταλλο	0,000078
δ. Χαρτί	0,002476

ε. Ξύλο	0,002842
Υγρά απόβλητα (kg CO ₂ -eq / kg τυριού/έτος)	
α. Λύματα προς επεξεργασία	0,000693

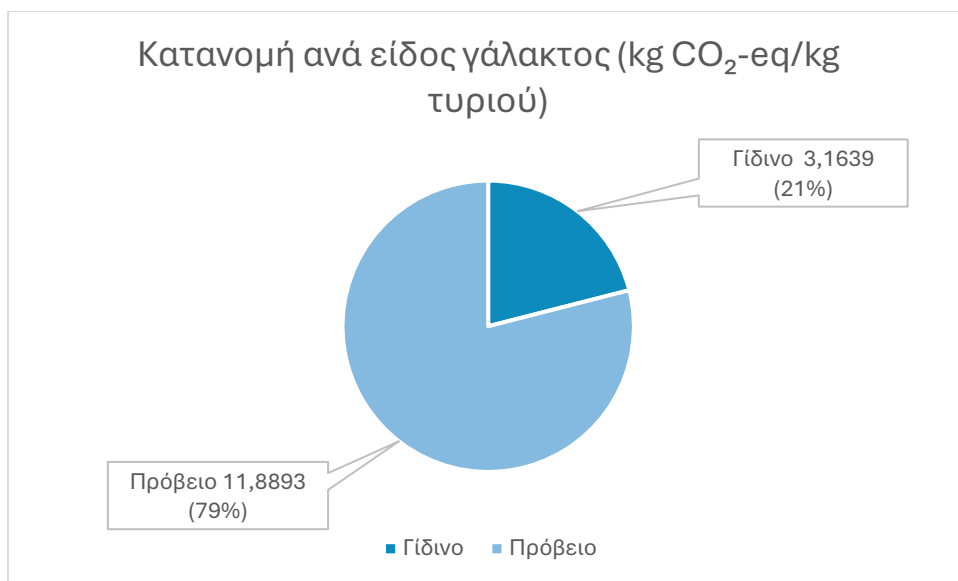
Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι εκπομπές που αποδίδονται στην πρωτογενή παραγωγή του γάλακτος και ανέρχονται σε 15,05 kg CO₂-eq/kg τυριού και οι εκπομπές που σχετίζονται με το στάδιο της βιομηχανικής παραγωγής οι οποίες προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας, τις μεταφορές, τη χρήση υλικών συσκευασίας και τη διαχείριση των αποβλήτων.

4.4 Κατανομή εκπομπών μεταξύ παραγωγής γάλακτος και βιομηχανίας

Οι συνολικές εκπομπές των 15,42 kg CO₂-eq/kg τυριού κατανέμονται μεταξύ των εκπομπών του σταδίου παραγωγής γάλακτος και των εκπομπών που προέρχονται σε επίπεδο βιομηχανίας. Οι εκπομπές από το στάδιο της παραγωγής γάλακτος ανέρχονται σε 15,05 kg CO₂-eq/kg τυριού, ενώ οι εκπομπές που προκύπτουν από τη στιγμή του το γάλα μεταφέρεται στο τυροκομείο, τα στάδια εντός του τυροκομείου και τη διανομή του τελικού προϊόντος ανέρχονται σε 0,37 kg CO₂-eq/kg τυριού. Από το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα των 15,42 kg CO₂-eq/kg τυριού, το 98% αντιστοιχεί στο στάδιο παραγωγής του γάλακτος και το 2% στα στάδια της μεταφοράς του γάλακτος, της βιομηχανικής παραγωγής και διανομής του τελικού προϊόντος.

4. 4. 1 Εκπομπές στο στάδιο παραγωγής γάλακτος

Οι εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή γάλακτος διακρίθηκαν ανά είδος γάλακτος, μεταξύ πρόβειου και γίδινου γάλακτος.

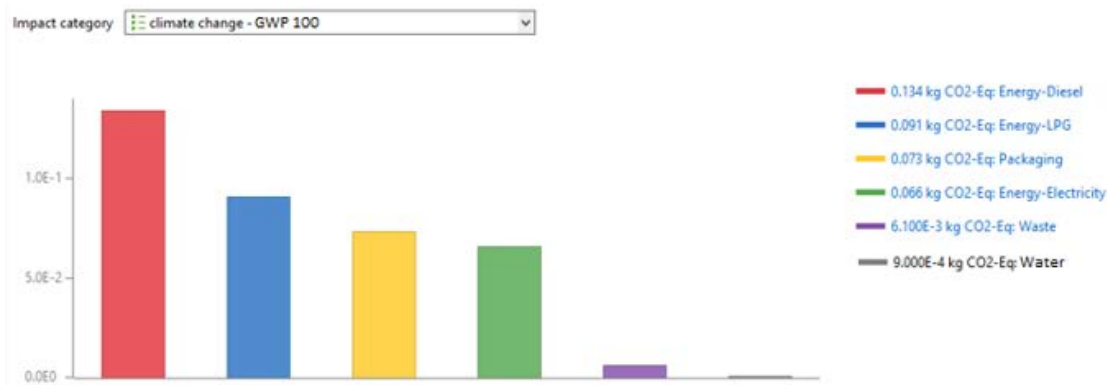


Εικόνα 2 Κατανομή εκπομπών (kg CO₂-eq/kg τυριού) ανά είδος γάλακτος.

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η κατανομή των εκπομπών CO₂-eq ανά είδος γάλακτος για 1 kg τυριού. Από το σύνολο των εκπομπών του σταδίου παραγωγής γάλακτος, που αντιστοιχεί σε 15,05 kg CO₂-eq/kg τυριού, το 79% αποδίδεται στην παραγωγή πρόβειου γάλακτος και το 21% στην παραγωγή γίδινου γάλακτος. Οι απόλυτες τιμές αντιστοιχούν σε 11,8893 kg CO₂-eq/kg τυριού για το πρόβειο γάλα και 3,1639 kg CO₂-eq/kg τυριού για το γίδινο γάλα.

4.4.2 Εκπομπές στο στάδιο λειτουργίας του τυροκομείου

Οι συνολικές εκπομπές που αποδίδονται στη λειτουργία του τυροκομείου αντιστοιχούν σε 0,37 kg CO₂-eq και περιλαμβάνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ενέργειας από καύση υγραερίου και την κατανάλωση πετρελαίου τύπου diesel για μεταφορά, τη συσκευασία, τη διαχείριση αποβλήτων και τη χρήση νερού.

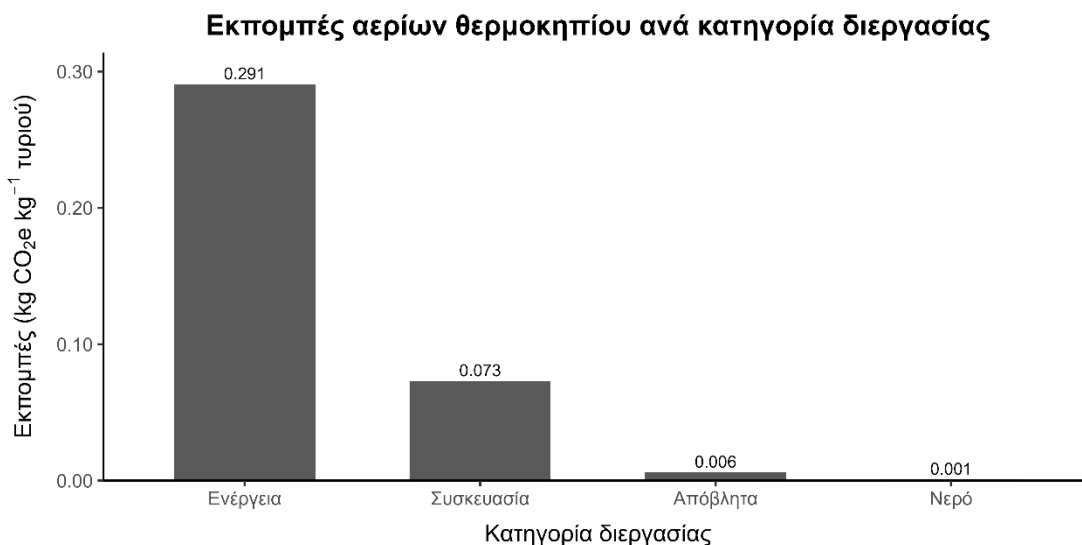


Εικόνα 3. Απεικόνιση κατανομής εκπομπών σε επίπεδο βιομηχανίας (CO₂-eq/ kg τυριού) με τη χρήση openLCA.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η κατανομή των εκπομπών CO₂-eq/ kg τυριού που αποδίδονται στην παραγωγή τυριού με εξαίρεση των εκπομπών από τη παραγωγή γάλακτος, δηλαδή στη μεταφορά γάλακτος, στη τυροκόμηση και στη διανομή του προϊόντος. Η κατανομή αυτή παρουσιάζεται όπως προέκυψε από τη χρήση του λογισμικού openLCA στα πλαίσια της απεικόνισης για την κατηγορία επίπτωσης climate change, GWP 100.

Οι εκπομπές από την κατανάλωση πετρελαίου (diesel) ανέρχονται σε 0,134 kg CO₂-eq/kg τυριού, ενώ οι εκπομπές από τη χρήση υγραερίου (LPG) και ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται σε 0,091 kg CO₂-eq/kg τυριού και 0,066 kg CO₂-eq/kg τυριού, αντίστοιχα. Η συνεισφορά της συσκευασίας αντιστοιχεί σε 0,073 kg CO₂-eq/kg τυριού, ενώ οι εκπομπές που αποδίδονται στη διαχείριση αποβλήτων και στη χρήση νερού υπολογίστηκαν σε 0,0062 kg CO₂-eq/kg τυριού και 0,0009 kg CO₂-eq/kg τυριού, αντίστοιχα.

4.4.2.1 Ομαδοποίηση εκπομπών ανά κατηγορία



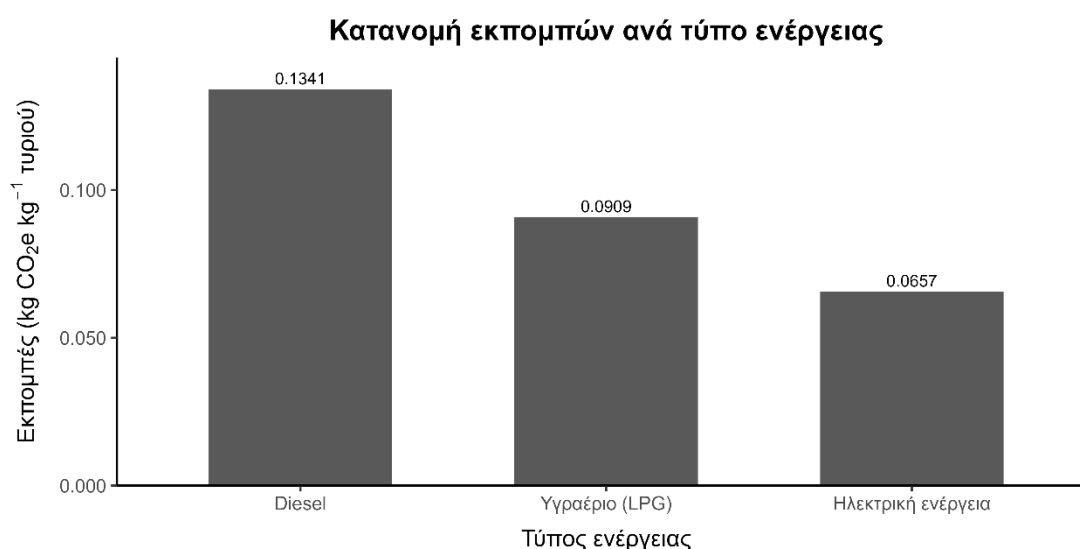
Εικόνα 4 Εκπομπές (kg CO₂-eq/ kg τυριού) ανά ομαδοποιημένη κατηγορία στο στάδιο παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας.

Στην Εικόνα 4, παρουσιάζεται η ομαδοποίηση των εκπομπών CO₂-eq/kg τυριού στο στάδιο παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας. Οι εκπομπές ενέργειας ομαδοποιήθηκαν, δηλαδή οι εκπομπές της ηλεκτρικής ενέργειας, της καύσης πετρελαίου (diesel) για μεταφορά και της καύσης του υγραερίου του καυστήρα. Ακόμα, οι εκπομπές από τα υλικά συσκευασίας είναι ομαδοποιημένες καθώς και για τα απόβλητα, ομαδοποιώντας όλα τα στερεά και υγρά απόβλητα.

Οι αντίστοιχες εκπομπές για κάθε κατηγορία ανέρχονται σε 0,2907 kg CO₂-eq/kg τυριού για την ενέργεια, που αντιστοιχεί στο 78,40% των εκπομπών σε επίπεδο βιομηχανίας, σε 0,0730 kg CO₂-eq/kg τυριού για τη συσκευασία που αντιστοιχεί σε 19,71%, σε 0,0061 kg CO₂-eq/kg

τυριού για τα απόβλητα που αντιστοιχεί σε 1,65 % και σε 0,0009 kg CO₂-eq/kg τυριού για την κατανάλωση νερού που αντιστοιχεί σε 0,24%.

4.4.2.1.1 Κατανομή εκπομπών ανά τύπο ενέργειας

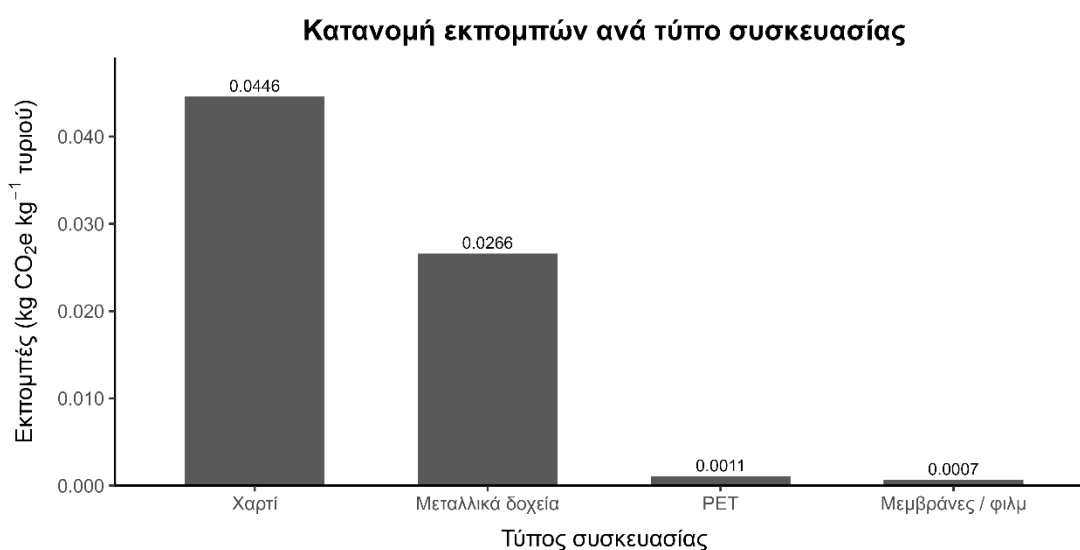


Εικόνα 5. Εκπομπές (kg CO₂-eq/kg τυριού) ανά τύπο ενέργειας στο στάδιο παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας.

Στην Εικόνα 5, αναπαρίσταται η κατανομή ανά τύπο ενέργειας. Οι εκπομπές διακρίθηκαν μεταξύ κατανάλωσης πετρελαίου (diesel) για μεταφορές, καύσης υγραερίου (LPG) και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές που αποδίδονται στο πετρέλαιο (diesel) ανέρχονται σε 0,1341 kg CO₂-eq/kg τυριού, που αντιστοιχεί σε 46% των συνολικών εκπομπών ενέργειας, ενώ οι εκπομπές από την καύση υγραερίου (LPG) και την κατανάλωση ηλεκτρικής

ενέργειας ανέρχονται σε 0,0909 kg CO₂-eq/kg τυριού και 0,0657 kg CO₂-eq/kg τυριού με ποσοστά 31% και 23% αντίστοιχα.

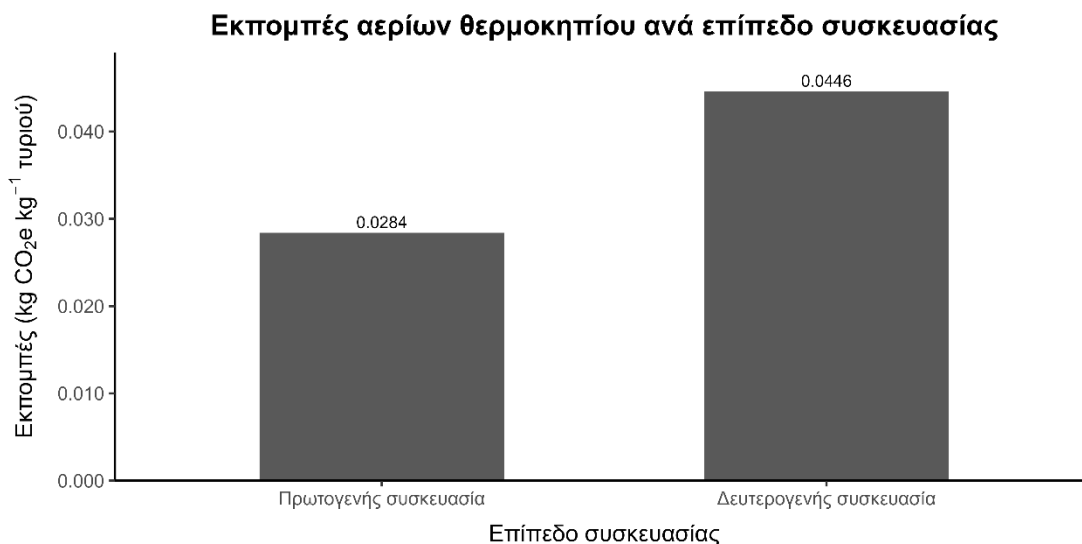
4.4.2.1.2 Κατανομή εκπομπών ανά τύπο συσκευασίας



Εικόνα 6. Κατανομή εκπομπών (kg CO₂-eq/kg τυριού) αναλυτικά ανά τύπο συσκευασίας στο στάδιο παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας.

Στην Εικόνα 6 αναπαρίσταται η κατανομή των εκπομπών ανάλογα με το υλικό συσκευασίας που χρησιμοποιείται. Οι εκπομπές εξαιτίας του τύπου συσκευασίας αντιστοιχούν για το χαρτί σε 0,0446 kg CO₂-eq/kg τυριού και σε ποσοστό 61% των συνολικών εκπομπών εξαιτίας της χρήσης υλικών συσκευασίας, για τα μεταλλικά δοχεία σε 0,0266 kg CO₂-eq /kg τυριού και ποσοστό 36%, για συσκευασίες τύπου PET σε 0,0011 kg CO₂-eq /kg τυριού, ποσοστό 2% και για συσκευασίες τύπου μεμβράνες/φίλμ σε 0,0007 kg CO₂-eq/ kg τυριού, ποσοστό 1%.

Από το ερωτηματολόγιο προκύπτει ότι η φέτα ΠΟΠ και το κατσικίσιο τυρί διατίθενται σε συσκευασίες μεταλλικών δοχείων 4 kg, 7 kg και 15 kg, καθώς και σε πλαστικές συσκευασίες 400 gr και 1 kg. Το κεφαλοτύρι διατίθεται σε συσκευασίες τύπου vacuum 2 kg, 4,5 kg, 8,5 kg, καθώς και 250 gr και 200 τριμμένο gr. Το μανούρι διατίθεται σε συσκευασίες τύπου vacuum 1 kg, 2 kg και 300 gr. Το ανθότυρο και η μυζήθρα διατίθενται σε συσκευασίες τύπου vacuum 2 kg. Οι συσκευασίες αυτές αποτελούν πρωτογενείς συσκευασίες, ενώ για όλα τα τυριά χρησιμοποιούνται δευτερογενείς συσκευασίες από χαρτί.

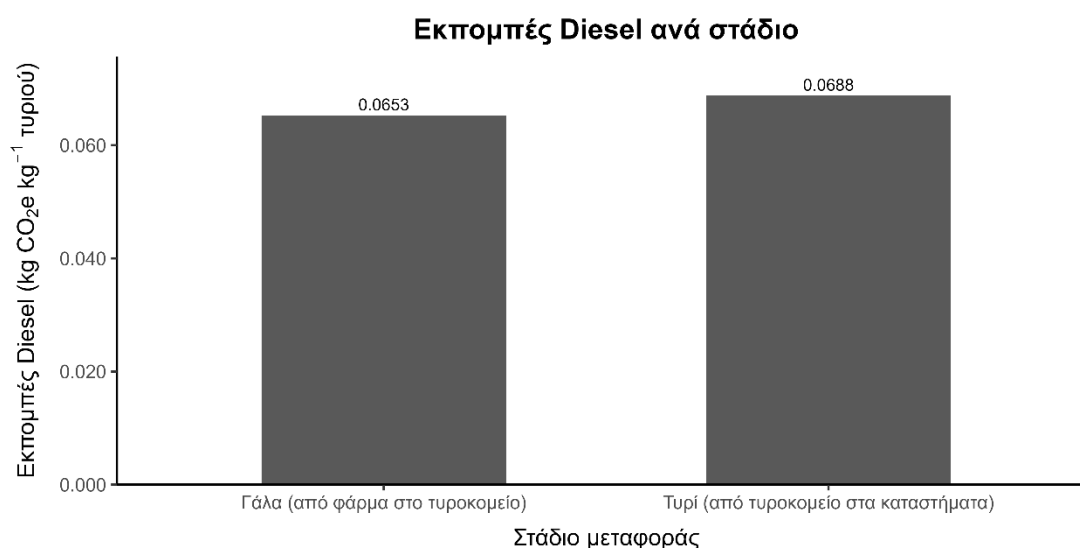


Εικόνα 7. Κατανομή εκπομπών (kg CO₂-eq/kg τυριού) ανά κατηγορία τύπου συσκευασίας στο στάδιο παραγωγής τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας.

Οι εκπομπές κατανέμονται ανάλογα με την κατηγορία τύπου συσκευασίας και προκύπτει ότι η χρήση πρωτογενούς συσκευασίας έχει εκπομπές 0,0284 kg CO₂-eq/kg τυριού που αντιστοιχεί στο 39% των εκπομπών από τη χρήση συσκευασίας και η χρήση δευτερογενούς συσκευασίας έχει εκπομπές 0,0446 kg CO₂-eq/kg τυριού που αντιστοιχεί σε 61%.

4.4.2.1.3 Κατανομή εκπομπών από τις μεταφορές

Οι εκπομπές που προέρχονται από τις μεταφορές αντιστοιχούν συνολικά σε 0,1341 kg CO₂-eq και αφορούν τόσο τη μεταφορά του γάλακτος από τη φάρμα στο τυροκομείο όσο και τη μεταφορά του τελικού προϊόντος από το τυροκομείο στα καταστήματα λιανικής.

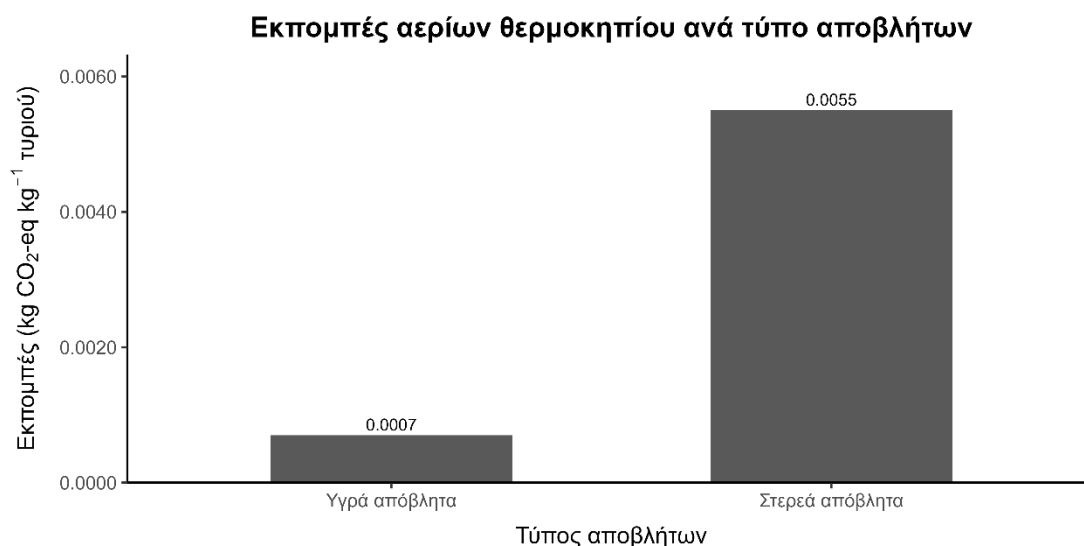


Εικόνα 8 Κατανομή των εκπομπών μεταφοράς (kg CO₂-eq/kg τυριού) μεταξύ προϊόντων/σταδίων για παραγωγή τυριού σε βιομηχανία μικρής κλίμακας.

Στην Εικόνα 8 οι εκπομπές από τις μεταφορές του γάλακτος από τη φάρμα στο τυροκομείο αντιστοιχούν σε 0,0653 kg CO₂-eq/kg τυριού και ποσοστό 49% των συνολικών εκπομπών από τη καύση πετρελαίου τύπου diesel για μεταφορές και οι εκπομπές από τις μεταφορές του τυριού από το τυροκομείο στα καταστήματα λιανικής αντιστοιχούν σε 0,0688 kg CO₂-eq/kg τυριού και ποσοστό 51%.

4.4.2.1.4 Κατανομή μεταξύ του τύπου αποβλήτων

Οι εκπομπές από τη διαχείριση αποβλήτων κατανέμονται μεταξύ υγρών και στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 9 Κατανομή των εκπομπών (kg CO₂-eq/ kg τυριού) ανά τύπο αποβλήτων.

Στην Εικόνα 9 οι εκπομπές από τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων αντιστοιχούν σε 0,0055 kg CO₂-eq/ kg τυριού και ποσοστό 88% από τις εκπομπές από τη συνολική διαχείριση αποβλήτων και οι εκπομπές από τη διαχείριση των υγρών αντιστοιχούν σε 0,0007 kg CO₂-eq/ kg τυριού και ποσοστό 11%.



***Εικόνα 2** Κατανομή των εκπομπών (kg CO₂-eq/ kg τυριού) ανά τύπο στερεών αποβλήτων.*

Στην Εικόνα 10 αναφέρεται ότι τα στερεά απόβλητα από ξύλο είχαν εκπομπές 0,0028 kg CO₂-eq/ kg τυριού και ποσοστό 52% από τις εκπομπές από τη συνολική διαχείριση στερεών αποβλήτων, από το χαρτί 0,0025 kg CO₂-eq/ kg τυριού και ποσοστό 46%, από το μέταλλο 0,00008 kg CO₂-eq/ kg τυριού και ποσοστό 1% και από το πλαστικό 0,00005 kg CO₂-eq/ kg τυριού και ποσοστό 1%.

4.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης η παραγωγή τυριού σε τυροκομείο μελέτης μικρής κλίμακας από γίδινο και πρόβειο γάλα έχει αποτύπωμα άνθρακα 15,42 kg CO₂-eq/kg τυριού. Το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών οφείλεται στην παραγωγή γάλακτος. Η βιομηχανία έχει μικρότερη αλλά υπολογίσιμη, συνεισφορά, την κατανάλωση ενέργειας να κυριαρχεί.

Τα ευρήματα αυτά αποτελούν τη βάση για τη συζήτηση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, η οποία ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα εργασία είχε ως σκοπό τη μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής τυριού ενός τυροκομείου μελέτης, μικρής κλίμακας στην Ελλάδα με βασικά μεθοδολογικά στοιχεία LCA. Στο πλαίσιο αυτό έγινε εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα για 1 kg συσκευασμένου τυριού «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης» για το έτος αναφοράς 2024. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αποτύπωμα άνθρακα εκτιμάται σε 15,42 kg CO₂-eq/kg τυριού. Η τιμή αυτή τοποθετείται στο ανώτερο τμήμα του εύρους τιμών που αναφέρεται στη βιβλιογραφία για την παραγωγή τυριού, το οποίο κυμαίνεται από 4 έως πάνω από 22 kg CO₂-eq/kg τυριού (Verge et al., 2013; Silverio et al., 2025). Η τοποθέτηση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από την προέλευση του γάλακτος, καθώς το τυρί στο τυροκομείο μελέτης παράγεται από γίδινο και πρόβειο γάλα, κυρίως πρόβειο, το οποίο έχει υψηλότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σχέση με άλλα είδη γάλακτος (Laliotis et al., 2025; Mazzetto et al., 2022). Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν εντοπίστηκε αντίστοιχη μελέτη εκτίμησης του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγής τυριού από γίδινο και πρόβειο γάλα σε μικρή κλίμακα στην Ελλάδα «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης». Ωστόσο, υπάρχουν παρόμοιες μελέτες, που εξετάζουν μερικές από τις παραπάνω συνθήκες. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με μελέτες μικρής κλίμακας που εκτιμούν το αποτύπωμα άνθρακα για ημίσκληρο αγελαδινό τυρί με όρια «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής» σε 15,6 και 16,6 kg CO₂-eq/kg τυριού, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Μεξικό και στην Ισπανία, αντίστοιχα (Salas-Vargas et al., 2021; Laca et al., 2020). Επιπλέον, συμφωνούν με μελέτες μικρής κλίμακας που εκτιμούν το αποτύπωμα άνθρακα για ημίσκληρο πρόβειο τυρί με τιμή 17 kg CO₂-eq/kg τυριού, στην Ιταλία, με όρια «από τη φάρμα έως τον λιανέμπορο» (Vagnoni et al., 2017). Ωστόσο, υψηλότερη τιμή παρατηρείται σε μελέτη για ημίσκληρο πρόβειο τυρί με όρια «από τη φάρμα έως την πύλη», με τιμή 22,13 kg CO₂-eq/kg τυριού (Silverio et al., 2025). Τα παραπάνω υποδεικνύουν ότι σε μελέτες μικρής κλίμακας με όρια «από τη φάρμα έως τη

λιανική», οι τιμές βρίσκονται συχνά στην ίδια τάξη μεγέθους. Ωστόσο, η συσχέτιση αυτή δεν είναι αρκετή, καθώς οι μελέτες υιοθετούν διαφορετικές μεθοδολογικές επιλογές και παραδοχές, οι οποίες είναι κρίσιμες για την εκτίμηση του αποτυπώματος. Η παρούσα μελέτη αναμενόταν να παρουσιάζει υψηλότερο αποτύπωμα σε σύγκριση με τυριά αγελαδινού γάλακτος υπό ίσα όρια συστήματος και ίδιο τύπο τυριού. Παράλληλα, το αποτύπωμα αναμενόταν να είναι χαμηλότερο σε σχέση με ημίσκληρα τυριά, λόγω του ότι το τυροκομείο παράγει κυρίως φρέσκα τυριά (Finnegan et al., 2017). Επίσης, ενδέχεται να είναι χαμηλότερο σε σχέση με τυριά πρόβειου γάλακτος, καθώς στη μελέτη χρησιμοποιείται και γίδινο γάλα. Στο υπό εξέταση τυροκομείο, ο όρος τυρί είναι ενιαίος, καθώς περιλαμβάνει φρέσκα τυριά, τυριά τυρογάλακτος και ημίσκληρα τυριά. Η παραδοχή αυτή όταν συνδυάζεται με διαφορετικής προέλευσης γάλακτος δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο τη σύγκριση ανά τύπο τυριού. Κατά συνέπεια, οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης σε σχέση με τη διεθνή βιβλιογραφία δεν υποδηλώνουν ασυνέπεια, αλλά οφείλονται στην ετερογένεια των συστημάτων παραγωγής τυριού. Η ετερογένεια των συστημάτων αφορά κυρίως τον τύπο τυριού, τη σύσταση και την προέλευση του γάλακτος, την απόδοση τυροκόμησης και τα όρια συστήματος (Silverio et al., 2025). Άλλοι παράμετροι που περιορίζουν τη συγκρισιμότητα είναι η κλίμακα παραγωγής, ο βαθμός επεξεργασίας του, το σύστημα εκτροφής και διατροφής των ζώων και η σύσταση του τυριού σε λιπαρά και στερεά γάλακτος (Verge et al., 2013; Kim et al., 2013; Vagnoni et al., 2017).

Επιμέρους στόχος της εργασίας ήταν η εκτίμηση και η σύγκριση του αποτυπώματος άνθρακα μεταξύ πρωτογενούς παραγωγής γάλακτος και βιομηχανικής παραγωγής τυριού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 98% κατανέμεται στην παραγωγή γάλακτος και το 2% στη βιομηχανία με τιμή 15,05 και 0,37 kg CO₂-eq/kg τυριού, αντίστοιχα. Συνεπώς, η πρωτογενής παραγωγή κυριαρχεί, έχει τις περισσότερες εκπομπές GHG και είναι καθοριστική για τη διαμόρφωση του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγής τυριού, ενώ το βιομηχανικό στάδιο

έχει ελάχιστη συνεισφορά στην παρούσα μελέτη. Η κατανομή αυτή φαίνεται να συμφωνεί με το σύνολο της διεθνούς βιβλιογραφίας. Ειδικότερα, το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τη μελέτη του αποτυπώματος για την παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένου του τυριού (Clune et al., 2017). Επίσης, η κατανομή αυτή συμφωνεί με μελέτες για παραγωγή τυριού από αγελαδινό γάλα στην Ιταλία (Canellada et al., 2018), τυριού τύπου Grana Padano (Bava et al., 2018), τυριού σε μικρή κλίμακα, από αγελαδινό και πρόβειο γάλα στην περιοχή της Βραζιλίας (Santos Jr. et al. 2017) και της Ρουμανίας (Ghinea et al. 2022), καθώς και τυριού από γίδινο γάλα (Cabral et al., 2020). Συνολικά, οι μελέτες αυτές συμφωνούν για γάλα πρόβειο, γίδινο και αγελαδινό, για διάφορα είδη τυριών, μικρής κλίμακας παραγωγή και μελέτες στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη (Finnegan et al., 2017). Εξετάζοντας το ποσοστό των εκπομπών GHG, που είναι υπεύθυνες για το αποτύπωμα άνθρακα αναφέρεται ότι «η παραγωγή γάλακτος μπορεί να ευθύνεται για 93,5–99,6% των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τυριού, ανάλογα με την κατηγορία επίπτωσης, ενώ για την κλιματική αλλαγή το ποσοστό ανέρχεται στο 95,6%» (Bava et al., 2018), τιμή ελαφρώς χαμηλότερη από την παρούσα μελέτη. Σε μελέτη για πρόβειο τυρί τύπου Pecorino, η παραγωγή γάλακτος αντιστοιχεί περίπου στο 92% των συνολικών εκπομπών (Vagnoni et al., 2017), για σκληρό ΠΟΠ τυρί μακράς ωρίμανσης τύπου Grana Padano, το ποσοστό υπερβαίνει το 90% και επισημαίνεται η σημαντική επίδραση της μεθόδου κατανομής στις τελικές τιμές (Bava et al., 2018). Το αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας σχετικά με την κατανομή συμφωνεί με τη βιβλιογραφία, ωστόσο βρίσκεται στο ανώτερο άκρο των αντίστοιχων ποσοστών που αναφέρονται σε άλλες μελέτες ή είναι οριακά πιο αυξημένο. Η διαφορά αυτή μπορεί να ερμηνευτεί από την προέλευση του γάλακτος και να ενισχυθεί από τις μεθοδολογικές παραδοχές και τους περιορισμούς της παρούσας μελέτης. Η παραγωγή γάλακτος συνοδεύεται από υψηλές εκπομπές από τις βιολογικές διεργασίες των μηρυκαστικών, τη διαχείριση κοπριάς και την παραγωγή ζωοτροφών (Vagnoni et al., 2017; Salas-Vargas et al., 2021). Το τυροκομείο

μελέτης παράγει τυριά από γίδινο και πρόβειο γάλα με εκπομπές που ακολουθούν την εισροή και αποδίδονται κατά 79% στην παραγωγή πρόβειου γάλακτος και 21% στην παραγωγή γιδίνου γάλακτος. Το πρόβειο γάλα χαρακτηρίζεται από υψηλότερες εκπομπές ανά kg παραγόμενου γάλακτος σε σύγκριση με το γίδινο και το αγελαδινό, λόγω της χαμηλότερης παραγωγικότητας των ζώων (Laliotis & Bizelis, 2025; Finnegan et al., 2017), όπως έχει καταγραφεί και σε άλλες μελέτες σε αντίστοιχα συστήματα εκτροφής προβάτων (Vagnoni et al., 2017; Ghinea & Leahu, 2023). Η κατανομή αυτή ενισχύεται και από τους συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν ανά kg FPCM, όπου καταγράφεται υψηλότερη τιμή για πρόβειο έναντι γιδίνου γάλακτος, σύμφωνα με τυπικές προσεγγίσεις Tier 1. Η προσέγγιση αυτή αφορά τυπικές μεθόδους υπολογισμού εκπομπών που βασίζονται σε γενικούς συντελεστές εκπομπών μέσω τιμών και δεν λαμβάνουν υπόψη ειδικά χαρακτηριστικά των συστημάτων εκτροφής (IPCC, 2006). Δεδομένης της κατανομής, όπου το 98% των εκπομπών προέρχεται από το γάλα, η αβεβαιότητα του συνολικού αποτελέσματος αναμένεται να καθορίζεται κυρίως από τους συντελεστές εκπομπών της πρωτογενούς παραγωγής και λιγότερο από παραμέτρους της μεταποίησης. Επιπρόσθετα, η μελέτη αφορά ελληνικά δεδομένα, όπου τα περισσότερα ελληνικά συστήματα εκτροφής αιγοπροβάτων είναι εκτατικά ή ημiekτατικά και δικαιολογούν τις αυξημένες τιμές GWP (Laliotis & Bizelis, 2025). Αυτό σημαίνει ότι τα ζώα που εκτρέφονται σε εκτατικά και ημiekτατικά συστήματα, έχουν χαμηλότερη παραγωγικότητα ανά ζώο, και παρουσιάζουν υψηλότερες εκπομπές ανά kg γάλακτος σε σύγκριση με εντατικά συστήματα, παρά τη χαμηλότερη χρήση εισροών, όπως συμπυκνωμένες ζωοτροφές και ενέργεια (Verge et al., 2013; Finnegan et al., 2017). Ως εκ τούτου, η σύνθεση της πρώτης ύλης, η σύσταση του τυριού και η αναλογία πρόβειου/γιδίνου γάλακτος σε συνδυασμό με την απόδοση τυροκόμησης εξηγούν τις αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών μελετών LCA. Ωστόσο, η κατανομή αυτή θα μπορούσε εν μέρει να ερμηνευτεί από τους περιορισμούς και τις παραδοχές της παρούσας ανάλυσης. Ο όρος τυρί περιλαμβάνει κατά βάση φρέσκα τυριά και

τυριά τυρογάλακτος. Τα τυριά αυτά συγκριτικά με τυριά μακράς ωρίμανσης, τείνουν να εμφανίζουν μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε επίπεδο βιομηχανίας καθώς δεν απαιτούν μεγάλους χρόνους για ωρίμανση, θέρμανση και τεμαχισμό γεγονός που μειώνει τη συνεισφορά της βιομηχανίας στο αποτέλεσμα. Μελέτες για την παραγωγή σκληρών, ώριμων τυριών, όπως τυρί τύπου Minas παρουσιάζουν κατανομή με μεγαλύτερη συνεισφορά στις εκπομπές εξαιτίας του βιομηχανικού σταδίου και μικρότερη εξαιτίας της παραγωγής γάλακτος, σε ποσοστό 86% (Nigri et al., 2014). Τα όρια συστήματος στην παρούσα μελέτη είναι έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης. Σε περίπτωση που ήταν μεταγενέστερα, όπως η κατανάλωση ή το τέλος ζωής συσκευασίας, η κατανομή θα μεταβαλλόταν, καθώς θα υπήρχαν επιπρόσθετες εκπομπές. Στη μελέτη δεν πραγματοποιήθηκε επιμερισμός και κατανομή εκπομπών μεταξύ κύριου προϊόντος και συν-προϊόντων, όπως το τυρόγαλα, ενώ ορισμένες εισροές, όπως άλλες πρώτες ύλες και καθαριστικά εξαιρέθηκαν λόγω έλλειψης αξιόπιστων συντελεστών. Οι επιλογές αυτές ενδέχεται να επηρεάζουν την τελική κατανομή. Σε μελέτες τα άλλα συστατικά συνεισφέρουν <0,02% (Nunes et al., 2020) και τα προϊόντα καθαρισμού έχουν αντίκτυπο από την παραγωγή πλαστικών δοχείων και δραστικών ουσιών. Κατά συνέπεια, η υψηλότερη συμμετοχή της παραγωγής γάλακτος στην παρούσα εργασία ερμηνεύεται σε συνάρτηση με τα όρια συστήματος και τις παραδοχές και τους περιορισμούς.

Επιμέρους στόχος της παρούσας μελέτης ήταν ο εντοπισμός κρίσιμων σημείων σε επίπεδο βιομηχανίας. Η παραγωγή τυριού στη βιομηχανία μελέτης αφορά μικρή κλίμακα και παρουσίασε εκπομπές που κατανέμονται σε 78,40% στην κατανάλωση ενέργειας, σε 19,71% στη χρήση υλικών συσκευασίας, στο 1,65% στη διαχείριση αποβλήτων και 0,24% στην κατανάλωση νερού. Στην κατανομή αυτή κυριαρχούν οι εκπομπές που προέρχονται από την κατανάλωση ενέργειας. Στη βιβλιογραφία, όταν εξαιρείται το στάδιο παραγωγής γάλακτος, η κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο βιομηχανίας αποτελεί το κύριο «κρίσιμο σημείο» των εκπομπών της παραγωγής τυριού και άλλων γαλακτοκομικών προϊόντων (Flysjo et al., 2014).

Ειδικότερα, η κατανάλωση ενέργειας έχει εκπομπές που κατανέμονται μεταξύ 43 και 89% με όρια συστήματος «από πύλη σε πύλη» ή «μετά την πύλη του αγροκτήματος» και αποτελεί τον κύριο παράγοντα GWP, με ποσοστά 70–80%, τα οποία συμφωνούν με την παρούσα μελέτη (Djekic et al., 2014; Finnegan et al., 2018). Η κατανάλωση ενέργειας στις μελέτες έχει συνήθως μεγαλύτερες εκπομπές από τη χρήση συσκευασίας, όπως και στην παρούσα μελέτη (Finnegan et al., 2018). Οι εκπομπές σε επίπεδο βιομηχανίας εξαιτίας της κατανάλωσης ενέργειας κυριαρχούν, λόγω των εκπομπών CO₂, N₂O και CH₄ από την καύση ορυκτών καυσίμων, συγκεκριμένα του πετρελαίου τύπου diesel για τη μεταφορά από τα βυτία και τα φορτηγά. Επίσης, λόγω των εκπομπών SO₂ και NO_x από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία εξαρτάται κυρίως από μη ανανεώσιμες πηγές (Gonzalez-Garcia et al., 2013). Για τις εκπομπές από την ηλεκτρική ενέργεια, καθοριστικό είναι το μείγμα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μελέτες προηγούμενων ετών οι εκπομπές από ηλεκτρική ενέργεια ήταν περισσότερες λόγω της αυξημένης χρήσης λιγνίτη (Laliotis & Bizelis, 2025). Στην παρούσα μελέτη οι εκπομπές αφορούν 54,01% ορυκτά καύσιμα, όπου το 6,28% προέρχεται από λιγνίτη και το 43,76 από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2025). Το σημείο αυτό δείχνει τη σημαντικότητα χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως στρατηγική για μετάβαση σε βιώσιμα συστήματα. Επίσης, οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας κυριαρχούν καθώς αφορούν κυρίως ενεργοβόρες διεργασίες, όπως θερμικές διεργασίες, ψύξη, ωρίμανση, τη λειτουργία του εργοστασίου και τις μεταφορές, που πραγματοποιούνται σε καθημερινή βάση. Όλα τα παραπάνω, συμβάλλουν σημαντικά στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο της μονάδας. Το τυροκομείο μελέτης αποτελεί τυπικό τυροκομείο μικρής κλίμακας, το οποίο επιβεβαιώνεται από την ετήσια παραγωγή του που αφορά 1.070.800 kg τυριού. Αυτό δικαιολογεί την κατανάλωση ενέργειας λόγω της περιορισμένης δυνατότητας οικονομίας σε επίπεδο κλίμακας, καθώς σε μεγάλης κλίμακας παραγωγής η ίδια υποδομή διαχειρίζεται μεγαλύτερο όγκο παραγωγής, με μικρότερη κατανάλωση ανά kg προϊόντος, ενώ η μικρή κλίμακα έχει συνήθως χαμηλότερη ενεργειακή

αποδοτικότητα εξοπλισμού. Συμπερασματικά, η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί το κύριο «κρίσιμο σημείο» εντός της βιομηχανίας. Η συνολική της επίδραση στο συνολικό αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής τυριού παραμένει περιορισμένη, καθώς αφορά το 2% του συνολικού αποτυπώματος, ωστόσο αποτελεί σημείο βελτίωσης μέσω λειτουργικών και τεχνολογικών παρεμβάσεων.

Εφόσον οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας κυριαρχούν, η κατανομή των εκπομπών ανά τύπο ενέργειας είναι καθοριστική για τον εντοπισμό των κρίσιμων σημείων σε επίπεδο βιομηχανίας. Στην παρούσα μελέτη, η έλλειψη μετρητών στα μηχανήματα καθιστά αδύνατη την κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των σταδίων, ωστόσο οι διαφορετικές πηγές ενέργειας επιτρέπουν την κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ θερμικών διεργασιών, ενέργειας για τη λειτουργία του εργοστασίου και την ψύξη, καθώς και για τις μεταφορές. Στη βιβλιογραφία το φυσικό αέριο ή προπάνιο χρησιμοποιείται συνήθως για θερμική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια για μηχανικές διεργασίες και φωτισμό και το diesel για τις μεταφορές (Kim et al., 2013), επιτρέποντας τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλογα με τον τύπο ενέργειας. Στην παρούσα μελέτη οι εκπομπές από την καύση diesel αντιστοιχούν στο 46% των συνολικών εκπομπών ενέργειας, οι εκπομπές από τη καύση υγραερίου στο 31% και από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο 23%. Η κατάταξη αυτή επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία, όπου η θερμική ενέργεια κυριαρχεί έναντι της ηλεκτρικής (Finnegan et al., 2018). Σε κάθε περίπτωση ο τύπος της ενέργειας που καταναλώνεται είναι καθοριστικός για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε επίπεδο βιομηχανίας. Οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας εξαρτώνται και από τα προϊόντα που παράγει η βιομηχανία (Djekic et al., 2014). Για παράδειγμα, η παραγωγή μαλακών τυριών, όπως η μοτσαρέλα, φαίνεται να απαιτεί λιγότερη ενέργεια από ημίσκληρα τυριά, με τις ενεργειακές απαιτήσεις να αφορούν κυρίως την παστερίωση και τη συντήρηση (Finnegan et al., 2018). Οι εκπομπές από τις μεταφορές στη βιβλιογραφία ποικίλλουν με τη μεταφορά γάλακτος από τις φάρμες στο τυροκομείο να είναι ο

πρώτος σημαντικός παράγοντας (Bava et al., 2018), ενώ να έχουν χαμηλότερο αντίκτυπο όταν οι μονάδες βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους (Djekic et al., 2014). Συνεπώς, η κατανάλωση diesel για τη μεταφορά γάλακτος από τη φάρμα στη βιομηχανία έχει εκπομπές που ποικίλλουν λόγω της μεταβλητότητας των αποστάσεων των βιομηχανιών από τη φάρμα και τα καταστήματα. Σε περιπτώσεις που οι μεταφορές αποτελούν κρίσιμο σημείο, οι μέσες αποστάσεις κυμαίνονται από 65 έως 200 χλμ (Finnegan et al., 2018). Στην παρούσα μελέτη τα όρια συστήματος περιλαμβάνουν τη μεταφορά γάλακτος και τη μεταφορά τυριού με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι εκπομπές και να αποτελεί λογικό αποτέλεσμα η κυριαρχία τους. Οι μεταφορές που αφορούν τη μεταφορά γάλακτος από τη φάρμα στο τυροκομείο συνεισφέρουν κατά 49% στις εκπομπές από καύση diesel για μεταφορά, ενώ από το τυροκομείο στα καταστήματα κατά 51%. Αυτό οφείλεται στο ότι το τυρί διανέμεται σε μικρότερες παρτίδες, σε πολλαπλούς προορισμούς και μπορεί να μην είναι πλήρως φορτωμένο το φορτηγό διανομής, ενώ η μεταφορά του γάλακτος γίνεται σε μικρότερες αποστάσεις, με το αποτέλεσμα να επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία (Kim et al., 2013). Συμπερασματικά, η τοποθεσία, το μέγεθος της μονάδας, η παλαιότητα των μηχανημάτων, ο ρυθμός αξιοποίησης της μονάδας, το επίπεδο αυτοματισμού και η επιλογή ενέργειας επηρεάζουν τις εκπομπές (Djekic et al., 2014). Η κατανάλωση ενέργειας με καύση ορυκτών καυσίμων και οι μεταφορές, αποτελούν τα κυρίαρχα «κρίσιμα σημεία» του βιομηχανικού σταδίου. Συνεπώς, σε επίπεδο βιομηχανίας μικρής κλίμακας, οι σημαντικότερες δυνατότητες μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα εντοπίζονται στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και στη βελτιστοποίηση των μεταφορών.

Σύμφωνα με την ανάλυση, μετά την κατανάλωση ενέργειας, κρίσιμο σημείο σε βιομηχανικό επίπεδο αποτελεί η χρήση υλικών συσκευασίας, το οποίο αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Riva et al., 2016). Οι εκπομπές εξαρτώνται από τον τύπο και την ποσότητα της συσκευασίας που χρησιμοποιείται (Finnegan et al., 2018), ενώ σχετίζονται με την παραγωγή των υλικών με

χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μεταφορά τους στη βιομηχανία (Djekic et al., 2014). Η μελέτη δείχνει ότι το 61% αντιστοιχεί στη δευτερογενή συσκευασία χαρτιού και το 39% στην πρωτογενή συσκευασία με τις εκπομπές από τα μεταλλικά δοχεία να κυριαρχούν σε σχέση με τις PET και τις μεμβράνες/φίλμ. Έτσι, παρόλο που τα χαρτόκουτα έχουν σχεδόν πάντα χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο στη βιβλιογραφία (Finnegan et al., 2018), στην παρούσα μελέτη αποτελούν δευτερογενή συσκευασία, γεγονός που δηλώνει ότι όλα τα τυριά συσκευάζονται με χαρτόκουτα και λόγω της ποσότητας προκύπτει η κατανομή αυτή. Το τυρί που παράγεται από τη βιομηχανία κατανέμεται σε διαφορετικούς τύπους τυριών. Μεταξύ των τυριών η φέτα και το κατσικίσιο τυρί παράγονται σε σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα και συσκευάζονται με μεταλλικά δοχεία, ενώ συσκευασίες PET και μεμβράνες/φίλμ χρησιμοποιούνται λιγότερο. Κατά συνέπεια, η ποσότητα δικαιολογεί την κατανομή, παρόλο που τα πλαστικά υλικά, όπως το PET και οι μεμβράνες χρησιμοποιούν ορυκτές πρώτες ύλες και είναι περισσότερο ρυπογόνα (Kim et al., 2013). Ταυτόχρονα, η σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση αυτών των υλικών δικαιολογεί ότι παρότι χρησιμοποιούνται σε μικρότερες ποσότητες η συνεισφορά τους είναι μετρήσιμη. Συνεπώς, παρόλο που τα διαθέσιμα δεδομένα για τη συσκευασία στη βιβλιογραφία είναι περιορισμένα και η συνεισφορά τους ήταν ελάχιστη σε όρια από το αγρόκτημα έως το χονδρικό εμπόριο ή τον λιανοπωλητή (Finnegan et al., 2018), η παρούσα ανάλυση επιβεβαιώνει τη συσκευασία ως δεύτερο κρίσιμο σημείο σε επίπεδο βιομηχανίας.

Οι εκπομπές από τον τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων έχουν μικρότερη συνεισφορά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε επίπεδο βιομηχανίας και κατανέμονται σε 88% σε στερεά απόβλητα και 12% σε υγρά απόβλητα. Μεταξύ των στερεών αποβλήτων, το ξύλο συνεισφέρει στις επιμέρους εκπομπές κατά 52%, το χαρτί κατά 46%, το μέταλλο και το πλαστικό κατά 2%. Η βιβλιογραφία παρέχει περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την ποσοτική κατανομή των στερεών αποβλήτων σε τυροκομεία μικρής κλίμακας με όρια έως τα καταστήματα λιανικής.

Ωστόσο, η κατανομή των στερεών αποβλήτων μπορεί να δικαιολογηθεί από τις ποσότητες των αποβλήτων, τη χρήση υλικών για δευτερογενείς συσκευασίες που αφορούν στο σύνολο τα τυριά της μονάδας και μένουν στη μονάδα μετά τη διανομή στα καταστήματα λιανικής. Αντίθετα, τα απόβλητα από μέταλλο και πλαστικό που προέρχονται από τη συσκευασία καταλήγουν κυρίως στον καταναλωτή και είναι εκτός ορίων συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά είναι μεταβλητά στη βιβλιογραφία και εξαρτώνται από τον τρόπο διαχείρισης των λυμάτων. Είναι αναμενόμενο οι εκπομπές από τα στερεά απόβλητα να κυριαρχούν λόγω της ποσότητας, της απόρριψης στα απορρίμματα και της καύσης τους, ενώ τα υγρά απόβλητα επιβαρύνουν άλλες κατηγορίες περιβαλλοντικού αποτυπώματος, όπως ο ευτροφισμός. Στη βιβλιογραφία οι γαλακτοβιομηχανίες παράγουν μεγάλες ποσότητες λυμάτων με υψηλό οργανικό φορτίο (Gonzalez-Garcia et al., 2013) με τη σύνθεση να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος και τα λευκά προϊόντα να έχουν μικρότερο αντίκτυπο σε σύγκριση με τα κίτρινα (Djekic et al., 2014). Σημαντικός παράγοντας είναι και ο μεγάλος όγκος λυμάτων από τους εντατικούς καθαρισμούς (Finnegan et al., 2018). Τα λύματα μπορούν μέσω βιολογικού καθαρισμού να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν επιτόπου, με τις εκπομπές να περιορίζονται αποκλειστικά στη χρήση ενέργειας για τη λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού και στη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων (Gonzalez-Garcia et al., 2013). Στη μελέτη περίπτωσης το τυρόγαλα επαναχρησιμοποιείται για την παραγωγή τυριών τυρογάλακτος ή λαμβάνεται από άλλη βιομηχανία. Τα λύματα υποβάλλονται σε βιολογικό καθαρισμό και τα οργανικά λύματα που προκύπτουν, παραλαμβάνονται επίσης από άλλη βιομηχανία, με αποτέλεσμα οι εκπομπές να μεταφέρονται σε άλλες βιομηχανίες εκτός ορίων συστήματος. Η ανάκτηση του ορού γάλακτος και η παραλαβή αυτού και των οργανικών αποβλήτων αποτελεί βιώσιμη πρακτική δικαιολογώντας το χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των υγρών λυμάτων (Ghinea & Leahu 2023). Συνεπώς, τα λύματα έχουν εξαιρετικά μεταβλητή σύνθεση, ανάλογα με την τεχνολογία που εφαρμόζεται και το εάν ο ορός

γάλακτος διαχωρίζεται (Djekic et al., 2014). Η κυριαρχία των στερεών αποβλήτων κρίνεται αναμενόμενη, δεδομένου ότι τα υγρά απόβλητα επηρεάζουν κυρίως άλλες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οι εκπομπές εκτός ορίων επηρεάζουν άμεσα το αποτέλεσμα. Το νερό έχει αμελητέα συνεισφορά στο αποτύπωμα άνθρακα στην παρούσα μελέτη, παρόλο που καταναλώνεται σημαντική ποσότητα νερού. Αυτό επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία, καθώς η κατανάλωση νερού στη γαλακτοβιομηχανία συνδέεται κυρίως με κατηγορίες επίπτωσης όπως η εξάντληση υδατικών πόρων και ο ευτροφισμός, ενώ η συνεισφορά της στο αποτύπωμα άνθρακα είναι περιορισμένη και αφορά κυρίως την ενέργεια για άντληση και επεξεργασία (Finnegan et al., 2018).

Συνολικά, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τυριού σε επίπεδο βιομηχανίας στην παρούσα μελέτη εκτιμήθηκε σε 0,37 kg CO₂-eq ανά kg τυριού. Η τιμή βρίσκεται στο κατώτερο άκρο τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για το στάδιο της μεταποίησης. Σύμφωνα με τη μελέτη των Nunes et al. (2020) η γαλακτοβιομηχανία που έχει εκπομπές περίπου 0,32 kg CO₂eq αποτελεί λιγότερο ρυπογόνο εργοστάσιο, δεδομένο που ταιριάζει και με την παρούσα μελέτη περίπτωσης (Nunes et al., 2020). Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι το τυροκομείο είναι τυπικό μικρής κλίμακας, με υψηλότερη χρήση εργατικού δυναμικού αντί για ηλεκτρικά μηχανήματα, απουσιάζει η μακρά ωρίμανση για το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής και υπόκεινται σε περιορισμούς και παραδοχές οι οποίες συντελούν στο αποτέλεσμα αυτό.

Το αποτύπωμα άνθρακα για την παραγωγή 1 kg τυριού στην παρούσα μελέτη περίπτωσης επηρεάζεται από συγκεκριμένες παραδοχές και περιορισμούς. Ειδικότερα, η μελέτη εκπονήθηκε χωρίς πλήρη πρόσβαση σε εμπορικές βάσεις δεδομένων LCA, γεγονός που περιόρισε τη δυνατότητα χρήσης εξατομικευμένων συντελεστών εκπομπών. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε διαθέσιμους εθνικούς και διεθνείς συντελεστές εκπομπών, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές και εισάγουν αβεβαιότητα. Το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής γάλακτος δεν υπολογίστηκε από πρωτογενή δεδομένα, καθώς οι διαθέσιμες

πληροφορίες αφορούσαν μόνο την ετήσια εισροή γάλακτος. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικοί συντελεστές που αφορούσαν ημiekτατικά συστήματα εκτροφής αιγοπροβάτων σε ορεινές ημiekτατικές εκμεταλλεύσεις στην Ελλάδα. Οι συντελεστές αυτοί ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως τις πραγματικές εκπομπές, δεδομένου ότι ορισμένες φάρμες ενδέχεται να εφαρμόζουν διαφορετικά συστήματα εκτροφής ή διαφορετική σύσταση ζωοτροφών, ενώ οι διαθέσιμοι συντελεστές προέρχονται από μελέτες ορεινών εκμεταλλεύσεων της Πελοποννήσου. Το τυροκομείο μελέτης προμηθεύεται γάλα από το γεωγραφικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, γεγονός που ενδέχεται να δημιουργεί αποκλίσεις λόγω διαφορών στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και τις κλιματικές συνθήκες, οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν στην παρούσα ανάλυση. Ως εκ τούτου, εφαρμόστηκαν μέσοι συντελεστές εκπομπών, Tier 1 με μετατροπή των δεδομένων σε FPCM, λαμβάνοντας υπόψιν τη σύσταση του γάλακτος και αυξάνοντας την αβεβαιότητα. Οι συντελεστές εκπομπών για την ενέργεια προέρχονται από εθνικές πηγές για το έτος αναφοράς και ήταν οι μόνοι διαθέσιμοι και προσβάσιμοι κατά τον χρόνο εκπόνησης της μελέτης. Ωστόσο, αποτελούν μέσους συντελεστές, οι οποίοι δε λαμβάνουν υπόψιν πιθανές διακυμάνσεις στη σύνθεση του ενεργειακού μείγματος ή στην απόδοση των μηχανημάτων. Επίσης, οι βιβλιογραφικοί συντελεστές εκπομπών δεν διασφαλίζουν πλήρη τεχνολογική αντιστοιχία με τον εξοπλισμό και τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της μελετώμενης μονάδας, όπως η παλαιότητα των μηχανημάτων, ο βαθμός συντήρησης και το επίπεδο αυτοματισμού, παράγοντες που δύναται να επηρεάζουν ουσιαστικά την ενεργειακή κατανάλωση και τις αντίστοιχες εκπομπές. Οι συντελεστές εκπομπών για την κατανάλωση καυσίμων για τις μεταφορές, δεν υπολογίζουν το φορτίο του οχήματος ανά διαδρομή και τα χαρακτηριστικά του οχήματος μεταφοράς. Έτσι, δε λήφθηκαν υπόψιν παράμετροι όπως οι επιστροφές χωρίς φορτίο, η διαδρομή χωρίς πλήρες φορτίο, η ψυκτική λειτουργία, παράγοντες που επηρεάζουν το αποτύπωμα. Οι συντελεστές εκπομπών για την κατανάλωση νερού, τη χρήση υλικών συσκευασίας και τη διαχείριση

στερεών αποβλήτων στην παρούσα μελέτη είναι ευρείας χρήσης και όχι προσαρμοσμένοι στις ελληνικές συνθήκες, ενώ το ίδιο ισχύει και για τους συντελεστές που αφορούν τη διαχείριση υγρών αποβλήτων. Πρόσθετες πρώτες ύλες και προϊόντα καθαρισμού και απολύμανσης εξαιρέθηκαν από την ανάλυση λόγω έλλειψης αξιόπιστων συντελεστών εκπομπών. Αν και οι εισροές αυτές εκτιμάται ότι έχουν μικρή συνεισφορά στο συνολικό αποτύπωμα άνθρακα, η εξαίρεσή τους αποτελεί πηγή αβεβαιότητας. Η κατανάλωση ενέργειας και νερού στο τυροκομείο καταγράφηκε σε συνολικό επίπεδο εγκατάστασης και όχι ανά επιμέρους διεργασία, παστερίωση, ωρίμανση, συσκευασία, λόγω έλλειψης επιμέρους μετρητών. Η προσέγγιση αυτή ενδέχεται να περιορίζει την ακρίβεια στον εντοπισμό επιμέρους διεργασιών με υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το εξεταζόμενο τυροκομείο παράγει διαφορετικούς τύπους τυριών, με διαφοροποιήσεις ως προς τη διάρκεια ωρίμανσης, τις απαιτήσεις σε ενέργεια και τη σύσταση της πρώτης ύλης, καθώς και τυριά τυρογάλακτος. Συνεπώς, υπάρχει διαφορά μεταξύ διαφορετικών τεχνολογικών διεργασιών, τύπων τυριών ή περιόδων αυξημένης παραγωγής, περιορίζοντας την ανάλυση της εσωτερικής μεταβλητότητας του βιομηχανικού σταδίου. Παρά τις διαφοροποιήσεις αυτές, η λειτουργική μονάδα της μελέτης ορίστηκε ως 1 kg τελικού προϊόντος, ανεξαρτήτως τύπου τυριού. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συνολική εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγής, ωστόσο δεν αποτυπώνει πλήρως τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους προϊόντων, ιδίως σε σχέση με τον χρόνο ωρίμανσης και τις ενεργειακές απαιτήσεις. Η ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα ενός μόνο έτους αναφοράς και σε μέσες ετήσιες τιμές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η εποχικότητα της παραγωγής και οι ενδεχόμενες διακυμάνσεις στη ζήτηση, στις μεταφορές και στην κατανάλωση ενέργειας. Στην μελέτη δεν εφαρμόστηκε επιμερισμός (allocation) περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε συν-προϊόντα, καθώς ο ορός γάλακτος που παράγεται κατά την τυροκομία μεταποιείται και αξιοποιείται σε άλλη επιχείρηση και συνεπώς δεν θεωρήθηκε απόβλητο εντός των ορίων της παρούσας μελέτης. Επιπλέον, από το βιολογικό καθαρισμό

προκύπτουν οργανικά απόβλητα τα οποία παραλαμβάνονται ομοίως από άλλη βιομηχανία και είναι εκτός ορίων. Η μελέτη δεν επιτρέπει την αξιολόγηση πολλαπλών κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων για άλλες κατηγορίες επιπτώσεων. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα δεν αποτυπώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τυριού, αλλά μόνο το αποτύπωμα άνθρακα. Τέλος, η έλλειψη δεδομένων για τα επόμενα στάδια περιορίζει τη μελέτη στα όρια συστήματος από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής. Όλα τα παραπάνω, οδηγούν σε εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα, με αβεβαιότητα και πιθανότητα υποεκτίμησης σε επίπεδο βιομηχανίας. Παρά τους περιορισμούς, τα ερευνητικά ερωτήματα απαντήθηκαν και τα αποτελέσματα αποτελούν εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα εντός των ορίων της παρούσας μελέτης.

Η εργασία αυτή έχει ως επιμέρους στόχο τον εντοπισμό των κρίσιμων σημείων σε επίπεδο βιομηχανίας για τη πρόταση βέλτιστων πρακτικών από τη βιβλιογραφία. Δεδομένου ότι οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας κυριαρχούν σε επίπεδο βιομηχανίας, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες αποτελεί βέλτιστη πρακτική με μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Ghinea & Leahu 2023). Επίσης, βέλτιστη πρακτική σε μονάδα μικρής κλίμακας αποτελεί η αυξημένη χρήση ανθρώπινου εργατικού δυναμικού έναντι αυτοματοποιημένου μηχανισμού για τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Για τις εκπομπές εξαιτίας των μεταφορών, προτείνεται η τοπική διανομή και πώληση προϊόντων. Επίσης, προτείνεται η μείωση της απόστασης μεταφοράς του γάλακτος, μέσω συγκέντρωσης του από απομακρυσμένες περιοχές σε ενδιάμεσες τοποθεσίες περιορίζοντας τον αριθμό και την απόσταση των δρομολογίων (Bava et al., 2018). Πρόσθετες προτάσεις περιλαμβάνουν τη χρήση οχημάτων χαμηλότερων εκπομπών, όπως ηλεκτρικά οχήματα για μείωση των εκπομπών από χρήση diesel (Ghinea & Leahu 2023). Επιπλέον, η αξιοποίηση οργανικών αποβλήτων και τυρογάλακτος μέσω αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοαερίου μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών και στη βελτίωση της

αποδοτικότητα της μονάδας (Ghinea & Leahu 2023). Σε επίπεδο εξοπλισμού, η αντικατάσταση παλαιών μηχανημάτων με νέο εξοπλισμό ανώτερης ενεργειακής κλάσης αποτελεί σημαντική πρακτική μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας (Bava et al., 2018). Παράλληλα, οι επισκευές διαρροών σε συστήματα ατμού και ψύξης, η προσαρμογή των κύκλων καθαρισμού, η μείωση του χρόνου αποστείρωσης, το κλείσιμο των μηχανημάτων εκτός ωρών λειτουργίας και η μείωση της θερμοκρασίας του νερού καθαρισμού μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές (Djekic et al., 2014). Οι παραπάνω πρακτικές μπορεί να μειώνουν το αποτύπωμα άνθρακα, ωστόσο πρέπει να αξιολογηθούν συνδυαστικά και να μελετηθούν εκτενώς πριν εφαρμοστούν, ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμες, να διασφαλίζουν την ασφάλεια και να μην υποβαθμίζουν την ποιότητα των παραγόμενων τυριών.

Η παρούσα μελέτη αποτελεί εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγής 1 kg τυριού από γίδινο και πρόβειο γάλα συμπεριλαμβάνοντας ΠΟΠ τυριά, όπως η φέτα και το μανούρι που παράγονται σε τυροκομεία μικρής κλίμακας στην Ελλάδα και δίνει κατανομή επιπτώσεων, ενώ εντοπίζει τα κρίσιμα σημεία σε επίπεδο βιομηχανίας. Ωστόσο, δεδομένων των περιορισμών, υπάρχουν προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Ειδικότερα, προτείνεται μελέτη με συλλογή πρωτογενών δεδομένων σε επίπεδο φάρμας ή χρήση εμπορικών βάσεων LCA με συντελεστές προσαρμοσμένους στις ελληνικές συνθήκες. Ακόμα, προτείνεται μελέτη με εγκατάσταση επιμέρους μετρητών ενέργειας ανά διεργασία στη βιομηχανία για ακριβέστερο εντοπισμό ενεργοβόρων σταδίων, καθώς και ανάλυση ανά τύπο τυριού ή ειδικές μελέτες για την παραγωγή 1 kg φέτας ΠΟΠ και 1 kg μανούρι ΠΟΠ. Επίσης, η αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων επιμερισμού (allocation) μεταξύ κύριου προϊόντος και υποπροϊόντων βάση μάζας, ενέργειας ή οικονομικής αξίας. Προτείνεται, η ενσωμάτωση λεπτομερέστερων δεδομένων μεταφορών. Σημαντική είναι η μελέτη με ανάλυση κι άλλων κατηγοριών επιπτώσεων, συμπληρωματικά με την κλιματική αλλαγή, όπως ο ευτροφισμός, η οξίνιση, η κατανάλωση υδατικών πόρων και η χρήση φυσικών πόρων, για πλήρη μελέτη του περιβαλλοντικού

αποτυπώματος. Καθώς και η μελέτη σε διαφορετικά όρια συστήματος και κυρίως σε μεταγενέστερα. Σε κάθε περίπτωση η πρόσβαση και η χρήση εμπορικών βάσεων δεδομένων θα συμβάλλει στην καλύτερη εκτίμηση του αποτυπώματος. Οι παραπάνω προτάσεις θα υποστηρίξουν και την πρόταση στρατηγικών μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος με σύγχρονα και πιο στοχευμένα δεδομένα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εκτίμησε το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής τυριού σε τυροκομείο μικρής κλίμακας στην Ελλάδα, με την εφαρμογή βασικών μεθοδολογικών στοιχείων LCA και όρια συστήματος «από τη φάρμα έως τα καταστήματα λιανικής πώλησης» για το έτος αναφοράς 2024.

Από την παρούσα εργασία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής 1 kg συσκευασμένου τυριού στο τυροκομείο μελέτης εκτιμήθηκε σε 15,42 kg CO₂-eq/kg, τιμή που βρίσκεται στο ανώτερο εύρος της διεθνούς βιβλιογραφίας.
- Η τιμή του αποτυπώματος άνθρακα αποδίδεται κυρίως στη χρήση γίδινου και πρόβειου γάλακτος, κυρίως πρόβειου.
- Η πρωτογενής παραγωγή γάλακτος αποτελεί το κυρίαρχο στάδιο του αποτυπώματος άνθρακα, συνεισφέροντας 98% των συνολικών εκπομπών, ενώ το βιομηχανικό στάδιο συμβάλλει μόλις κατά 2%.
- Η κατανομή των εκπομπών στην παραγωγή γάλακτος ακολουθεί την εισροή της πρώτης ύλης, με το πρόβειο γάλα να συνεισφέρει το μεγαλύτερο ποσοστό σε σύγκριση με άλλα είδη γάλακτος.
- Σε επίπεδο βιομηχανίας, κρίσιμο σημείο αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας με ποσοστό 78,40%, ακολουθεί η συσκευασία με 19,71%, ενώ οι εκπομπές από τη διαχείριση των αποβλήτων και την κατανάλωση νερού είναι περιορισμένες.
- Οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας σχετίζονται κυρίως με τη χρήση ορυκτών καυσίμων και μεταφορών, με αναγκαίες τις βέλτιστες πρακτικές στα σημεία αυτά.

- Τα αποτελέσματα επηρεάζονται από μεθοδολογικές παραδοχές και περιορισμούς, όπως η χρήση μέσων συντελεστών εκπομπών, η απουσία επιμέρους μετρητών ενέργειας και η μη εφαρμογή κατανομής.
- Συνολικά, η μελέτη επιβεβαιώνει ότι η μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγής τυριού εξαρτάται πρωτίστως από παρεμβάσεις στην παραγωγή γάλακτος, ενώ σε επίπεδο βιομηχανίας απαιτούνται στοχευμένες βελτιώσεις στην κατανάλωση ενέργειας, στις μεταφορές και στη συσκευασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Hellenic Statistical Authority. (2025). Annual agricultural statistical survey: Final results for the year 2023. ELSTAT.

ΔΑΠΕΕΠ. (2025). Στατιστικά στοιχεία παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης.

Υπουργείο Ανάπτυξης. (2014). Κώδικας τροφίμων και ποτών, Άρθρο 83. Εθνικό Τυπογραφείο.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). Εθνικές πολιτικές για την ενέργεια και το κλίμα. ΥΠΕΝ.

Ξένη βιβλιογραφία

Ahmad, S., Wong, K. Y., & Ahmad, R. (2019). Life cycle assessment for food production and manufacturing: recent trends, global applications and future prospects. *Procedia Manufacturing*, 34, 49-57.

Anifantakis, E. M. (1991). Traditional feta cheese. Feta and related cheeses, 49-69.

Anifantakis, E. M. (1991). Greek cheeses: A tradition of centuries. National Dairy Committee of Greece.

Arzoumanidis, I., Salomone, R., Petti, L., Mondello, G., & Raggi, A. (2017). Is there a simplified LCA tool suitable for the agri-food industry? An assessment of selected tools. *Journal of Cleaner Production*, 149, 406-425.

Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). The hitch hiker's guide to LCA (Vol. 1).

Bava, L., Bacenetti, J., Gislon, G., Pellegrino, L., D'Incecco, P., Sandrucci, A., ... & Zucali, M. (2018). Impact assessment of traditional food manufacturing: The case of Grana Padano cheese. *Science of the total environment*, 626, 1200-1209.

Boehm, R., Wilde, P. E., Ver Ploeg, M., Costello, C., & Cash, S. B. (2018). A comprehensive life cycle assessment of greenhouse gas emissions from US household food choices. *Food Policy*, 79, 67-76.

Cabral, C. F. S., Veiga, L. B. E., Araújo, M. G., & de Souza, S. L. Q. (2020). Environmental Life Cycle Assessment of goat cheese production in Brazil: A path towards sustainability. *Lwt*, 129, 109550.

Calderon, L. A., Iglesias, L., Laca, A., Herrero, M., & Díaz, M. (2010). The utility of Life Cycle Assessment in the ready meal food industry. *Resources, conservation and recycling*, 54(12), 1196-1207.

Canellada, F., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2018). Environmental impact of cheese production: A case study of a small-scale factory in southern Europe and global overview of carbon footprint. *Science of the total Environment*, 635, 167-177.

Carvalho, L. S., Willers, C. D., Soares, B. B., Nogueira, A. R., de Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2022). Environmental life cycle assessment of cow milk in a conventional

semi-intensive Brazilian production system. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 21259-21274.

Celozzi, S., Mattiello, S., Battini, M., Bailo, G., Bava, L., Tamburini, A., ... & Zucali, M. (2020). Evaluation of the environmental sustainability of goat's milk and cheese production using the LCA approach.

Clairand, J. M., Briceno-Leon, M., Escriva-Escriva, G., & Pantaleo, A. M. (2020). Review of energy efficiency technologies in the food industry: Trends, barriers, and opportunities. *IEEE Access*, 8, 48015-48029.

Clune, S., Crossin, E., & Verghese, K. (2017). Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of cleaner production*, 140, 766-783.

Cruz-Rivero, L., Hernández, E. A., Lince-Olguín, E., Mar-Orozco, C. E., López-García, S. A., & Cruz-Martínez, P. Y. (2025). Life cycle assessment applied to milk production and processing: An integrative systematic literature review. *Sustainability*, 17(4), 1615.

Cucek, L., Klemes, J. J., & Kravanja, Z. (2015). Overview of environmental footprints. In *Assessing and measuring environmental impact and sustainability* (pp. 131-193). Butterworth-Heinemann.

Curran, M. A. (2014). Strengths and limitations of life cycle assessment. In *Background and future prospects in life cycle assessment* (pp. 189-206). Dordrecht: Springer Netherlands.

Dalla Riva, A., Burek, J., Kim, D., Thoma, G., Cassandro, M., & De Marchi, M. (2017). Environmental life cycle assessment of Italian mozzarella cheese: Hotspots and improvement opportunities. *Journal of dairy science*, 100(10), 7933-7952.

Damiani, M., Ferrara, N., & Ardente, F. (2022). Understanding product environmental footprint and organisation environmental footprint methods.

DEFRA. (2025). UK greenhouse gas conversion factors for company reporting. Department for Environment, Food & Rural Affairs.

Djekic, I., Miocinovic, J., Tomasevic, I., Smigic, N., & Tomic, N. (2014). Environmental life-cycle assessment of various dairy products. *Journal of cleaner production*, 68, 64-72.

Drosinos, E. H., & Siana, P. S. (2007). HACCP in the cheese manufacturing process, a case study. In *Food Safety: A Practical and Case Study Approach* (pp. 91-111). Boston, MA: Springer US.

Dubeuf, J. P., Morales, F. D. A. R., & Genis, J. C. (2010). Initiatives and projects to promote the Mediterranean local cheeses and their relations to the development of livestock systems and activities. *Small Ruminant Research*, 93(2-3), 67-75.

Egas, D., Ponsá, S., & Colon, J. (2020). CalcPEFDairy: A Product Environmental Footprint compliant tool for a tailored assessment of raw milk and dairy products. *Journal of Environmental Management*, 260, 110049.

European Commission. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system (COM(2020) 381 final). European Commission.

European Union. (2012). Regulation (EU) No 1151/2012 of the European Parliament and of the Council on quality schemes for agricultural products and foodstuffs. Official Journal of the European Union, L 343, 1–29.

Famiglietti, J., Guerci, M., Proserpio, C., Ravaglia, P., & Motta, M. (2019). Development and testing of the product environmental footprint milk tool: a comprehensive LCA tool for dairy products. *Science of the Total Environment*, 648, 1614-1626.

Fang, K., Song, S., Heijungs, R., de Groot, S., Dong, L., Song, J., & Wiloso, E. I. (2016). The footprint's fingerprint: on the classification of the footprint family. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 23, 54-62.

Fernandez-Amador, O., Francois, J. F., Oberdabernig, D. A., & Tomberger, P. (2020). The methane footprint of nations: Stylized facts from a global panel dataset. *Ecological economics*, 170, 106528.

Finnegan, W., & Goggins, J. (2021). Environmental impact of the dairy industry. In *Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption* (pp. 129-146). Academic Press.

Finnegan, W., Goggins, J., Clifford, E., & Zhan, X. (2017). Global warming potential associated with dairy products in the Republic of Ireland. *Journal of Cleaner Production*, 163, 262-273.

Finnegan, W., Yan, M., Holden, N. M., & Goggins, J. (2018). A review of environmental life cycle assessment studies examining cheese production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(9), 1773-1787.

Flysjo, A., Thrane, M., & Hermansen, J. E. (2014). Method to assess the carbon footprint at product level in the dairy industry. *International Dairy Journal*, 34(1), 86-92.

Georgopoulou, E., Gakis, N., Kapetanakis, D., Voloudakis, D., Markaki, M., Sarafidis, Y., ... & Tzamtzis, I. (2024). Climate Change Risks for the Mediterranean Agri-Food Sector: The Case of Greece. *Agriculture*, 14(5), 770.

Ghinea, C., & Leahu, A. (2023). Life cycle assessment of sheep cheese production in a small dairy factory from Romanian rural area. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 6986-7004.

Gonzalez-Garcia, S., Castanheira, É. G., Dias, A. C., & Arroja, L. (2013). Environmental performance of a Portuguese mature cheese-making dairy mill. *Journal of cleaner production*, 41, 65-73.

GreenDelta GmbH. (2026). openLCA software documentation and databases. GreenDelta GmbH.

Guinée, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards (Vol. 7). Springer Science & Business Media.

Hauschild, M. Z. (2017). Introduction to LCA methodology. In *Life cycle assessment: theory and practice* (pp. 59-66). Cham: Springer International Publishing.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (Chapter 5: Food security). IPCC.

International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006—Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. ISO.

International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006—Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. ISO.

IPCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Khanpit, V., Viswanathan, S., & Hinrichsen, O. (2024). Environmental impact of animal milk vs plant-based milk: Critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449, Article 141703. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141703>

Kim, D., Thoma, G., Nutter, D., Milani, F., Ulrich, R., & Norris, G. (2013). Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 1019-1035.

Klimes, J. J. (Ed.). (2015). Assessing and measuring environmental impact and sustainability. Butterworth-Heinemann.

Koukaliaroglou-van Houwelingen, M. (2009). Ioannis S. Arvanitoyannis, Theodoros H. Varzakas and. HACCP and ISO 22000, 91.

Kristensen, T., Søgaard, K., Eriksen, J., & Mogensen, L. (2015). Carbon footprint of cheese produced on milk from Holstein and Jersey cows fed hay differing in herb content. *Journal of Cleaner Production*, 101, 229-237.

Kumar, M., Choubey, V. K., Deepak, A., Gedam, V. V., & Raut, R. D. (2021). Life cycle assessment (LCA) of dairy processing industry: A case study of North India. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129331.

Laca, A., Gómez, N., Laca, A., & Díaz, M. (2020). Overview on GHG emissions of raw milk production and a comparison of milk and cheese carbon footprints of two different systems from northern Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1650-1666.

Laliotis, G. P., & Bizelis, I. (2025). Assessment of greenhouse gas emissions and carbon footprint in mountainous semi-extensive dairy sheep and goat farms in Greece. *Environments*, 12(7), 232.

Le Feon, S., Papadakis, A., Yannou-Le Bris, G., Auburger, J., Chatzitheodorou, D., Aubin, J., & Pénicaud, C. (2023). Life cycle inventory and life cycle impact assessment datasets of PDO Feta production in Stymfalia region, Greece. *Data in Brief*, 48, 109207.

Li, X., Hu, Z., Cao, J., & Xu, X. (2022). The impact of environmental accountability on air pollution: A public attention perspective. *Energy Policy*, 161, 112733.

Litopoulou-Tzanetaki, E., & Tzanetakis, N. (2014). The microfloras of traditional Greek cheeses. *Cheese and Microbes*, 177-218.

Matustik, J., & Koci, V. (2021). What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124833.

Mazzetto, A. M., Falconer, S., & Ledgard, S. (2022). Mapping the carbon footprint of milk production from cattle: A systematic review. *Journal of Dairy Science*, 105(12), 9713-9725.

Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M. G., Sapkota, T., Tubiello, F. N., & Xu, Y. (2019).

Food security. In *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Milani, F. X., Nutter, D., & Thoma, G. (2011). Invited review: Environmental impacts of dairy processing and products: A review. *Journal of dairy science*, 94(9), 4243-4254.

Nigri, E. M., Barros, A. C. D., Rocha, S. D. F., & Romeiro Filho, E. (2014). Assessing environmental impacts using a comparative LCA of industrial and artisanal production processes: " Minas Cheese" case. *Food Science and Technology*, 34, 522-531.

Nikolic, D., Jovanović, S., Jurišević, N., Nikolić, N., Radulović, J., Velemir Radović, M., & Grujić, I. (2025). Sustainable Design in Agriculture—Energy Optimization of Solar Greenhouses with Renewable Energy Technologies. *Energies*, 18(2), 416.

Novaković, T., Novaković, D., Milić, D., Tomaš Simin, M., Radišić, M., Radišić, M., ... & Mihajlović, M. (2025). Assessment of Technical and Eco-Efficiency of Dairy Farms in the Republic of Serbia: Towards the Implementation of a Circular Economy. *Agriculture*, 15(8), 899.

Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., & Sala, S. (2017). Environmental impacts of food consumption in Europe. *Journal of cleaner production*, 140, 753-765.

Nunes, Ó. S., Gaspar, P. D., Nunes, J., Quinteiro, P., Dias, A. C., & Godina, R. (2020). Life-cycle assessment of dairy products—Case study of regional cheese produced in Portugal. *Processes*, 8(9), 1182.

Palmieri, N., Forleo, M. B., & Salimei, E. (2017). Environmental impacts of a dairy cheese chain including whey feeding: An Italian case study. *Journal of Cleaner Production*, 140, 881-889.

Pappa, E. C., Kondyli, E., Vlachou, A. M., & Malamou, E. (2025). Characteristics of a hard cheese manufactured using high heat-treated sheep or mixed sheep-goat milk. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 76(2), 9363-9374.

Ritchie, H. (2019). Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions. *Our world in data*.

Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2022). Environmental impacts of food production. *Our world in data*.

Rokicki, B., & Fayisa, T. (2026). New evidence on the determinants of agri-food GHG emissions in low and middle-income countries. *Environmental Impact Assessment Review*, 117, 108155.

Sachan, R. S. K., & Karnwal, A. (2022). Advancement in cheese production technology. In *Advances in dairy microbial products* (pp. 191-208). Woodhead Publishing.

Salas-Vargas, C., Brunett-Pérez, L., Espinosa-Ortiz, V. E., & Martínez-García, C. G. (2021). Environmental impact of Oaxaca cheese production and wastewater from artisanal dairies under two scenarios in Aculco, State of Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127586.

Santos Jr, H. C. M., Maranduba, H. L., de Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2017). Life cycle assessment of cheese production process in a small-sized dairy industry in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3470-3482.

- Santos, L. D. L. C. D., Renato, N. D. S., Florindo, T. J., Rosa, A. P., & Borges, A. C. (2022). Life cycle assessment of dairy products: a case study of a dairy factory in Brazil. *Sustainability*, 14(15), 9646.
- SILVA, A. A. D., Elabras-Veiga, L. B., SOUZA, S. L. Q. D., & Araújo, M. G. (2023). Life cycle assessment of minas frescal cheese and cured minas cheese: a comparative analysis. *Food Science and Technology*, 43, e109522.
- Silva, D. A. L., Nunes, A. O., Piekarski, C. M., da Silva Moris, V. A., de Souza, L. S. M., & Rodrigues, T. O. (2019). Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 304-315.
- Silverio, K. S., Freitas, D., & Dias, J. M. (2025). Energy footprint of cheese: A critical review of the environmental impact and opportunities for sustainability. *Applied Sciences*, 15(14), 8072.
- Sintori, A., Tzouramani, I., & Lontakis, A. (2019). Greenhouse gas emissions in dairy goat farming systems: Abatement potential and cost. *Animals*, 9(11), 945.
- Soares, B. B., Alves, E. C., de Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2021). Environmental impact of cheese production. In *Environmental impact of agro-food industry and food consumption* (pp. 169-187). Academic Press.
- Soares, J., Miguel, I., Venâncio, C., Lopes, I., & Oliveira, M. (2021). On the path to minimize plastic pollution: The perceived importance of education and knowledge dissemination strategies. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112890.
- Spreafico, C., & Russo, D. (2021). A sustainable cheese packaging survey involving scientific papers and patents. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126196.
- Steubing, B., Wernet, G., Reinhard, J., Bauer, C., & Moreno-Ruiz, E. (2016). The ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1269-1281.
- Uctug, F. G. (2019). The environmental life cycle assessment of dairy products. *Food Engineering Reviews*, 11(2), 104-121.
- Vagnoni, E., Franca, A., Porqueddu, C., & Duce, P. (2017). Environmental profile of Sardinian sheep milk cheese supply chain: A comparison between two contrasting dairy systems. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1078-1089.
- Vanham, D., Leip, A., Galli, A., Kastner, T., Bruckner, M., Uwizeye, A., ... & Hoekstra, A. Y. (2019). Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Science of the total environment*, 693, 133642.
- Walstra, P., Walstra, P., Wouters, J. T., & Geurts, T. J. (2005). *Dairy science and technology*. CRC press.
- Wang, L. (2013). Waste management in the dairy industry. In C. M. Galanakis (Ed.), *Food industry wastes: Assessment and recuperation of commodities* (pp. 227–246). Academic Press.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The international journal of life cycle assessment*, 21(9), 1218-1230.

Zhao, R., Xu, Y., Wen, X., Zhang, N., & Cai, J. (2018). Carbon footprint assessment for a local branded pure milk product: a lifecycle based approach. *Food Science and Technology*, 38, 98-105.

ABSTRACT

Food production exerts environmental pressure due to growing demand, the intensive use of natural resources, and the release of greenhouse gas emissions. In this context, the agri-food sector, and in particular the dairy industry, has emerged as a key area for applying environmental assessment and designing sustainable practices. Among dairy products, cheese is of particular interest because its production requires large quantities of raw milk and involves energy-intensive processing and preservation operations.

This master's thesis aims to estimate the environmental footprint of cheese production in a small-scale dairy plant in Greece by applying core methodological elements of Life Cycle Assessment (LCA), using the carbon footprint indicator. The study is based on a case study of a cheese plant that processes exclusively sheep and goat milk and produces various types of cheese, including Protected Designation of Origin (PDO) products such as feta and manouri.

The analysis was conducted for a functional unit of 1 kg of packaged cheese, with system boundaries defined as “cradle to retail stores” and a reference year of 2024. The assessed stages include primary milk production, transport to the cheese plant, industrial processing, packaging, waste management, and distribution of the final product. The consumption phase and end-of-life disposal were not considered. Emissions were estimated using secondary emission factors from the literature and international guidelines due to limited availability of primary data and the lack of access to commercial LCA databases.

The results indicate that the total carbon footprint of cheese production is estimated at 15.42 kg CO₂-eq per kg of final product. The majority of emissions (98%) are attributed to the primary milk production stage, corresponding to 15.05 kg CO₂-eq, confirming the literature finding that milk production is the dominant stage shaping the environmental footprint of dairy products. In contrast, industrial processing and distribution contribute only 2% of total emissions, with a footprint of 0.37 kg CO₂-eq per kg of cheese.

At the industrial stage, the analysis showed that energy consumption is the main “hotspot,” accounting for 78.40% of emissions, followed by packaging materials (19.71%), solid waste management (1.65%), and water consumption (0.24%). The relatively low contribution of the industrial phase is attributed to the small operating scale of the plant, its low energy intensity, the limited ripening time for a large share of production, and the exclusion of whey from the system boundaries.

The thesis identifies specific limitations and assumptions that may lead to an underestimation of the actual environmental footprint—particularly at the industrial level—such as the use of average emission factors, the absence of allocation of environmental burdens to by-products, and the aggregated recording of energy consumption. Despite these limitations, the results are considered sufficiently robust for comparative assessment and for identifying the main sources of emissions.

Overall, this study contributes to addressing a research gap concerning the production of sheep- and goat-milk cheeses in small-scale Greek dairy plants and provides an evidence-

based foundation for designing strategies to reduce the environmental footprint in the cheese sector, as well as for developing future, more detailed LCA studies.

Keywords:

Life Cycle Assessment (LCA), cheesemaking industry, small-scale, sheep and goat milk, PDO cheeses.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα Ι: Εισροές και εκροές του τυροκομείου μελέτης για το έτος 2024.

Είσοδοι (Inputs)

1. Γάλα (kg)	
α. Πρόβειο	3.008.235
β. Γίδινο	1.412.509
2. Νερό (L)	4.800.000
3. Ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	258.323
4. Υγραέριο - LPG (L)	59.244
5. Πετρέλαιο - Diesel (L)	
α. Γάλα	26.600
β. Τυριά	28.000
6. Υλικά συσκευασίας (kg)	
α. Χαρτί	40.000
β. Πλαστικά (PET)	220
γ. Μεμβράνες/φιλμ	80
δ. Μεταλλικά κουτιά	7.000

Έξοδοι (Outputs)

1. Τυρί (kg)	1.070.800
2. Στερεά απόβλητα (kg)	
α. Πλαστικό από πολυστυρένιο	470
β. Πλαστικά πολυστρωματικά	1.784
γ. Μέταλλο	6.608
δ. Χαρτί	2.277
ε. Ξύλο	3.289
3. Λύματα προς επεξεργασία (L)	4.600.000

Παράρτημα Ι. Εισροές και εκροές του τυροκομείου μελέτης για το έτος 2024.

Παράρτημα ΙΙ: Βιβλιογραφικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

Πηγή εκπομπών	Συντελεστής εκπομπών CO ₂	Πηγή συντελεστή εκπομπών
Παραγωγή γάλακτος	CF _{goat} : 2.12 kg CO ₂ -eq./kg FPCM (Tier 1)	(Laliotis & Bizelis, 2025)
	CF _{sheep} : 2.87 kg CO ₂ -eq./kg FPCM (Tier 1)	(Laliotis & Bizelis, 2025)
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	EF _{CO2} : 271,618 (gCO ₂ / KWh) EF _{CH4} : 0,0063220 (gGHG/kWh)	(ΔΑΠΕΕΠ, 2025) (YIΠEN, 2025)
	EF _{N2O} : 0,0026031 (gGHG/kWh)	(YIΠEN, 2025)
Κατανάλωση ενέργειας από υγραέριο (LPG)	EF _{CO2} : 63,10 (tnCO ₂ /TJ) EF _{CH4} : 1,00 (kgCH ₄ /TJ) EF _{N2O} : 0,10 (kgN ₂ O/TJ)	(YIΠEN, 2025) (YIΠEN, 2025) (YIΠEN, 2025)
Κατανάλωση καυσίμου μεταφοράς (Diesel)	EF _{CO2} : 73,26 (tnCO ₂ /TJ) EF _{CH4} : 16,54 (kgCH ₄ /TJ) EF _{N2O} : 2,68 (kgN ₂ O/TJ)	(YIΠEN, 2025) (YIΠEN, 2025) (YIΠEN, 2025)
Κατανάλωση νερού	EF: 0,1913 kg CO ₂ e	(DEFRA, 2025)
Υλικά συσκευασίας (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο)	EF _{paper} : 1193,966 kg CO ₂ e EF _{PET} : 3854,919 kg CO ₂ e EF _{FILM} : 2910,465 kg CO ₂ e EF _{METAL} : 2854,919 kg CO ₂ e	(DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025)
Στερεά απόβλητα (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο, ξύλο)	EF _{paper} : 1164,489 kg CO ₂ e EF _{PET} : 8,88386 kg CO ₂ e EF _{FILM} : 8,88386 kg CO ₂ e EF _{METAL} : 8,88386 kg CO ₂ e EF _{WOOD} : 925,2442 kg CO ₂ e	(DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025) (DEFRA, 2025)
Υγρά λύματα (βιολογικός καθαρισμός)	EF: 0.028 (kg CH ₄ /kg COD)	(IPCC, 2006)

Παράρτημα II. Βιβλιογραφικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

Παράρτημα III: Υπολογισμοί των εκπομπών από την παραγωγή γάλακτος.

Μέση σύσταση γάλακτος	πρόβειο	γίδινο
Λιπαρά (%)	6.5	4.7
Πρωτεΐνη (%)	5.47	3.89
Λακτόζη (%)	4.34	4.24

Εικόνα 3. Μέση σύσταση γάλακτος ανά είδος γάλακτος.

Υπολογισμοί

FPCM (kg/έτος)= Παραγωγή (kg/έτος) × (0,1226× % Λιπαρά + 0,0776 × % Πραγματικής Πρωτεΐνης + 0,2534)

Πρόβειο

FPCM (kg/έτος)= 2,809 × (0,1226 × 6,5 + 0,0776 × 5,47 + 0,2534)

FPCM (kg/έτος)= 4,1426

Γίδινο

FPCM (kg/έτος)= 1,319 × (0,1226× 4,7 + 0,0776 × 3,89 + 0,2534)

FPCM (kg/έτος)= 1,4924

Tier 1: Μέσες τιμές CF

Γίδινο: 2,12 kg CO₂ -eq/kg FPCM

Πρόβειο: 2,87 kg CO₂ -eq/kg FPCM

Tier 1:

Γίδινο= 2,12 kg CO₂ -eq/kg FPCM × 1,4924 FPCM

Γίδινο= 3,1639 kg CO₂ -eq

Πρόβειο= 2,87 kg CO₂ -eq/kg FPCM × 4,1426 FPCM

Πρόβειο= 11,8893 kg CO₂ -eq

Εκπομπές από παραγωγή γάλακτος (ετήσια)= 15,0532 kg CO₂-eq/kg τυριού

Παράρτημα IV: Υπολογισμός εκπομπών από κατανάλωση ενέργειας

Τύποι

$$\rho = m/V$$

$$\text{κατανάλωση (TJ)} = \text{ποσότητα καυσίμου} * \text{NCV}$$

$$\text{εκπομπές} = \text{κατανάλωση καυσίμου} * \text{συντελεστή εκπομπών}$$

$$\text{υπολογισμός kg CO}_2\text{e} = \text{kg (CO}_2\text{, CH}_4\text{, N}_2\text{O)} * \text{συντελεστή GWP}$$

Υγραέριο

NCV (TJ/tn)	EF CO ₂ (tnCO ₂ /TJ)	EF CH ₄ (kgCH ₄ /TJ)	EF N ₂ O (kgN ₂ O/TJ)	Μέση Τιμή για τους υπολογισμούς του Εθνικού κλιματικού νόμου (kg/m ³)
0,04730	63,10	1,00	0,10	550,00

Μετατροπές

$$V: 5,53269\text{E-}05\text{m}^3$$

$$m: 3,043\text{E-}05\text{tn}$$

Υπολογισμοί

$$m_{\text{καυσίμου}} = 0,030430 \text{ kg} = 0,000030430 \text{ tn}$$

$$\text{κατανάλωση} = 0,000001439 \text{ TJ}$$

εκπομπές CO ₂	0,090821611	kg CO ₂	*1	0,090821611
εκπομπές CH ₄	0,000001439	kg CH ₄	*28	0,000040301
εκπομπές N ₂ O	0,000000144	kg N ₂ O	*265	0,000038142

$$\text{Εκπομπές υγραερίου} = 0,0909 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Diesel

NCV (TJ/tn)	EF CO ₂ (tnCO ₂ /TJ)	EF CH ₄ (kgCH ₄ /TJ)	EF N ₂ O (kgN ₂ O/TJ)	Μέση Τιμή για τους υπολογισμούς του Εθνικού κλιματικού νόμου (kg/m ³)
0,0428	73,23	0,48	2,12	832,5

Μετατροπές

$$V: 5,09899\text{E-}05 \text{ m}^3$$

$$m: 4,24491\text{E-}05 \text{ tn}$$

Υπολογισμοί

$$m_{\text{καυσίμου}} = 0,042449103 \text{ kg} = 4,24491\text{E-}05 \text{ tn}$$

$$\text{κατανάλωση} = 1,81682\text{E-}06 \text{ TJ}$$

Diesel εκπομπές CO ₂	0,13304585	kgCO ₂	*1	0,133045848
Diesel εκπομπές CH ₄	0,00000087	kgCH ₄	*28	0,000024418
Diesel εκπομπές N ₂ O	0,00000385	kgN ₂ O	*265	0,001020690

$$\text{Εκπομπές Diesel} = 0,1341 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Ηλεκτρική Ενέργεια

CO ₂ Εκπομπές (gCO ₂ /kWh)	EF (gGHG/kWh) CH ₄	EF (gGHG/kWh) N ₂ O
--	-------------------------------	--------------------------------

271,618	0,006322	0,0026031
CO ₂ Εκπομπές (kgCO ₂ /kWh)	EF (kgGHG/kWh) CH ₄	EF (kgGHG/kWh) N ₂ O
0,271618	0,000006322	0,0000026

Ηλεκτρική ενέργεια εκπομπές CO ₂ :	0,06552594	kgCO ₂ /kWh	*1	0,06552594
Ηλεκτρική ενέργεια εκπομπές CH ₄ :	0,00000153	kgGHG/kWh	*28	0,00004270
Ηλεκτρική ενέργεια εκπομπές N ₂ O:	0,00000063	kgGHG/kWh	*265	0,000166415

Εκπομπές Ηλεκτρικής ενέργειας= 0,0657 kg CO₂e

Παράρτημα V: Υπολογισμός εκπομπών από κατανάλωση νερού, υλικά συσκευασίας και στερεά απόβλητα

Υπολογισμός

Εκπομπές=συντελεστής*κατανάλωση νερού/υλικό συσκευασίας/στερεό απόβλητο (στην κατάλληλη μονάδα)

Νερό

Activity	Type	Unit	kg CO ₂ e
Water supply	Water supply	cubic metres	0,1913

Νερό	
Μέση ετήσια κατανάλωση νερού ανά kg/προϊόντος (m ³)	0,00448

Εκπομπές από κατανάλωση νερού = 0,0009 kg CO₂e

Υλικά συσκευασίας

Υλικά συσκευασίας (kg/έτος):	ανά kg/προϊόντος
Χαρτί	0,037355248
PET	0,000293333
Μεμβράνες/φιλμ	0,000249377
Μεταλλικά κουτιά	0,009333333

	συντελεστής	kg CO ₂ e
Χαρτί	1193,96586	0,0446
PET	3854,91851	0,0011
Μεμβράνες/φιλμ	2910,46529	0,0007
Μεταλλικά κουτιά	2854,91851	0,0266

Εκπομπές από υλικά συσκευασίας = 0,0731 kg CO₂e

Σημείωση: Για τα υλικά συσκευασίας και τα στερεά απόβλητα η διαίρεση της μέσης ετήσιας τιμής έγινε με τη μέση ετήσια ποσότητα των τύπων τυριών που αντιστοιχούν σε κάθε υλικό.

Στερεά απόβλητα

Στερεά απόβλητα	ανά kg/προϊόντος
Οργανικά - Λάσπη (kg/έτος)	0,158759806
Πλαστικό από πολυστυρένιο (kg/έτος)	0,000626667
Πολυστρωματικά πλαστικά (kg/έτος)	0,005561097
Χαρτί (kg/έτος)	0,002126448
Μέταλλο (kg/έτος)	0,008810667
Ξύλο (kg/έτος)	0,003071535

	συντελεστής	kg CO ₂ e
Πλαστικό από πολυστυρένιο	8,88386	0,0000056
Πολυστρωματικά πλαστικά	8,88386	0,0000494
Χαρτί	1164,4894	0,0024762
Μέταλλο	8,88386	0,0000783
Ξύλο	925,24423	0,0028419

Εκπομπές από στερεά απόβλητα: 0,0055 kg CO₂e

Παράρτημα VI: Υπολογισμός εκπομπών από υγρά απόβλητα

Έγιναν μετατροπές από mg/L σε kg/m³ για όγκο λυμάτων Q=4.600 m³

COD εισροής 4000 mg/L $\rightarrow$ 4000 g/m³

$$TOW_{in} = 4600 \times 4000 \times 10^{-3} = \mathbf{18400 \text{ kg COD/yr}}$$

COD εκροής 40 mg/L:

$$TOW_{out} = 4600 \times 40 \times 10^{-3} = \mathbf{184 \text{ kg COD/yr}}$$

TN εισροής 18 mg/L:

$$TN_{in} = 4600 \times 18 \times 10^{-3} = \mathbf{82.8 \text{ kg N/yr}}$$

TN εκροής 6 mg/L:

$$TN_{out} = 4600 \times 6 \times 10^{-3} = \mathbf{27.6 \text{ kg N/yr}}$$

Χημικά φορτία ΕΙΣΡΟΗ	ανά kg προϊόντος
TOW_in COD (kg)	0,0172
TOW_in BOD (kg)	0,0069

Χημικά φορτία ΕΚΡΟΗ	ανά kg προϊόντος
TOW_out COD (kg)	0,000172
TOW_out BOD (kg)	0,000069

Ολικό Άζωτο ΕΙΣΡΟΗ	ανά kg προϊόντος
TN_in (Ολικό Άζωτο) (kg)	0,000077

Ολικό Άζωτο ΕΚΡΟΗ	ανά kg προϊόντος
TN_out (Ολικό Άζωτο) (kg)	0,000026

Τύποι για CH₄ από βιομηχανικά λύματα (SBR αερόβιο & εκροή σε ποταμό)

$$CH_4 \text{ Emissions} = \sum_i [(TOW_i - S_i) \cdot EF_i - R_i]$$

$$EF_j = B_o \cdot MCF_j$$

$$B_o = \mathbf{0.25 \text{ kg CH}_4/\text{kg COD}}$$

TABLE 6.2 DEFAULT MAXIMUM CH ₄ PRODUCING CAPACITY (B _o) FOR DOMESTIC WASTEWATER
0.6 kg CH ₄ /kg BOD
0.25 kg CH ₄ /kg COD
Based on expert judgment by lead authors and on Doorn <i>et al.</i> (1997)

και **MCF** από πίνακες.

Για κεντρική αερόβια μονάδα:

Wastewater treatment system				
Centralised, aerobic treatment plant	Some CH ₄ can be emitted from settling basins and other anaerobic pockets. For treatment plants that are receiving wastewater beyond the design capacity, inventory compilers should judge the amount of organic material removed in sludge accordingly.	0 (0 – 0.1)	0	0

Για εκροή σε υδάτινο αποδέκτη (ποταμός) (discharge to aquatic environments, Tier 1):

TABLE 6.8 (UPDATED) DEFAULT MCF VALUES AND RESULTANT EF _s FOR INDUSTRIAL WASTEWATER				
Type of treatment and discharge pathway or system	Comments	MCF ¹ (Range)	EF ² (kg CH ₄ /kg BOD)	EF ² (kg CH ₄ /kg COD)
Discharge from treated or untreated system				
Discharge to aquatic environments (Tier 1)	Most aquatic environments including rivers are supersaturated in CH ₄ . Nutrient oversupply will increase CH ₄ emissions. Environments where carbon accumulates in sediments have higher potential for methane generation.	0.11 (0.004 – 0.27)	0.068	0.028

Υπολογισμός

(A) CH₄ από την αερόβια επεξεργασία (μονάδα)

$$CH_{4_{plant}} = (TOW_{in} - S) \cdot EF_{aerobic}$$

$$CH_{4_{plant}} = 0$$

(B) CH₄ μετά την απόρριψη στον ποταμό (λόγω υπολειπόμενου COD)

$$CH_{4_{river}} = TOW_{out} \cdot EF_{discharge}$$

$$CH_{4_{river}} = 0,000172 \cdot 0,028$$

$$CH_{4_{river}} = 0,000004816$$

και:

$$CH_{4_{total}} = CH_{4_{plant}} + CH_{4_{river}}$$

$$CH_{4_{total}} = 0,000004816$$

**N₂O από άζωτο: (i) μονάδα επεξεργασίας και (ii) εκροή σε ποταμό
(i) μονάδα επεξεργασίας**

$$N_2O_{plants,IND} = \sum_i (TN_{IND,i} \cdot T_{i,j} \cdot EF_{plants,j}) \cdot \frac{44}{28}$$

Για κεντρική αερόβια μονάδα:

Wastewater treatment system, EF_{plants}			
Centralised, aerobic treatment plant	N ₂ O is variable and can be significant	0.016 ¹	0.00016 – 0.045

N₂O από την εκροή στον ποταμό

EQUATION 6.7 (UPDATED)

N₂O EMISSIONS FROM DOMESTIC WASTEWATER EFFLUENT

$$N_2O_{EFFLUENT,DOM} = N_{EFFLUENT,DOM} \cdot EF_{EFFLUENT} \cdot \frac{44}{28}$$

TABLE 6.8a (NEW) DEFAULT EF VALUES FOR DOMESTIC AND INDUSTRIAL WASTEWATER			
Type of treatment and discharge pathway or system	Comments	EF ¹ (kg N ₂ O-N/kg N)	Range
Discharge from treated or untreated system, $EF_{EFFLUENT}$			
Freshwater, estuarine, and marine discharge (Tier 1)	Based on limited field data and on specific assumptions regarding the occurrence of nitrification and denitrification in rivers and in estuaries	0.005 ²	0.0005 – 0.075

Υπολογισμός N₂O

N₂O από μονάδα επεξεργασίας

- $TN_{in} = 0,000077 \text{ kgN/yr}$
- $EF_{plants} = 0.016 \text{ kg N}_2\text{O-N/kg N}$

$$N_2O_{plants} = 0,000077 \times 0.016 \times \frac{44}{28} = \mathbf{0.0000019 \text{ kgN}_2\text{O/yr}}$$

N₂O από την εκροή στον ποταμό

- $TN_{out} = 0.000026 \text{ kgN/yr}$
- $EF_{effluent} = 0.005 \text{ kg N}_2\text{O-N/kg N}$

$$N_2O_{effluent IND} = 0.000026 \times 0.005 \times \frac{44}{28} = \mathbf{0.000000204 \text{ kgN}_2\text{O/yr}}$$

$$N_2O_{total} = \mathbf{0.000002104 \text{ kgN}_2\text{O/yr}}$$

5) Μετατροπή CH₄ και N₂O σε CO₂e

$$\begin{aligned} CO_2e &= CH_{4kg} \cdot GWP_{CH_4} + N_2O_{kg} \cdot GWP_{N_2O} \\ CO_2e &= 0,000004816 \cdot 28 + 0,000002104 \cdot 265 \\ CO_2e &= 0,000135 + 0,000558 \\ CO_2e &= 0,000693 \\ CO_2e &= \mathbf{0,0007 \text{ kg CO}_2e} \end{aligned}$$

Παράρτημα VII: Μετατροπή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-e).

Οι εκπομπές μετατρέπονται σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-e), όταν πολλαπλασιάζονται με το GWP, το οποίο εκφράζει το ποσοστό της ατμόσφαιρας που απορροφάται από ένα αέριο του θερμοκηπίου σε συγκεκριμένο χρόνο, για παράδειγμα 100 χρόνια, σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2021).

Οι συντελεστές GWP (100):

Αέριο	GWP (kgCO ₂ eq/GHG)
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265

(ΥΠΕΝ, 2025)

Παράρτημα VIII: Τύπος υπολογισμού των εκπομπών

Οι εκπομπές υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον γενικό τύπο:

$$\text{Emissions} = \text{Activity Data} \times \text{Emission Factor [I]}$$

Όπου:

Emissions: εκπομπές (kg CO₂-eq/ λειτουργική μονάδα)

Activity Data: δεδομένα δραστηριότητας (φυσική μονάδα μέτρησης δραστηριότητας/
λειτουργική μονάδα)

Emission Factor: συντελεστές εκπομπών για δραστηριότητα (kg CO₂-eq/μονάδα
δραστηριότητας)

(IPCC, 2006)