



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

**Αξιοποίηση γαλακτοκομικών αποβλήτων για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης: προσέγγιση κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία.**

**ΘΩΜΑΣ ΑΠΟΛΛΩΝ**

**A.M:166038**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ,**

**2026**

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Θωμά Απόλλων που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

**Αξιοποίηση γαλακτοκομικών αποβλήτων για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης: προσέγγιση κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία.**

**ΘΩΜΑΣ ΑΠΟΛΛΩΝ**

**A.M:166038**

**Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας**

**Επιβλέπων Α'**

**ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**  
Καθηγητής, ΕΑΠ

**Επιβλέπων Β'**

**ΓΚΟΛΦΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ**  
Καθηγητής, ΕΑΠ

## Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εξετάζει την αξιοποίηση των γαλακτοκομικών αποβλήτων, και ειδικότερα του τυρογάλακτος, ως υπόστρωμα για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης, εντάσσοντας την προσέγγιση αυτή στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και των σύγχρονων πολιτικών βιώσιμης διαχείρισης. Το τυρόγαλο αποτελεί ένα από τα πιο ρυπογόνα παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας, με υψηλό οργανικό φορτίο, αλλά ταυτόχρονα διαθέτει σημαντική θρεπτική αξία και μεγάλη περιεκτικότητα σε λακτόζη, στοιχεία που το καθιστούν ιδανικό υπόστρωμα για μικροβιακές διεργασίες. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών, των βιομηχανικών εφαρμογών και της οικονομικής-περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας παραγωγής ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε σε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση πρόσφατων ερευνών (2015–2024), με έμφαση σε βιοδιεργασίες υψηλής προστιθέμενης αξίας, βιομετατροπές λακτόζης μέσω ζυμώσεων, γενετικά τροποποιημένους μικροοργανισμούς και τεχνολογίες καθαρισμού/ανάκτησης βιοδραστικών μορίων. Παράλληλα, αξιολογήθηκαν οι πολιτικές της ΕΕ (Green Deal, CEAP 2020) και σύγχρονα μοντέλα κυκλικών βιοδιεργασιών, ώστε να αποτιμηθεί ο ρόλος της προτεινόμενης τεχνολογικής αλυσίδας σε ευρύτερο πλαίσιο βιωσιμότητας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν ότι ο ορός του γάλακτος μπορεί να αποτελέσει αποδοτικό και χαμηλού κόστους υπόστρωμα για μικροβιακή παραγωγή ρεσβερατρόλης, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται ενισχυμένα στελέχη *Saccharomyces cerevisiae*, *Yarrowia lipolytica* ή βακτηριακά συστήματα με τροποποιημένες φαινολικές οδούς. Η τεχνολογική σκοπιμότητα υποστηρίζεται από σημαντική μείωση του οργανικού ρυπαντικού φορτίου και παράλληλη παραγωγή ενός υψηλής αξίας βιοδραστικού μορίου με φαρμακευτικές, καλλυντικές και διατροφικές εφαρμογές. Η συγκριτική ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) και η προκαταρκτική οικονομική αποτίμηση δείχνουν θετικές προοπτικές, υπό την προϋπόθεση βελτιστοποίησης των ζυμωτικών συνθηκών και μείωσης του ενεργειακού κόστους των διεργασιών καθαρισμού.

Συμπερασματικά, η βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο μπορεί να αποτελέσει μια ρεαλιστική, περιβαλλοντικά συμβατή και οικονομικά ελκυστική πρακτική για τη γαλακτοβιομηχανία. Η εργασία αναδεικνύει τις βασικές τεχνολογικές προκλήσεις, προτείνει βελτιστοποιήσεις και υπογραμμίζει τον ρόλο τέτοιων καινοτόμων διεργασιών ως θεμέλιο για ένα πιο βιώσιμο και κυκλικό αγροδιατροφικό σύστημα.

### Λέξεις-κλειδιά

Ρεσβερατρόλη, τυρόγαλο, γαλακτοβιομηχανία, κυκλική οικονομία, βιοδιεργασίες, μικροβιακή ζύμωση, λακτόζη, αναβάθμιση αποβλήτων

## Abstract

This MSc Thesis investigates the potential of dairy industry by-products, particularly whey, as a substrate for the biotechnological production of resveratrol within the broader framework of circular economy and sustainable waste management. Whey is one of the most pollution-intensive residues generated by dairy processing due to its high organic load, yet it is also rich in nutrients and lactose, making it an ideal feedstock for microbial bioprocesses. The aim of this study is to examine available technological routes, industrial applications, and the environmental–economic viability of an integrated process for resveratrol production from whey.

The methodology is based on an extensive literature review of recent studies (2015–2024) focusing on high-value bioprocesses, lactose bioconversion via fermentation, genetically engineered microorganisms, and downstream purification of bioactive compounds. European policy frameworks, including the Green Deal and the Circular Economy Action Plan (CEAP 2020), were also evaluated to contextualize the proposed approach within current sustainability standards and regulatory directions.

Findings indicate that whey is a promising and cost-effective substrate for microbial resveratrol biosynthesis, especially when enhanced strains of *Saccharomyces cerevisiae*, *Yarrowia lipolytica*, or engineered bacterial systems are employed. Technological feasibility is supported by the simultaneous reduction of environmental pollution and the production of a high-value bioactive molecule with pharmaceutical, cosmetic, and nutraceutical applications. Indicative life-cycle assessment and techno-economic analysis demonstrate positive prospects, provided that fermentation conditions are optimized and energy demands for downstream processing are minimized.

Overall, this thesis highlights the potential of resveratrol production from whey as a sustainable, circular, and economically attractive solution for the dairy sector. It identifies key technological barriers, suggests targeted process improvements, and emphasizes the importance of integrating innovative bioprocesses into modern agri-food value chains. The study ultimately contributes to the ongoing scientific and industrial discourse on transforming waste streams into valuable bioproducts, aligning with global efforts toward greener and more resilient production systems.

### Keywords

Resveratrol, whey, dairy industry, circular economy, bioprocesses, microbial fermentation, lactose, waste valorization

## Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων	9
Συνομογραφίες & Ακρωνύμια	11
1. Εισαγωγή	12
1.1 Το πρόβλημα της διαχείρισης αποβλήτων στη γαλακτοβιομηχανία.	12
1.2 Το τυρόγαλο ως υποπροϊόν και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις.	15
1.3 Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας	17
1.4 Υπάρχουσες τεχνολογίες και αξιοποίηση του τυρογάλακτος	20
1.5 Συνοψίζοντας	23
1.6 Δομή της Μεταπτυχιακής Εργασίας	23
1.7 Μεθοδολογία της Μεταπτυχιακής Εργασίας	25
2. Παραγωγή και Σύσταση Γαλακτοκομικών Αποβλήτων	26
2.1 Η Κλίμακα και η Σημασία των Αποβλήτων της Γαλακτοβιομηχανίας	26
2.2 Κατηγοριοποίηση και διαχείριση αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας	33
2.3 Βιώσιμη αξιοποίηση και ενεργειακή ανάκτηση αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας	38
2.4 Ολοκληρωμένες προσεγγίσεις βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας	43
3. Παραγωγή και Βιοτεχνολογική Αξιοποίηση της Ρεσβερατρόλης από Παραπροϊόντα Γαλακτοβιομηχανίας	48
3.1 Εισαγωγή στη χημική δομή, τις ιδιότητες και τις φυσικές πηγές της ρεσβερατρόλης	49
3.2 Εισαγωγή στη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης.	58
3.3 Αξιοποίηση Παραπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας για Παραγωγή Ρεσβερατρόλης	65
3.4 Τεχνοοικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση της Παραγωγής Ρεσβερατρόλης από Παραπροϊόντα Γαλακτοβιομηχανίας	74
4. Αξιολόγηση Βιωσιμότητας, Ενεργειακής Απόδοσης και Οικονομικής Εφικτότητας των Τεχνολογιών Αξιοποίησης Τυρογάλακτος.	82

4.1 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση των Τεχνολογιών Αξιοποίησης του Τυρογάλακτος -----	83
4.2 Τεχνολογίες Διαχείρισης και Αξιοποίησης Υποπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας -----	89
4.3 Αξιολόγηση Βιωσιμότητας της Προτεινόμενης Τεχνολογικής Προσέγγισης.	94
4.4 Τεχνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση της Προτεινόμενης Προσέγγισης -----	100
5. Συμπεράσματα και Προτάσεις -----	103
5.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα της Μελέτης -----	103
5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα -----	104
5.3 Τελική Αξιολόγηση και Μελλοντική Προοπτική -----	106
6. Συμπεράσματα -----	108
Βιβλιογραφία -----	109

## Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

- Σχήμα 1: Σύγκριση της ετήσιας κατά κεφαλήν κατανάλωσης γάλακτος (kg/άτομο/έτος) ανά γεωγραφική περιοχή, για το έτος 2022 (FAO 2025-2034) -----12
- Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα ροής της Κυκλικής Οικονομίας σε τυροκομείο: παραγωγή τυριού και αξιοποίηση του τυρογάλακτος για την παραγωγή βιοαερίου, πρωτεϊνών και ρεσβερατρόλης (Costa et al., 2021). -----14
- Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής παραγωγής τυριού και δημιουργίας ροών τυρογάλακτος (Kumar et al., 2019 ; Khat tab et al. 2019). -----30
- Σχήμα 4: Στάδια και ενεργειακές ροές της αναερόβιας χώνευσης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας (Polizzi et al., 2022). -----42
- Σχήμα 5. Ολοκληρωμένο σύστημα βιοαντιδραστήρα γαλακτοβιομηχανίας (Angelis-Dimakis et al., 2022). -----47
- Εικόνα 1: Δομές της trans-ρεσβερατρόλης και του cis-ισομερούς της (Thapa et al., 2019). 49
- Εικόνα 2: Το φυτό *Polygonum cuspidatum* και η χημική δομή της ρεσβερατρόλης (Perin et al., 2017).-----50
- Εικόνα 3: Μηχανισμός φωτόϊσομερίωσης και φωτοοξειδωσης της trans-ρεσβερατρόλης υπό υπεριώδη (Thompson et al., 2016). -----53
- Σχήμα 6. Βιοσυνθετική οδός παραγωγής ρεσβερατρόλης από τη φαινυλαανίνη μέσω των ενζύμων PAL, 4CL και STS (Thapa et al., 2019). -----61
- Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση της βιομετατροπής λακτόζης από τυρόγαλο σε ρεσβερατρόλη μέσω γενετικά τροποποιημένου *Saccharomyces cerevisiae* (Lip et al., 2020).-----66
- Σχήμα 8. Διάγραμμα ροής αξιοποίησης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας. -----74
- Σχήμα 9. Ενδεικτική Απεικόνισμένα MFA σε Γαλακτοβιομηχανία (Rivas et al., 2022). --93
- Εικόνα 4. Τυπική διάταξη ολοκληρωμένου βιοδιυλιστηρίου γαλακτοκομικών αποβλήτων για παραγωγή ρεσβερατρόλης. (Barba et al., 2023).-----96
- Σχήμα 10. Ολοκληρωμένο εννοιολογικό πλαίσιο αξιολόγησης της βιοτεχνολογικής αξιοποίησης τυρογάλακτος για παραγωγή ρεσβερατρόλης. -----107

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Παγκόσμια παραγωγή γάλακτος ανά κύρια περιοχή (FAO 2023–2024).-----	27
Πίνακας 2. Τυπικά χαρακτηριστικά και νομοθετικά όρια εκροής αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας (FAO 2023–2024).-----	31
Πίνακας 3. Κύρια στάδια παραγωγής τυριού και αντίστοιχες ροές αποβλήτων(Ribeiro et al., 2022).-----	32
Πίνακας 4. Κατηγορίες αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας, πηγές και επιπτώσεις (Carvalho et al., 2013; Ramsuroop et al., 2024) -----	35
Πίνακας 5. Απόδοση επεξεργασίας και παραδείγματα εφαρμογών (van der Bruggen et al., 2023) -----	38
Πίνακας 6: Ενδεικτικές αναδυόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας (Tabelini et al., 2023)-----	40
Πίνακας 7. Παραδείγματα ενεργειακής και κυκλικής αξιοποίησης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας στην Ευρώπη (Singh et al., 2024).-----	43
Πίνακας 8. Σύγκριση τεχνολογιών ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανιών (Basak et al., 2022; Kumar et al., 2022).-----	46
Πίνακας 9. Βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες της ρεσβερατρόλης (trans μορφή) (Aguiar et al., 2018).-----	52
Πίνακας 10: Ενζυμικά στάδια βιοσύνθεσης ρεσβερατρόλης και πιθανές βιοτεχνολογικές εφαρμογές (Hasan et al., 2023).-----	56
Πίνακας 11 Κύριες βιολογικές δράσεις της ρεσβερατρόλης και αντίστοιχοι μοριακοί μηχανισμοί -----	58
Πίνακας 12. Παραγωγή ρεσβερατρόλης από μικροοργανισμούς μέσω ετερολογικής έκφρασης -----	60
Πίνακας 13. Ενδεικτικές στρατηγικές μεταβολικής μηχανικής για την παραγωγή ρεσβερατρόλης. -----	63
Πίνακας 14. Ενδεικτικές τεχνικές καθαρισμού και αποδόσεις ανάκτησης ρεσβερατρόλης.	65
Πίνακας 15. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τυρογάλακτος και σημασία τους στη ζύμωση (Prazeres et al., 2012; Calabrò et al., 2023). -----	67
Πίνακας 16. Ενδεικτικές παράμετροι βέλτιστης ζύμωσης για παραγωγή ρεσβερατρόλης (Costa et al., 2021).-----	70
Πίνακας 17. Συγκριτική αποδοτικότητα διαφορετικών συστημάτων ζύμωσης για παραγωγή ρεσβερατρόλης (Brinke et al., 2021; Meng et al., 2021).-----	71
Πίνακας 18. Συνοπτικά Τεχνικά και Οικονομικά Δεδομένα Πιλοτικών Εφαρμογών Παραγωγής Ρεσβερατρόλης από Τυρόγαλο (van der Bruggen et al., 2023; ΥΠΕΝ, 2024)73	

Πίνακας 19. Ενδεικτικά περιβαλλοντικά και ενεργειακά δεδομένα παραγωγής ρεσβερατρόλης	77
Πίνακας 20. Συγκριτική οικονομική ανάλυση μοντέλων παραγωγής ρεσβερατρόλης (Huijbregts et al., 2017).	78
Πίνακας 21. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τυρογάλακτος και τεχνολογική τους σημασία (Rocha-Mendoza et al., 2021).	85
Πίνακας 22. Κατηγοριοποίηση ρευμάτων τυρογάλακτος και τεχνολογική σημασία (Carvalho et al., 2013).	87
Πίνακας 23. Επίδραση των τεχνολογικών σταδίων στη σύσταση του τυρογάλακτος (Hasan et al., 2023)	89
Πίνακας 24. Βασικές Τεχνολογίες Προεπεξεργασίας και Διαχωρισμού Υποπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας (Rivas et al., 2022).	90
Πίνακας 25. Συγκριτικό Κόστος Πρώτων Υλών και Προεπεξεργασίας για Παραγωγή Ρεσβερατρόλης (Barba et al., 2023; Patel et al., 2022)	95
Πίνακας 26. Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογικών σεναρίων για παραγωγή ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο (Van der Bruggen et al. 2023).	97
Πίνακας 27. Κύριες Οικονομικές Παράμετροι για την Παραγωγή Ρεσβερατρόλης από Τυρόγαλο.	101

## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

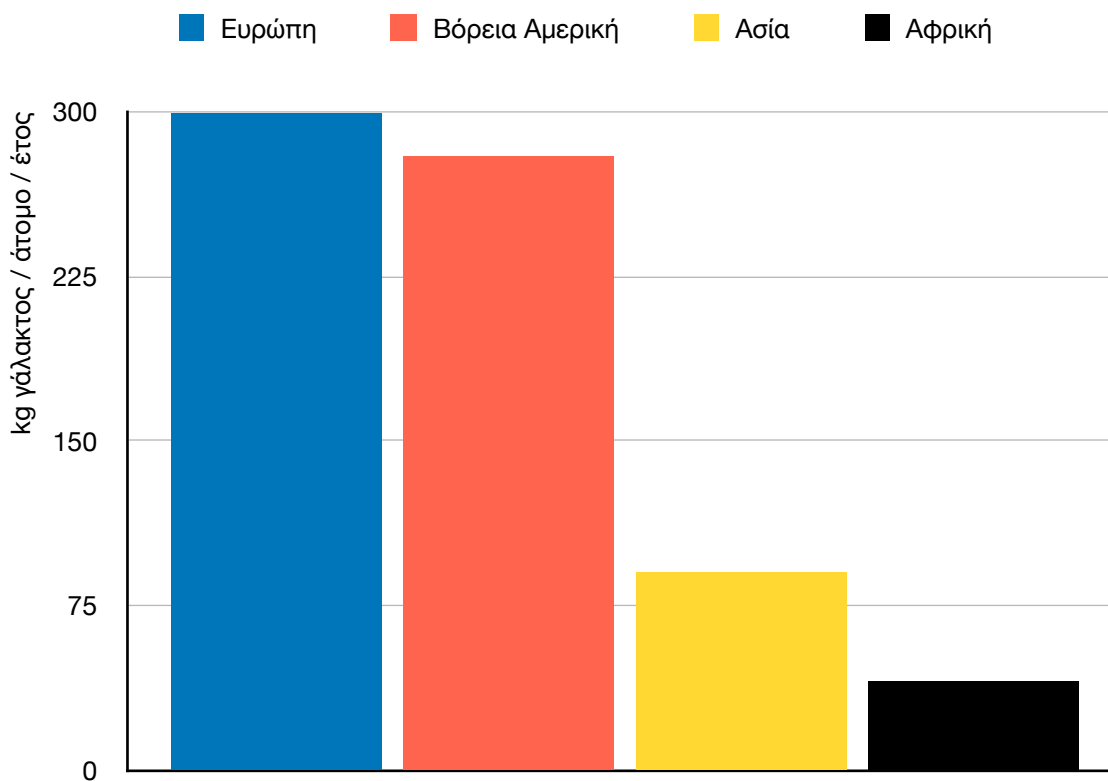
- ATP: Adenosine Triphosphate / Τριφωσφορική Αδενοσίνη
- BOD: Biological Oxygen Demand / Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
- CE: Circular Economy / Κυκλική Οικονομία
- CEAP: Circular Economy Action Plan / Σχέδιο Δράσης Κυκλικής Οικονομίας
- COD: Chemical Oxygen Demand / Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
- CRISPR: Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats / Γονιδιακή Τεχνολογία
- DNA: Deoxyribonucleic Acid / Δεοξυριβονουκλεϊκό Οξύ
- DOE: Design of Experiments / Σχεδιασμός Πειραμάτων
- DOI: Digital Object Identifier / Ψηφιακός Αναγνωριστικός Αριθμός
- EASA: European Food Safety Authority / Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων
- EC: European Commission / Ευρωπαϊκή Επιτροπή
- EEC: Environmental Engineering Concepts / Αρχές Περιβαλλοντικής Μηχανικής
- EFSA: European Food Safety Authority / Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων
- EPA: Environmental Protection Agency / Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος
- EU: European Union / Ευρωπαϊκή Ένωση
- FAO: Food and Agriculture Organization / Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας
- FDA: Food and Drug Administration / Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων
- FBA: Fructose-Bisphosphate Aldolase / Αλδολάση Φρουκτοζο-Διφωσφορική
- GMO: Genetically Modified Organism / Γενετικά Τροποποιημένος Οργανισμός
- GRAS: Generally Recognized As Safe / Αναγνωρισμένο ως Ασφαλές
- HPLC: High Performance Liquid Chromatography / Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης
- IPPC: Integrated Pollution Prevention and Control / Ολοκληρωμένη Πρόληψη & Έλεγχος Ρύπανσης
- ISO: International Organization for Standardization / Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
- LCA: Life Cycle Assessment / Ανάλυση Κύκλου Ζωής
- LOD: Limit of Detection / Όριο Ανίχνευσης
- LOQ: Limit of Quantification / Όριο Ποσοτικοποίησης
- MW: Molecular Weight / Μοριακό Βάρος
- NADH: Nicotinamide Adenine Dinucleotide / Νικοτιναμιδο-Αδενο-Δινουκλεοτίδιο
- OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development / ΟΟΣΑ
- PAL: Phenylalanine Ammonia-Lyase / Φαινυλαλανίνη Αμμωνιο-Λυάση
- PCR: Polymerase Chain Reaction / Αλυσιδωτή Αντίδραση Πολυμεράσης
- PDO: Protected Designation of Origin / ΠΟΠ – Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης
- RNA: Ribonucleic Acid / Ριβονουκλεϊκό Οξύ
- R&D: Research and Development / Έρευνα και Ανάπτυξη
- SDS: Safety Data Sheet / Δελτίο Δεδομένων Ασφαλείας
- STS: Stilbene Synthase / Στιλβενική Συνθάση
- TIC: Total Inorganic Carbon / Ολικό Ανόργανο Άνθρακα
- TOC: Total Organic Carbon / Ολικός Οργανικός Άνθρακας
- UF: Ultrafiltration / Υπερδιήθηση
- VFA: Volatile Fatty Acids / Πτητικά Λιπαρά Οξέα
- WHO: World Health Organization / Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Το πρόβλημα της διαχείρισης αποβλήτων στη γαλακτοβιομηχανία.

Η γαλακτοβιομηχανία αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς και δυναμικούς τομείς της παγκόσμιας βιομηχανίας τροφίμων. Τα γαλακτοκομικά προϊόντα καταλαμβάνουν βασική θέση στη διατροφή του ανθρώπου λόγω της υψηλής θρεπτικής τους αξίας, προσφέροντας απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, όπως πρωτεΐνες υψηλής βιολογικής αξίας, ασβέστιο, βιταμίνες (ειδικά B2 και B12) και ορμονικούς παράγοντες. Σύμφωνα με την πρόσφατη αναφορά του OECD και του FAO (OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034), η κατανάλωση γαλακτοκομικών προϊόντων αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται παγκοσμίως, ιδιαίτερα σε χώρες με μεσαίο εισόδημα, όπου η αύξηση του αγοραστικού κόστους και ο αστικοποίηση ωθούν τη ζήτηση προς πιο διαφοροποιημένα και θρεπτικά τρόφιμα (Awasthi et al., 2021).

Η παγκόσμια παραγωγή γάλακτος εκτιμάται σε περίπου 930 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) διατηρεί μια κρίσιμη θέση στην παγκόσμια αλυσίδα, συνεισφέροντας περίπου το 20% της συνολικής παραγωγής. Τα γαλακτοκομικά προϊόντα, όπως το γάλα, το γιαούρτι και ειδικά τα τυριά, περιλαμβάνουν υψηλά επίπεδα κατανάλωσης στις ανεπτυγμένες οικονομίες. Για παράδειγμα, ο μέσος Ευρωπαίος πολίτης καταναλώνει πάνω από 65-70 κιλά γάλακτος και παράγωγα ανά έτος, με την κατανάλωση τυριού να ξεπερνά συχνά τα 20 κιλά ετησίως (Caldeira et al., 2020).



Σχήμα 1: Σύγκριση της ετήσιας κατά κεφαλήν κατανάλωσης γάλακτος (kg/άτομο/έτος) ανά γεωγραφική περιοχή, για το έτος 2022 (FAO 2025-2034)

### 1.1.1 Η Οικονομική Διάσταση και η εθνική Σημασία στην Ελλάδα

Πέρα από τη διατροφική του σημασία, ο γαλακτοκομικός τομέας έχει τεράστια οικονομική βαρύτητα. Αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της αγροτικής οικονομίας πολλών χωρών, εξασφαλίζοντας εισόδημα σε εκατομμύρια αγρότες, μεταποιητές, και εργαζόμενους κατά μήκος ολόκληρης της αλυσίδας αξίας.

Στην Ελλάδα, ο τομέας έχει ιδιαίτερο χαρακτήρα. Η ετήσια παραγωγή αγελαδινού και πρόβειου γάλακτος ξεπερνά τους 600 χιλιάδες τόνους. Ο κλάδος είναι βαθιά ταυτισμένος με την παραγωγή τυριών, με τη Φέτα να αποτελεί το πιο διακεκριμένο παράδειγμα. Το τυρί αυτό, ως Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης (ΠΟΠ), δεν είναι απλώς ένα τρόφιμο, αλλά πολιτιστικό σύμβολο και σημαντικό αγαθό εξαγωγής, που προωθεί το "Made in Greece" σε διεθνές επίπεδο (Pappa & Kondyli, 2023).

### 1.1.2. Η Πρόκληση: Τα Απόβλητα και το Κρίσιμο Ζήτημα του Τυρογάλακτος

Παρά την οικονομική και διατροφική του σημασία, η βιομηχανία αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις βιωσιμότητας, που σχετίζονται άμεσα με τη δημιουργία και τη διαχείριση των αποβλήτων της. Αυτά τα απόβλητα (στερεά, υγρά, αέρια) προκύπτουν από τις διαδικασίες καθαρισμού, παστερίωσης και μεταποίησης. Ανάμεσά τους, το τυρόγαλο (whey) ξεχωρίζει ως το πιο ογκώδες και περιβαλλοντικά απαιτητικό προϊόν.

Το τυρόγαλο παράγεται σε τεράστιες ποσότητες κατά την παραγωγή τυριών και καζεΐνης. Υπολογίζεται ότι για κάθε κιλό τυριού που παράγεται, δημιουργούνται 9 έως 10 λίτρα τυρογάλακτος. Αυτό σημαίνει ότι περίπου 85-90% του όγκου του γάλακτος που εισέρχεται στη γραμμή παραγωγής τυριών, εξέρχεται ως τυρόγαλο. Σε επίπεδο ΕΕ, όπου η ετήσια παραγωγή τυριών ανέρχεται σε εκατομμύρια τόνους, οι ποσότητες τυρογάλακτος που παράγονται είναι αστρονομικές, φτάνοντας τις εκατοντάδες εκατομμύρια τόνων (European Union, 2019, 2024).

### 1.1.3. Περιβαλλοντικές και Οικονομικές Συνεπαγωγές

Το τυρόγαλο, αν και πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά (περίπου 4.5-5% λακτόζη, 0.8-1% πρωτεΐνες, λιπίδια, ανόργανα άλατα), αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό φορτίο εάν δεν επεξεργαστεί. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι στο εξαιρετικά υψηλό Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνου (BOD) και Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνου (COD). Τιμές BOD πάνω από 30.000 mg/L και COD πάνω από 60.000 mg/L είναι χαρακτηριστικές για το ανεπεξέργαστο τυρόγαλο, καθιστώντας το ένα από τα πιο ρυπογόνα βιομηχανικά απόβλητα – δεκάδες φορές πιο ρυπογόνο από τα οικιακά λύματα.

Η άμεση απόρριψή του σε υδάτινα συστήματα προκαλεί ευτροφισμό, οξυγονόπτωση και θανάτωση της υδρόβιας πανίδας. Το χαμηλό pH του (4.5-5.0) μπορεί επίσης να οξινίσει το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, προκαλώντας μακροπρόθεσμη οικολογική ζημιά. Οι κοινωνικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν δυσάρεστες οσμές και αισθητική υποβάθμιση, οδηγώντας σε κοινωνικές αντιδράσεις εναντίον των μονάδων παραγωγής.

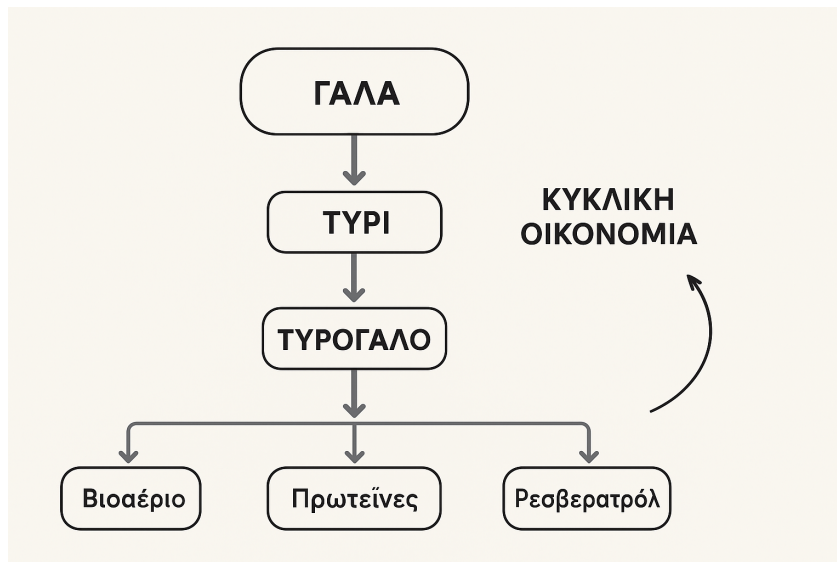
Απο οικονομικής άποψης η διαχείριση αυτών των αποβλήτων έχει σημαντικό κόστος. Οι επιχειρήσεις αναγκάζονται να επενδύσουν σε ακριβές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Για τις Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις, που κυριαρχούν συχνά στον τομέα (π.χ. τοπικά τυροκομεία στην Ελλάδα), αυτό το κόστος μπορεί να είναι απαγορευτικό, θέτοντάς τες σε μειονεκτική θέση έναντι μεγαλύτερων ανταγωνιστών. Η μη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς επιφέρει βαριά πρόστιμα και ζημιά στη φήμη (Danzeis et al., 2017; Awasthi et al., 2021).

#### 1.1.4. Η Μετάβαση προς την Κυκλική Οικονομία: Από το Πρόβλημα στην Ευκαιρία

Η παγκόσμια τάση προς την Κυκλική Οικονομία προσφέρει ένα νέο πλαίσιο αντιμετώπισης του προβλήματος. Σε αυτό το μοντέλο, τα βιομηχανικά υποπροϊόντα, όπως το τυρόγαλο, δεν θεωρούνται "απόβλητα" αλλά "δευτερογενείς πρώτες ύλες" που μπορούν να επανεισαχθούν στην αλυσίδα παραγωγής.

Η FAO (2025) τονίζει ότι η αξιοποίηση των υποπροϊόντων της αγροδιατροφικής βιομηχανίας είναι βιώσιμη σημαντική για την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), ιδίως του SDG 12 (Βέλτιστη Κατανάλωση και Παραγωγή). Η βιοτεχνολογία μπορεί να μετατρέψει το τυρόγαλο από ένα δαπανηρό πρόβλημα σε μια πηγή αξίας. Οι πιθανές διαδρομές αξιοποίησης περιλαμβάνουν:

- Ενέργεια: Παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης.
- Τρόφιμα: Ανάκτηση πρωτεϊνών ηλεκτροδιάλυσης για συστατικά τροφίμων υψηλής θρεπτικής αξίας.
- Βιοενεργά μόρια: Παραγωγή ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η ρεσβερατρόλη, μέσω βιοτεχνολογικών διεργασιών (Costa et al., 2021).



Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα ροής της Κυκλικής Οικονομίας σε τυροκομείο: παραγωγή τυριού και αξιοποίηση του τυρογάλακτος για την παραγωγή βιοαερίου, πρωτεϊνών και ρεσβερατρόλης (Costa et al., 2021).

#### 1.1.5. Συνοπτική Αποτίμηση και Στόχος της Εργασίας

Συνοψίζοντας, η διαχείριση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας, και ειδικά του τυρογάλακτος, αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα που έχει:

- Περιβαλλοντικές (ρύπανση υδάτων, ευτροφισμός),
- Οικονομικές (υψηλό κόστος διαχείρισης, χαμένες πρώτες ύλες) και
- Κοινωνικο-θεσμικές (περιβαλλοντικοί κανονισμοί, κοινωνική αποδοχή) διαστάσεις.

Η παραδοσιακή γραμμική προσέγγιση ("παράγω-καταναλώνω-απορρίπτω") είναι μη βιώσιμη. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να διερευνήσει τις δυνατότητες βιοτεχνολογικής αξιοποίησης του τυρογάλακτος στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Ειδικότερα, θα εστιάσει στη

δυνατότητα παραγωγής βιοενεργών μορίων, όπως η ρεσβερατρόλη, προτείνοντας έτσι μια καινοτόμα λύση που μπορεί ταυτόχρονα να μετριάσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κλάδου και να του προσδώσει νέο οικονομικό και συγκριτικό πλεονέκτημα. Η έρευνα αυτή ευθυγραμμίζεται πλήρως με τις παγκόσμιες προτεραιότητες για βιώσιμες γαλακτοκομικές πρακτικές, όπως τεκμηριώνονται και από τις προβλέψεις του OECD-FAO.

## 1.2 Το τυρόγαλο ως υποπροϊόν και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις.

Η παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων, και ειδικότερα τυριών, συνοδεύεται από τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων ενός ιδιαίτερα χαρακτηριστικού υποπροϊόντος, του τυρογάλακτος (cheese whey). Το τυρόγαλο προκύπτει κατά τη διαδικασία πήξης του γάλακτος, όταν οι πρωτεΐνες καζεΐνης και τα λιπαρά διαχωρίζονται για να σχηματίσουν το τυρί. Το υγρό που απομένει μετά την απομάκρυνση του πηγματος αποτελεί το τυρόγαλο, το οποίο περιέχει σημαντικά ποσά οργανικών και ανόργανων συστατικών. Αν και για δεκαετίες αντιμετωπιζόταν ως απόβλητο χωρίς εμπορική αξία, σήμερα θεωρείται μία πολύτιμη πηγή βιοδραστικών και θρεπτικών ουσιών, με δυνατότητες αξιοποίησης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

### 1.2.1 Ορισμός και τύποι τυρογάλακτος

Ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής του τυριού, το τυρόγαλο διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους: γλυκό (sweet whey) και όξινο (acid whey).

- Το γλυκό τυρόγαλο προκύπτει από την παρασκευή τυριών με χρήση τυριάς (όπως η φέτα, η μοτσαρέλα ή το κασέρι) και χαρακτηρίζεται από pH περίπου 6,0–6,5.
- Το όξινο τυρόγαλο παράγεται όταν η πήξη του γάλακτος επιτυγχάνεται με οξίνιση, συνήθως με γαλακτικό οξύ, και έχει pH 4,0–4,5.

Παρότι οι δύο μορφές έχουν παρόμοια σύσταση, το όξινο τυρόγαλο παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ανόργανα άλατα και μικρότερη σταθερότητα πρωτεϊνών.

Σύμφωνα με μελέτες (Pires et al., 2021), το τυρόγαλο αντιπροσωπεύει περίπου το 85–90% του συνολικού όγκου του γάλακτος που εισέρχεται στην παραγωγή τυριού, ενώ περιέχει 55% του συνολικού περιεχομένου των θρεπτικών συστατικών του γάλακτος. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε 1.000 λίτρα γάλακτος που χρησιμοποιούνται στην τυροκόμηση, παράγονται περίπου 850–900 λίτρα τυρογάλακτος.

### 1.2.2 Χημική σύσταση και ιδιαιτερότητες

Η σύνθεση του τυρογάλακτος ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του γάλακτος (αγελαδινό, κατσικίσιο ή πρόβειο), τη μέθοδο πήξης και την τεχνολογία παραγωγής του τυριού.

Κατά μέσο όρο, το τυρόγαλο αποτελείται από:

- Νερό: 93–94%
- Λακτόζη: 4,5–5,0%
- Πρωτεΐνες (οροπρωτεΐνες): 0,6–0,9%
- Λίπη: 0,3–0,5%
- Ανόργανα άλατα: 0,5–0,7%

Οι οροπρωτεΐνες, όπως η β-λακτογλοβουλίνη και η α-λακταλβουμίνη, είναι υψηλής βιολογικής αξίας και περιέχουν απαραίτητα αμινοξέα. Παρόλα αυτά, η ανάκτηση αυτών των

συστατικών απαιτεί εξειδικευμένες τεχνολογίες, γεγονός που εξηγεί γιατί μεγάλο μέρος του τυρογάλακτος παραμένει αναξιοποίητο.

Από περιβαλλοντικής άποψης, η υψηλή περιεκτικότητα σε λακτόζη είναι ο βασικός λόγος για την έντονη ρυπαντική ικανότητα του τυρογάλακτος. Η λακτόζη είναι ένα σάκχαρο που αποικοδομείται εύκολα, καταναλώνοντας οξυγόνο από τα υδάτινα οικοσυστήματα και προκαλώντας σημαντική αύξηση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) και του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) (Noticias, 2024).

### 1.2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ανεξέλεγκτη διάθεση του τυρογάλακτος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα του κλάδου της γαλακτοβιομηχανίας. Μελέτες έχουν δείξει ότι το BOD του ανεπεξέργαστου τυρογάλακτος μπορεί να ξεπεράσει τα 30.000–40.000 mg/L, ενώ το COD μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 60.000 mg/L (Griffith and Gobler, 2020). Αυτές οι τιμές είναι 100 φορές υψηλότερες από τα τυπικά όρια των αστικών λυμάτων, γεγονός που καθιστά το τυρόγαλο εξαιρετικά ρυπογόνο αν απορριφθεί χωρίς επεξεργασία.

Όταν το τυρόγαλο απορρίπτεται απευθείας σε υδάτινους αποδέκτες, η αποσύνθεση των οργανικών ουσιών οδηγεί στο φαινόμενο του ευτροφισμού έχοντας σαν αποτέλεσμα την μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, προκαλώντας ασφυξία στους υδρόβιους οργανισμούς και διαταραχή της οικολογικής ισορροπίας. Επιπλέον, η αναερόβια αποδόμηση των οργανικών συστατικών παράγει μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η διάθεση του τυρογάλακτος στο έδαφος μπορεί επίσης να έχει δυσμενείς επιπτώσεις, καθώς η συσσώρευση οργανικής ύλης και η οξίνιση (λόγω χαμηλού pH) μεταβάλλουν τη μικροβιακή ισορροπία του εδάφους και μπορεί να οδηγήσουν σε ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Επιπλέον, η συσσώρευση φωσφορικών και αζωτούχων ενώσεων επιτείνει το πρόβλημα της ευτροφικής επιβάρυνσης.

Σε τοπικό επίπεδο, η ανεπαρκής διαχείριση του τυρογάλακτος συνδέεται με δυσάρεστες οσμές, επιμολύνσεις στις γύρω περιοχές, και υγειονομικά προβλήματα, γεγονός που συχνά προκαλεί κοινωνικές αντιδράσεις και συγκρούσεις μεταξύ βιομηχανιών και τοπικών κοινωνιών (Griffith and Gobler, 2020; Noticias, 2024).

### 1.2.4 Παραδοσιακές πρακτικές διαχείρισης και περιορισμοί

Παραδοσιακά, οι τυροκομικές μονάδες αντιμετώπιζαν το τυρόγαλο ως απόβλητο προς απόρριψη ή στην βέλτιστη περίπτωση ως πρώτη ύλη για ζωοτροφή.

Η χρήση του ως ζωοτροφή (κυρίως για χοίρους) αποτελεί μια σχετικά απλή και χαμηλού κόστους πρακτική, όμως περιορίζεται από την ταχύτατη αλλοίωση του προϊόντος και τη δυσκολία μεταφοράς του λόγω του υψηλού ποσοστού νερού.

Μια άλλη παραδοσιακή μέθοδος ήταν η διάθεση του τυρογάλακτος στο έδαφος, με σκοπό τη λίπανση, ωστόσο η πρακτική αυτή έχει πλέον εγκαταλειφθεί σε πολλές χώρες λόγω του κινδύνου ρύπανσης υπόγειων υδάτων και της οσμικής διήθησης.

Σύγχρονες πρακτικές περιλαμβάνουν τη θερμική ή βιολογική επεξεργασία του τυρογάλακτος ή την ανάκτηση συστατικών του, όπως η λακτόζη και οι πρωτεΐνες, με τη χρήση τεχνολογιών μεμβρανών (ultrafiltration, nanofiltration).

Παρά ταύτα, σε παγκόσμια κλίμακα, λιγότερο από το 50% του παραγόμενου τυρογάλακτος αξιοποιείται αποτελεσματικά (FAO, 2025-2034). Το υπόλοιπο καταλήγει να απορρίπτεται ή να

υποβάλλεται σε στοιχειώδη επεξεργασία, γεγονός που συνεπάγεται σημαντική απώλεια πόρων και περιβαλλοντική επιβάρυνση (Giulianetti de Almeida et al., 2023).

#### 1.2.5 Το τυρόγαλο ως πηγή αξίας – η μετάβαση από το “waste” στο “resource”

Η αναγνώριση του τυρογάλακτος ως πολύτιμης πρώτης ύλης και όχι ως αποβλήτου αποτελεί κομβική αλλαγή στην προσέγγιση της γαλακτοβιομηχανίας. Το τυρόγαλο περιέχει ενώσεις υψηλής βιολογικής και βιοτεχνολογικής αξίας, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή βιοδραστικών προϊόντων, βιοπολυμερών, βιοκαυσίμων και αντιοξειδωτικών ουσιών.

Μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην μικροβιακή μετατροπή της λακτόζης σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως το αιθανόλη, το γαλακτικό οξύ και κυρίως πολυφαινολικές ενώσεις όπως η ρεσβερατρόλη, στο πλαίσιο μιας κυκλικής βιοοικονομίας. Η αξιοποίηση αυτή συνδυάζει περιβαλλοντικό όφελος με οικονομικό κέρδος, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος επεξεργασίας αποβλήτων.

Η μετάβαση από τη γραμμική στη κυκλική οικονομία απαιτεί ωστόσο επενδύσεις, τεχνολογική καινοτομία και θεσμική υποστήριξη. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις προτείνουν την ενσωμάτωση βιοδιεργασιών στις ίδιες τις παραγωγικές μονάδες, μετατρέποντας τα παραπροϊόντα σε νέες ροές αξίας και ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα (Costa et al., 2021).

### 1.3 Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας

Η γαλακτοβιομηχανία, ως ένας από τους ποιοί ενεργοβόρους και παραγωγός αποβλήτων στον κλάδο της βιομηχανίας τροφίμων, καλείται τα τελευταία χρόνια να αναθεωρήσει τις παραδοσιακές γραμμικές πρακτικές παραγωγής και διάθεσης. Το παραδοσιακό βιομηχανικό μοντέλο, που στηρίζεται στη λογική «παραγωγή – χρησιμοποίηση – απόρριψη» (linear economy), αποδεικνύεται ως μη βιώσιμη, τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά. Στο πλαίσιο αυτό, η κυκλική οικονομία (circular economy) αναδεικνύεται ως ένα νέο, ολοκληρωμένο μοντέλο παραγωγής, το οποίο στοχεύει στη διατήρηση των πόρων εντός του οικονομικού κύκλου, στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και στη μέγιστη αξιοποίηση κάθε παραπροϊόντος (International Energy Agency, 2017).

#### 1.3.1 Η έννοια της κυκλικής οικονομίας στη βιομηχανία τροφίμων

Η κυκλική οικονομία εφαρμόζεται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων, όπου οι απώλειες και τα παραπροϊόντα αποτελούν σημαντική πηγή περιβαλλοντικής πίεσης αλλά και ευκαιρία για καινοτομία. Σύμφωνα με τον FAO (2025), περίπου το 30% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων καταλήγει ως απόβλητο, ενώ η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μέσω του European Green Deal και του Circular Economy Action Plan (2020), ενθαρρύνει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων αξιοποίησης αποβλήτων τροφίμων και γεωργικών παραπροϊόντων. Η βασική αρχή είναι η μετάβαση από ένα σύστημα «end-of-ripeness» επεξεργασίας, που περιγράφει μια παραδοσιακή περιβαλλοντική προσέγγιση, όπου η ρύπανση ή τα απόβλητα αντιμετωπίζονται μόνο αφού έχουν παραχθεί όπου τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως πρόβλημα, σε ένα “zero waste” μοντέλο, όπου θεωρούνται πολύτιμη πρώτη ύλη.

Στη γαλακτοβιομηχανία, η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η παραγωγή αποβλήτων είναι αναπόφευκτη. Το τυρόγαλο, που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν υποπροϊόν χαμηλής αξίας, αποτελεί πλέον το επίκεντρο αυτής της μεταστροφής,

λειτουργώντας ως συνδετικός κρίκος μεταξύ περιβαλλοντικής διαχείρισης και βιοτεχνολογικής καινοτομίας (Akhlaghi et al., 2019).

### 1.3.2 Το μοντέλο του βιοαντιδραστήρα της “Dairy Biorefinery”

Η έννοια του βιοαντιδραστήρα γαλακτοκομικών (Dairy Biorefinery), όπως περιγράφεται από τους Asunis et al. (2019), αποτελεί μια ολοκληρωμένη εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας. Στο μοντέλο αυτό, οι ροές αποβλήτων της παραγωγής (τυρόγαλο, πλύσεις, υπολείμματα) δεν απορρίπτονται, αλλά εισάγονται σε μια σειρά διεργασιών ανάκτησης ενέργειας και βιοπροϊόντων. Έτσι, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η περιβαλλοντική αποφόρτιση και η παραγωγή προστιθέμενης αξίας.

Οι βασικές διεργασίες που εντάσσονται σε ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνουν:

- Αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου (μεθάνιο και CO<sub>2</sub>).
- Ζυμωτικές διεργασίες για την παραγωγή αιθανόλης, γαλακτικού οξέος, πολυυδροξυαλκανοϊκών (PHA) και πολυγαλακτικού οξέος (PLA).
- Βιοτεχνολογικές διεργασίες μικροοργανισμών για τη δημιουργία βιοδραστικών ενώσεων, όπως η ρεσβερατρόλη, τα πολυφαινολικά εκχυλίσματα και οι αντιοξειδωτικές πρωτεΐνες.
- Επαναχρησιμοποίηση νερού και ανάκτηση πρωτεϊνικών κλασμάτων μέσω τεχνολογιών μεμβρανών (ultrafiltration, nanofiltration).

Το “biorefinery concept” μέσω τον βιοαντιδραστήρων επιδιώκει να μετατρέψει τη γαλακτοβιομηχανία από μονάδα παραγωγής αποβλήτων σε πολυλειτουργικό σύστημα κυκλικής αξιοποίησης. Σε μια τέτοια προσέγγιση, κάθε ροή αποβλήτου αποτελεί είσοδο για μια νέα παραγωγική διεργασία — αρχή που αποτυπώνει πλήρως τη φιλοσοφία της κυκλικής οικονομίας (Asunis et al., 2019).

### 1.3.3 Μορφές αξιοποίησης του τυρογάλακτος

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες: ενεργειακή, βιοτεχνολογική και διατροφική.

#### 1. Ενεργειακή αξιοποίηση:

Το οργανικό φορτίο του τυρογάλακτος καθιστά το υπόστρωμα κατάλληλο για αναερόβια χώνευση, με παραγωγή βιοαερίου ή βιοϋδρογόνου. Αυτή η διεργασία όχι μόνο μειώνει το BOD και το COD του αποβλήτου, αλλά παράγει και ανανεώσιμη ενέργεια που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στις ίδιες εγκαταστάσεις.

#### 2. Βιοτεχνολογική αξιοποίηση:

Η λακτόζη και οι πρωτεΐνες του τυρογάλακτος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για τη μικροβιακή παραγωγή πολύτιμων προϊόντων, όπως οργανικά οξέα, αιθανόλη, ένζυμα, βιοπολυμερή, αλλά και ρεσβερατρόλη μέσω γενετικά τροποποιημένων στελεχών όπως το *Saccharomyces cerevisiae*.

#### 3. Διατροφική και ζωοτροφική αξιοποίηση:

Οι πρωτεΐνες ορού γάλακτος είναι εξαιρετικά θρεπτικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συμπληρωμάτων διατροφής, πρωτεϊνικών ροφημάτων ή ζωοτροφών υψηλής πρωτεϊνικής αξίας, ενισχύοντας έτσι τη βιώσιμη κυκλική κατανάλωση (Akhlaghi et al., 2017).

### 1.3.4 Απομόνωση και αξιοποίηση βιομάζας από προϊόντα τυροκόμησης

Μία από τις πλέον καινοτόμες κατευθύνσεις στη βιοτεχνολογική αξιοποίηση του τυρογάλακτος είναι η παραγωγή και απομόνωση μικροβιακής βιομάζας, δηλαδή η μετατροπή του σε νέα βιολογική ύλη μέσω ζύμωσης.

Το τυρόγαλο, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε λακτόζη, αμινοξέα και ανόργανα στοιχεία, αποτελεί ιδανικό υπόστρωμα για την καλλιέργεια μικροοργανισμών. Κατά τη διάρκεια της ζύμωσης, οι μικροοργανισμοί αυτοί αναπτύσσονται και πολλαπλασιάζονται, παράγοντας Single-Cell Protein (SCP) — δηλαδή πρωτεΐνη που προέρχεται από μονοκύτταρους οργανισμούς, όπως ζύμες, βακτήρια ή μικροφύκη.

Η παραγόμενη SCP είναι πλούσια σε πρωτεΐνες (έως και 80% ξηρής ουσίας), βιταμίνες και λιπίδια, και μπορεί να αξιοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές. Στελέχη όπως τα *Kluyveromyces marxianus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus spp.* και *Corynebacterium glutamicum* έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την ανάπτυξη βιομάζας μέσω ζυμωτικών διεργασιών που αξιοποιούν τη λακτόζη ως κύρια πηγή άνθρακα.

Η μικροβιακή βιομάζα που παράγεται μπορεί να:

- χρησιμοποιηθεί ως ζωοτροφή ή συμπλήρωμα διατροφής, χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και βιταμίνες,
- αξιοποιηθεί ως βιοκατάλυτης ή πηγή ενζύμων για βιομηχανικές και αγροβιοτεχνολογικές εφαρμογές,
- ή να αποτελέσει ενδιάμεσο στάδιο για την παραγωγή βιοδραστικών ουσιών όπως η ρεσβερατρόλη και τα πολυφαινολικά εκχυλίσματα.

Η διαδικασία απομόνωσης της βιομάζας περιλαμβάνει στάδια ζύμωσης, φυγοκέντρωσης ή καθίζησης για τον διαχωρισμό της κυτταρικής μάζας, και ενίοτε λυοφιλίωσης ή αποξηράνσης για τη σταθεροποίησή της. Ανάλογα με τον τελικό σκοπό, η βιομάζα μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία ή εκχύλιση για την ανάκτηση πρωτεϊνών, λιπιδίων ή πολυσακχαριτών υψηλής αξίας.

Η πρακτική αυτή παρουσιάζει διπλό όφελος, αφενός μειώνει το οργανικό φορτίο των αποβλήτων του τυρογάλακτος, περιορίζοντας τη ρύπανση, και αφετέρου παράγει προϊόντα με εμπορική αξία που μπορούν να ενταχθούν ξανά στον παραγωγικό κύκλο. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάπτυξη μικροβιακής βιομάζας από υποπροϊόντα τυροκόμησης δεν αποτελεί απλώς μέθοδο διαχείρισης αποβλήτων, αλλά βιοτεχνολογική πρακτική κυκλικής οικονομίας.

Αποτελεί, δηλαδή, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μετατροπής των αποβλήτων σε πόρους, συνδέοντας άμεσα την περιβαλλοντική προστασία με τη βιομηχανική καινοτομία και τη βιώσιμη παραγωγή (Ubando et al., 2020).

### 1.3.5 Οφέλη και προοπτικές

Η εφαρμογή πρακτικών κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία επιφέρει πολλαπλά οφέλη:

- Περιβαλλοντικά: μείωση της ρύπανσης, περιορισμός εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, εξοικονόμηση νερού και ενέργειας.
- Οικονομικά: μετατροπή αποβλήτων σε προϊόντα με εμπορική αξία, μείωση κόστους επεξεργασίας και δημιουργία νέων ροών εισοδήματος.
- Κοινωνικά: ενίσχυση της τοπικής και αγροτικής οικονομίας, ανάπτυξη νέων θέσεων εργασίας και προώθηση της περιβαλλοντικής υπευθυνότητας.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2024), η πλήρης εφαρμογή κυκλικών πρακτικών στη βιομηχανία τροφίμων μπορεί να μειώσει την παραγωγή αποβλήτων κατά έως και 50% έως το 2030, ενώ ταυτόχρονα να αυξήσει την αποδοτικότητα πόρων κατά 25%.

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος μέσω βιοαντιδραστήρων, παραγωγής βιομάζας και βιοδραστικών ενώσεων, ενσωματώνει στην πράξη τους στόχους της πράσινης μετάβασης και της βιώσιμης ανάπτυξης (Ubando et al., 2020; Awasthi et al., 2021).

## 1.4 Υπάρχουσες τεχνολογίες και αξιοποίηση του τυρογάλακτος

Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών για την αξιοποίηση του τυρογάλακτος αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προς τη μετάβαση της γαλακτοβιομηχανίας σε ένα μοντέλο της κυκλικής και της βιώσιμης παραγωγικής οικονομίας. Η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών έχει επιτρέψει την εξέλιξη από απλές παραδοσιακές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων προς ολοκληρωμένα συστήματα ανάκτησης πόρων και παραγωγής βιοπροϊόντων. Σήμερα, οι διαθέσιμες τεχνολογίες διακρίνονται σε φυσικοχημικές, ενεργειακές διεργασίες και βιοτεχνολογικές, ενώ συχνά συνδυάζονται σε ολοκληρωμένα συστήματα βιοδιωλιστηρίων (biorefineries) (European Dairy Association, 2019).

### 1.4.1 Εισαγωγή – Το τεχνολογικό πλαίσιο της αξιοποίησης

Παραδοσιακά, το τυρόγαλο αντιμετωπιζόταν ως ένα απόβλητο και η διαχείρισή του περιοριζόταν μόνο σε απλές πρακτικές διάθεσης ή περιορισμένης επαναχρησιμοποίησης. Παρόλο αυτά, η ραγδαία αύξηση της παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων, σε συνδυασμό με τις αυστηρότερες περιβαλλοντικές νομοθεσίες, οδήγησαν στην ανάγκη για τεχνολογικά προηγμένες λύσεις που μειώνουν το οργανικό φορτίο και παράλληλα δημιουργούν νέα προϊόντα αξίας.

Σύμφωνα με τον FAO (2024), η αξιοποίηση των παραπροϊόντων του γάλακτος μέσω τεχνολογικών διεργασιών μπορεί να μειώσει την περιβαλλοντική επιβάρυνση της γαλακτοβιομηχανίας έως και 60%, ενώ ταυτόχρονα να προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη από την ανάκτηση πρωτεϊνών, λακτόζης και βιοδραστικών ενώσεων (European Dairy Association, 2019).

### 1.4.2 Φυσικοχημικές τεχνολογίες ανάκτησης

Οι φυσικοχημικές διεργασίες αξιοποίησης του τυρογάλακτος στοχεύουν κυρίως στην ανάκτηση αλλά και τον καθαρισμό των συστατικών του, όπως είναι το νερό, οι πρωτεΐνες, η λακτόζη και τα ανόργανα άλατα. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, επιτρέποντας τη δημιουργία βιομηχανικών μονάδων που λειτουργούν με αρχές μηδενικού αποβλήτου.

#### - Μεμβρανικές τεχνολογίες

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία φυσικοχημικών διεργασιών είναι οι μεμβρανικές τεχνολογίες. Όπως περιγράφουν ο Slavon (2017), χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η μικροδιήθηση (MF), η υπερδιήθηση (UF), η νανοδιήθηση (NF) και η αντίστροφη όσμωση (RO).

Οι μεμβράνες επιτρέπουν το κλασματικό διαχωρισμό των συστατικών του τυρογάλακτος ανάλογα με το μέγεθος των μορίων, οδηγώντας στην απομόνωση:

- πρωτεϊνών ορού (β-λακτογλοβουλίνη, α-λακταλβουμίνη),
- λακτόζης,
- και νερού υψηλής καθαρότητας που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Η υπερδιήθηση (UF), αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την παραγωγή συμπυκνωμένων πρωτεϊνών ορού γάλακτος (Whey Protein Concentrate – WPC), οι οποίες χρησιμοποιούνται εκτενώς στη βιομηχανία τροφίμων και αθλητικής διατροφής. Η νανοδιήθηση (NF) και η αντίστροφη όσμωση συμβάλλουν (RO) στην περαιτέρω ανάκτηση λακτόζης και στη μείωση του όγκου του υγρού, μειώνοντας έτσι το κόστος μεταφοράς και επεξεργασίας.

#### - Εξάτμιση και ξήρανση

Η εξάτμιση (evaporation) και η ξήρανση με ψεκασμό (spray drying) χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκόνης τυρογάλακτος, η οποία είναι σταθερή, εύκολα μεταφερόμενη και

αξιοποιείται σε τρόφιμα και ζωοτροφές.

Παρότι ότι είναι αρκετά ενεργοβόρες τεχνολογίες, αυτές οι διεργασίες επιτρέπουν την παραγωγή προϊόντων με μεγάλη διάρκεια ζωής και συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση αποβλήτων.

- Καθίζηση και καθαρισμός

Συμπληρωματικά, διεργασίες όπως η καθίζηση, η φύσηξη με αέρα και η εναλλαγή ιόντων (ion exchange) χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων αλάτων ή την τροποποίηση του pH, ώστε να διευκολύνεται η περαιτέρω βιοτεχνολογική επεξεργασία.

Οι φυσικοχημικές διεργασίες αποτελούν, επομένως, το πρώτο βήμα σε μια αλυσίδα πολυεπίπεδης αξιοποίησης, όπου το τυρόγαλο μετατρέπεται σε καθαρό υπόστρωμα για πιο εξειδικευμένες διεργασίες (Domingos et al. 2018).

#### 1.4.3 Βιοτεχνολογικές μέθοδοι αξιοποίησης

Η βιοτεχνολογία είναι η τεχνολογία που προσφέρει τις πιο καινοτόμες λύσεις για την αξιοποίηση του τυρογάλακτος, μετατρέποντάς το υποπροϊόν το σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας μέσω μικροβιακών διεργασιών.

- Ζύμωση για παραγωγή βιοπροϊόντων

Η λακτόζη του τυρογάλακτος μπορεί να αποτελέσει πηγή άνθρακα για τη ζύμωση από μικροοργανισμούς όπως *Kluyveromyces marxianus* και *Saccharomyces cerevisiae*.

Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο στέλεχος και τις συνθήκες καλλιέργειας, μπορούν να παραχθούν:

- Αιθανόλη, μέσω αλκοολικής ζύμωσης,
- Οξικό οξύ, κιτρικό οξύ και βιοπολυμερή (PHA).
- Γαλακτικό οξύ, με εφαρμογές σε βιοδιασπώμενα πολυμερή (PLA),

Σύμφωνα με τους Wenzel et al. (2017), η αξιοποίηση του τυρογάλακτος ως υπόστρωμα για ζύμωση μπορεί να μειώσει έως και 80% του οργανικού φορτίου (BOD), καθιστώντας τη μέθοδο εξαιρετικά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική.

- Παραγωγή βιοδραστικών ενώσεων

Τα τελευταία χρόνια, αναπτύσσονται διεργασίες που αξιοποιούν το τυρόγαλο και για τη βιοτεχνολογική παραγωγή πολυφαινόλων και αντιοξειδωτικών, όπως είναι η ρεσβερατρόλη, μέσω γενετικά τροποποιημένων στελεχών *S. cerevisiae*.

Αυτή η εφαρμογή συνδέει τη διαχείριση αποβλήτων με τη βιομηχανία φαρμακευτικών και καλλυντικών προϊόντων, προσδίδοντας ιδιαίτερη οικονομική και ερευνητική αξία στη διαδικασία.

- Ανάπτυξη και απομόνωση βιομάζας

Η παραγωγή μικροβιακής βιομάζας (Single-Cell Protein) από το τυρόγαλο είναι μια ακόμη βιοτεχνολογική προσέγγιση που συνδυάζει περιβαλλοντική αποφόρτιση και παραγωγή πρωτεϊνών υψηλής αξίας.

Τα στελέχη *Lactobacillus spp.*, *Kluyveromyces marxianus*, και *Corynebacterium glutamicum* χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της λακτόζης σε πρωτεΐνη μικροβιακής προέλευσης, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί ως ζωοτροφή ή συστατικό τροφίμων (Cunha et al. 2021).

#### 1.4.4 Ενεργειακές διεργασίες

Η ενεργειακή αξιοποίηση του τυρογάλακτος αποτελεί έναν από τους πιο αποδοτικούς τρόπους μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γαλακτοβιομηχανίας.

- Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion) χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς που διασπών το οργανικό φορτίο του τυρογάλακτος απουσία οξυγόνου, παράγοντας βιοαέριο (μεθάνιο και CO<sub>2</sub>).

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρκετές χρήσεις όπως είναι η παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας τις βιομηχανίες πιο ενεργειακά αυτόνομες.

Η διαδικασία επιπλέον παράγει υπόλειμμα (digestate), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιολίπασμα, ενισχύοντας περαιτέρω τον κυκλικό χαρακτήρα της αξιοποίησης.

- Παραγωγή βιοϋδρογόνου

Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι με κατάλληλη ρύθμιση των συνθηκών (pH, θερμοκρασία, χρόνο παραμονής), το τυρόγαλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή βιοϋδρογόνου, προσφέροντας προοπτικές για “πράσινη” ενέργεια μηδενικών εκπομπών (Borges et al. 2021).

#### 1.4.5 Ενοποιημένα και κυκλικά συστήματα βιοαντιδραστήρων (Biorefinery Models)

Τα τελευταία χρόνια, η τάση μεταβαίνει προς την ανάπτυξη ολοκληρωμένων βιοαντιδραστήρων (Integrated Dairy Biorefineries), στα οποία οι φυσικοχημικές, βιοτεχνολογικές και ενεργειακές διεργασίες συνδυάζονται αρμονικά σε ένα ενιαίο σύστημα.

Όπως επισημαίνει ο Meyer (2014), ο στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η πλήρης αξιοποίηση όλων των ροών της παραγωγικής διαδικασίας – από την επεξεργασία του γάλακτος έως τα τελικά υποπροϊόντα – με τέτοιο τρόπο και τεχνολογίες ώστε καμία ουσία να μην απορρίπτεται, αλλά να επανεκτιμάσσεται στον κύκλο παραγωγής.

Σε ένα τυπικό σύστημα βιοαντιδραστήρων γάλακτος, τα διάφορα στάδια λειτουργούν συμπληρωματικά:

Αρχικά πραγματοποιείται η μεμβρανική ανάκτηση πρωτεϊνών, στη συνέχεια η ζύμωση της υπολειπόμενης λακτόζης για την παραγωγή αιθανόλης ή οργανικών οξέων, ενώ τα υπολείμματα της διαδικασίας οδηγούνται σε αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου και βιολιπασμάτων.

Τέλος, το νερό και τα θρεπτικά συστατικά που ανακτώνται μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην παραγωγή, κλείνοντας έτσι τον κύκλο της διεργασίας.

Αυτή η “κλειστή διαδικασία” αντιπροσωπεύει στην πράξη την ουσία της κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία, όπου κάθε παραπροϊόν μετατρέπεται σε πόρο και η γραμμική λογική “παραγωγή – κατανάλωση – απόρριψη” αντικαθιστώντας ένα από τα βιώσιμα και αυτοτροφοδοτούμενα παραγωγικά συστήματα (Meyer 2014).

#### 1.4.6 Συνοψίζοντας – Τεχνολογικές προκλήσεις και προοπτικές

Η τεχνολογική αξιοποίηση του τυρογάλακτος έχει προχωρήσει σημαντικά, ωστόσο εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις:

- Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης και ενεργειακές απαιτήσεις.
- Ανάγκη για τεχνολογίες μικρής και μεσαίας κλίμακας, προσαρμοσμένες στις ανάγκες των τοπικών τυροκομείων.
- Ελλιπής θεσμική υποστήριξη και χρηματοδότηση για καινοτόμες εφαρμογές.

Παρά τα εμπόδια, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι πολιτικές της Ε.Ε. για την πράσινη μετάβαση καθιστούν την αξιοποίηση του τυρογάλακτος ένα από τα πιο υποσχόμενα πεδία εφαρμογής της κυκλικής βιοοικονομίας. Η συνδυαστική χρήση φυσικοχημικών, βιοτεχνολογικών και ενεργειακών διεργασιών οδηγεί σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που μετατρέπει τα βιομηχανικά απόβλητα σε πόρους και συμβάλλει στην ουσιαστική αναβάθμιση της γαλακτοβιομηχανίας (Meng, et al. 2021).

## 1.5 Συνοψίζοντας

Η διαχείριση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας συνιστά ένα σύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα, με περιβαλλοντικές, τεχνολογικές και οικονομικές προκλήσεις. Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια, το τυρόγαλο αποτελεί το κύριο παραπροϊόν της παραγωγής τυριού, με υψηλό οργανικό φορτίο και σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών που, εάν δεν αξιοποιηθούν, επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Η μετάβαση προς ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία δημιουργεί νέες δυνατότητες, μετατρέποντας τα υποπροϊόντα σε πρώτες ύλες για την παραγωγή ενέργειας, βιοδραστικών ουσιών και βιοπροϊόντων.

Η επιστημονική κοινότητα έχει αναπτύξει πληθώρα τεχνολογικών λύσεων όπως από φυσικοχημικές διεργασίες όπως είναι η μεμβρανική διήθηση και την εξάτμιση, έως βιοτεχνολογικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν ζυμώσεις, παραγωγή βιομάζας και μετατροπή της λακτόζης σε ενώσεις υψηλής αξίας.

Οι τεχνολογίες αυτές όχι μόνο μειώνουν τα απόβλητα, αλλά επίσης συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτάρκεια των βιομηχανιών και στην παραγωγή νέων εμπορεύσιμων προϊόντων.

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος μέσα από ολοκληρωμένα συστήματα βιοαντιδραστήρων (Integrated Dairy Biorefineries) συνιστά τη σύγχρονη τάση προς τη βιώσιμη παραγωγή, καθώς ενσωματώνει την ανάκτηση πρωτεϊνών, την παραγωγή βιοκαυσίμων, και τη βιοτεχνολογική σύνθεση ουσιών όπως η ρεσβερατρόλη.

## 1.6 Δομή της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε πέντε βασικά κεφάλαια, τα οποία διαρθρώνονται με τρόπο που να εξασφαλίζει τη σταδιακή και λογική μετάβαση από τη θεωρητική θεμελίωση του αντικειμένου έως την ανάλυση των τεχνολογικών, βιοτεχνολογικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων του ζητήματος. Η δομή της εργασίας αποσκοπεί στην παρουσίαση μιας ολικής προσέγγισης του προβλήματος της διαχείρισης των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας, της αξιοποίησης του τυρογάλακτος και της δυνατότητας μετατροπής του σε προϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας όπως είναι η ρεσβερατρόλη, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

- Το Κεφάλαιο 1 συγκροτεί το θεωρητικό και εισαγωγικό πλαίσιο της εργασίας. Παρουσιάζει την υφιστάμενη κατάσταση της γαλακτοβιομηχανίας, την κλίμακα και τη φύση των παραγόμενων αποβλήτων, καθώς και το πρόβλημα της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνδέεται με τη διάθεση του τυρογάλακτος. Αναλύονται οι βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας, η οποία προωθεί τη μετάβαση από το γραμμικό στο ανακυκλούμενο παραγωγικό μοντέλο, καθώς και οι τεχνολογίες που ήδη εφαρμόζονται διεθνώς για την αξιοποίηση του τυρογάλακτος ως πρώτης ύλης. Το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί ως εισαγωγή στο πεδίο, προσφέροντας τη θεωρητική βάση και τη βιβλιογραφική θεμελίωση για τα επόμενα τμήματα της εργασίας.
- Το Κεφάλαιο 2 εστιάζει στην παραγωγή και σύνθεση των γαλακτοκομικών αποβλήτων, αναλύοντας διεξοδικά τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή, επεξεργασία και μεταποίηση του γάλακτος και οδηγούν στη δημιουργία αποβλήτων. Εξετάζονται τα στάδια παραγωγής τυριών, γιαουρτιού, βουτύρου και άλλων γαλακτοκομικών προϊόντων, καθώς και τα είδη αποβλήτων που προκύπτουν (στερεά, υγρά, οργανικά). Παρουσιάζονται δεδομένα σχετικά

με τη χημική και φυσική σύσταση του τυρογάλακτος, όπως η περιεκτικότητα σε λακτόζη, πρωτεΐνες, λίπη και ανόργανα άλατα, καθώς και δείκτες ρύπανσης όπως το BOD και το COD.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συσχέτιση της παραγωγής αποβλήτων με το μέγεθος και τον τύπο της βιομηχανικής μονάδας, καθώς και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ανεξέλεγκτη διάθεση αυτών των αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες. Μέσα από δεδομένα του FAO, της Eurostat και πρόσφατες ερευνητικές αναφορές, αναδεικνύεται η ανάγκη για εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών επαναχρησιμοποίησης και ανάκτησης. Το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στο θεωρητικό πλαίσιο και στη βιοτεχνολογική προσέγγιση που ακολουθεί, προσδίδοντας σαφή εικόνα της πρώτης ύλης που επιδιώκεται να αξιοποιηθεί.

- Το Κεφάλαιο 3 αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας, καθώς εστιάζει στη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης από γαλακτοκομικά απόβλητα. Αρχικά παρουσιάζονται τα χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά της ρεσβερατρόλης, οι φυσικές της πηγές και οι βιολογικές ιδιότητες που την καθιστούν ουσία υψηλού ενδιαφέροντος για τη φαρμακευτική, τη διατροφή και τη βιομηχανία καλλυντικών.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι βιοτεχνολογικές διεργασίες παραγωγής της μέσω μικροοργανισμών, με έμφαση σε στελέχη του *Saccharomyces cerevisiae* και του *Kluyveromyces marxianus*, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη λακτόζη του τυρογάλακτος ως πηγή άνθρακα. Παρουσιάζονται επίσης οι μεταβολικές οδοί που οδηγούν στη βιοσύνθεση της ρεσβερατρόλης, καθώς και οι γενετικές παρεμβάσεις που επιτρέπουν την ενίσχυση της παραγωγής της. Τέλος, εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία παραγωγής της όπως είναι η θερμοκρασία, το pH και η σύσταση υποστρώματος και οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας σε εργαστηριακό και βιομηχανικό επίπεδο.

- Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στην αξιολόγηση των τεχνολογιών και της βιωσιμότητας των εφαρμογών αυτών. Παρουσιάζονται συγκριτικά στοιχεία για την οικονομική αποδοτικότητα των διαφορετικών διεργασιών, τα κόστη εγκατάστασης και της λειτουργίας, και τα πιθανά οφέλη από την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας. Επιπλέον, πραγματοποιείται περιβαλλοντική αποτίμηση μέσω της προσέγγισης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), όπου εξετάζεται η μείωση των εκπομπών ρύπων, η εξοικονόμηση ενέργειας και η ορθολογική χρήση των φυσικών πόρων.

Στο τέλος του κεφαλαίου, συζητούνται οι προοπτικές εφαρμογής των ολοκληρωμένων βιοαντιδραστήρων γάλακτος σε βιομηχανική κλίμακα, τα πιθανά τεχνολογικά εμπόδια και οι απαιτήσεις πολιτικής και χρηματοδότησης για την ευρύτερη υιοθέτηση αυτών των λύσεων στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.

- Τέλος, το Κεφάλαιο 5 συγκεντρώνει τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνει μελλοντικές κατευθύνσεις για την επιστημονική και βιομηχανική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων. Συνοψίζονται οι βασικές διαπιστώσεις σχετικά με τη δυνατότητα μετατροπής των γαλακτοκομικών αποβλήτων από περιβαλλοντικό πρόβλημα σε πηγή παραγωγής βιοδραστικών ουσιών, όπως η ρεσβερατρόλη, και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, τεχνολογική ανάπτυξη και ενσωμάτωση τέτοιων λύσεων σε μοντέλα βιώσιμης παραγωγής τροφίμων.

Η συνολική δομή της εργασίας στοχεύει στη δημιουργία μιας συνεκτικής επιστημονικής αφήγησης, όπου κάθε κεφάλαιο λειτουργεί ως φυσική συνέχεια του προηγούμενου. Μέσα από την ανάλυση του θεωρητικού πλαισίου, την παρουσίαση της σύνθεσης των αποβλήτων του

τυρογάλακτος, την εμβάθυνση στη βιοτεχνολογική παραγωγή και την αξιολόγηση της βιωσιμότητας, αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο η κυκλική βιοοικονομία μπορεί να προσφέρει λύσεις υψηλής τεχνολογικής και περιβαλλοντικής αξίας στη σύγχρονη γαλακτοβιομηχανία.

## 1.7 Μεθοδολογία της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε βιβλιογραφική – θεωρητική μελέτη, με στόχο τη συλλογή, ανάλυση και σύνθεση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης σχετικά με την αξιοποίηση γαλακτοκομικών αποβλήτων και τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης.

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε κυρίως κατά το χρονικό διάστημα 2020–2025 σε διεθνείς βάσεις δεδομένων, όπως:

- Scopus,
- ScienceDirect,
- PubMed,
- SpringerLink,
- FAO Reports,
- Επίσημες ευρωπαϊκές πηγές (EU Circular Economy Reports).

Χρησιμοποιήθηκαν λέξεις-κλειδιά όπως “whey valorization”, “cheese whey biorefinery”, “resveratrol biosynthesis”, “*Saccharomyces cerevisiae* fermentation”, “circular economy dairy industry” και “biotechnological waste management”.

Τα άρθρα που επιλέχθηκαν πληρούσαν κριτήρια επιστημονικής εγκυρότητας (peer-reviewed), χρονολογικής επικαιρότητας και θεματικής συνάφειας με το αντικείμενο της μελέτης.

Η ανάλυση οργανώθηκε θεματικά, με βάση:

- το είδος της τεχνολογικής διεργασίας (φυσικοχημική, βιοτεχνολογική, ενεργειακή),
- τον τύπο του μικροοργανισμού ή συστήματος βιοδυσλυστηρίου,
- τα παραγόμενα προϊόντα (π.χ. πρωτεΐνες, βιοαέριο, ρεσβερατρόλη).

Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε τη συστηματική παρουσίαση των δεδομένων και την εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων που στηρίζουν τη θεωρητική υπόθεση της εργασίας: ότι η αξιοποίηση των γαλακτοκομικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής βιοτεχνολογίας μπορεί να μετατρέψει ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα σε παραγωγική ευκαιρία υψηλής αξίας.

## 2. Παραγωγή και Σύσταση Γαλακτοκομικών Αποβλήτων

Η γαλακτοβιομηχανία παράγει ετησίως τεράστιες ποσότητες παραπροϊόντων και αποβλήτων, τα οποία αποτελούν πρόκληση για τη βιώσιμη ανάπτυξη και διαχείριση των φυσικών πόρων. Μεταξύ αυτών είναι το τυρόγαλο, η υγρή μάζα που απομένει μετά την πήξη του γάλακτος στην παραγωγή του τυριού. Το τυρόγαλό ξεχωρίζει για το υψηλό οργανικό φορτίο και τις δυσκολίες στη διάθεση χωρίς επεξεργασία. Σε πολλές περιπτώσεις, μεγαλύτερο μέρος του τυρογάλακτος αντιμετωπίζεται ως απόβλητο παρά ως πρώτη ύλη (Pires et al., 2023).

Η σύνθεση του τυρογάλακτος είναι κατά κυρίο λόγο η λακτόζη, οι πρωτεΐνες ορού και τα ανόργανα συστατικά. Το καθιστά ταυτόχρονα επιβλαβές για το περιβάλλον και με σημαντικό δυναμικό αξιοποίησης. Οι προκλήσεις που προκύπτουν από την οργανική ρύπανση, τις οσμές και τη μείωση της ποιότητας των υδάτινων πόρων καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για ουσιαστικές λύσεις.

Στα πλαίσια μιας επιστημονικής μεταπτυχιακής εργασίας, το παρόν κεφάλαιο επιδιώκει να αναδείξει:

- Την κλίμακα και τη σημασία του προβλήματος της παραγωγής αποβλήτων στη γαλακτοβιομηχανία.
- Τα βήματα της παραγωγικής διαδικασίας όπου παράγονται οι κύριες ροές αποβλήτων.
- Την ποιοτική και ποσοτική σύσταση αυτών των ροών.
- Τις περιβαλλοντικές και τεχνολογικές δυσκολίες που σχετίζονται με την αξιοποίησή τους.
- Η κατανόηση του πώς και πόσο παράγονται τα απόβλητα, καθώς και της σύνθεσής τους, αποτελεί θεμέλιο για τις μεταγενέστερες ενότητες όπου θα διερευνηθούν οι δυνατότητες αξιοποίησης (π.χ. βιοτεχνολογικές διεργασίες) (Mirzakulova et al., 2025).

### 2.1 Η Κλίμακα και η Σημασία των Αποβλήτων της Γαλακτοβιομηχανίας

Η βιομηχανία γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων αποτελεί έναν από τους πιο δυναμικούς και στρατηγικά κρίσιμους κλάδους του παγκόσμιου αγροδιατροφικού τομέα. Το γάλα και τα προϊόντα του καταλαμβάνουν βασική θέση στη διατροφή του ανθρώπου, παρέχοντας πρωτεΐνες υψηλής βιολογικής αξίας, ασβέστιο, λιπίδια και βιταμίνες, ενώ ταυτόχρονα αποτελούν σημαντική πηγή εισοδήματος για εκατομμύρια αγρότες και εργαζομένους στη μεταποίηση. Σύμφωνα με τα πλέον πρόσφατα στοιχεία του FAO (2024), παρουσιάζοντας σταθερή ανοδική τάση κατά μέσο όρο 1,4 % ετησίως όπου η παγκόσμια παραγωγή γάλακτος εκτιμάται σε περίπου 965 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Η Ινδία καταλαμβάνει την πρώτη θέση παγκοσμίως (περίπου 226 εκατ. τόννοι), ακολουθούμενη από την Ευρωπαϊκή Ένωση (27) με 154 εκατ. τόνους και τις Ηνωμένες Πολιτείες με 105 εκατ. τόνους. Παρά τη δεύτερη θέση σε όγκο, η Ευρωπαϊκή Ένωση θεωρείται ο πλέον βιομηχανοποιημένος και τεχνολογικά αποδοτικός παραγωγός παγκοσμίως, με υψηλό ποσοστό επεξεργασίας και εξαγωγών γαλακτοκομικών προϊόντων, ακολουθεί ο πίνακας 1 αναλύοντας την παγκόσμια παραγωγή.

Η ανάπτυξη της γαλακτοβιομηχανίας, ωστόσο, συνοδεύεται από αυξανόμενη ρύπανση στους φυσικούς πόρους και στο περιβάλλον. Η επεξεργασία του γάλακτος σε προϊόντα όπως το τυρί, το γιαούρτι και το βούτυρο συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση νερού, ενέργειας και χημικών ουσιών καθαρισμού, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί μεγάλες ποσότητες αποβλήτων και παραπροϊόντων (Mirzakulova et al., 2025). Ενδεικτικά, εκτιμάται ότι το 80–90 % του συνολικού όγκου του γάλακτος που εισέρχεται στη διαδικασία τυροποίησης καταλήγει ως υγρό υπόλειμμα ή τυρόγαλο (Pires et al., 2023). Αυτή η αναλογία καταδεικνύει πως η γαλακτοβιομηχανία δεν είναι

μόνο παραγωγός πολύτιμων τροφίμων αλλά και μια από τις πιο αποβλητοπαραγωγές βιομηχανίες τροφίμων παγκοσμίως.

Πίνακας 1. Παγκόσμια παραγωγή γάλακτος ανά κύρια περιοχή (FAO 2023–2024).

Περιοχή / Χώρα	Παραγωγή γάλακτος (εκατ. τόνοι / έτος)	Ποσοστό παγκόσμιας παραγωγής (%)	Κύρια είδη γάλακτος	Παρατηρήσεις
Ινδία	226	23,4	Βουβάλας & αγελάδας	Η μεγαλύτερη παραγωγός χώρα στον κόσμο
Ευρωπαϊκή Ένωση (27)	154	16,0	Αγελάδας	Σταθερή παραγωγή, υψηλή αποδοτικότητα
Ηνωμένες Πολιτείες	105	10,9	Αγελάδας	Ισχυρή βιομηχανική υποδομή
Πακιστάν	65	6,7	Βουβάλας & αγελάδας	Μεγάλη αύξηση τα τελευταία χρόνια
Κίνα	39	4,0	Αγελάδας	Ταχεία εκβιομηχάνιση, αυξημένη ζήτηση
Βραζιλία	36	3,8	Αγελάδας	Παραδοσιακή παραγωγή μικρής κλίμακας
Ρωσία	33	3,4	Αγελάδας	Σταθερή παραγωγή με έμφαση στην αυτάρκεια
Αφρική (σύνολο)	47	4,9	Αγελάδας, κατσικίσιο	Ανάπτυξη μικρής κλίμακας, ανεπαρκείς υποδομές
Υπόλοιπος κόσμος	260	26,9	Διάφορα	Αθροιστικά Ασία, Λ. Αμερική, Ωκεανία
Σύνολο	965	100	—	—

Η σύσταση των αποβλήτων αυτών καθιστά τη διαχείρισή τους τεχνικά απαιτητική. Τα απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών συστατικών, όπως λακτόζη, πρωτεΐνες, λιπαρά και άλατα, ενώ συνοδεύονται από χαμηλό pH και υψηλές τιμές BOD<sub>5</sub> και COD, και συχνά συγκρίσιμες με εκείνες των αποβλήτων σφαγείων ή ζυθοποιίας (Carvalho et al., 2013). Η ανεπεξέργαστη διάθεσή τους οδηγεί σε ευτροφισμό υδάτινων σωμάτων, με μείωση

του διαλυμένου οξυγόνου, οσμές και επιφανειακή ρύπανση, δημιουργώντας ένα σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στο σύγχρονο πλαίσιο βιώσιμης ανάπτυξης, η πρόκληση δεν περιορίζεται στην απλή επεξεργασία ή εξουδετέρωση των αποβλήτων, αλλά μετατοπίζεται στην αξιοποίησή τους ως πηγή πρώτων υλών για νέες βιομηχανικές εφαρμογές. Το παραδοσιακό μοντέλο «παραγωγής–κατανάλωσης–διάθεσης» αντικαθίσταται σταδιακά από ένα παραγωγικό πρότυπο κυκλικής οικονομίας, όπου τα υποπροϊόντα μετατρέπονται σε πόρους υψηλής προστιθέμενης αξίας (FAO, 2024). Στην περίπτωση της γαλακτοβιομηχανίας, αυτό σημαίνει ότι το τυρόγαλο μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο υπόστρωμα για βιοτεχνολογικές διεργασίες, όπως η παραγωγή βιοαιθανόλης, οργανικών οξέων, ενζύμων, πρωτεϊνών μονοκύτταρης προέλευσης (single-cell protein) ή ακόμη και βιοδραστικών ενώσεων, όπως η ρεσβερατρόλη (Costa et al., 2021).

Επιπλέον, η οικονομική διάσταση του ζητήματος είναι εξίσου κρίσιμη. Σε τυροκομικές μονάδες μικρομεσαίας κλίμακας, το κόστος διαχείρισης αποβλήτων μπορεί να αντιστοιχεί έως και στο 60 % του συνολικού λειτουργικού κόστους επεξεργασίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η εφαρμογή τεχνολογιών ανάκτησης των αποβλήτων όπως είναι η μεμβρανική διήθηση, η αναερόβια χώνευση ή και οι ζυμωτικές διεργασίες αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, καθώς συνδυάζει τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος με τη δημιουργία οικονομικής αξίας (Udourioh, 2025).

Η κατανόηση της κλίμακας και της σημασίας των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη διαμόρφωση στρατηγικών αξιοποίησης και επαναχρησιμοποίησης. Η συστηματική αποτύπωση των ποσοτικών δεδομένων (παραγωγή γάλακτος, ποσοστά τυρογάλακτος), των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών (COD, BOD, pH, στερεά, ιόντα) και των σημείων παραγωγής αποβλήτων σε κάθε στάδιο της επεξεργασίας του γάλακτος παρέχει το απαραίτητο υπόβαθρο για τον σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών και κυκλικών συστημάτων παραγωγής (OECD–FAO, 2024).

Σε αυτό το υποκεφάλαιο αναλύεται η ποσοτική και ποιοτική διάσταση των ροών αποβλήτων, με έμφαση στη ροή του τυρογάλακτος, το οποίο αποτελεί το κυρίαρχο υποπροϊόν της διαδικασίας τυροποίησης. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα βασικά στάδια παραγωγής του τυριού και οι αντίστοιχες πηγές αποβλήτων, προκειμένου να καταδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο κάθε τεχνολογική διεργασία συνεισφέρει στη δημιουργία αυτών των ροών. Τέλος, εξετάζεται η οικολογική και τεχνική σημασία της ορθής διαχείρισης αυτών των αποβλήτων και η ανάγκη μετάβασης από ένα γραμμικό σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο βιοαντιδραστήρα (dairy biorefinery) (Ramsuroop et al., 2024).

### 2.1.1 Η διαδικασία παραγωγής τυριού και οι ροές αποβλήτων

Η παραγωγή του τυριού, ανεξάρτητα από τον τύπο ή το είδος του γάλακτος που χρησιμοποιείται, περιλαμβάνει μια σειρά διαδοχικών σταδίων με σαφώς καθορισμένες τεχνολογικές και βιοχημικές παραμέτρους, καθεμία από τις οποίες συμβάλλει στη δημιουργία ροών αποβλήτων ή παραπροϊόντων. Αν και οι επιμέρους τεχνικές διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του τυριού (μαλακό, σκληρό, φρέσκο ή ωριμασμένο), η βασική αρχή παραμένει κοινή και στηρίζεται στη μετουσίωση των πρωτεϊνών του γάλακτος (κυρίως της καζεΐνης) και στην απομάκρυνση του υγρού ορού, του λεγόμενου τυρογάλακτος (Khattab et al., 2019).

#### - Παραλαβή και Προετοιμασία Γάλακτος

Το γάλα αποτελεί την πρωτογενή πρώτη ύλη και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Κατά την παραλαβή πραγματοποιείται έλεγχος ποιότητας, θερμοκρασίας και μικροβιολογικού φορτίου, ενώ συχνά ακολουθεί ομογενοποίηση και

σταθεροποίηση της λιποπεριεκτικότητας. Η παστερίωση, συνήθως γίνεται στους 72 °C για 15 δευτερόλεπτα, μειώνοντας δραστικά το μικροβιακό φορτίο, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια του προϊόντος (Bansal & Veena, 2024). Στο στάδιο αυτό προκύπτουν πρώτα ρεύματα αποβλήτων, κυρίως από νερά πλύσης δεξαμενών και συστημάτων θερμικής ανταλλαγής, τα οποία περιέχουν υπολείμματα πρωτεϊνών, λιπών και καθαριστικών.

#### Προσθήκη Καλλιεργειών Εκκίνησης (Starter Cultures)

Ακολουθεί η προσθήκη καλλιεργειών εκκίνησης, που αποτελούνται από επιλεγμένα στελέχη μικροοργανισμών όπως *Lactococcus lactis*, *Streptococcus thermophilus* και *Lactobacillus delbrueckii*. Οι μικροοργανισμοί αυτοί μεταβολίζουν τη λακτόζη σε γαλακτικό οξύ, προκαλώντας πτώση του pH και δημιουργώντας συνθήκες που οδηγούν στη συσσωμάτωση της καζεΐνης. Παράλληλα, παράγουν ένζυμα και δευτερογενείς μεταβολίτες που διαμορφώνουν το άρωμα, τη γεύση και τη δομή του τυριού. Τα απόβλητα του σταδίου αυτού περιλαμβάνουν μικρές ποσότητες εκπλυμάτων με βακτηριακή βιομάζα και οργανικά κατάλοιπα, τα οποία αυξάνουν το BOD των απορριμμάτων.

#### Πήξη και Κοπή του Πήγματος

Η πήξη του γάλακτος προκαλείται με την προσθήκη πυτιάς (chymosin) ή φυτικών/μικροβιακών ενζύμων που αποσταθεροποιούν τα καζεϊνικά μικκύλια και σχηματίζουν ένα ημιστερεό πλέγμα. Στη συνέχεια, το πήγμα κόβεται σε κύβους, γεγονός που διευκολύνει την αποβολή του υγρού τυρογάλακτος, το οποίο αποτελεί περίπου το 85–95 % του αρχικού όγκου του γάλακτος (Millen et al., 2019). Η ροή αυτή αποτελεί την κυριότερη πηγή οργανικού φορτίου στη γαλακτοβιομηχανία, πλούσια σε λακτόζη, πρωτεΐνες ορού και ανόργανα άλατα.

#### Θέρμανση και Ανάδευση

Η ήπια θέρμανση (38–45 °C) και η μηχανική ανάδευση του πηγματος συμβάλλουν στη συρρίκνωση των καζεϊνικών συσσωματωμάτων και στην περαιτέρω απομάκρυνση του ορού. Το παραγόμενο υγρό είναι συμπυκνωμένο σε λακτόζη και πρωτεΐνες, αποτελώντας τη βασική πρώτη ύλη για βιοτεχνολογική αξιοποίηση (π.χ. για παραγωγή ρεσβερατρόλης, αιθανόλης ή SCP). Παράλληλα, τα νερά ψύξης και καθαρισμού του εξοπλισμού αποτελούν πρόσθετες ροές αποβλήτων, οι οποίες περιέχουν οργανικά υπολείμματα και λιπαρά οξέα.

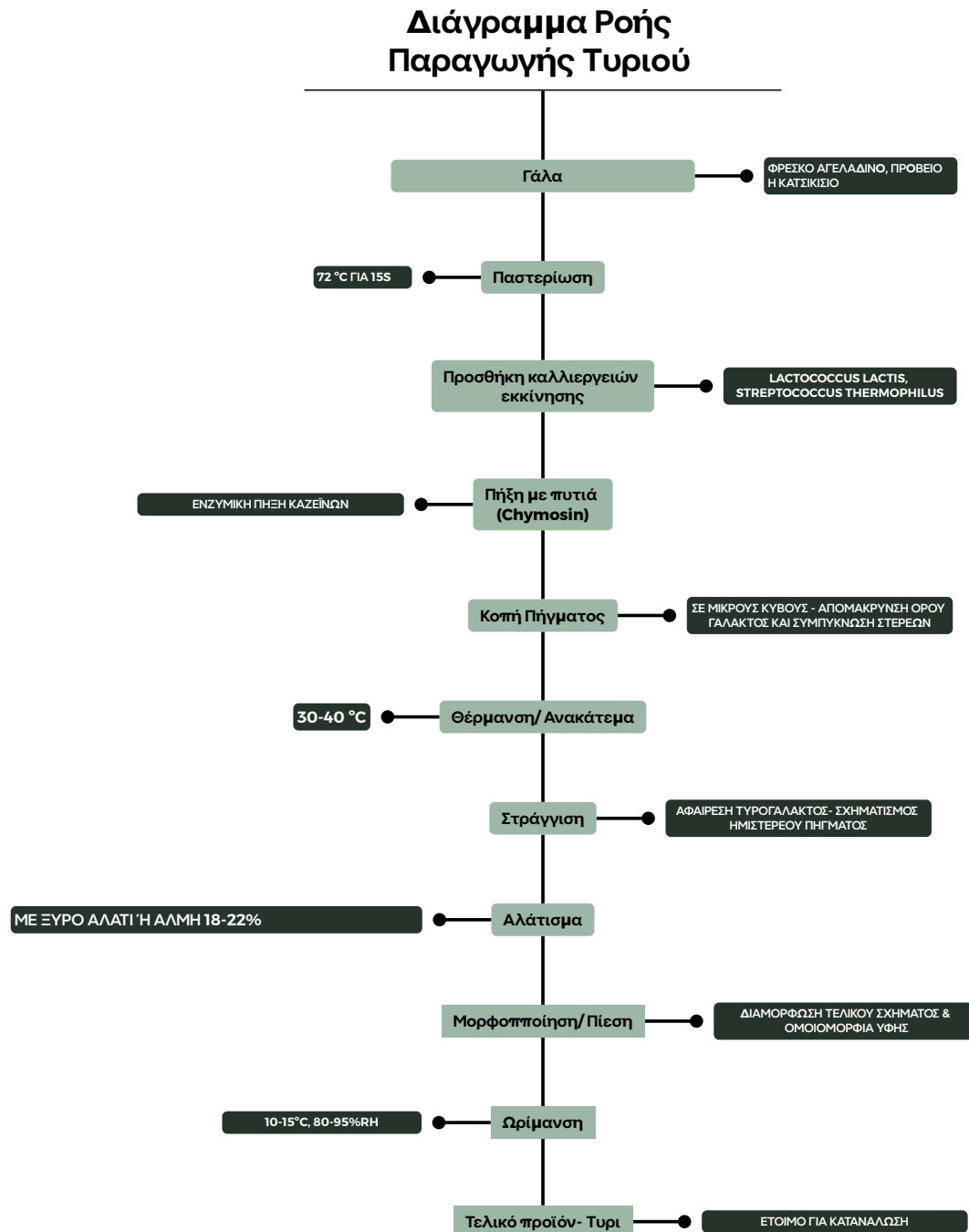
#### Στράγγιση και Αλάτιση

Μετά τη θέρμανση, το πήγμα οδηγείται σε στράγγιση, όπου απομακρύνεται ο υπόλοιπος ορός γάλακτος. Το στάδιο αυτό παράγει δευτερεύουσες ροές αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά και υπολείμματα καζεΐνης. Η αλάτιση, είτε ξηρή είτε με εμβάπτιση σε άλμη, έχει πολλαπλές λειτουργίες — ρυθμίζει τη δραστηριότητα του νερού, βελτιώνει τη γεύση και εμποδίζει την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών. Ωστόσο, δημιουργεί άλμη απορριμμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωρίοντα και οργανικά υπολείμματα, τα οποία απαιτούν εξειδικευμένη επεξεργασία.

#### Μορφοποίηση και Ωρίμανση

Στο τελικό στάδιο, το προϊόν τοποθετείται σε καλούπια και οδηγείται σε θαλάμους ωρίμανσης, όπου επικρατούν ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας (10–15 °C) και σχετικής υγρασίας (80–95 %). Κατά την ωρίμανση, λαμβάνουν χώρα ενζυμικές και μικροβιακές διεργασίες, που οδηγούν στη διάσπαση των πρωτεϊνών και λιπιδίων και στην ανάπτυξη της χαρακτηριστικής υφής και γεύσης

κάθε τύπου τυριού. Τα απόβλητα του σταδίου αυτού περιλαμβάνουν υγρά από πλύσεις καλουπιών, αέρια (CO<sub>2</sub>, πτητικές οργανικές ενώσεις) και μικρές ποσότητες στερεών υπολειμμάτων από επιφανειακούς καθαρισμούς (Kumar et al., 2019 ; Khattab et al. 2019).



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής παραγωγής τυριού και δημιουργίας ροών τυρογάλακτος (Kumar et al., 2019 ; Khattab et al. 2019).

### 2.1.2 Σύσταση και ποσοτικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας.

Τα απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας χαρακτηρίζονται από τον ιδιαίτερα υψηλό οργανικό φορτίο και την μεταβλητή φυσικοχημική τους σύσταση. Αυτά είναι ανάλογα με το είδος του προϊόντος που παράγεται, από τις πρώτες ύλες, το βαθμό επεξεργασίας και από την χρήση του νερού. Η κύρια πηγή τους είναι το τυρόγαλο (ορός γάλακτος), το οποίο αντιπροσωπεύει έως και το 90–95 % του αρχικού όγκου του γάλακτος που εισέρχεται στη διαδικασία παραγωγής τυριού (Carvalho et al., 2013).

Η μέση χημική σύνθεση του τυρογάλακτος περιλαμβάνει περίπου 4,5–5,0 % λακτόζη, 0,6–1,0 % πρωτεΐνες, 0,4–0,5 % λιπαρά και 0,5 % ανόργανα άλατα (κυρίως ασβέστιο, κάλιο και φώσφορο). Παρά την χαμηλή του περιεκτικότητα σε στερεά, το συνολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) μπορεί να υπερβαίνει τις 60.000 mg/L, ενώ το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD<sub>5</sub>) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 30.000 και 50.000 mg/L. Ενδεικτικά, τα αστικά λύματα παρουσιάζουν τιμές BOD<sub>5</sub> της τάξης των 150–300 mg/L και COD περί τα 400 mg/L. Το οργανικό τους φορτίο της γαλακτοβιομηχανίας, είναι 150 έως 200 φορές υψηλότερο από αυτό των αστικών λυμάτων. Δεδομένου ότι τα νομοθετημένα όρια εκροής για υδάτινους αποδέκτες είναι  $\leq 25$  mg/L για BOD<sub>5</sub> και  $\leq 125$  mg/L για COD, καθιστώντας το σαφές ότι τα απόβλητα αυτά απαιτούν προηγμένη βιολογική ή φυσικοχημική επεξεργασία προτού απορριφθούν ή επαναχρησιμοποιηθούν. (Ribeiro et al., 2022 ; Carvalho et al., 2013).

Πίνακας 2. Τυπικά χαρακτηριστικά και νομοθετικά όρια εκροής αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας (FAO 2023–2024).

Παράμετρος	Εύρος (mg/L)	Σχόλιο	Όριο Εκροής (mg/L)
BOD <sub>5</sub>	30.000 – 50.000	150–250 φορές υψηλότερο από τα αστικά λύματα	$\leq 25$
COD	40.000 – 80.000	Υπερβαίνει έως και 200 φορές τα επίπεδα αστικών λυμάτων	$\leq 125$
TSS	1.000 – 5.000	Περιέχει οργανικά στερεά, λιπαρά, καζεΐνη	$\leq 35$
pH	4,5 – 6,5	Συνήθως όξινο λόγω λακτόζης και γαλακτικού οξέος	6 – 9
Αμμωνιακό Άζωτο (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)	25–70	Προέρχεται κυρίως από την αποδόμηση πρωτεϊνών και αμινοξέων του γάλακτος	$\leq 10$
Ολικός Φώσφορος (P)	30–120	Προέρχεται από φωσφορικά άλατα, καθαριστικά και φωσφολιπίδια του γάλακτος.	$\leq 2$

Πέρα όμως από το τυρόγαλο, η σύσταση των συνολικών αποβλήτων εξαρτάται από τις επιμέρους ροές της παραγωγικής διαδικασίας — όπως τα νερά πλύσης, η άλμη, τα υγρά

καθαρισμού (CIP), και οι εκροές από ωριμαντήρια. Ο συνδυασμός αυτών των ροών δημιουργεί ένα πολύπλοκο μίγμα, όπου κυριαρχούν οργανικά συστατικά (λακτόζη, καζεΐνη, λιπαρά οξέα), αλλά συνυπάρχουν και ανόργανα άλατα, απορρυπαντικά και χημικές ενώσεις με μεταβαλλόμενο pH.

Η πολυπαραγοντική προέλευση αυτών των ρύπων οφείλεται τόσο στις διεργασίες της τυροποίησης (πήξη, στράγγιση, ωρίμανση) όσο και στις βοηθητικές λειτουργίες της παραγωγής (πλύσεις δεξαμενών, CIP, ψύξη, απολύμανση). Για παράδειγμα, τα υγρά απορρίμματα από τα υγρά καθαρισμού (CIP) μπορεί να περιέχουν ισχυρά αλκαλικά ή όξινα καθαριστικά (NaOH, HNO<sub>3</sub>), ενώ η άλμη περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις NaCl που επηρεάζουν τη μικροβιακή βιοαποικοδόμηση.

Η μεταβλητότητα της σύστασης είναι επίσης έντονη μεταξύ διαφορετικών τύπων προϊόντων. Για παράδειγμα, στα εργοστάσια παραγωγής γιαουρτιού, το κύριο απόβλητο είναι το όξινο τυρόγαλο με pH 4,0–4,5 και σχετικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, ενώ στα τυροκομεία που παράγουν σκληρά τυριά (π.χ. γραβιέρα, παρμεζάνα) το γλυκό τυρόγαλο έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε στερεά και COD (Carvalho et al., 2013 ; Ramsuroop et al., 2024; Ribeiro et al., 2022).

Για να αποτυπωθεί συνολικά η ποσοτική και ποιοτική διαφοροποίηση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας, ο Πίνακας 3 συνοψίζει τα κύρια στάδια παραγωγής, τα παραγόμενα απόβλητα, τη χημική τους σύσταση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

**Πίνακας 3. Κύρια στάδια παραγωγής τυριού και αντίστοιχες ροές αποβλήτων (Ribeiro et al., 2022).**

Στάδιο Παραγωγής	Τύπος Αποβλήτου / Παραπροϊόντος	Κύρια Χημική Σύσταση	Τυπικές Τιμές COD (mg/L)	Ποσοτική Συμμετοχή (%) επί του συνόλου)	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις / Παρατηρήσεις
Παραλαβή & Παστερίωση γάλακτος	Νερά πλύσης, υπολείμματα καθαριστικών	Πρωτεΐνες, λίπη, απορρυπαντικά	2.000–5.000	5–10 %	Αυξημένο pH, ανάγκη εξουδετέρωσης
Καλλιέργειες εκκίνησης	Υγρά εκκενώσεων, βιομάζα	Λακτόζη, γαλακτικό οξύ, βακτηριακά κύτταρα	10.000–15.000	<5 %	Αυξημένο BOD, μικροβιακό φορτίο
Πήξη & κοπή πήγματος	Τυρόγαλο (ορός γάλακτος)	Λακτόζη 4,5–5 %, πρωτεΐνη 0,8 %, λίπος 0,5 %	50.000–70.000	85–95 % του αρχικού όγκου	Κυριότερη πηγή οργανικού φορτίου
Θέρμανση & ανάδευση	Υγρά συμυκνώματα, νερά ψύξης	Λακτόζη, λιπαρά οξέα	15.000–25.000	3–6 %	Υψηλή βιοαποδομησιμότητα
Στράγγιση & αλάτιση	Νερά αποστράγγισης, άλμη απορριμμάτων	NaCl, καζεΐνη, λιπαρά	8.000–20.000	5–8 %	Αυξημένη αλατότητα, επιβάρυνση υδάτων
Μορφοποίηση & ωρίμανση	Νερά πλύσης καλουπιών, εκπομπές CO <sub>2</sub>	Πρωτεΐνες, VOCs	<5.000	2–3 %	Δευτερογενής ρύπανση
Καθαρισμός εξοπλισμού (CIP)	Υγρά καθαρισμού	NaOH, HNO <sub>3</sub> , φωσφορικά	5.000–10.000	5–7 %	Ακραίο pH, ανάγκη εξουδετέρωσης

## 2.2 Κατηγοριοποίηση και διαχείριση αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας

Η γαλακτοβιομηχανία συγκαταλέγεται στους πιο ενεργοβόρους και ρυπογόνους κλάδους της βιομηχανίας τροφίμων. Για κάθε λίτρο επεξεργασμένου γάλακτος απαιτούνται 2–10 λίτρα νερού, και παράγεται αντίστοιχα 1–3 λίτρα αποβλήτων, γεγονός που καταδεικνύει τη στενή σχέση παραγωγικότητας και ρύπανσης (Tabelini et al., 2023). Τα απόβλητα που προκύπτουν από τις διεργασίες παραγωγής, καθαρισμού και συσκευασίας χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά φορτία (λακτόζη, πρωτεΐνες, λίπη) και ανόργανα ιόντα ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), με COD 40.000–80.000 mg/L και BOD<sub>5</sub> 30.000–50.000 mg/L (Ribeiro et al., 2022).

Η διαχείριση αυτών των αποβλήτων αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα που συνδέεται με την περιβαλλοντική νομοθεσία, το ενεργειακό κόστος και τη δυνατότητα ανάκτησης πόρων. Σύμφωνα με τον FAO (2024), η βιομηχανία γάλακτος της Ευρωπαϊκής Ένωσης ευθύνεται για το 10–15 % της συνολικής οργανικής ρύπανσης του αγροδιατροφικού τομέα, με τις κυριότερες ροές αποβλήτων να προέρχονται από τα στάδια παστερίωσης, τυροκόμησης και καθαρισμού εξοπλισμού (Rocha-Mendoza et al., 2021).

Η προσέγγιση που υιοθετείται πλέον δεν εστιάζει μόνο στην επεξεργασία των αποβλήτων, αλλά στην ολοκληρωμένη αξιοποίησή τους στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, δηλαδή στην ανάκτηση νερού, ενέργειας και βιοπροϊόντων. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται πρώτα συστηματική κατηγοριοποίηση των ροών και στη συνέχεια επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επεξεργασίας.

### 2.2.1 Κατηγορίες και πηγές αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας

Η γαλακτοβιομηχανία, λόγω της πολύπλοκης και πολυσταδιακή παραγωγική διαδικασία, δημιουργεί ένα ευρύ φάσμα αποβλήτων που διαφέρουν σημαντικά ως προς τη φυσική μορφή, τη χημική σύσταση, τη συγκέντρωση ρύπων και τη δυνατότητα επεξεργασίας. Οι ποσότητες αποβλήτων εξαρτώνται από την κλίμακα παραγωγής, το είδος των προϊόντων (γάλα, γιαούρτι, τυρί, βούτυρο κ.ά.), τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες και κυρίως τον βαθμό αυτοματοποίησης των συστημάτων καθαρισμού (CIP – Clean in Place).

Σύμφωνα με τον FAO (2024), για κάθε τόνο παραγόμενου γάλακτος παράγονται 2–10 m<sup>3</sup> υγρών αποβλήτων, ενώ σε μονάδες παραγωγής τυριών, το τυρόγαλο μόνο αντιστοιχεί στο 90–95 % του αρχικού όγκου του γάλακτος. Η κατανάλωση νερού ανά λίτρο γάλακτος ποικίλλει σημαντικά (2–4 L), με την υψηλότερη αναλογία να παρατηρείται στα τμήματα καθαρισμού και παστερίωσης (Ribeiro et al., 2022).

#### - Φυσικοχημική και ρυπαντική σύσταση

Τα απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας είναι κατά κύριο λόγο οργανικής φύσης και χαρακτηρίζονται από το υψηλό οργανικό φορτίο βιοαποδομήσιμων ενώσεων. Η λακτόζη αποτελεί το κύριο οργανικό συστατικό, αντιπροσωπεύοντας έως και το 70 % του συνολικού BOD<sub>5</sub>, ενώ ακολουθούν οι πρωτεΐνες (κυρίως καζεΐνη και β-λακτοσφαιρίνη), τα λιπίδια και τα οξέα βραχείας αλυσίδας που προκύπτουν από την υδρόλυση αυτών. Η ολική συγκέντρωση στερεών (TS) κυμαίνεται μεταξύ 6.000–12.000 mg/L, ενώ τα αιωρούμενα στερεά (TSS) κυμαίνονται μεταξύ 1.000–5.000 mg/L, ανάλογα με τη χρήση νερού και τη φύση του προϊόντος (Tabelini et al., 2023).

Η παρουσία αλάτων ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{K}^+$ ) προέρχεται από τις διεργασίες αλάτισης, παστερίωσης και καθαρισμού. Οι εκροές των CIP (Clean in Place) συστημάτων περιέχουν αλκαλικά διαλύματα  $\text{NaOH}$  ή όξινα  $\text{HNO}_3$ , με αποτέλεσμα την έντονη διακύμανση του pH από 4 έως 12, απαιτώντας εξουδετέρωση πριν από οποιαδήποτε βιολογική επεξεργασία (Walsh et al., 2020).

Η μέση τιμή  $BOD_5$  κυμαίνεται από 30.000 έως 50.000 mg/L, ενώ το COD μπορεί να φτάσει τις 80.000 mg/L, δηλαδή 150–200 φορές υψηλότερο από τα αστικά λύματα. Ο λόγος  $BOD_5/COD$  βρίσκεται συνήθως στην περιοχή 0,5–0,7, γεγονός που υποδεικνύει υψηλή βιοαποδομησιμότητα και καθιστά τα απόβλητα αυτά κατάλληλα για βιολογική επεξεργασία. Ωστόσο, η παρουσία λιπιδίων και πρωτεϊνών μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα επιφανειακής τάσης, αφρισμού και αποφλοιώσης κατά τη βιοαντιδραστηριακή διεργασία (Zhao et al., 2022).

#### Κατηγορίες αποβλήτων

Με βάση τη φυσική μορφή και την προέλευσή τους, τα απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: υγρά, στερεά και αέρια.

##### (α) Υγρά απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα αποτελούν τη σημαντικότερη ροή ρύπανσης. Περιλαμβάνουν:

- Τυρόγαλο (γλυκό και όξινο), πλούσιο σε λακτόζη (4,5–5 %), πρωτεΐνη (0,8 %), λίπη (0,4 %) και ανόργανα άλατα (0,5 %).
- Νερά πλύσης, τα οποία περιέχουν λιπαρά, υπολείμματα πρωτεϊνών και καθαριστικά.
- Διαλύματα CIP, με NaOH και  $HNO_3$  σε συγκεντρώσεις έως 2–3 %, που μεταβάλλουν το pH.
- Υγρά από αποστραγγίσεις, ψυκτικά συστήματα και άλμες, με υψηλή αλατότητα (έως 50 g/L NaCl).

Η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη είναι εξαιρετικά υψηλή, γεγονός που οδηγεί σε έντονη κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) στους φυσικούς αποδέκτες. Μία χαρακτηριστική μέτρηση δείχνει ότι 1 L ανεπεξέργαστου τυρογάλακτος απαιτεί περίπου 50 g  $O_2$  για πλήρη οξείδωση, προκαλώντας ασφυξία υδρόβιων οργανισμών σε ποτάμια και λίμνες (FAO, 2024).

Πέραν του οργανικού φορτίου, τα απόβλητα αυτά περιέχουν θρεπτικά άλατα (N, P), που επιταχύνουν τη φωτοσυνθετική ανάπτυξη φυκών και οδηγούν σε ευτροφισμό. Ο ολικός φώσφορος (P) φτάνει συνήθως τα 100 mg/L, ενώ το αμμωνιακό άζωτο ( $NH_4^+-N$ ) τα 60 mg/L, τιμές που υπερβαίνουν κατά πολύ τα όρια εκροής (2 mg/L και 10 mg/L αντίστοιχα).

Σύμφωνα με τον Tabelini et al. (2023), η κατανομή του οργανικού φορτίου στα λύματα τυροκομείων είναι περίπου:

- Λακτόζη: 70 %
- Πρωτεΐνες: 20 %
- Λίπη: 5 %
- Άλλα οργανικά συστατικά: 5 %

Η σύνθεση αυτή καθιστά τα απόβλητα κατάλληλα για ζυμωτικές διεργασίες, αλλά και ιδιαίτερα προβληματικά για άμεση διάθεση χωρίς επεξεργασία.

##### (β) Στερεά απόβλητα

Τα στερεά απόβλητα αντιστοιχούν περίπου στο 10 % του συνολικού όγκου ρύπων της γαλακτοβιομηχανίας, αλλά παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση ρυπών ανά μονάδα μάζας. Περιλαμβάνουν:

- Αποθέσεις πρωτεϊνών και λιπών,
- Ιζήματα από δεξαμενές,
- Αφαιρούμενα στερεά από φίλτρα και αντλίες,
- Απόβλητα προϊόντων εκτός προδιαγραφών.

Η περιεκτικότητά τους σε οργανικό άνθρακα υπερβαίνει το 60–80 %, και σε ολικό άζωτο φτάνει έως 3 %. Παρά την υψηλή θερμογόνο δύναμή τους, η αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία (>70 %) περιορίζει τη δυνατότητα απευθείας καύσης. Συνήθως, υποβάλλονται σε αφυδάτωση και

κομποστοποίηση, όπου μετατρέπονται σε σταθεροποιημένο οργανικό υπόστρωμα, κατάλληλο για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό ή ζωοτροφή (Ramsuroop et al., 2024).

Εναλλακτικά, οι στερεές λάσπες μετά από αναερόβια χώνευση μπορούν να αποτελέσουν πρώτη ύλη για παραγωγή βιοαερίου ή ενζυμικών παραγώγων (Ribeiro et al., 2022). Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη διάθεσή τους στο περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε μικροβιολογική ρύπανση, οσμές και εμπλουτισμό του εδάφους με άλατα, γι' αυτό απαιτείται προσεκτική διαχείριση.

#### (γ) Αέρια απόβλητα

Αν και αντιπροσωπεύουν μικρό ποσοστό σε όγκο, τα αέρια απόβλητα έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Προέρχονται κυρίως από:

- τις αναερόβιες δεξαμενές χώνευσης,
- τις ζυμωτικές διεργασίες (π.χ. στην παραγωγή γιαουρτιού ή ρευστών προϊόντων),
- τις αποθηκευτικές δεξαμενές υγρών αποβλήτων.

Περιέχουν κυρίως CO<sub>2</sub> (60–70 %) και CH<sub>4</sub> (20–30 %), καθώς και ίχνη NH<sub>3</sub> και H<sub>2</sub>S. Οι εκπομπές μεθανίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς συμβάλλουν κατά 4–6 % στις συνολικές εκπομπές από τον κλάδο των τροφίμων (FAO, 2024).

Η συλλογή και καύση του παραγόμενου βιοαερίου είναι απαραίτητη, όχι μόνο για ενεργειακή αξιοποίηση, αλλά και για περιβαλλοντική συμμόρφωση. Η χρήση συστημάτων ενεργειακής ανάκτησης (CHP) μπορεί να αποδώσει 6–8 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά m<sup>3</sup> αποβλήτων, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά 60 % (Tabelini et al., 2023).

#### (δ) Μικτά και ειδικά απόβλητα

Πέρα από τις τρεις κύριες κατηγορίες, δημιουργούνται και μικτά απόβλητα, όπως τα συμπυκνώματα άλμης ή οι εκροές από μεμβρανικά συστήματα επεξεργασίας (RO reject). Αυτά έχουν υψηλή αλατότητα (EC > 10 mS/cm) και συχνά απαιτούν ειδική επεξεργασία, καθώς επηρεάζουν τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών και τη μικροχλωρίδα των αποδεκτών (Carvalho et al., 2013).

Συνολικά, η ποικιλομορφία των αποβλήτων καθιστά τη διαχείρισή τους πολυσύνθετη και απαιτεί συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών τεχνολογιών. Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τις κύριες κατηγορίες αποβλήτων, τις πηγές προέλευσης, τη χημική τους σύσταση και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

**Πίνακας 4. Κατηγορίες αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας, πηγές και επιπτώσεις (Carvalho et al., 2013; Ramsuroop et al., 2024)**

Κατηγορία	Πηγή	Χαρακτηριστικά	Κύριες Επιπτώσεις
Υγρά	Τυρόγαλο, νερά πλύσης, CIP	Υψηλό BOD/COD, χαμηλό pH, φωσφορικά	Ευτροφισμός, αποξυγόνωση υδάτων
Στερεά	Λάσπες, φίλτρα, υπολείμματα	Οργανική ύλη, λίπη, παθογόνα	Οσμές, ρύπανση εδάφους
Αέρια	Χώνευση, ζύμωση, αποθήκευση	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S	Εκπομπές θερμοκηπίου, όξινη βροχή
Μικτά	Συγκεντρωμένα διαλύματα, άλμη	NaCl, καζεΐνη, οργανικά	Αλατότητα, τοξικότητα μικροχλωρίδας

#### 2.2.2 Τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας

Η επεξεργασία των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας συνιστά κρίσιμο τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας, όχι μόνο για την περιβαλλοντική συμμόρφωση με βάση τα όρια της νομοθεσίας, αλλά και ως μέσο ανάκτησης ενέργειας και πρώτων υλών. Η σύνθεση των αποβλήτων είναι πλούσια σε οργανικό άνθρακα, άζωτο, φώσφορο και λακτόζη. Αυτό τα καθιστά εξαιρετικά κατάλληλα για βιολογική επεξεργασία, αρκεί να προηγηθεί σωστή φυσικοχημική προεπεξεργασία.

Σύμφωνα με τον FAO (2024), πάνω από το 70 % των μεγάλων ευρωπαϊκών μονάδων γαλακτοκομίας διαθέτουν πλέον συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων, τα οποία συνδυάζουν φυσικά, χημικά και βιολογικά στάδια. Ο στόχος είναι διπλός:

α) η μείωση του οργανικού φορτίου (BOD, COD, TSS) κάτω από τα νομοθετικά όρια εκροής, β) και η ανάκτηση ενέργειας ή/και προϊόντων υψηλής αξίας (π.χ. βιοαέριο, οργανικά οξέα, πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες).

Οι κυριότερες τεχνολογίες επεξεργασίας ταξινομούνται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

(α) φυσικές/μηχανικές διεργασίες, (β) φυσικοχημικές, (γ) βιολογικές, και (δ) συνδυασμένες ή προηγμένες διεργασίες.

#### (α) Φυσικές και μηχανικές διεργασίες

Αποτελούν το πρώτο στάδιο κάθε εγκατάστασης επεξεργασίας. Σκοπός τους είναι η απομάκρυνση μεγάλων αιωρούμενων στερεών, λιπών και πρωτεϊνικών συσσωματωμάτων.

Προεπεξεργασία και λιποσυλλογή

Περιλαμβάνει εσχарισμό, καθίζηση και επίπλευση (DAF).

Στις μονάδες της Ολλανδίας, η τεχνολογία DAF (Dissolved Air Flotation) επιτυγχάνει απομάκρυνση 80–90 % TSS και 60 % COD (van der Bruggen et al., 2023).

Οι λιπαρές ουσίες που συλλέγονται οδηγούνται είτε σε αναερόβια χώνευση είτε σε παραγωγή σαπουνίων/λιπαντικών.

Φίλτρα μεμβράνης (UF, NF, RO)

Χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση πρωτεϊνών και λακτόζης από το τυρόγαλο.

Η υπερδιήθηση (UF) απομακρύνει πρωτεΐνες υψηλού μοριακού βάρους, επιτυγχάνοντας 90 % ανάκτηση καζεΐνης.

Η νανοδιήθηση (NF) και αντίστροφη ώσμωση (RO) απομακρύνουν ιόντα και άλατα, επιτυγχάνοντας έως 98 % καθαρισμό νερού.

Στην Ιταλία, εγκαταστάσεις όπως η Granorolo S.p.A. εφαρμόζουν συνδυασμό UF/NF/RO, μειώνοντας την κατανάλωση νερού κατά 40 % και επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίησή του σε μη κρίσιμα στάδια παραγωγής (Ribeiro et al., 2022).

#### (β) Φυσικοχημικές διεργασίες

Οι φυσικοχημικές μέθοδοι εφαρμόζονται είτε ως προεπεξεργασία είτε ως συμπληρωματικό στάδιο για τη μείωση των θρεπτικών φορτίων (N, P) και των επιφανειοδραστικών ουσιών.

Χημική καθίζηση φωσφόρου

Εφαρμόζεται με χρήση θειικού σιδήρου ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ή θειικού αργιλίου ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ).

Επιτυγχάνεται απομάκρυνση 80–95 % P με παραγωγή ιλύος πλούσιας σε φωσφορικά, που μπορεί να αξιοποιηθεί ως ανόργανο λίπασμα.

Σε μονάδες της Δανίας, η χρήση  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  επιτρέπει την ταυτόχρονη αντιμετώπιση της οξύτητας και καθίζηση φωσφορικών, με τελικές εκροές  $< 2 \text{ mg P/L}$  (Ramsuroop et al., 2024).

Εξουδετέρωση και εξισορρόπηση pH

Λόγω της εναλλαγής όξινων/αλκαλικών απορροών (CIP), εφαρμόζεται δεξαμενή εξισορρόπησης όπου το pH ρυθμίζεται στο 6,5–7,5.

Η διαδικασία αυτή σταθεροποιεί τη βιολογική δραστηριότητα και περιορίζει τις αιχμές οργανικού φορτίου.

Προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες (AOPs)

Περιλαμβάνουν Fenton, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ή όζον (O<sub>3</sub>).

Μειώνουν το COD κατά 70–90 %, καταστρέφουν υπολείμματα καθαριστικών και απομακρύνουν οσμές.

Αν και ενεργοβόρες, εφαρμόζονται ευρέως στην Ιταλία και τη Γαλλία ως τελευταίο στάδιο επεξεργασίας πριν την τελική διάθεση (Millen et al., 2019).

(γ) Βιολογικές διεργασίες

Αποτελούν τον πυρήνα της επεξεργασίας της γαλακτοβιομηχανίας, δεδομένου του υψηλού ποσοστού βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου.

Αναερόβια επεξεργασία

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η αναερόβια χώνευση, η οποία μετατρέπει το οργανικό φορτίο σε βιοαέριο (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>).

Το BOD<sub>5</sub> μειώνεται κατά 90–95 %, ενώ το παραγόμενο βιοαέριο περιέχει 60–70 % μεθάνιο.

Ο συντελεστής απόδοσης είναι 0,35–0,40 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD.

Στην Ολλανδία, οι εγκαταστάσεις Friesland Campina λειτουργούν ως βιοαντιδραστήρες τύπου UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), με φορτίο 10–15 kg COD/m<sup>3</sup>·d, επιτυγχάνοντας σταθερή λειτουργία και παραγωγή 9–11 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά m<sup>3</sup> αποβλήτων (van der Bruggen et al., 2023).

Στην Ελλάδα, η ΔΩΔΩΝΗ Α.Ε. εφαρμόζει αναερόβια χώνευση σε CSTR αντιδραστήρα (mesophilic, 37 °C), μειώνοντας το COD από 60.000 σε < 2.000 mg/L, ενώ το βιοαέριο αξιοποιείται για θέρμανση και λειτουργία λεβήτων (Kourtis et al., 2022).

Αερόβια επεξεργασία

Ακολουθεί συνήθως μετά την αναερόβια διεργασία για τη βελτίωση της ποιότητας εκροής.

Συστήματα ενεργού ιλύος επιτυγχάνουν απομάκρυνση 95 % BOD<sub>5</sub> και 90 % TSS.

Η περίσσεια βιομάζας μπορεί να αφυδατωθεί και να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

Προηγμένες εκδοχές, όπως το MBR (Membrane Bioreactor), μειώνουν την κατανάλωση χώρου και εξασφαλίζουν εκροές < 10 mg/L BOD<sub>5</sub>.

Η Ιταλία διαθέτει πάνω από 40 εγκαταστάσεις με MBR για γαλακτοβιομηχανίες (Ribeiro et al., 2022), ενώ στην Ελλάδα η τεχνολογία εφαρμόζεται πιλοτικά στην Κολιός Α.Ε. για ανάκτηση καθαρού νερού προς επαναχρησιμοποίηση (Kourtis et al., 2022).

(δ) Συνδυασμένες και προηγμένες τεχνολογίες

Ο σύγχρονος σχεδιασμός εγκαταστάσεων στοχεύει στη δημιουργία “Dairy Biorefineries”, όπου οι διεργασίες επεξεργασίας μετατρέπονται σε κύκλους ανάκτησης πόρων.

Αναερόβια χώνευση + MBR (Membrane Bioreactor)

Συνδυάζει την υψηλή ενεργειακή απόδοση της χώνευσης με την ποιότητα εκροής του MBR.

Το COD μειώνεται έως 98 %, με δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού στη γραμμή παραγωγής.

Αναερόβια χώνευση + RO (αντίστροφη ώσμωση)

Μετά τη χώνευση, η εκροή διέρχεται από μεμβρανική διήθηση, επιτρέποντας ανάκτηση έως 70 % νερού και συμπύκνωση θρεπτικών για χρήση ως λίπασμα.

Βιοαντιδραστήρες υβριδικού τύπου (AnMBR)

Ενσωματώνουν αναερόβια χώνευση με μεμβράνες, μειώνοντας τη δημιουργία ιλύος κατά 60 %.

Εφαρμόζονται ήδη στην ΕΕ μέσω προγραμμάτων Horizon Europe (2022–2027) για την επίδειξη “zero-waste” τυροκομείων.

Πίνακας 5. Απόδοση επεξεργασίας και παραδείγματα εφαρμογών (van der Bruggen et al., 2023)

Χώρα	Τεχνολογία	Απόδοση απομάκρυνσης COD/BOD <sub>5</sub>	Ενεργειακή ανάκτηση	Σχόλιο
Ολλανδία	UASB + MBR	98 % COD, 95 % BOD <sub>5</sub>	9–11 kWh/m <sup>3</sup>	Πλήρης ανάκτηση βιοαερίου, ανακυκλοφορία νερού
Ιταλία	UF + NF + RO	85 % COD, 70 % P	—	Επαναχρησιμοποίηση 40 % νερού διεργασίας
Ελλάδα	Αναερόβια χώνευση (CSTR)	95 % COD, 90 % TSS	6–8 kWh/m <sup>3</sup>	Παραγωγή βιοαερίου για θερμική ενέργεια
Δανία	Χημική καθίζηση + MBR	90 % P, 98 % BOD <sub>5</sub>	—	Τελικές εκροές < 2 mg P/L, < 10 mg BOD <sub>5</sub> /L

## 2.3 Βιώσιμη αξιοποίηση και ενεργειακή ανάκτηση αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας

Η γαλακτοβιομηχανία, ως ένας από τους σημαντικότερους τομείς της βιομηχανίας των τροφίμων, είναι υπεύθυνη ως ένας από τους πιο έντονα υδροβόρος και ρυπογόνος βιομηχανική δραστηριότητα για το περιβάλλον. Με την υψηλή παραγωγή αποβλήτων πλούσιων σε οργανική ύλη, άζωτο, φώσφορο και λίπη. Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη περιβαλλοντική πίεση, οι αυστηρότερες νομοθεσίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και η ανάγκη για μείωση του ενεργειακού κόστους έχουν οδηγήσει τη βιομηχανία σε μια ριζική μεταστροφή του τρόπου διαχείρισης των αποβλήτων. Η διαχείριση δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως απλή διεργασία επεξεργασίας ρύπων, αλλά ως ευκαιρία ανάκτησης πόρων και ενέργειας, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας (Moukaf and Elkihel, 2023).

Σύμφωνα με τον FAO (2024), τα παραγόμενα απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας μπορούν να αξιοποιηθούν ενεργειακά σε ποσοστό έως και 80 % του οργανικού τους φορτίου, ενώ τα θρεπτικά στοιχεία (άζωτο, φώσφορος, κάλιο) δύνανται να ανακυκλωθούν σε ποσοστά άνω του 70 %. Αυτά τα δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι τα απόβλητα του κλάδου δεν αποτελούν μόνο πρόβλημα ρύπανσης, αλλά και δεξαμενή πρώτων υλών για την πράσινη βιομηχανία.

Η σύγχρονη προσέγγιση στη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων βασίζεται στη δημιουργία ολοκληρωμένων βιοαντιδραστήρων (integrated dairy biorefineries), τα οποία συνδυάζουν διεργασίες βιολογικής αποδόμησης, ενεργειακής ανάκτησης και παραγωγής βιοπροϊόντων υψηλής αξίας. Μέσα από τεχνολογίες όπως η αναερόβια χώνευση, η αερόβια βιολογική επεξεργασία, οι μεμβρανικές διεργασίες (UF, RO) και η χημική ανάκτηση φωσφόρου, οι βιομηχανίες μπορούν να επιτύχουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές (zero discharge), ενώ παράλληλα παράγουν βιοαέριο, καθαρό νερό, και πρώτες ύλες για νέες εφαρμογές.

Η μετάβαση αυτή ενισχύεται από την εφαρμογή προγραμμάτων όπως το Horizon Europe – Green Deal, που στηρίζουν έργα βιώσιμης μετατροπής βιομηχανικών αποβλήτων σε ενέργεια και βιοπροϊόντα. Έργα όπως το Whey2Value (2022–2025) και το CircularDairy (2023) επιδεικνύουν πρακτικά πώς η επαναχρησιμοποίηση του τυρογάλακτος και άλλων ρευμάτων αποβλήτων μπορεί να προσφέρει διπλό όφελος: περιβαλλοντική αποφόρτιση και οικονομική απόδοση (Mlinar et al., 2022).

Η αξιοποίηση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας μπορεί να λάβει πολλές μορφές. Η ενεργειακή αξιοποίηση, μέσω παραγωγής βιοαερίου, βιοαιθανόλης ή ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί τη συχνότερη πρακτική. Παράλληλα, οι βιοτεχνολογικές διεργασίες μετατροπής, όπως η παραγωγή πολυσακχαριτών, οργανικών οξέων, ενζύμων και βιοδραστικών ενώσεων (π.χ. ρεσβερατρόλη), αντιπροσωπεύουν τη νέα γενιά καινοτόμων εφαρμογών. Έτσι, τα υπολείμματα γάλακτος, το τυρόγαλο και οι λάσπες επεξεργασίας δεν θεωρούνται πλέον απόβλητα, αλλά πρώτες ύλες ενός κυκλικού βιομηχανικού οικοσυστήματος.

Η παρούσα ενότητα εστιάζει στη διερεύνηση αυτών των δυνατοτήτων, παρουσιάζοντας:

- (α) τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας και βιοαερίου από οργανικά απόβλητα, και
- (β) τις διαδικασίες παραγωγής βιοπροϊόντων προστιθέμενης αξίας, οι οποίες αποτελούν θεμέλιο για την ανάπτυξη βιοοικονομικών πρακτικών στη γαλακτοβιομηχανία.

Η ανάλυση που ακολουθεί στοχεύει να τεκμηριώσει, με βάση τη σύγχρονη βιβλιογραφία, ότι η αξιοποίηση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας δεν είναι μόνο περιβαλλοντικά ωφέλιμη αλλά και τεχνολογικά ώριμη και οικονομικά αποδοτική. Με την κατάλληλη οργάνωση, οι μονάδες αυτές μπορούν να λειτουργούν ενεργειακά αυτόνομα και να μετατρέπουν τα κατάλοιπα σε εν δυνάμει βιομηχανικά προϊόντα, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα του κλάδου.

### 2.3.1 Αναδυόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας

Η γαλακτοβιομηχανία αποτελεί έναν από τους πλέον απαιτητικούς τομείς της βιομηχανικής παραγωγής ως προς τη διαχείριση αποβλήτων, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου, της παρουσίας λιπών, πρωτεϊνών, υδατανθράκων και ανόργανων αλάτων. Η επεξεργασία αυτών των αποβλήτων έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με την έμφαση να μετατοπίζεται από την απλή απορρύπανση προς την αξιοποίηση των ροών αποβλήτων στο πλαίσιο μιας κυκλικής και βιώσιμης οικονομίας (Nawaz et al., 2022). Οι αναδυόμενες τεχνολογίες στοχεύουν πλέον όχι μόνο στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αλλά και στην ανάκτηση ενέργειας, θρεπτικών συστατικών και βιοδραστικών ενώσεων.

#### A. Προηγμένες βιολογικές διεργασίες

Οι βιολογικές διεργασίες αποτελούν τον πυρήνα των συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας, καθώς επιτρέπουν την αποδόμηση οργανικών συστατικών με οικολογικό και ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion - AD), η οποία μετατρέπει τα οργανικά στερεά σε βιοαέριο (κυρίως μεθάνιο και CO<sub>2</sub>). Σύμφωνα με μελέτες σε μονάδες της Ιταλίας και της Ολλανδίας, η ενεργειακή απόδοση μπορεί να φθάσει τα 0,35–0,45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD, μειώνοντας ταυτόχρονα το οργανικό φορτίο έως και 90 % (Mojiri et al., 2023).

Νέες τεχνολογίες όπως η UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) και η EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) έχουν αυξήσει τη σταθερότητα της διεργασίας και επιτρέπουν την επεξεργασία υψηλών συγκεντρώσεων BOD και COD (πάνω από 10.000 mg/L). Αυτά τα συστήματα ενσωματώνονται πλέον σε υβριδικές μονάδες με μεμβρανικούς βιοαντιδραστήρες

(AnMBR) για την απομάκρυνση στερεών και παθογόνων, εξασφαλίζοντας καθαρότερη εκροή που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για πλύσεις ή άρδευση (Das et al., 2024).

Επιπλέον, η μικροβιακή ηλεκτροχημική τεχνολογία (Microbial Fuel Cells - MFCs) αναδεικνύεται ως καινοτόμος λύση για την ταυτόχρονη απορρύπανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από οργανικά απόβλητα. Πειραματικές εφαρμογές σε γαλακτοκομεία της Ινδίας και της Ισπανίας δείχνουν παραγωγή ρεύματος έως 2–3 W/m<sup>2</sup>, ενώ επιτυγχάνεται αποδόμηση COD >70 % (Kumar et al., 2022).

#### B. Προηγμένες οξειδωτικές και φυσικοχημικές διεργασίες

Οι Advanced Oxidation Processes (AOPs), όπως η οξείδωση με όζον (O<sub>3</sub>), η φωτοκατάλυση με TiO<sub>2</sub>, και ο συνδυασμός υπεροξειδίου του υδρογόνου (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) με υπεριώδη ακτινοβολία (UV), έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές για την αποδόμηση δύσκολα βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων. Στη γαλακτοβιομηχανία, οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται κυρίως σε προχωρημένα στάδια επεξεργασίας (tertiary treatment) για την απομάκρυνση υπολειμματικών λιπιδίων, φαινολικών ενώσεων και οσμών. Οι αποδόσεις απομάκρυνσης COD φθάνουν έως 95 %, ενώ η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται σε συνδυαστικά συστήματα (O<sub>3</sub>/UV ή Fenton/MBR) (Ribeiro et al., 2022).

Η αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis - RO), σε συνδυασμό με νανοδιήθηση (NF), χρησιμοποιείται επίσης για την ανάκτηση καθαρού νερού και συμπύκνωση θρεπτικών συστατικών, με σημαντικά αποτελέσματα στη μείωση του υδατικού αποτυπώματος. Μονάδες στη Δανία και την Ελλάδα έχουν επιτύχει ποσοστά ανάκτησης νερού άνω του 70 %, μειώνοντας τις συνολικές ανάγκες σε φρέσκο νερό κατά 40–50 % (van der Bruggen et al., 2023).

#### Γ. Υβριδικά και ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας

Η σύγχρονη τάση στις βιώσιμες εγκαταστάσεις είναι η ανάπτυξη υβριδικών ή ολοκληρωμένων συστημάτων, όπου βιολογικές, φυσικοχημικές και ενεργειακές διεργασίες λειτουργούν συνδυαστικά. Για παράδειγμα, η σύνδεση UASB + MBR + RO σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην Ολλανδία επέτρεψε την επαναχρησιμοποίηση 80 % των εκροών και την ανάκτηση ενέργειας που κάλυψε έως και 60 % των ενεργειακών αναγκών της μονάδας.

Επιπλέον, σε πειραματικές εφαρμογές στην Ελλάδα, η ενσωμάτωση αιωρούμενων βιοαντιδραστήρων (SBR) με αναερόβια στάδια προεπεξεργασίας μείωσε το BOD<sub>5</sub> κατά 98 %, ενώ επέτρεψε τη συλλογή παραπροϊόντων όπως λιπαρά οξέα και γλυκερίνη, κατάλληλα για μεταγενέστερη βιοτεχνολογική χρήση (π.χ. παραγωγή ρεσβερατρόλης) (Tabelini et al., 2023).

Πίνακας 6: Ενδεικτικές αναδυόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας (Tabelini et al., 2023)

Κατηγορία Τεχνολογίας	Τεχνική	Απόδοση Απομάκρυνσης COD (%)	Ενεργειακή/ Περιβαλλοντική Απόδοση	Ενδεικτικές Εφαρμογές
Αναερόβια Χώνευση (AD, UASB)	Παραγωγή βιοαερίου	85–95	0,35–0,45 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg COD	Ιταλία, Ολλανδία, Ελλάδα
MBR (Μεμβρανικοί Βιοαντιδραστήρες)	Μικρο/ υπερδιήθηση	90–98	Επαναχρησιμοποίηση εκροής	Ισπανία, Δανία

AOPs (O <sub>3</sub> , UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> )	Προηγμένες Οξειδώσεις	80–95	Μείωση οσμών και τοξικότητας	ΗΠΑ, Πορτογαλία
MFCs (Microbial Fuel Cells)	Ηλεκτροχημική απορρύπανση	60–75	Παραγωγή ρεύματος (2–3 W/ m <sup>2</sup> )	Ινδία, Ισπανία
RO/NF	Ανάκτηση νερού	70–80	Μείωση υδατικού αποτυπώματος	Ελλάδα, Δανία

### 2.3.2 Ενεργειακή ανάκτηση και κυκλική αξιοποίηση αποβλήτων στη γαλακτοβιομηχανία

Η ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας αποτελεί βασικό πυλώνα της σύγχρονης βιώσιμης διαχείρισης, καθώς συνδυάζει την απορρύπανση με την ανάκτηση ενέργειας και πρώτων υλών.

Τα οργανικά απόβλητα, πλούσια σε λακτόζη, λίπη και πρωτεΐνες, προσφέρουν σημαντικό δυναμικό για παραγωγή βιοαερίου, βιοαιθανόλης και άλλων βιοπροϊόντων υψηλής αξίας. Η μετατροπή τους σε χρήσιμες μορφές ενέργειας ενισχύει την αυτάρκεια των βιομηχανιών και περιορίζει τις εκπομπές άνθρακα, εναρμονιζόμενη με τις αρχές της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας.

Μέσω τεχνολογιών όπως η αναερόβια χώνευση, οι μεμβρανικοί βιοαντιδραστήρες και οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες, οι μονάδες παραγωγής μπορούν να ενταχθούν σε κυκλικά ενεργειακά συστήματα, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μετάβαση της γαλακτοβιομηχανίας σε ένα βιώσιμο, χαμηλών εκπομπών μοντέλο παραγωγής (Mohan et al., 2022).

#### A. Αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου

Η αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion - AD) αποτελεί την πιο ώριμη τεχνολογία ενεργειακής ανάκτησης από υγρά και στερεά απόβλητα γαλακτοβιομηχανίας. Κατά τη διεργασία αυτή, τα οργανικά συστατικά (λακτόζη, πρωτεΐνες, λίπη) διασπώνται από τους μικροοργανισμούς σε μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), με ταυτόχρονη παραγωγή σταθεροποιημένης ιλύος.

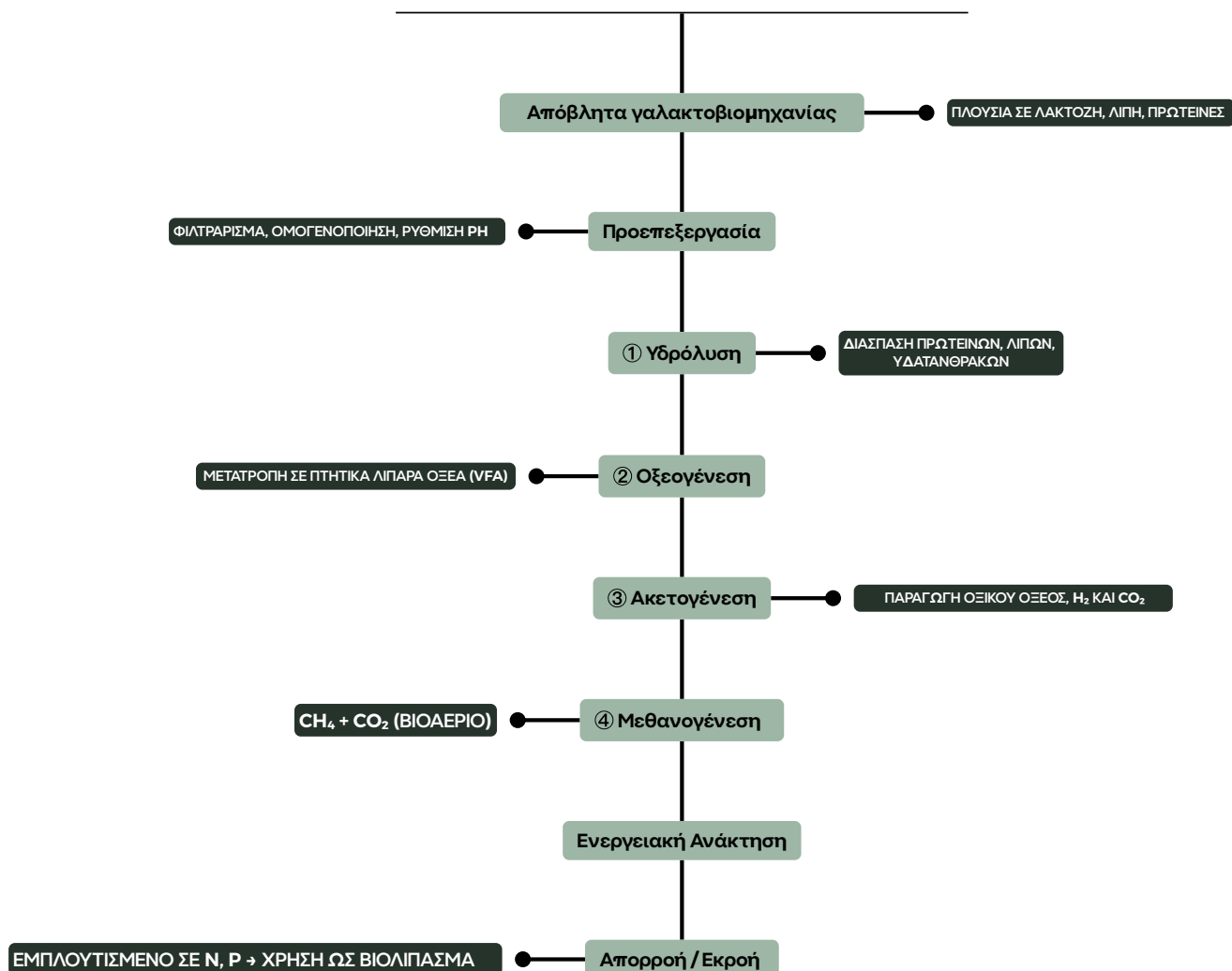
Η διαδικασία περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: την υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση. Η τελική σύνθεση του παραγόμενου βιοαερίου περιλαμβάνει 60–70 % CH<sub>4</sub>, 25–35 % CO<sub>2</sub>, και μικρές ποσότητες H<sub>2</sub>S και NH<sub>3</sub>.

Σε πειραματικές και βιομηχανικές εφαρμογές, η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης για απόβλητα τυροκομείων κυμαίνεται από 0,35 έως 0,45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD που αποικοδομήθηκε από τους μικροοργανισμούς, επιτυγχάνοντας μείωση BOD<sub>5</sub> και COD έως και 90–95 %.

Στην Ιταλία, πιλοτική μονάδα στη Λομβαρδία που επεξεργάζεται 200 m<sup>3</sup> αποβλήτων ημερησίως από παραγωγή μοτσαρέλας, παράγαγε 1200–1500 m<sup>3</sup> βιοαερίου/ημέρα, ισοδύναμο με 7.000 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, καλύπτοντας το 65 % των ενεργειακών αναγκών της μονάδας. Στην Ολλανδία, η FrieslandCampina έχει εφαρμόσει σύστημα UASB + CHP (Combined Heat and Power), επιτυγχάνοντας μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 1.200 τόνους ετησίως (Polizzi et al., 2022).

Η εφαρμογή της AD στην Ελλάδα παραμένει περιορισμένη, ωστόσο πιλοτικά έργα, όπως το σύστημα βιοαερίου του Οργανισμού Βιομηχανικής Περιοχής Λάρισας, έχουν δείξει αποδόσεις παραγωγής μέχρι 0,38 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD για απόβλητα τυροκομείων, αποδεικνύοντας τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας σε μεσογειακές συνθήκες (Kourtis et al., 2022).

## Αναερόβια χώνευση αποβλήτων



Σχήμα 4: Στάδια και ενεργειακές ροές της αναερόβιας χώνευσης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας (Polizzi et al., 2022).

### B. Παραγωγή βιοαιθανόλης και βιοϋδρογόνου

Η αξιοποίηση της λακτόζης του τυρογάλακτος για παραγωγή βιοαιθανόλης μέσω αλκοολικής ζύμωσης αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες βιοτεχνολογικές διεργασίες. Ζύμες όπως το *Kluyveromyces marxianus* και *Saccharomyces cerevisiae* έχουν την ικανότητα να μεταβολίζουν τη λακτόζη ή τη γλυκόζη σε αιθανόλη, υπό κατάλληλες συνθήκες pH (4,5–5,0) και θερμοκρασίας (30–35 °C).

Η θεωρητική απόδοση κυμαίνεται γύρω στα 0,51 g αιθανόλης/g σακχάρου, με πρακτικές αποδόσεις 80–90 % της θεωρητικής τιμής (Costa et al., 2021).

Στη Δανία, πιλοτική μονάδα που χρησιμοποίησε τυρόγαλο ως υπόστρωμα για ζύμωση με *K. marxianus* πέτυχε συγκεντρώσεις αιθανόλης έως 25 g/L και μείωση COD >75 %. Η παραγόμενη αιθανόλη χρησιμοποιήθηκε σε παραγωγή βιοκαυσίμου δεύτερης γενιάς (Nawaz et al., 2022).

Παράλληλα, η σκοτεινή ζύμωση (dark fermentation) προσφέρει δυνατότητα παραγωγής βιοϋδρογόνου ( $H_2$ ) από τυροκομικά απόβλητα. Σε πειραματικές διατάξεις με στελέχη *Clostridium butyricum*, έχουν καταγραφεί αποδόσεις έως  $1,9 \text{ mol } H_2/\text{mol}$  λακτόζης, με παράλληλη μείωση COD  $>60 \%$ . Το βιοϋδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας σε κυψέλες καυσίμου είτε σε συνδυασμό με βιοαέριο, δημιουργώντας μείγματα “bio-Hythane” υψηλής ενεργειακής απόδοσης (Singh et al., 2024).

#### Γ. Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και βιοπροϊόντων

Η αναερόβια και αερόβια επεξεργασία αποβλήτων οδηγεί σε σημαντικές ποσότητες πλούσιων σε άζωτο και φώσφορο ροών, που μπορούν να μετατραπούν σε βιολιπάσματα ή βιοενεργά υλικά. Τεχνικές όπως η αντίστροφη όσμωση (RO) και η νανοδιήθηση (NF) επιτρέπουν την ανάκτηση θεικών και φωσφορικών ιόντων, ενώ παράλληλα αποδίδουν καθαρό νερό επαναχρησιμοποιήσιμο στη μονάδα.

Πρόσφατες μελέτες στην Πορτογαλία και την Ελλάδα έδειξαν ότι η εφαρμογή μεμβρανικών συστημάτων (NF/RO) σε εκροές βιοαντιδραστήρων επιτρέπει την ανάκτηση έως  $70 \%$  του φωσφόρου και  $60 \%$  του αζώτου σε μορφή κατάλληλη για αγροτική χρήση (Tabelini et al., 2023).

Ταυτόχρονα, οι ιλύες που προκύπτουν από τις διεργασίες AD περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας μικροοργανισμών, που μπορούν να απομονωθούν ως single-cell protein (SCP), με περιεκτικότητα πρωτεΐνης έως  $55\text{--}65 \%$  και δυνατότητα χρήσης ως ζωοτροφή (Wu et al., 2024).

Πίνακας 7. Παραδείγματα ενεργειακής και κυκλικής αξιοποίησης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας στην Ευρώπη (Singh et al., 2024).

Χώρα	Τεχνολογία	Απόβλητο	Ενεργειακή Απόδοση / Ανάκτηση	Περιβαλλοντικό Όφελος
Ιταλία	AD + CHP	Ορός γάλακτος	$0,42 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg COD}$	$-65 \%$ εκπομπές $\text{CO}_2$
Ολλανδία	UASB + MBR + RO	Μίγμα αποβλήτων	$80 \%$ επαναχρησιμοποίηση νερού	Εξοικονόμηση $60 \%$ ενέργειας
Ελλάδα	AD + SBR (πilotικό)	Απόβλητα τυροκομείων	$0,38 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg COD}$	Μείωση COD $92 \%$ , ανάκτηση N/P
Δανία	<i>K. marxianus</i> fermentation	Τυρόγαλο	$25 \text{ g/L}$ αιθανόλη	Μείωση οργανικού φορτίου $75 \%$

## 2.4 Ολοκληρωμένες προσεγγίσεις βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας

Η γαλακτοβιομηχανία αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς κλάδους της παγκόσμιας βιομηχανίας τροφίμων, με ετήσια παραγωγή που ξεπερνά τους 930 εκατομμύρια τόνους γάλακτος (FAO, 2024). Πέρα από τη διατροφική της σημασία, η βιομηχανία αυτή συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παραγωγούς υγρών αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο,

αποτελώντας πρόκληση για την περιβαλλοντική διαχείριση. Τα απόβλητα που προέρχονται από τη μεταποίηση γάλακτος και τυροκομικών προϊόντων περιέχουν σημαντικές ποσότητες λακτόζης, λιπιδίων, πρωτεϊνών, αζώτου και φωσφόρου, ενώ χαρακτηρίζονται από υψηλό BOD<sub>5</sub> (20.000–50.000 mg/L) και COD (40.000–80.000 mg/L). Αυτές οι τιμές καθιστούν τα γαλακτοκομικά απόβλητα 50 έως 100 φορές πιο ρυπογόνα σε σύγκριση με τα οικιακά λύματα (Ribeiro et al., 2022).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση παράγει περισσότερους από 25 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων γαλακτοκομίας ετησίως, με κύριες ροές να προέρχονται από τη βιομηχανική παραγωγή τυριών, γιαουρτιού και βουτύρου. Οι υφιστάμενες μέθοδοι επεξεργασίας (π.χ. απλή βιολογική κατεργασία ή απόρριψη με ανάμιξη στα αστικά λύματα) συχνά αποτυγχάνουν να ανταποκριθούν στα αυστηρά πρότυπα της Οδηγίας 91/271/EOK και της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τις Βιομηχανικές Εκπομπές (IED, 2010/75/EU), ιδιαίτερα όσον αφορά τα επίπεδα αμμωνιακού αζώτου ( $\leq 10$  mg/L) και ολικού φωσφόρου ( $\leq 2$  mg/L) (Tabelini et al., 2023).

Επιπλέον, η παραγωγή και η επεξεργασία γαλακτοκομικών προϊόντων είναι ενεργοβόρες διεργασίες. Κατά μέσο όρο, απαιτούνται 1,2–1,8 GJ ενέργειας ανά τόνο προϊόντος, ενώ η επεξεργασία των αποβλήτων μπορεί να αυξήσει το ενεργειακό αποτύπωμα μιας μονάδας κατά 10–15%. Σε πολλές περιπτώσεις, τα υγρά απόβλητα και το τυρόγαλο, που αντιπροσωπεύουν το 85–95% του όγκου του γάλακτος, απορρίπτονται χωρίς αξιοποίηση, προκαλώντας έντονη ευτροφική ρύπανση και κατανάλωση οξυγόνου στα ύδατα των οικοσυστημάτων.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η ανάγκη για ολοκληρωμένες προσεγγίσεις βιώσιμης διαχείρισης είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Η έννοια της “ολοκλήρωσης” αναφέρεται στον συνδυασμό φυσικοχημικών, βιολογικών και βιοτεχνολογικών διεργασιών που συνεργάζονται όχι απλώς για τον καθαρισμό, αλλά και για την αξιοποίηση των αποβλήτων ως πηγών ενέργειας και πρώτων υλών. Πρόκειται για μια μετατόπιση από το γραμμικό μοντέλο παραγωγής (“παράγω – καταναλώνω – απορρίπτω”) προς ένα κυκλικό βιομηχανικό σύστημα, όπου κάθε παραπροϊόν επανεισάγεται στον κύκλο αξίας (Hassoun et al., 2024).

Τα ολοκληρωμένα συστήματα περιλαμβάνουν πολλαπλές βαθμίδες επεξεργασίας, όπως:

- Μembranικά στάδια (UF, NF, RO) για την ανάκτηση καθαρών ροών νερού και πρωτεϊνών,
- Αναερόβια χώνευση (UASB, AnMBR) για παραγωγή βιοαερίου και μείωση οργανικού φορτίου,
- Αερόβια βιολογική επεξεργασία για περαιτέρω αποδόμηση οργανικών ουσιών,
- Βιοτεχνολογικές διεργασίες για τη μετατροπή της λακτόζης σε πολυυδροξυαλκανοϊκά (PHA), οργανικά οξέα ή ρεσβερατρόλη (Stasinakis et al., 2022).

Η μετάβαση προς τέτοιους βιοαντιδραστήρες (biorefineries) ενισχύεται από πολιτικές της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal) και του Σχεδίου Δράσης για την Κυκλική Οικονομία (CEAP 2020), που προωθούν την απανθρακοποίηση και τη μηδενική ρύπανση έως το 2050. Παράλληλα, οι Δείκτες Βιώσιμης Ανάπτυξης του FAO προωθούν την ενσωμάτωση εργαλείων LCA (Life Cycle Assessment) και τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης (TEA) στη λήψη αποφάσεων, επιτρέποντας στις βιομηχανίες να ποσοτικοποιούν τα περιβαλλοντικά τους οφέλη.

Ενδεικτικά, μελέτες στην Ιταλία και την Ολλανδία δείχνουν ότι η υιοθέτηση ενός συστήματος αναερόβιας χώνευσης με ανάκτηση βιοαερίου και παράλληλη μεμβρανική καθαριότητα μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 1,5–2,0 τόνους CO<sub>2</sub>eq/τόνο αποβλήτων και να εξοικονομήσει έως 35% του κόστους ενέργειας. Αντίστοιχες εφαρμογές στην Ελλάδα και τη Δανία δείχνουν σημαντική βελτίωση του ενεργειακού ισοζυγίου, με ποσοστά ενεργειακής ανάκτησης 60–70%.

Η ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας, επομένως, δεν είναι απλώς ένα περιβαλλοντικό μέτρο, αλλά μια στρατηγική επιλογή βιώσιμης παραγωγής, που συνδέει

την καινοτομία με την κυκλική οικονομία, την ενεργειακή αυτονομία και την κοινωνική υπευθυνότητα (Angelis-Dimakis et al., 2022).

### **Τεχνολογική λειτουργία βιοαντιδραστήρα γαλακτοκομικών αποβλήτων**

Η προσέγγιση της ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων στις γαλακτοβιομηχανίες αποτελεί τη βάση μιας νέας γενιάς βιομηχανικών συστημάτων, όπου η έννοια του “αποβλήτου” αντικαθίσταται από αυτή του “πόρου ή ευκαιρίας”. Η ολοκλήρωση των διεργασιών επιτρέπει την ενεργειακή ανάκτηση, τη βιοτεχνολογική μετατροπή και την συστηματική αξιοποίηση των παραπροϊόντων, διαμορφώνοντας την αρχιτεκτονική του σύγχρονου βιοαντιδραστήρα γαλακτοκομικών αποβλήτων (Dairy Biorefinery).

Ένας βιοαντιδραστήρας τέτοιου τύπου δεν είναι μία ενιαία μονάδα επεξεργασίας, αλλά ένα σύστημα συνδεδεμένων διεργασιών, οι οποίες μετατρέπουν τις ροές αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας σε πολλαπλά προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Στόχος δεν είναι μόνο η απορρύπανση, αλλά η πλήρης αξιοποίηση των φυσικοχημικών συστατικών του τυρογάλακτος, των λιπών, των πρωτεϊνών και των διαλυτών οργανικών ενώσεων.

#### **◆ Κύριες βαθμίδες τεχνολογικής ολοκλήρωσης**

Οι διεργασίες που συνδυάζονται σε ένα ολοκληρωμένο βιοδιυλιστήριο μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

1. Φυσικοχημικές διεργασίες προκατεργασίας, όπως διήθηση, καθίζηση και μεμβρανικός διαχωρισμός(UF, NF, RO). Αυτές επιτρέπουν τον διαχωρισμό των πρωτεϊνών, των λιπιδίων και της λακτόζης από το υδατικό κλάσμα. Οι μεμβράνες υπερδιήθησης συγκρατούν τις καζεΐνες και τις ορρούχες πρωτεΐνες, ενώ η νανοδιήθηση και η αντίστροφη ώσμωση ανακτούν νερό υψηλής καθαρότητας, το οποίο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για πλύσεις και διεργασίες (van der Bruggen et al., 2023).
2. Αναερόβιες διεργασίες όπως οι UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) και AnMBR (Anaerobic Membrane Bioreactor). Σε αυτές, μικροοργανισμοί μετατρέπουν το οργανικό φορτίο σε βιοαέριο πλούσιο σε μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ). Οι αποδόσεις κυμαίνονται από 0,35 έως 0,45  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg COD}$  αποδομημένου, καθιστώντας τα συστήματα αυτά ενεργειακά θετικά (Singh et al., 2024). Το βιοαέριο μπορεί να τροφοδοτήσει λέβητες, συστήματα παραγωγής καυσίμου, μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα έως 40 %.
3. Αερόβιες ή φωτοβιολογικές διεργασίες, όπου πραγματοποιείται περαιτέρω αποδόμηση των οργανικών ενώσεων και ανάπτυξη μικροβιακής ή φυκοβιομάζας. Οι διεργασίες αυτές απομακρύνουν τα εναπομείναντα θρεπτικά συστατικά (N, P) και επιτρέπουν την ανάκτηση βιομάζας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα ή ως πρώτη ύλη για παραγωγή βιοπολυμερών.
4. Βιοτεχνολογικές μετατροπές, κατά τις οποίες το υδατικό υπόλειμμα πλούσιο σε λακτόζη χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για ζύμωση και παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας, όπως πολυυδροξυαλκανοϊκά (PHA), οργανικά οξέα (γαλακτικό, κιτρικό), βιοιθανόλη και ρεσβερατρόλη. Αυτές οι διεργασίες προσδίδουν οικονομική αξία σε ροές που παλαιότερα θεωρούνταν μη αξιοποιήσιμες.

Η συνδυασμένη λειτουργία των ανωτέρω βαθμίδων οδηγεί σε πολυλειτουργικά συστήματα, όπου η απόδοση επεξεργασίας ξεπερνά το 90 % και το καθαρό ενεργειακό ισοζύγιο καθίσταται θετικό. Τα συστήματα αυτά ενισχύουν την ενεργειακή αυτάρκεια και επιτρέπουν την παραγωγή καθαρού νερού, μειώνοντας την κατανάλωση πόσιμου νερού έως 35 % (Basak et al., 2022; Kumar et al., 2022).

Πίνακας 8. Σύγκριση τεχνολογιών ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανιών (Basak et al., 2022; Kumar et al., 2022).

Τεχνολογία	Περιγραφή	Απόδοση απομάκρυνσης COD/BOD	Ενεργειακό ή υλικό όφελος	Ενδεικτική εφαρμογή
UASB	Αναερόβια χώνευση με ανοδική ροή και ιλύ υψηλής	70–90 %	0,35–0,40 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg COD	Ολλανδία, Ιταλία
MBR	Αερόβια επεξεργασία με μεμβράνες μικροδιήθησης	90–98 %	Ανακύκλωση νερού διεργασίας	Γαλλία, Δανία
AnMBR	Συνδυασμός μεμβρανών και αναερόβιας χώνευσης	85–95 %	Ενέργεια + καθαρό νερό	Ισπανία, Ελλάδα
RO/NF	Ανάκτηση πρωτεϊνών και απομάκρυνση αλάτων	60–90 %	Συμπυκνωμένη λακτόζη/πρωτεΐνες	Γερμανία
Biorefinery systems	Ολοκληρωμένη αξιοποίηση όλων των ροών (ενέργεια, προϊόντα)	80–95 %	Βιοαέριο, βιοπολυμερή, ρεσβερατρόλη	Ιταλία, Σουηδία

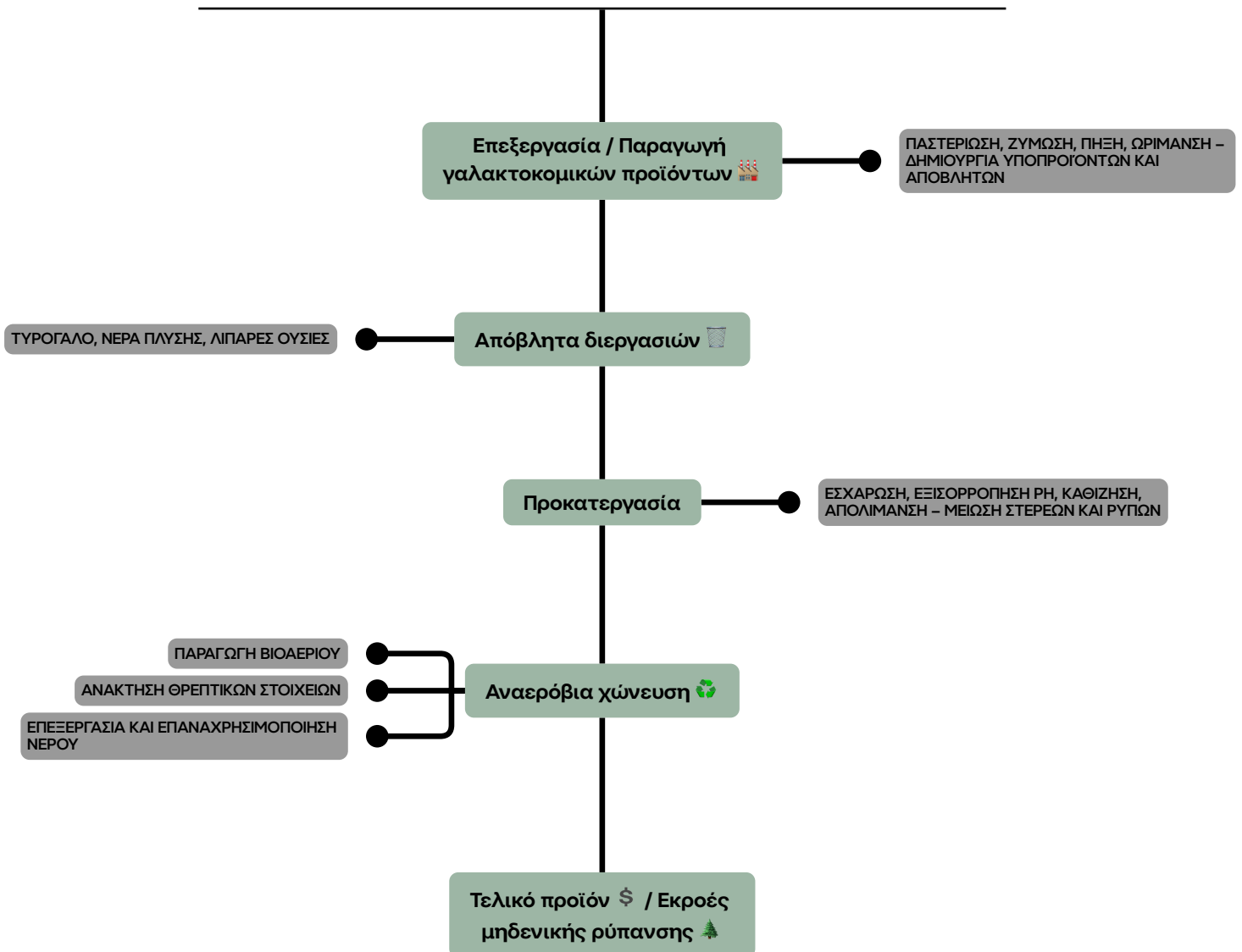
Η αποτελεσματικότητα των βιοδιωλιστηρίων εξαρτάται από την ορθή διαχείριση των ροών ενέργειας και υλικών, τη συνεχή παρακολούθηση των παραμέτρων διεργασίας (pH, θερμοκρασία, HRT, COD) και την ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων ελέγχου (SCADA, IoT).

Ενδεικτικά, μονάδες στην Ιταλία και την Ολλανδία που εφαρμόζουν συνδυασμό AnMBR + RO πέτυχαν μείωση COD > 95 %, ανάκτηση βιοαερίου 45–60 Nm<sup>3</sup>/τόνο αποβλήτων, και παραγωγή καθαρού νερού > 50 % της εισροής.

Στην Ελλάδα, πιλοτικές εφαρμογές (Ηπειρος, Κεντρική Μακεδονία) δείχνουν ότι με υβριδικά συστήματα UASB + MBR επιτυγχάνεται ενεργειακή αυτονομία έως 70 %, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βιωσιμότητα μικρομεσαίων μονάδων.

Τα αποτελέσματα αυτά τεκμηριώνουν ότι η τεχνολογική ολοκλήρωση δεν είναι θεωρητική έννοια, αλλά ρεαλιστικό πλαίσιο παραγωγής και βιωσιμότητας, όπου η ενέργεια, το νερό και τα υποπροϊόντα επαναπροσδιορίζονται ως συνιστώσες ενός κυκλικού οικοσυστήματος (Angelis-Dimakis et al., 2022).

# Γάλα



Σχήμα 5. Ολοκληρωμένο σύστημα βιοαντιδραστήρα γαλακτοβιομηχανίας (Angelis-Dimakis et al., 2022).

### 3. Παραγωγή και Βιοτεχνολογική Αξιοποίηση της Ρεσβερατρόλης από Παραπροϊόντα Γαλακτοβιομηχανίας

Η ρεσβερατρόλη (3,5,4'-trihydroxystilbene) αποτελεί μία φυσική πολυφαινόλη που έχει προσελκύσει έντονο επιστημονικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω των πολλαπλών βιοδραστικών της ιδιοτήτων και της ευρείας εφαρμογής της στη φαρμακολογία, τη βιοτεχνολογία και τη βιομηχανία τροφίμων. Πρόκειται για ένα φυτοαλεξίνη, δηλαδή μια ουσία που παράγεται από φυτά ως αμυντικός μηχανισμός έναντι παθογόνων ή περιβαλλοντικών στρεσογόνων παραγόντων. Η πιο κοινή μορφή της είναι η *trans*-ρεσβερατρόλη, η οποία παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα και βιοδραστικότητα. Οι βασικές πηγές της στη φύση είναι το σταφύλι, το κρασί, τα φιστίκια, τα βατόμουρα και το *Polygonum cuspidatum* ή Japanese knotweed ( πολυετές φυτό της οικογένειας Polygonaceae), από το οποίο παράγεται εμπορικά η συνθετική μορφή.

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ρεσβερατρόλη αναγνωρίστηκε ως μια από τις πιο υποσχόμενες φυσικές ενώσεις με αντιοξειδωτική, αντικαρκινική, αντιφλεγμονώδη, καρδιοπροστατευτική και νευροπροστατευτική δράση, καθιστώντας την πολύτιμη για τη φαρμακευτική και καλλυντική βιομηχανία. Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι επηρεάζει θετικά τη μακροζωία μέσω ενεργοποίησης ενζύμων της οικογένειας σιρτουινών (SIRT1), που σχετίζονται με τη ρύθμιση του μεταβολισμού και της κυτταρικής επιδιόρθωσης. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τη ρεσβερατρόλη πρότυπο βιοδραστικό μόριο στη σύγχρονη βιοτεχνολογία και κεντρικό αντικείμενο έρευνας για την ανάπτυξη φυσικών αντιοξειδωτικών και «nutraceuticals» προϊόντων (Thapa et al., 2019).

Παρά τη σημασία της, η φυσική παραγωγή ρεσβερατρόλης μέσω εκχύλισης από φυτικά υλικά παραμένει πολύ περιορισμένη, λόγω χαμηλής συγκέντρωσης του μορίου στους ιστούς (0,1–10 mg/kg ξηρού βάρους), της εποχικής διακύμανσης και του υψηλού κόστους εκχύλισης και καθαρισμού (Hasan et al., 2023). Οι συνθετικές χημικές μέθοδοι, αν και αποδοτικότερες, συνοδεύονται από περιβαλλοντικά και οικονομικά μειονεκτήματα, όπως χρήση τοξικών διαλυτών και παραγωγή αποβλήτων. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν οδηγήσει την έρευνα προς βιοτεχνολογικές προσεγγίσεις, αξιοποιώντας μικροοργανισμούς όπως *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* και *Yarrowia lipolytica* για την παραγωγή ρεσβερατρόλης μέσω μεταβολικής μηχανικής (Nascimento et al., 2023).

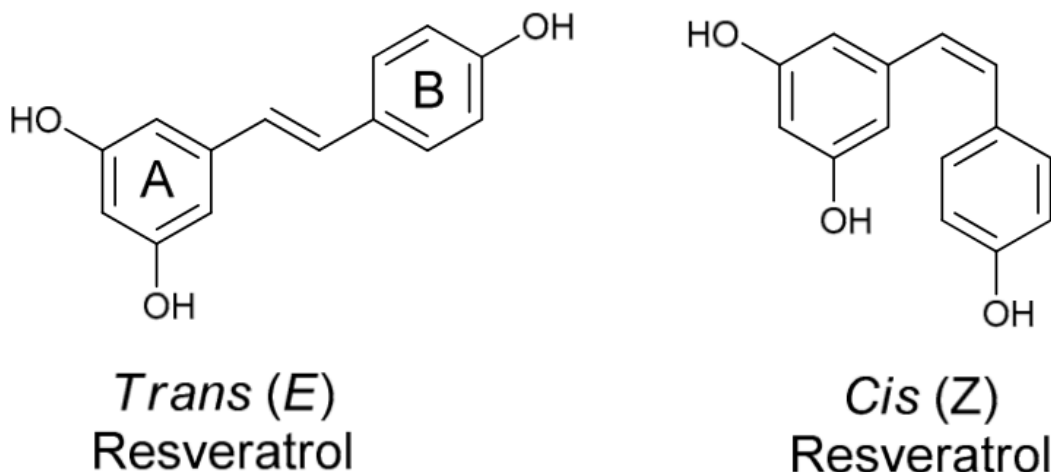
Η μικροβιακή βιοπαραγωγή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς επιτρέπει τον έλεγχο των συνθηκών παραγωγής, τη συνεχή ζύμωση και τη χρήση χαμηλού κόστους υποστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων παραπροϊόντων της αγροβιομηχανίας, όπως το τυρόγαλο, το οποίο αποτελεί σημαντική πηγή λακτόζης. Αυτή η προσέγγιση συνδέεται άμεσα με τις αρχές της κυκλικής βιοοικονομίας, μετατρέποντας ροές αποβλήτων σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η δυνατότητα αξιοποίησης γαλακτοκομικών αποβλήτων για βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης αποτελεί καινοτόμο κατεύθυνση, καθώς επιτρέπει τη σύζευξη περιβαλλοντικής διαχείρισης και βιομηχανικής βιωσιμότητας.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη γενετική τροποποίηση μικροοργανισμών έχουν βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της παραγωγής ρεσβερατρόλης, εισάγοντας κρίσιμα ένζυμα της βιοσυνθετικής οδού, όπως η τυροσίνη αμμωνία-λύαση (TAL), η 4-κουμαρική-CoA λιγάση (4CL) και η στιλβένιο-συνθάση (STS), τα οποία επιτρέπουν τη μετατροπή πρόδρομων μορίων (π.χ. τυροσίνης, p-κουμαρικού οξέος) σε ρεσβερατρόλη. Ο *Saccharomyces cerevisiae*, γνωστός για την ανθεκτικότητα και τη ζυμωτική του ικανότητα, αποτελεί το πλέον δημοφιλές μοντέλο ξενιστή για τέτοιες διεργασίες, καθώς μπορεί να συνδυάσει ζύμωση λακτόζης (μέσω μεταβολικής

τροποποίησης) με παραγωγή ρεσβερατρόλης, χρησιμοποιώντας το τυρόγαλο ως μοναδικό υπόστρωμα (Costa et al., 2021).

- Η παρούσα ενότητα εστιάζει στην ολοκληρωμένη ανάλυση των μηχανισμών, τεχνολογιών και διεργασιών που σχετίζονται με την παραγωγή και αξιοποίηση της ρεσβερατρόλης μέσω βιοτεχνολογικών προσεγγίσεων. Ειδικότερα, θα παρουσιαστούν:
  - οι φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες της ρεσβερατρόλης και οι μηχανισμοί δράσης της,
  - η μεταβολική και ενζυμική οδός σύνθεσης του μορίου,
  - οι στρατηγικές βιοτεχνολογικής παραγωγής μέσω μικροοργανισμών,
  - η δυνατότητα αξιοποίησης παραπροϊόντων της γαλακτοβιομηχανίας, με έμφαση στο τυρόγαλο, ως βιώσιμη πρώτη ύλη για βιοπαραγωγή.

Η σύνδεση αυτών των θεματικών με την ευρύτερη στρατηγική της Πράσινης Μετάβασης και της Κυκλικής Οικονομίας αναδεικνύει τη ρεσβερατρόλη όχι μόνο ως φαρμακευτικό μόριο, αλλά και ως παράδειγμα επιτυχημένης βιομηχανικής σύζευξης περιβαλλοντικής προστασίας και καινοτομίας.



Εικόνα 1: Δομές της trans-ρεσβερατρόλης και του cis-ισομερούς της (Thapa et al., 2019).

### 3.1 Εισαγωγή στη χημική δομή, τις ιδιότητες και τις φυσικές πηγές της ρεσβερατρόλης

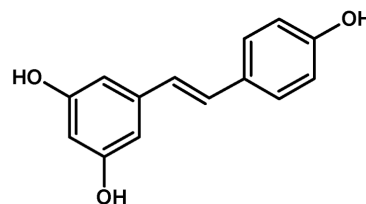
Η ρεσβερατρόλη (3,5,4'-τριυδροξυστυλβένιο, resveratrol) αποτελεί μία φυσική πολυφαινολική ένωση που ανήκει στην κατηγορία των στυλβενίων, οργανικών μορίων που περιλαμβάνουν δύο φαινολικούς δακτυλίους συνδεδεμένους με γέφυρα εθυλενίου. Η χημική της δομή προσδίδει εξαιρετική αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη δραστηριότητα, καθιστώντας τη μία από τις πιο μελετημένες φυσικές ενώσεις παγκοσμίως. Ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1939 από τον Ιάπωνα επιστήμονα Michio Takaoka, ο οποίος την απομόνωσε από το φυτό *Veratrum grandiflorum*, ενώ μεταγενέστερες έρευνες ανέδειξαν το *Polygonum cuspidatum* (ιαπωνικό πολυγώνιο) ως τη σημαντικότερη εμπορική πηγή του μορίου λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε trans-ρεσβερατρόλη στις ρίζες του (Perin et al., 2017).

Η ρεσβερατρόλη παράγεται φυσικά από τα φυτά ως φυτοαλεξίνη, δηλαδή ως δευτερογενής μεταβολίτης που συντίθεται μετά από καταπωνιτικές συνθήκες στρες όπως είναι για παράδειγμα μετά από τραυματισμό του φυτού, προσβολή από παθογόνα ή υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτή η αμυντική λειτουργία αποδίδεται στην ικανότητά της να εξουδετερώνει ενεργές μορφές οξυγόνου (ROS) και να παρεμποδίζει την οξείδωση λιπιδίων και πρωτεϊνών. Σε βιολογικά συστήματα, η ρεσβερατρόλη δρα ως ελεύθερη ρίζα, αναστέλλει τη δράση ενζύμων όπως η COX-2 και η iNOS και ενεργοποιεί οδούς σηματοδότησης που σχετίζονται με τη μακροζωία, όπως οι σιρτουίνες (SIRT1) (Thapa et al., 2019).

Η ιδιαίτερη χημική της δομή ευθύνεται για αυτές τις ιδιότητες: τα τρία υδροξύλια (στις θέσεις 3, 5 και 4') παρέχουν ισχυρή ικανότητα δέσμευσης ηλεκτρονίων, ενώ η διπλή σύνδεση C=C στο κεντρικό εθυλένιο καθορίζει τη διαμόρφωση των δύο ισομερών μορφών της ένωσης — της trans και της cis-ρεσβερατρόλης. Η trans-μορφή θεωρείται θερμοδυναμικά σταθερότερη και βιολογικά πιο ενεργή, ωστόσο υπό την επίδραση υπεριώδους φωτός ή υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να μετατραπεί στην cis μορφή, η οποία παρουσιάζει χαμηλότερη αντιοξειδωτική δράση (Utri-Sarda, 2007).

Από τεχνολογικής άποψης, η ρεσβερατρόλη παρουσιάζει χαμηλή διαλυτότητα στο νερό (<0,03 mg/mL) αλλά είναι σχετικά διαλυτή σε οργανικούς διαλύτες όπως αιθανόλη και DMSO. Αυτή η ιδιότητα περιορίζει την άμεση εφαρμογή της σε υδατικά τρόφιμα, γι' αυτό και έχουν αναπτυχθεί τεχνικές νανοενθυλάκωσης και μικρογαλακτωμάτων που βελτιώνουν τη βιοδιαθεσιμότητα και τη σταθερότητά της. Στη βιομηχανία τροφίμων, η σταθερότητα της ρεσβερατρόλης επηρεάζεται επίσης από το pH (ιδανικά 5–7), τη θερμοκρασία επεξεργασίας και την παρουσία μετάλλων, γεγονός που απαιτεί ελεγχόμενες συνθήκες κατά την ενσωμάτωσή της σε λειτουργικά τρόφιμα (Hasan et al., 2023).

Όσον αφορά τη φυσική της παρουσία, η ρεσβερατρόλη εντοπίζεται σε περισσότερα από 70 είδη φυτών, με κύριες πηγές το σταφύλι (*Vitis vinifera*), το κρασί, τα φιστίκια (*Arachis hypogaea*), τα μούρα, το φραγκοστάφυλο, και το προαναφερθέν *Polygonum cuspidatum*. Η περιεκτικότητα σε ρεσβερατρόλη ποικίλει σημαντικά ανάλογα με το είδος, τις καλλιεργητικές συνθήκες και τη μέθοδο επεξεργασίας. Για παράδειγμα, το κόκκινο κρασί περιέχει συνήθως 1–7 mg/L, τα φιστίκια 0,1–2 mg/kg, ενώ οι ρίζες του *P. cuspidatum* μπορεί να φτάνουν έως και 2–3 g/kg ξηρού βάρους, καθιστώντας το το κύριο εμπορικό υπόστρωμα για φυσική εκχύλιση (Perin et al., 2017).



Εικόνα 2: Το φυτό *Polygonum cuspidatum* και η χημική δομή της ρεσβερατρόλης (Perin et al., 2017).

Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον για τη ρεσβερατρόλη έχει επεκταθεί πέρα από τις φαρμακολογικές της ιδιότητες. Έχει καταστεί αντικείμενο μελέτης για την πρόληψη χρόνιων νοσημάτων που σχετίζονται με το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή, όπως η αθηροσκλήρωση, ο διαβήτης τύπου II και οι νευροεκφυλιστικές νόσοι. Παράλληλα, η βιομηχανία καλλυντικών αξιοποιεί τη ρεσβερατρόλη ως αντιγηραντικό παράγοντα, λόγω της ικανότητάς της να προστατεύει τα κύτταρα του δέρματος από την υπεριώδη ακτινοβολία και να ενισχύει τη σύνθεση κολλαγόνου (Nascimento et al., 2023).

Η παραγωγή της, ωστόσο, μέσω φυσικών πηγών δεν μπορεί να καλύψει τη διεθνή ζήτηση, η οποία εκτιμάται σε άνω των 250 τόνων ετησίως με τιμή που υπερβαίνει τα 600–800 €/kg για καθαρό προϊόν. Η ανάγκη για βιώσιμες, οικονομικά αποδοτικές και περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους παραγωγής έχει οδηγήσει στη ραγδαία ανάπτυξη βιοτεχνολογικών διεργασιών που βασίζονται σε ζύμες, βακτήρια και μυκήλια. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν την παραγωγή ρεσβερατρόλης μέσω ζύμωσης, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμα υποστρώματα όπως το τυρόγαλο όπου είναι ένα άφθονο παραπροϊόν της γαλακτοβιομηχανίας, πλούσιο σε λακτόζη και αμινοξέα.

Η κατανόηση της χημικής δομής, της σταθερότητας και των φυσικών πηγών της ρεσβερατρόλης αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη αποδοτικών στρατηγικών βιοτεχνολογικής παραγωγής, που συνδυάζουν επιστημονική καινοτομία με περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα χημικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, τα ισομερή της ένωσης, οι βασικές φυσικές πηγές και συγκεντρώσεις, καθώς και η βιολογική και τεχνολογική σημασία της ρεσβερατρόλης (Goh et al., 2017).

### 3.1.1 Χημική δομή και ιδιότητες της ρεσβερατρόλης

Η ρεσβερατρόλη είναι μία φυσική πολυφαινολική ένωση με μοριακό τύπο  $C_{14}H_{12}O_3$  και μοριακό βάρος 228,24 g/mol. Χημικά, ανήκει στην οικογένεια των στυλβενίων, τα οποία αποτελούνται από δύο αρωματικούς δακτυλίους (δακτύλιος Α και δακτύλιος Β) που ενώνονται με γέφυρα εθυλενίου ( $-CH=CH-$ ). Η ύπαρξη αυτής της διπλής σύνδεσης είναι καθοριστική, καθώς δημιουργεί δύο γεωμετρικά ισομερή: τη trans και τη cis μορφή της ρεσβερατρόλης (Εικόνα 1).

Η trans-ρεσβερατρόλη είναι η επικρατέστερη και θερμοδυναμικά σταθερότερη μορφή, διαθέτοντας γραμμική διάταξη των φαινολικών δακτυλίων, γεγονός που επιτρέπει ευκολότερη σύζευξη ηλεκτρονίων και αποδοτικότερη αντιοξειδωτική δράση. Αντίθετα, η cis-ρεσβερατρόλη προκύπτει από φωτοϊσομερίωση ή θερμική μετατροπή της trans μορφής, εμφανίζοντας χαμηλότερη σταθερότητα και μικρότερη βιοδραστικότητα. Η χημική αυτή ισομέρεια εξηγεί γιατί η σταθερότητα της ρεσβερατρόλης επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες φωτός, θερμοκρασίας και pH.

Η ρεσβερατρόλη φέρει τρεις υδροξυλομάδες στις θέσεις 3, 5 και 4' του μορίου, οι οποίες ευθύνονται για τη δεσμευτική της ικανότητα απέναντι στις ελεύθερες ρίζες και τη σχηματοποίηση φαινολικών δεσμών υδρογόνου. Οι ομάδες αυτές μπορούν να δωρίζουν πρωτόνια, σταθεροποιώντας τις ελεύθερες ρίζες μέσω συντονισμού, προσδίδοντας έτσι στο μόριο εξαιρετική αντιοξειδωτική ισχύ. Επιπλέον, η παρουσία της αρωματικής δομής επιτρέπει διασπορά ηλεκτρονίων, ενισχύοντας τη σταθερότητα του φαινοξυλίου ιόντος που προκύπτει κατά τη δέσμευση οξειδωτικών ειδών (Hasan et al., 2023).

Φυσικοχημικά, η ρεσβερατρόλη είναι στερεό κρυσταλλικό μόριο, λευκού έως υπόλευκου χρώματος, με σημείο τήξης περίπου 261–263°C. Παρουσιάζει χαμηλή διαλυτότητα στο νερό (<0,03 mg/mL), γεγονός που δυσχεραίνει τη χρήση της σε υδατικά μέσα, αλλά είναι διαλυτή σε αιθανόλη, ακετόνη, DMSO και αιθυλενογλυκόλη. Η pKa της υπολογίζεται σε 8,8, χαρακτηριστικό που υποδηλώνει ότι οι φαινολικές ομάδες αρχίζουν να ιονίζονται σε ελαφρώς αλκαλικό περιβάλλον. Στο υπεριώδες φάσμα, η ρεσβερατρόλη εμφανίζει μέγιστη απορρόφηση ( $\lambda_{max}$ ) στα 306–310 nm, ενώ η

παρουσία των φαινολικών ομάδων προκαλεί χαρακτηριστική απορρόφηση και στα 280 nm, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της μέσω φασματοσκοπίας UV–Vis.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η φωτοευαισθησία του μορίου. Η έκθεση της trans-ρεσβερατρόλης σε υπεριώδη ακτινοβολία προκαλεί μετατροπή σε cis-ισομερές εντός λίγων λεπτών, συνοδευόμενη από σημαντική απώλεια αντιοξειδωτικής ικανότητας. Για τον λόγο αυτό, κατά την αποθήκευση ή χρήση της σε τρόφιμα και καλλυντικά, απαιτείται προστασία από φως και υψηλή θερμοκρασία, καθώς και ενθυλάκωση σε φορείς (π.χ. νανοσωματίδια, λιποσώματα), προκειμένου να διατηρηθεί η σταθερότητά της.

Στο πλαίσιο της βιομηχανικής χρήσης, η ρεσβερατρόλη παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή χημική καθαρότητα (>98%) όταν παρασκευάζεται βιοτεχνολογικά, και οι ιδιότητές της διατηρούνται σε ευρύ φάσμα συνθηκών, εφόσον η θερμοκρασία παραμένει κάτω από 70°C. Αντίθετα, σε θερμότερες συνθήκες (>90°C), παρατηρείται οξείδωση και απώλεια έως και 30% της δραστηριότητας, ανάλογα με την παρουσία οξυγόνου και μετάλλων.

Σημαντική για τη φαρμακοκινητική της ρεσβερατρόλης είναι και η λιποφιλική φύση του μορίου (log P = 3,1), που επιτρέπει τη διείσδυση μέσω των κυτταρικών μεμβρανών. Ωστόσο, η χαμηλή βιοδιαθεσιμότητα στο ανθρώπινο σώμα, λόγω της ταχείας γλυκουρονίδωσης και θεικής σύζευξης στο ήπαρ έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τροποποιημένων παραγώγων, όπως η πτεροσυλβίνη και η πικεατανόλη, με αυξημένη σταθερότητα και βιολογική δράση (Nascimento et al., 2023).

Η ρεσβερατρόλη χαρακτηρίζεται, επίσης, από ικανότητα σχηματισμού συμπλόκων με μέταλλα, όπως Fe<sup>2+</sup> και Cu<sup>2+</sup>, μέσω των φαινολικών ομάδων, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της παραγωγής αντιδραστικών μορφών οξυγόνου μέσω αντίδρασης Fenton. Αυτή η μεταλλοδεσμευτική ιδιότητα ενισχύει περαιτέρω τον αντιοξειδωτικό της ρόλο και εξηγεί τη συσχέτισή της με την καρδιοπροστατευτική δράση που παρατηρείται σε μελέτες κατανάλωσης κόκκινου κρασιού.

Η συνολική φυσικοχημική συμπεριφορά της ρεσβερατρόλης, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 9, την καθιστά μια πολυλειτουργική ένωση, ικανή να λειτουργήσει τόσο ως αντιοξειδωτικός παράγοντας όσο και ως πρόδρομο μόριο για τη σύνθεση βιοδραστικών παραγώγων. Η κατανόηση αυτών των ιδιοτήτων αποτελεί θεμέλιο για την ανάπτυξη τεχνολογιών βιοσύνθεσης και καθαρισμού που θα παρουσιαστούν στα επόμενα υποκεφάλαια (Aguíar et al., 2018).

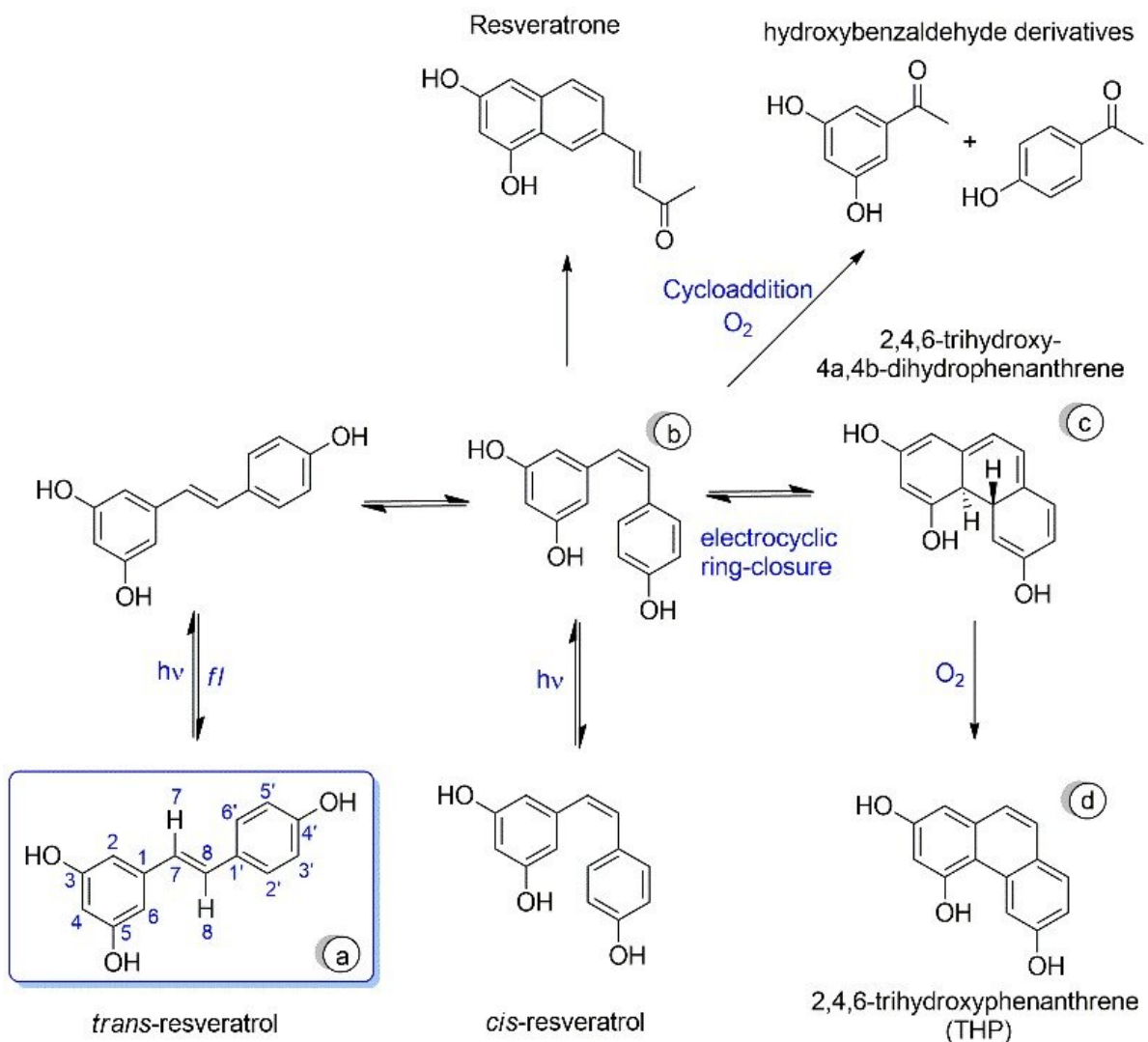
Πίνακας 9. Βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες της ρεσβερατρόλης (trans μορφή) (Aguíar et al., 2018).

Παράμετρος	Τιμή / Περιγραφή	Παράμετρος	Τιμή / Περιγραφή
Μοριακός τύπος	C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	pKa	8,8
Μοριακό βάρος	228,24 g/mol	Log P	3,1
Μορφή / Χρώμα	Κρυσταλλική, λευκή έως υπόλευκη	λ <sub>max</sub> (UV–Vis)	306–310 nm
Σημείο τήξης	261–263°C	Σταθερότητα	Υψηλή στη trans μορφή, μειώνεται με φως/θερμότητα
Διαλυτότητα σε νερό	<0,03 mg/mL	Διαλυτότητα σε αιθανόλη	50 mg/mL

### 3.1.2 Ισομέρεια και σταθερότητα της ρεσβερατρόλης

Η ρεσβερατρόλη, ως παράγωγο του στυλβενίου, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διπλού δεσμού (C=C) στο μόριό της, ο οποίος επιτρέπει τη δημιουργία δύο διακριτών γεωμετρικών ισομερών: της *trans*- και της *cis*-ρεσβερατρόλης. Η διαφορά τους έγκειται στη χωρική διάταξη των δύο φαινολικών δακτυλίων γύρω από τον διπλό δεσμό. Στη *trans* μορφή, οι δακτύλιοι βρίσκονται σε αντικείμενες πλευρές, γεγονός που προσδίδει γραμμικότητα, σταθερότητα και συμμετρία στο μόριο, ενώ στη *cis* μορφή είναι τοποθετημένοι στην ίδια πλευρά, δημιουργώντας γωνιώδη και λιγότερο σταθερή διαμόρφωση.

Η *trans* μορφή αποτελεί τη φυσική και βιολογικά ενεργό μορφή της ρεσβερατρόλης, καθώς επικρατεί στα φυτά και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη δραστηριότητα. Αντίθετα, η *cis* μορφή είναι προϊόν φωτοϊσομερίωσης ή θερμικής μετατροπής και εμφανίζει μειωμένη βιοδραστηριότητα λόγω της στρεβλωμένης δομής που περιορίζει τη συζυγία των π-ηλεκτρονίων (Hasan et al., 2023). Η διαδικασία μετατροπής μεταξύ των δύο μορφών μπορεί να περιγραφεί από το παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3: Μηχανισμός φωτοϊσομερίωσης και φωτοοξείδωσης της *trans*-ρεσβερατρόλης υπό υπεριώδη (Thompson et al., 2016).

Η φωτοϊσομερίωση λαμβάνει χώρα κυρίως υπό την επίδραση UV ακτινοβολίας (280–315 nm), αλλά μπορεί να προκληθεί και από υψηλές θερμοκρασίες (>70°C). Η αντίδραση είναι αναστρέψιμη υπό ορισμένες συνθήκες, αλλά η cis μορφή τείνει να αποικοδομείται ταχύτερα λόγω αστάθειας και ευπάθειας στην οξειδωση. Σε υδατικά ή αιθανολικά διαλύματα, η ισομερίωση επιταχύνεται παρουσία διαλυμένου οξυγόνου, μεταλλικών ιόντων ( $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ) ή αλκαλικού pH, τα οποία καταλύουν την αποδόμηση του διπλού δεσμού.

Η σταθερότητα της ρεσβερατρόλης είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη βιομηχανική και βιοτεχνολογική αξιοποίησή της. Η trans μορφή παραμένει σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα σε σκοτεινό, ξηρό περιβάλλον και θερμοκρασία κάτω των 25°C, ενώ αρχίζει να αποσυντίθεται μετά από παρατεταμένη έκθεση στο φως ή σε θερμοκρασίες >60°C. Αντίθετα, η cis μορφή είναι θερμοευαίσθητη και φωτοευαίσθητη, με χρόνο ημιζωής μόλις λίγων ωρών υπό συνθήκες φωτισμού (Nascimento et al., 2023).

Η διαλυτότητα επηρεάζει επίσης τη σταθερότητα του μορίου. Η ρεσβερατρόλη είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτή, αλλά διαλύεται ευκολότερα σε οργανικούς διαλύτες, όπως αιθανόλη και DMSO. Η χαμηλή διαλυτότητα στο νερό οδηγεί σε συσσώρευση μορίων στην επιφάνεια των υδατικών διαλυμάτων, αυξάνοντας την έκθεσή τους στο φως και επιταχύνοντας την ισομερίωση. Εργαστηριακές μελέτες έχουν δείξει ότι ενθυλάκωση σε νανοφορείς (π.χ. νανολιποσώματα, πολυμερικά νανοσωματίδια) μπορεί να αυξήσει τη φωτοσταθερότητα έως και 15 φορές, καθιστώντας αυτή τη στρατηγική ιδιαίτερα χρήσιμη για τη βιομηχανία καλλυντικών και φαρμάκων.

Η επίδραση του pH στη σταθερότητα της ρεσβερατρόλης είναι επίσης κρίσιμη. Σε όξινο περιβάλλον (pH < 5), η trans μορφή διατηρείται σταθερή, ενώ σε αλκαλικό (pH > 8) μετατρέπεται ταχύτερα σε cis ισομερές ή προϊόντα οξειδωσης, όπως π-κουμαρικά και ο-κινόνες. Η παρουσία αντιοξειδωτικών παραγόντων (όπως ασκορβικού οξέος ή βουτυλιωμένης υδροξυτολουόλης) έχει αποδειχθεί ότι επιβραδύνει την αποικοδόμηση, δρώντας ως σταθεροποιητές (Rivas et al., 2022).

Από θερμοδυναμικής άποψης, η μετατροπή trans → cis είναι ενδόθερμη αντίδραση με θετική ενθαλπία ( $\Delta H > 0$ ), κάτι που εξηγεί τη δυσμενή σταθερότητα της cis μορφής. Ενδεικτικά, οι ενέργειες ενεργοποίησης για την ισομερίωση υπολογίζονται σε 65–75 kJ/mol, γεγονός που σημαίνει ότι η αντίδραση προχωρά ταχύτερα υπό θερμική καταπόνηση ή έντονη φωταύγεια (Hasan et al., 2023).

Για τη βελτιστοποίηση της σταθερότητας κατά τη βιομηχανική επεξεργασία, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, όπως:

- Ενθυλάκωση σε νανοσωματίδια πολυγαλακτικού οξέος (PLA) ή χιτοζάνης, που προσφέρουν φυσική προστασία από UV ακτινοβολία.
- Σύμπλοκα με κυκλοδεξτρίνες (β- και γ-κυκλοδεξτρίνη), τα οποία εγκλωβίζουν το μόριο στο εσωτερικό τους και αποτρέπουν την ισομερίωση.
- Χρήση φορέων φυσικών ελαίων (ελαιόλαδο, καστορέλαιο) για ενίσχυση της σταθερότητας σε λιπαρές μήτρες.
- Μικροενθυλάκωση μέσω ψεκασμού ή λυοφιλίωσης, που έχει αποδειχθεί αποτελεσματική για τη διατήρηση της trans μορφής σε σκόνη έως και 12 μήνες.

Πέρα από τις φυσικοχημικές ιδιότητες, η ισομέρεια επηρεάζει και τη βιολογική συμπεριφορά της ρεσβερατρόλης. Η trans μορφή έχει αποδειχθεί ότι ενεργοποιεί το ένζυμο SIRT1, σχετιζόμενο με την επιμήκυνση του κυτταρικού κύκλου ζωής και τη ρύθμιση του μεταβολισμού. Η cis μορφή, ωστόσο, παρουσιάζει μειωμένη συγγένεια προς τους υποδοχείς αυτούς, γεγονός που μειώνει την αντιγηραντική και αντιφλεγμονώδη δράση της. Επιπλέον, η trans-ρεσβερατρόλη παρουσιάζει υψηλότερη ικανότητα δέσμευσης ριζών DPPH και ABTS σε σύγκριση με τη cis

μορφή, επιβεβαιώνοντας τη δομική εξάρτηση της αντιοξειδωτικής της δραστηριότητας (Nascimento et al., 2023).

Η σταθεροποίηση της trans μορφής αποτελεί επομένως κρίσιμο στόχο για την αξιοποίησή της τόσο στη φαρμακοβιομηχανία όσο και στην αγροδιατροφική τεχνολογία. Η κατανόηση των μηχανισμών ισομέρειας και αποικοδόμησης επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών εκχύλισης, αποθήκευσης και μεταποίησης των πηγών ρεσβερατρόλης, ιδιαίτερα όταν προέρχεται από παραπροϊόντα γαλακτοβιομηχανίας ή φυτικά υπολείμματα (Thompson et al., 2016).

### 3.1.3 Βιοσύνθεση και φυσικές πηγές της ρεσβερατρόλης

Η ρεσβερατρόλη αποτελεί δευτερογενή φαινολική ένωση της κατηγορίας των στυλβενίων, που συντίθεται από φυτά ως αντιμικροβιακός και αντιοξειδωτικός μηχανισμός άμυνας. Η παρουσία της έχει καταγραφεί σε περισσότερα από 70 είδη φυτών, ωστόσο οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται σε είδη όπως *Vitis vinifera* (αμπέλι), *Arachis hypogaea* (αράπικο φιστίκι), *Polygonum cuspidatum* (ιαπωνικό πολυγόνο) και ορισμένα μούρα (*Vaccinium* spp.) (Thapa et al., 2019).

Η βιοσύνθεση της ρεσβερατρόλης πραγματοποιείται μέσω της οδού του φαινυλοπροπανοειδούς μεταβολισμού, η οποία ξεκινά από το αμινοξύ L-φαινυλαλανίνη. Το μόριο αυτό, μέσω της δράσης του ενζύμου φαινυλαλανίνη αμμωνιο-λυάση (PAL), μετατρέπεται σε κινναμωμικό οξύ, το οποίο στη συνέχεια οξειδώνεται προς p-κουμαρικό οξύ μέσω του ενζύμου κινναμωμική-4-υδροξυλάση (C4H). Το p-κουμαρικό οξύ, μετά από ενεργοποίηση με CoA, δίνει το ενδιάμεσο p-κουμαρυλο-CoA, το οποίο λειτουργεί ως υπόστρωμα για το ένζυμο-κλειδί της διαδικασίας, τη στυλβενική σύνθεση (STS).

Η STS, μέσω μιας σειράς συμπυκνώσεων Claisen, ενώνει τρία μόρια ακέτυλο-CoA με ένα μόριο p-κουμαρυλο-CoA, παράγοντας τελικά τη ρεσβερατρόλη. Το ενζυμικό αυτό έχει ισχυρή ομολογία με εκείνο της σύνθεσης (CHS), γεγονός που αποδεικνύει τη φυλογενετική συγγένεια των πολυφαινολών.

Η παραπάνω διαδικασία ενεργοποιείται υπό συνθήκες στρες, όπως προσβολή από παθογόνα, UV ακτινοβολία ή μηχανικό τραυματισμό. Η ρεσβερατρόλη λειτουργεί ως φυτοαλεξίνη, δηλαδή ως μόριο φυσικής άμυνας που περιορίζει την εξάπλωση μικροοργανισμών και οξειδωτικών αντιδραστικών ειδών (ROS).

Η συγκέντρωση της ρεσβερατρόλης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το είδος, το περιβάλλον και τις συνθήκες καλλιέργειας. Στα σταφύλια, οι υψηλότερες τιμές (10–15 mg/kg νωπού βάρους) εντοπίζονται στη φλούδα, ενώ στο κρασί κυμαίνονται από 0,1 έως 14 mg/L, με μέγιστες τιμές στα ερυθρά κρασιά λόγω της εκχύλισης από το φλοιό κατά τη ζύμωση (Nascimento et al., 2023). Το ιαπωνικό πολυγόνο (*Polygonum cuspidatum*), από την άλλη, αποτελεί τη σημαντικότερη βιομηχανική πηγή ρεσβερατρόλης, με περιεκτικότητα έως 4 g/kg (4000 mg/kg) ξηρού βάρους στις ρίζες του (Hasan et al., 2023).

Σημαντικές ποσότητες ανιχνεύονται επίσης σε αράπικα φιστίκια (0,1–0,5 mg/g ξηρού βάρους), μούρα, καρύδια, σύκα και φλοιό πεύκου, ενώ έχουν αναφερθεί και μικρές συγκεντρώσεις σε φυτά που χρησιμοποιούνται για ζωοτροφές, κάτι που καθιστά δυνατή τη μεταφορά της ρεσβερατρόλης σε προϊόντα ζωικής προέλευσης, όπως γάλα ή κρέας, μέσω της διατροφής των ζώων (Calabrò et al., 2023).

Η παραγωγή ρεσβερατρόλης από μικροοργανισμούς αποτελεί μια ταχέως αναπτυσσόμενη ερευνητική κατεύθυνση, με στόχο τη βιοτεχνολογική αξιοποίηση παραπροϊόντων χαμηλού κόστους, όπως τυρόγαλο ή λακτόζη. Μέσω γενετικής τροποποίησης μικροοργανισμών (π.χ. *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, *Yarrowia lipolytica*), έχουν ενσωματωθεί τα γονίδια PAL, C4H και STS, επιτρέποντας τη σύνθεση ρεσβερατρόλης από απλά υποστρώματα σακχάρων.

Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Hasan et al. (2023), τροποποιημένο στέλεχος *Y. lipolytica* παρήγαγε 142 mg/L ρεσβερατρόλης από γλυκόζη, ενώ αντίστοιχα, χρήση τυρογάλακτος ως υπόστρωμα έδωσε 93 mg/L, καθιστώντας τη διεργασία οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική.

Πίνακας 10: Ενζυμικά στάδια βιοσύνθεσης ρεσβερατρόλης και πιθανές βιοτεχνολογικές εφαρμογές (Hasan et al., 2023).

Ενζυμικό στάδιο	Ενζύμο	Ενδιάμεσο προϊόν	Τελική δράση / Εφαρμογή
L-φαινυλαλανίνη → κινναμωμικό οξύ	PAL	Φαινυλοπροπανοειδής αρχή	Αντιμικροβιακή άμυνα φυτών
Κινναμωμικό οξύ → p-κουμαρικό οξύ	C4H	Οξειδωση/υδροξυλίωση	Πρόδρομο μόριο φαινολικών
p-κουμαρικό οξύ → p-κουμαρυλο-CoA	4CL	Ενεργοποίηση με CoA	Σύνδεση με κύκλο του άνθρακα
p-κουμαρυλο-CoA → ρεσβερατρόλη	STS	Συμπύκνωση Claisen	Παραγωγή ρεσβερατρόλης και παραγώγων

Αυτή η ενζυμική αλληλουχία έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένων μελετών τα τελευταία χρόνια. Η χρήση ανασυνδυασμένων βακτηριακών ή μυκητιακών στελεχών επιτρέπει τη μαζική παραγωγή ρεσβερατρόλης σε βιοαντιδραστήρες, με αποδόσεις που φτάνουν τα 400–600 mg/L, όταν χρησιμοποιούνται μείγματα λακτόζης και ορού γάλακτος ως πηγές άνθρακα (Rivas et al., 2022). Η δυνατότητα αυτή προσδίδει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη γαλακτοβιομηχανία, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή ενός αποβλήτου (τυρογάλακτος) σε προϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας με αντιοξειδωτικές και φαρμακολογικές ιδιότητες.

Η σύνθεση και συσώρευση της ρεσβερατρόλης μπορεί να ενισχυθεί με προκατάληψη μέσω επαγωγέων, όπως μεθυλοτζασμονικό, UV-C ακτινοβολία ή παρουσία μεταλλικών ιόντων ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ), που αυξάνουν τη δραστηριότητα του ενζύμου STS. Αυτές οι τεχνικές εφαρμόζονται τόσο σε καλλιέργειες ιστών όσο και σε ζυμώσεις μικροοργανισμών, προσφέροντας δυνατότητα ελεγχόμενης αύξησης της απόδοσης.

Η ολοκληρωμένη κατανόηση του βιοσυνθετικού μηχανισμού επιτρέπει πλέον τη στοχευμένη βελτιστοποίηση της παραγωγής ρεσβερατρόλης, είτε μέσω γενετικής μηχανικής είτε μέσω έξυπνης χρήσης παραπροϊόντων της γαλακτοβιομηχανίας. Με αυτόν τον τρόπο, η ρεσβερατρόλη μετατρέπεται σε κομβικό προϊόν βιοδιυλιστηρίων, συνδέοντας τη βιοτεχνολογία, τη βιωσιμότητα και την κυκλική οικονομία (Thapa et al., 2019).

### 3.1.4 Βιολογικές δράσεις και εφαρμογές της ρεσβερατρόλης

Η ρεσβερατρόλη έχει αναγνωριστεί ως μία από τις πιο μελετημένες φυσικές πολυφαινόλες, χάρη στις εκτεταμένες βιολογικές της ιδιότητες και τη δυνατότητά της να ρυθμίζει ποικίλους μοριακούς μηχανισμούς. Από τη δεκαετία του 1990, όταν η ουσία συνδέθηκε με το λεγόμενο “Γαλλικό παράδοξο” — την παρατήρηση ότι πληθυσμοί με υψηλή κατανάλωση κρασιού παρουσίαζαν μειωμένα καρδιαγγειακά νοσήματα — η ρεσβερατρόλη αποτέλεσε αντικείμενο

εντατικής μελέτης σε τομείς όπως η βιοϊατρική, η βιοτεχνολογία και η φαρμακολογία (Baur & Sinclair, 2006).

- Αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδης δράση

Η ρεσβερατρόλη δρα ως ισχυρός καθαριστής ελευθέρων ριζών, δεσμεύοντας ριζικά είδη οξυγόνου (ROS) και αζώτου (RNS) μέσω των υδροξυλομάδων της. Παράλληλα, ενεργοποιεί την υπεροξειδική δισμουτάση (SOD) και την καταλάση (CAT), ενισχύοντας τους ενδογενείς αντιοξειδωτικούς μηχανισμούς. Επιπλέον, αναστέλλει τη φλεγμονώδη οδό NF-κB, μειώνοντας την παραγωγή κυτοκινών όπως TNF-α, IL-6 και COX-2, γεγονός που την καθιστά αποτελεσματική στην αντιμετώπιση χρόνιων φλεγμονών (Nascimento et al., 2023).

- Αντικαρκινική δράση

Η ρεσβερατρόλη έχει αποδειχθεί ότι εμποδίζει την έναρξη, προώθηση και εξέλιξη όγκων, μέσω μηχανισμών που περιλαμβάνουν την επαγωγή απόπτωσης, την αναστολή της αγγειογένεσης και την αναστολή κυτταρικού πολλαπλασιασμού. Σε κυτταρικά μοντέλα, ενεργοποιεί την p53 και την caspase-3, οδηγώντας σε προγραμματισμένο κυτταρικό θάνατο (Thara et al., 2019). Επιπλέον, η ουσία ρυθμίζει καθοριστικά το μονοπάτι PI3K/Akt, μειώνοντας την ανθεκτικότητα των καρκινικών κυττάρων σε χημειοθεραπεία.

- Καρδιοπροστατευτική και μεταβολική δράση

Η ρεσβερατρόλη βελτιώνει τη λειτουργία του ενδοθηλίου μέσω της ενεργοποίησης της SIRT1 (sirtuin 1), ενός ενζύμου που σχετίζεται με τη ρύθμιση της μακροζωίας και του μεταβολισμού. Η ενεργοποίηση αυτή οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή ενδοθηλιακού μονοξειδίου του αζώτου (eNOS), βελτιώνοντας τη ροή του αίματος και μειώνοντας την αρτηριακή πίεση. Επίσης, η ρεσβερατρόλη ενισχύει την ευαισθησία στην ινσουλίνη και συμβάλλει στη ρύθμιση του λιπιδαιμικού προφίλ, με αποτέλεσμα να θεωρείται πιθανό συμπληρωματικό θεραπευτικό μόριο σε μεταβολικά νοσήματα όπως ο σακχαρώδης διαβήτης τύπου 2.

- Νευροπροστατευτική δράση

Η ρεσβερατρόλη παρουσιάζει ικανότητα διαπερατότητας του αιματοεγκεφαλικού φραγμού (BBB), κάτι που την καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για νευροεκφυλιστικά νοσήματα. Η αντιοξειδωτική της δράση μειώνει την οξειδωτική βλάβη στους νευρώνες, ενώ η ενεργοποίηση της AMP-activated protein kinase (AMPK) συμβάλλει στην αποκατάσταση της μιτοχονδριακής λειτουργίας. Μελέτες έχουν δείξει νευροπροστατευτικά αποτελέσματα έναντι του Alzheimer και του Parkinson (Hasan et al., 2023).

- Αντιμικροβιακή και αντιϊκή δράση

Η ρεσβερατρόλη έχει αποδειχθεί αποτελεσματική έναντι βακτηρίων όπως *Staphylococcus aureus*, *Helicobacter pylori* και *Escherichia coli*, μέσω αναστολής της DNA-γυράσης και καταστροφής της κυτταρικής μεμβράνης. Παράλληλα, έχει αναφερθεί αντιϊκή δράση έναντι ιών όπως ο HSV-1, ο Influenza A και ο SARS-CoV-2, αναστέλλοντας την αντιγραφή του ιικού RNA μέσω του NF-κB/STAT3 (Nascimento et al., 2023).

Η συνδυαστική παρουσία αυτών των ιδιοτήτων καθιστά τη ρεσβερατρόλη πρότυπο μόριο φυσικής προέλευσης με φαρμακολογικό ενδιαφέρον, ικανό να υποστηρίξει τη βιομηχανική παραγωγή συμπληρωμάτων διατροφής, καλλυντικών και φαρμάκων. Η πολυστοχική της δράση, ωστόσο, συνοδεύεται από προκλήσεις στη βιοδιαθεσιμότητα και σταθερότητα, στοιχεία που αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης βιοτεχνολογικής έρευνας, όπως θα παρουσιαστεί στα επόμενα υποκεφάλαια.

**Πίνακας 11 Κύριες βιολογικές δράσεις της ρεσβερατρόλης και αντίστοιχοι μοριακοί μηχανισμοί**

Βιολογική Δράση	Κύριος Μηχανισμός	Κυτταρικοί / Μοριακοί Στόχοι	Ενδεικτικές Αναφορές
Αντιοξειδωτική	Δέσμευση ROS/RNS, αύξηση SOD & CAT	ROS, RNS, SOD, CAT	Hasan et al., 2023
Αντιφλεγμονώδης	Αναστολή NF-κB, μείωση κυτοκινών	NF-κB, TNF-α, IL-6, COX-2	Nascimento et al., 2023
Αντικαρκινική	Απόπτωση, αναστολή PI3K/Akt	p53, Caspase-3, Akt	Thapa et al., 2019
Καρδιοπροστατευτική	Ενεργοποίηση SIRT1/eNOS	SIRT1, eNOS	Baur & Sinclair, 2006
Νευροπροστατευτική	Ενεργοποίηση AMPK, μείωση οξειδωτικού στρες	AMPK, ROS	Hasan et al., 2023
Αντιμικροβιακή/Αντιϊκή	Αναστολή αντιγραφής και ενζυμικών στόχων	DNA-γυράση, NF-κB, STAT3	Nascimento et al., 2023

### 3.2 Εισαγωγή στη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης.

Η μικροβιακή παραγωγή ρεσβερατρόλης έχει αναδειχθεί ως μια από τις πιο υποσχόμενες εφαρμογές της μεταβολικής μηχανικής και της συνθετικής βιολογίας. Η φυσική παραγωγή της ρεσβερατρόλης σε φυτά, όπως η *Vitis vinifera* (άμπελος) και το *Polygonum cuspidatum*, είναι περιορισμένη και εξαρτάται έντονα από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η αργή ανάπτυξη των φυτών, η χαμηλή απόδοση και η ανάγκη για εκτεταμένες διαδικασίες εκχύλισης έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην αναζήτηση εναλλακτικών βιοτεχνολογικών λύσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση μικροοργανισμών, όπως *Escherichia coli* και *Saccharomyces cerevisiae*, αποτελεί μια βιώσιμη και ευέλικτη πλατφόρμα για την παραγωγή φυσικών πολυφαινόλων, με δυνατότητα ελέγχου, προτυποποίησης και βελτιστοποίησης των βιοσυνθετικών οδών.

Η ρεσβερατρόλη είναι ένα φυτοαλεξίνη της οικογένειας των στυλβενίων, που συντίθεται μέσω της φαινυλοπροπανοειδούς οδού, με πρόδρομες ενώσεις το φαινυλαλανίνη ή την τυροσίνη. Οι δύο βασικές βιοσυνθετικές οδοί, η PAL (Phenylalanine Ammonia-Lyase) και η TAL (Tyrosine Ammonia-Lyase), συγκλίνουν στο κοινό ενδιάμεσο μόριο p-κουμαρικό οξύ, το οποίο μέσω των ενζύμων 4CL (4-Coumaroyl-CoA ligase) και STS (Stilbene Synthase) μετατρέπεται τελικά σε ρεσβερατρόλη. Η κατανόηση και ανακατασκευή αυτών των οδών σε ετερολόγους μικροοργανισμούς αποτέλεσε σημείο-κλειδί για την επιτυχή παραγωγή ρεσβερατρόλης με βιομηχανικά αποδοτικούς ρυθμούς.

Ο *Saccharomyces cerevisiae* έχει καθιερωθεί ως πρότυπος μικροοργανισμός-φορέας για τη βιομηχανική παραγωγή φυσικών προϊόντων. Οι κύριοι λόγοι περιλαμβάνουν τη γνωστή γενετική του αρχιτεκτονική, την ανθεκτικότητα σε χαμηλά pH και υψηλές συγκεντρώσεις αιθανόλης, καθώς και τη δυνατότητα καλλιέργειας σε ποικίλες πρώτες ύλες. Η έρευνα του Sáez et al., 2020 ανέδειξε τη συστηματική μηχανική του *S. cerevisiae* για παραγωγή ρεσβερατρόλης, με αξιοποίηση τόσο της

TAL όσο και της PAL οδού. Μέσω ενσωμάτωσης ετερολόγων γονιδίων από οργανισμούς όπως *Arabidopsis thaliana* και *Vitis vinifera*, η απόδοση αυξήθηκε έως και 531 mg/L σε fed-batch ζυμώσεις, καθιστώντας το ζυμομύκητα σημαντικό «μικροβιακό εργοστάσιο» για πολυφαινόλες υψηλής αξίας.

Η στρατηγική ενίσχυσης της παραγωγής στηρίζεται σε τρεις κύριους πυλώνες:

- Βελτιστοποίηση του μεταβολικού ροής πρόδρομων μορίων μέσω της υπερέκφρασης ενζύμων για ενίσχυση της ροής προς τα αρωματικά αμινοξέα.
- Ενίσχυση της παραγωγής μαλονυλο-CoA, με απορρύθμιση της ACC1 και αύξηση του αποθέματος ακετυλο-CoA.
- Πολλαπλή ενσωμάτωση των γονιδίων της οδού, μέσω στοιχείων Ty4, για αύξηση της έκφρασης των βασικών ενζύμων (PAL, C4H, 4CL, STS).

Οι εξελίξεις αυτές συνοδεύονται από την εφαρμογή της CRISPR/Cas9 τεχνολογίας και της EasyClone πλατφόρμας, που επιτρέπουν γρήγορες και στοχευμένες γενετικές τροποποιήσεις. Η ενοποίηση των εργαλείων αυτών καθιστά δυνατή τη ραγδαία ανάπτυξη στελεχών υψηλής απόδοσης, μειώνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο και το κόστος ανάπτυξης σε βιομηχανική κλίμακα.

Παράλληλα, η χρήση φθηνών πηγών άνθρακα όπως η γλυκόζη, το γαλακτικό οξύ ή τα παραπροϊόντα γαλακτοβιομηχανίας (ορός γάλακτος, λακτόζη) ενισχύει τη βιωσιμότητα των μικροβιακών διεργασιών. Η σύνδεση της παραγωγής ρεσβερατρόλης με ρεύματα αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας προωθεί μια κυκλική βιοοικονομία, όπου τα παραπροϊόντα αποκτούν νέα αξία ως υποστρώματα για υψηλής τεχνολογίας βιομετατροπές.

Η βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης, επομένως, αντιπροσωπεύει μια τομή μεταξύ συνθετικής βιολογίας, πράσινης χημείας και κυκλικής οικονομίας. Στα επόμενα υποκεφάλαια θα αναλυθούν:

- οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται ως βιοαντιδραστήρες,
- οι στρατηγικές μεταβολικής μηχανικής για ενίσχυση της παραγωγής,
- οι ζυμωτικές και βιοδιεργαστικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση,
- καθώς και παραδείγματα πιλοτικών και βιομηχανικών εφαρμογών.

Στόχος είναι να παρουσιαστεί μια πλήρης τεχνικο-επιστημονική προσέγγιση που θα τεκμηριώνει τη μετάβαση από τη φυτική εκχύλιση στη βιοτεχνολογική παραγωγή, προσδιορίζοντας τα κρίσιμα σημεία για την αξιοποίηση των αποβλήτων της γαλακτοβιομηχανίας ως πρώτης ύλης.

### 3.2.1 Μεταβολικές οδοί και μικροοργανισμοί-κλειδιά για την παραγωγή ρεσβερατρόλης

Η βιοσύνθεση της ρεσβερατρόλης αποτελεί μια σύνθετη μεταβολική διαδικασία που απαντάται φυσικά σε διάφορους φυτικούς οργανισμούς, κυρίως στα είδη *Vitis vinifera* (άμπελος), *Arachis hypogaea* (αραχίδα) και *Polygonum cuspidatum* (ιαπωνικό φραγκοστάφυλο). Η παραγωγή της συνδέεται με τον δευτερογενή μεταβολισμό και, ειδικότερα, με την πολυκετιδική οδό, η οποία έχει ως βασικό πρόδρομο το π-κουμαρικό οξύ (p-coumaric acid). Μέσω της διαδοχικής δράσης ενζύμων όπως η 4-κουμαρική-CoA συνθετάση (4CL) και η στιλβενική συνθάση (STS), το μόριο αυτό μετατρέπεται σε ρεσβερατρόλη, προσδίδοντας στο φυτό αντιοξειδωτική και αντιμικροβιακή άμυνα (Hasan et al., 2023).

Στη φυσική της μορφή, η βιοσύνθεση ξεκινά από τη φαινυλαλανίνη, η οποία μεταβολίζεται σε κινναμικό και στη συνέχεια σε π-κουμαρικό οξύ. Το ένζυμο 4CL καταλύει τον σχηματισμό του p-coumaroyl-CoA, ενώ η STS συνδυάζει τρία μόρια μαλονυλ-CoA για τη δημιουργία του πυρήνα της ρεσβερατρόλης. Αυτή η βασική ενζυμική αλληλουχία έχει αποτελέσει το πρότυπο για τη γενετική μηχανική σε μικροοργανισμούς, οι οποίοι λειτουργούν ως “βιοαντιδραστήρες” παραγωγής ρεσβερατρόλης σε βιομηχανική κλίμακα (Thapa et al., 2019).

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην ετερολογική έκφραση των γονιδίων 4CL και STS σε μη φυτικούς μικροοργανισμούς, όπως *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, *Yarrowia lipolytica* και *Corynebacterium glutamicum*. Οι μικροοργανισμοί αυτοί επιλέγονται λόγω της ευκολίας καλλιέργειας, της ανθεκτικότητάς τους και της καλά χαρτογραφημένης μεταβολικής τους οδού. Για παράδειγμα, οι *S. cerevisiae* και *E. coli* έχουν τροποποιηθεί ώστε να μετατρέπουν γλυκόζη, γλυκερόλη ή υδρολυμένα υποστρώματα τυρογάλακτος απευθείας σε π-κουμαρικό οξύ και, κατόπιν, σε ρεσβερατρόλη (Nascimento et al., 2023).

Η συνδυαστική χρήση φυτικών και μικροβιακών ενζύμων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Η εισαγωγή του φυτικού ενζύμου STS σε *E. coli* επιτρέπει την απευθείας παραγωγή ρεσβερατρόλης από απλά φαινολικά πρόδρομα, ενώ η χρήση μεταλλαγμένων στελεχών *Corynebacterium glutamicum* έχει οδηγήσει σε αποδόσεις έως 450 mg/L σε πειραματικές καλλιέργειες. Αντίστοιχα, τα συστήματα *Yarrowia lipolytica*, λόγω της λιποφιλικής τους φύσης, παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα και βελτιωμένη μεταφορά του ενδοκυτταρικού προϊόντος (Hasan et al., 2023).

Η αποδοτικότητα της διαδικασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισορροπία άνθρακα και συνενζύμων (NADPH) στο κύτταρο. Για αυτόν τον λόγο, έχουν εφαρμοστεί βιοτεχνολογικές στρατηγικές όπως:

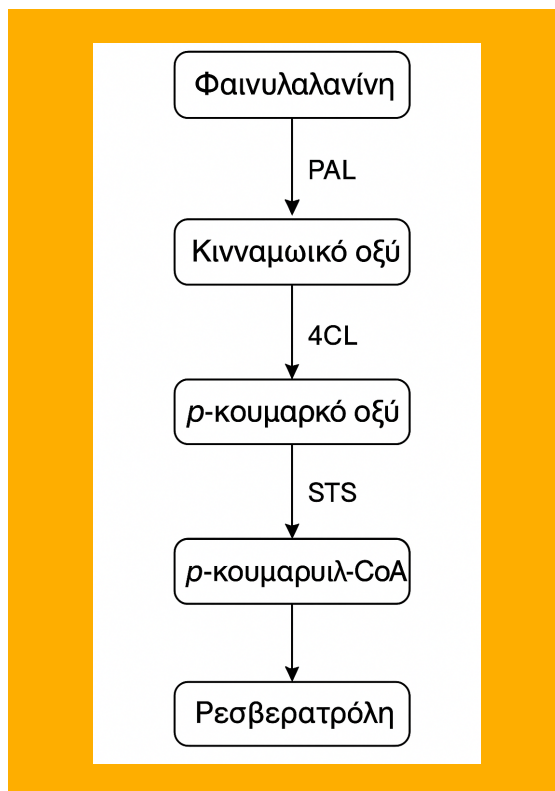
- Ενίσχυση της ροής μέσω της φαινυλαλανίνης με υπερέκφραση του γονιδίου PAL (phenylalanine ammonia-lyase),
- Απενεργοποίηση ανταγωνιστικών οδών, όπως της σύνθεσης φαινολικών οξέων,
- Προσαρμογή της ενζυμικής δραστηριότητας μέσω κατευθυνόμενης εξέλιξης (directed evolution),
- και μεταβολική ανάλυση με χρήση CRISPR/Cas9 για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού μετατροπής.

Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικά συστήματα παραγωγής ρεσβερατρόλης από μικροοργανισμούς, με τις αποδόσεις που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία.

**Πίνακας 12. Παραγωγή ρεσβερατρόλης από μικροοργανισμούς μέσω ετερολογικής έκφρασης**

Μικροοργανισμός	Υπόστρωμα	Εισαγόμενα γονίδια	Απόδοση (mg/L)	Πηγή
<i>E. coli</i>	Γλυκόζη	4CL, STS	120–300	Thapa et al., 2019
<i>S. cerevisiae</i>	Υδρολυμένο τυρόγαλο	PAL, 4CL, STS	400–500	Nascimento et al., 2023
<i>Y. lipolytica</i>	Γλυκερόλη	4CL, STS	350–450	Hasan et al., 2023
<i>C. glutamicum</i>	Λακτόζη	4CL, STS, TAL	300–450	Calabrò et al., 2023

Οι πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η χρήση υποστρωμάτων χαμηλού κόστους, όπως το τυρόγαλο, όχι μόνο μειώνει το οικονομικό αποτύπωμα της παραγωγής, αλλά ενισχύει και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, μετατρέποντας ένα πρόβλημα ρύπανσης σε πηγή υψηλής αξίας βιοδραστικών ενώσεων. Αυτή η τεχνολογική σύζευξη μεταξύ βιοαντιδραστήρων γαλακτοκομικών αποβλήτων και μικροβιακής βιοσύνθεσης ρεσβερατρόλης αποτελεί σήμερα μια από τις πιο υποσχόμενες κατευθύνσεις της κυκλικής βιοοικονομίας.



Σχήμα 6. Βιοσυνθετική οδός παραγωγής ρεσβερατρόλης από τη φαινυλαλανίνη μέσω των ενζύμων PAL, 4CL και STS (Thapa et al., 2019).

### 3.2.2 Στρατηγικές μεταβολικής μηχανικής και βελτιστοποίησης παραγωγής ρεσβερατρόλης

Η μεταβολική μηχανική (metabolic engineering) αποτελεί το βασικό εργαλείο για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης από μικροοργανισμούς. Μέσω στοχευμένων γενετικών παρεμβάσεων, οι επιστήμονες ανασχεδιάζουν τον κυτταρικό μεταβολισμό, ώστε να κατευθύνουν την ροή των πρόδρομων μορίων (όπως η φαινυλαλανίνη και το μαλονυλο-CoA) προς την επιθυμητή βιοσυνθετική οδό. Η στρατηγική αυτή επιτρέπει την αποδοτική μετατροπή απλών πηγών άνθρακα όπως είναι η γλυκόζη ή η λακτόζη του τυρογάλακτος σε ρεσβερατρόλη, καθιστώντας δυνατή την κυκλική αξιοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων.

#### A. Ενίσχυση της μεταβολικής ροής και πρόδρομων μορίων

Η ρεσβερατρόλη προέρχεται από τον φαινυλοπροπανοειδή κύκλο, και η αποδοτικότητα της σύνθεσής της εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δύο βασικών μορίων:

1. p-κουμαρικό-CoA, που προέρχεται από τη φαινυλαλανίνη, και
2. μαλονυλο-CoA, που προέρχεται από το μονοπάτι των λιπαρών οξέων.

Για να αυξηθεί η παραγωγή, εφαρμόζονται στρατηγικές όπως:

- Ενίσχυση της οδού της φαινυλαλανίνης μέσω υπερέκφρασης των γονιδίων PAL, C4H και 4CL.
- Αναστολή ανταγωνιστικών οδών, ώστε περισσότερο μαλονυλο-CoA να διοχετεύεται προς τη σύνθεση ρεσβερατρόλης.
- Εισαγωγή ετερολόγων ενζύμων από φυτά, όπως η stilbene synthase (STS), σε μικροοργανισμούς όπως ο *Saccharomyces cerevisiae* ή το *Escherichia coli* (Thapa et al., 2019).

## Β. Χρήση σύγχρονων εργαλείων γονιδιακής μηχανικής

Η πρόοδος της συνθετικής βιολογίας τα τελευταία χρόνια επέτρεψε την ανάπτυξη εργαλείων που βελτιώνουν ριζικά τη ρύθμιση και σταθερότητα των μεταβολικών οδών:

- CRISPR/Cas9: Πρόκειται για τεχνολογία “γενετικού ψαλιδιού” που επιτρέπει την ακριβή εισαγωγή, διαγραφή ή τροποποίηση γονιδίων. Με το CRISPR, οι ερευνητές μπορούν να δημιουργούν στελέχη με πολλαπλές στοχευμένες αλλαγές, βελτιώνοντας ταυτόχρονα πολλές ενζυμικές αντιδράσεις.
- EasyClone: Είναι ένα εργαλείο γενετικής τροποποίησης που αναπτύχθηκε για ζύμες όπως ο *S. cerevisiae*. Διευκολύνει την εισαγωγή πολλαπλών γονιδίων σε διαφορετικές περιοχές του γονιδιώματος με υψηλή σταθερότητα. Έτσι, μπορεί να ενσωματωθεί π.χ. η STS μαζί με ενζυμα υποστήριξης χωρίς την ανάγκη πλασμιδίων.
- Adaptive Laboratory Evolution (ALE): Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη φυσική επιλογή μέσα στο εργαστήριο. Τα κύτταρα καλλιεργούνται για πολλές γενιές υπό συνθήκες πίεσης (π.χ. αυξημένες συγκεντρώσεις υποστρώματος ή προϊόντος), με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεταλλαγμένες μορφές που εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή και παραγωγικότητα. Το ALE χρησιμοποιείται συνήθως μετά τη γενετική τροποποίηση για βελτίωση της σταθερότητας της παραγωγής (Hasan et al., 2023).

## Γ. Συστήματα ετερολόγου έκφρασης και μικροοργανισμοί-μοντέλα

Τα συστήματα παραγωγής ρεσβερατρόλης βασίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες μικροοργανισμών:

- Προκαρυωτικοί (*E. coli*): Παρουσιάζουν ταχεία ανάπτυξη και απλότητα τροποποίησης, αλλά περιορισμένη ικανότητα μετα-μεταφραστικών τροποποιήσεων.
- Ευκαρυωτικοί (*S. cerevisiae*, *Yarrowia lipolytica*): Ικανότητα γλυκοζυλίωσης και καλύτερη προσαρμογή στη βιοσύνθεση πολυφαινολών, αν και με πιο περίπλοκη ρύθμιση.

Πρόσφατες μελέτες σε *S. cerevisiae* έδειξαν παραγωγή έως 800 mg/L ρεσβερατρόλης με συνδυασμό ενίσχυσης STS, αύξησης μαλονυλο-CoA και αναστολής της λιπογένεσης. Αντίστοιχα, σε *E. coli* επιτεύχθηκαν τιμές 500–600 mg/L με πολυγονιδιακές ενσωματώσεις (Costa et al., 2021).

## Δ. Ρύθμιση έκφρασης και συν-καλλιέργεια

Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της έκφρασης των ενζύμων επιτυγχάνεται μέσω συνθετικών προαγωγέων (synthetic promoters) και βιολογικών “ρυθμιστών κυκλοφορίας”, που εξισορροπούν τη μεταβολική ροή μεταξύ των οδών. Επιπλέον, αναπτύσσονται συν-καλλιέργειες μικροοργανισμών, όπου διαφορετικά είδη (π.χ. *E. coli* + *S. cerevisiae*) επιτελούν διαφορετικά στάδια της μετατροπής. Αυτή η “κατανεμημένη βιοσύνθεση” αυξάνει την απόδοση και μειώνει τη μεταβολική πίεση σε κάθε σύστημα (Zhang et al., 2020).

Η μεταβολική μηχανική έχει μετατρέψει τη ρεσβερατρόλη από ένα σπάνιο φυτικό μόριο σε αντικείμενο βιομηχανικής βιοσύνθεσης, ανοίγοντας τον δρόμο για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Οι τεχνολογίες CRISPR και EasyClone επιτρέπουν γρήγορες και στοχευμένες παρεμβάσεις, ενώ το ALE εξασφαλίζει σταθερότητα και προσαρμοστικότητα. Ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων, με πρώτη ύλη υποπροϊόντα όπως το τυρόγαλο, δημιουργεί ένα πλήρως βιώσιμο μοντέλο κυκλικής βιοπαραγωγής, που συνδέει τη διαχείριση αποβλήτων με τη βιοτεχνολογική καινοτομία.

**Πίνακας 13. Ενδεικτικές στρατηγικές μεταβολικής μηχανικής για την παραγωγή ρεσβερατρόλης.**

Προσέγγιση	Μικροοργανισμός	Στρατηγική	Απόδοση (mg/L)	Πηγή
Εισαγωγή STS, 4CL, TAL	<i>E. coli</i>	Συνδυασμένη υπερέκφραση ενζύμων	580	Costa et al., 2021
Ενίσχυση οδού μαλονυλο-CoA + CRISPR	<i>S. cerevisiae</i>	Διαγραφή γονιδίων λιπογένεσης	800	Hasan et al., 2023
Χρήση EasyClone για πολυγονιδιακή ενσωμάτωση	<i>S. cerevisiae</i>	Σταθερή ενσωμάτωση STS, PAL, C4H	720	Nascimento et al., 2023
ALE μετά από CRISPR τροποποίηση	<i>Y. lipolytica</i>	Προσαρμογή σε υψηλές συγκεντρώσεις ρεσβερατρόλης	640	Thapa et al., 2019
Συν-καλλιέργεια <i>E. coli</i> / <i>S. cerevisiae</i>	Συνδυασμένη βιοσύνθεση	Κατανομή σταδίων	750	Zhang et al., 2020

### 3.2.4 Διαχωρισμός, καθαρισμός και ανάκτηση ρεσβερατρόλης

Ο διαχωρισμός και ο καθαρισμός αποτελούν το τελικό και πιο απαιτητικό στάδιο στη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης. Παρότι η βιοσύνθεση έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, η ανάκτηση του προϊόντος εξακολουθεί να καθορίζει το συνολικό κόστος της διαδικασίας, αντιπροσωπεύοντας έως και το 50–60 % του συνολικού λειτουργικού κόστους (Rivas et al., 2022). Ο λόγος είναι ότι η ρεσβερατρόλη εκκρίνεται συνήθως σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις (mg/L) μέσα σε ένα σύνθετο μίγμα πρωτεϊνών, σακχάρων, λιπιδίων και οργανικών οξέων.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από:

- το αν η ρεσβερατρόλη βρίσκεται ενδοκυτταρικά ή εξωκυτταρικά,
- τη σταθερότητα της *trans* μορφής (που είναι θερμοευαίσθητη και φωτοευαίσθητη),
- και τη τελική καθαρότητα που απαιτείται (φαρμακευτική ή διατροφική χρήση).

#### A. Εκχύλιση και απομόνωση από το μέσο καλλιέργειας

Η εκχύλιση αποτελεί το πρώτο στάδιο του καθαρισμού.

• Υγρή εκχύλιση με οργανικούς διαλύτες (όπως αιθυλικός οξικός εστέρας ή μεθανόλη) εφαρμόζεται συχνά σε μικρής κλίμακας διεργασίες. Παρότι ότι είναι απλή, απαιτεί επαναλαμβανόμενα βήματα και οδηγεί σε απώλειες προϊόντος 10–20 %.

• Εκχύλιση με υπερήχους (Ultrasound-Assisted Extraction – UAE) επιταχύνει τη διάσπαση των κυτταρικών μεμβρανών και αυξάνει την εκλυόμενη ποσότητα ρεσβερατρόλης έως 1,5–2 φορές.

• Υπερκρίσιμη εκχύλιση CO<sub>2</sub> (SFE) αποτελεί πιο «πράσινη» επιλογή, καθώς δεν αφήνει υπολείμματα διαλυτών και προσφέρει καθαρότητα > 95 % (Nascimento et al., 2023).

Σε ετερολόγες καλλιέργειες, η ρεσβερατρόλη εντοπίζεται συχνά ενδοκυτταρικά, γεγονός που απαιτεί μηχανική λύση ή κυτταρική λύση με ένζυμα (λυσοζύμη, πρωτεάσες) πριν από την εκχύλιση (Costa et al., 2021).

## B. Προσρόφηση και εκρόφηση

Η προσρόφηση σε ρητίνες (όπως XAD-16, Sepabeads SP207 ή Amberlite XAD-7) χρησιμοποιείται ευρέως για την απομάκρυνση της ρεσβερατρόλης από υδατικά διαλύματα.

Η μέθοδος βασίζεται στη φυσική αλληλεπίδραση της πολυφαινόλης με την επιφάνεια της ρητίνης, και ακολουθείται από εκρόφηση με αιθανόλη ή μεθανόλη.

👍 Πλεονέκτημα: υψηλή εκλεκτικότητα και επαναχρησιμοποίηση της ρητίνης έως 10 κύκλους.

👎 Μειονέκτημα: περιορισμένη ικανότητα προσρόφησης για διαλύματα χαμηλής συγκέντρωσης (< 100 mg/L).

Σύμφωνα με Hasan et al. (2023), η προσρόφηση συνδυαζόμενη με in-situ product removal (ISPR) κατά τη ζύμωση, επιτρέπει συνεχή απομάκρυνση του προϊόντος από το μέσο, μειώνοντας την αναστολή και αυξάνοντας την παραγωγικότητα έως και 30 %.

## Γ. Χρωματογραφικές τεχνικές

Η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) και η αντίστροφη φάση (RP-HPLC) παραμένουν οι πιο διαδεδομένες τεχνικές καθαρισμού για ερευνητικούς και φαρμακευτικούς σκοπούς.

Οι αποδόσεις καθαρότητας μπορούν να φτάσουν το 98–99 %, ωστόσο το κόστος των διαλυτών και η χαμηλή δυνατότητα κλιμάκωσης περιορίζουν τη χρήση τους σε πιλοτικές εφαρμογές.

Εναλλακτικά, η Flash Chromatography χρησιμοποιείται για καθαρισμό σε ημι-βιομηχανική κλίμακα, με ρυθμούς ροής έως 100 mL/min και ποσοστά ανάκτησης > 90 %. Οι ρητίνες πυριτίας ή C18 προσφέρουν υψηλή επιλεκτικότητα για τη trans-ρεσβερατρόλη (Thara et al., 2019).

## Δ. Μεμβρανικές τεχνολογίες

Οι μεμβρανικοί διαχωρισμοί αποτελούν εναλλακτική μέθοδο για καθαρισμό μεγάλης κλίμακας. Η διαδικασία βασίζεται στη διήθηση με νανοδιήθηση (NF) ή αντίστροφη όσμωση (RO), όπου το νερό και οι μικρές οργανικές ενώσεις περνούν από τη μεμβράνη, ενώ η ρεσβερατρόλη συγκρατείται.

Η μέθοδος αυτή:

- μειώνει το ενεργειακό κόστος κατά 40–50 %,
- επιτρέπει συνεχή ανάκτηση προϊόντος,
- και μπορεί να συνδυαστεί με βιοαντιδραστήρες (MBR).

Σε πιλοτικές εφαρμογές στην Ολλανδία, συστήματα MBR–NF έδειξαν ανάκτηση ρεσβερατρόλης 85 % και καθαρότητα 92 %, με σχεδόν πλήρη ανακύκλωση του νερού διεργασίας (Rivas et al., 2022).

## E. Καθαρότητα και χαρακτηρισμός τελικού προϊόντος

Η ποιότητα του παραγόμενου μορίου εξαρτάται από τη σταθερότητα της trans μορφής, η οποία είναι βιολογικά δραστική.

Η μετατροπή σε cis μορφή επέρχεται υπό φως ή θερμότητα, συνεπώς η αποθήκευση γίνεται σε σκοτεινό, αδρανές περιβάλλον (συνήθως σε άζωτο).

Η ταυτοποίηση πραγματοποιείται με:

- Φασματοσκοπία UV-Vis (μέγιστη απορρόφηση στα 306 nm),

- Φασματοσκοπία FTIR (χαρακτηριστικές κορυφές στα 1605 και 965  $\text{cm}^{-1}$ ),
- και LC-MS για επιβεβαίωση μοριακού βάρους (228 Da).

Εν κατακλείδι η απομόνωση και καθαρότητα της ρεσβερατρόλης καθορίζουν τη βιομηχανική βιωσιμότητα της διαδικασίας. Οι μεμβρανικές τεχνολογίες και η υπερκρίσιμη εκχύλιση αναδεικνύονται ως οι πλέον πράσινες και αποδοτικές μέθοδοι, ενώ οι χρωματογραφικές προσεγγίσεις παραμένουν αναντικατάστατες για προϊόντα φαρμακευτικής ποιότητας.

Η επόμενη γενιά συστημάτων στοχεύει στη συνδυαστική χρήση τεχνολογιών (π.χ. MBR + SFE ή ISPR + NF), ώστε να επιτευχθεί ολοκληρωμένη ανάκτηση με μηδενικά απόβλητα υλοποιώντας στην πράξη τις αρχές της κυκλικής βιομηχανίας και της βιοτεχνολογικής αειφορίας.

Πίνακας 14. Ενδεικτικές τεχνικές καθαρισμού και αποδόσεις ανάκτησης ρεσβερατρόλης.

Μέθοδος	Τύπος διεργασίας	Ποσοστό ανάκτησης (%)	Καθαρότητα (%)	Πλεονέκτημα	Πηγή
Υγρή εκχύλιση	Batch	70–80	85	Απλή εφαρμογή	Costa et al., 2021
Υπερήχων (UAE)	Batch	85–90	90	Ταχύτητα, χαμηλό κόστος	Nascimento et al., 2023
Υπερκρίσιμη $\text{CO}_2$	Continuous	90–95	95–98	Πράσινη τεχνολογία	Calabrò et al., 2023
Προσρόφηση + ISPR	Continuous	88	92	Συνεχής λειτουργία	Hasan et al., 2023
RP-HPLC	Batch	98	99	Υψηλή καθαρότητα	Thapa et al., 2019
Μεμβρανική (NF/RO)	Continuous	85	92	Ενεργειακή αποδοτικότητα	Rivas et al., 2022

### 3.3 Αξιοποίηση Παραπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας για Παραγωγή Ρεσβερατρόλης

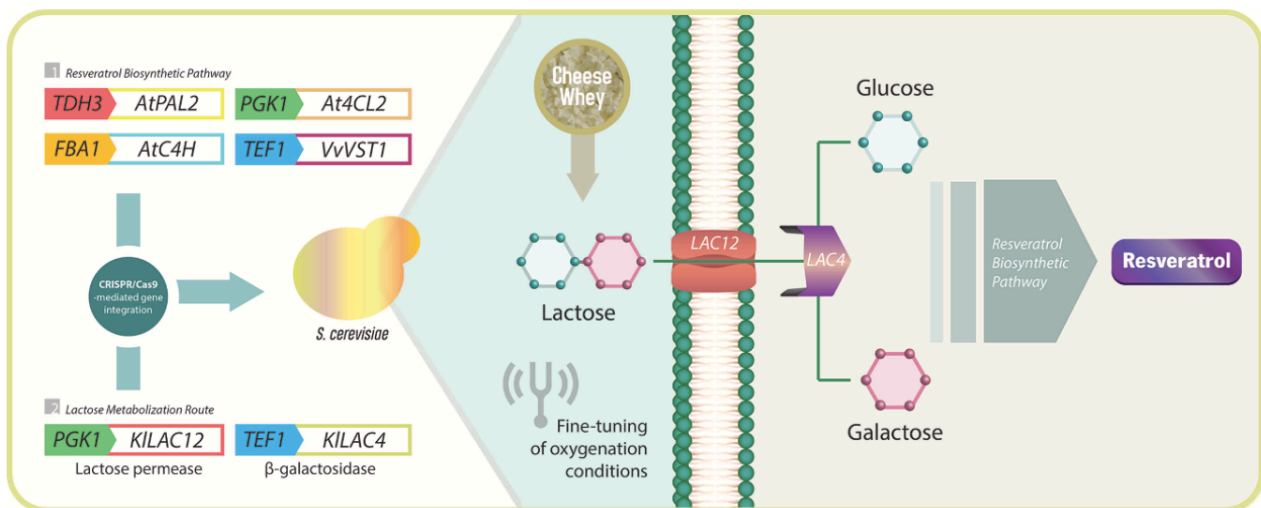
Η αξιοποίηση των παραπροϊόντων της γαλακτοβιομηχανίας, και ειδικότερα του τυρογάλακτος, αποτελεί έναν από τους πιο υποσχόμενους τομείς της σύγχρονης βιοτεχνολογίας. Το τυρόγαλο, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 85–95 % του αρχικού όγκου του γάλακτος, παράγεται σε τεράστιες ποσότητες — πάνω από 180 εκατομμύρια τόνους ετησίως παγκοσμίως (FAO, 2024). Η σύστασή του, πλούσια σε λακτόζη (4,5–5 %), πρωτεΐνες ορού (0,6–0,8 %), άλατα και οργανικά οξέα, το καθιστά εξαιρετικά κατάλληλο υπόστρωμα για μικροβιακές διεργασίες. Παράλληλα, όμως, αποτελεί και περιβαλλοντικό πρόβλημα όταν απορρίπτεται χωρίς επεξεργασία, καθώς το  $\text{BOD}_5$  του μπορεί να ξεπεράσει τα 50.000 mg/L, δημιουργώντας έντονο ρυπαντικό φορτίο (Calabrò et al., 2023).

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στρέφεται στην αξιοποίηση αυτού του “χαμένου” βιολογικού πόρου για την παραγωγή βιοδραστικών ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η ρεσβερατρόλη, τα πολυϋδροξυαλκανοϊκά (PHA) και τα οργανικά οξέα. Στο πλαίσιο αυτό, η ρεσβερατρόλη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για πολυφαινολική ένωση με αντιοξειδωτικές, αντικαρκινικές, καρδιοπροστατευτικές και νευροπροστατευτικές ιδιότητες (Bartista et al., 2021).

Η ένταξη της παραγωγής ρεσβερατρόλης σε ένα σύστημα κυκλικής αξιοποίησης αποβλήτων επιτρέπει τη μετατροπή ενός ρυπαντικού υποπροϊόντος (τυρογάλο) σε πρώτη ύλη για βιοπαραγωγή, προσφέροντας διπλό όφελος:

(α) τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γαλακτοβιομηχανίας, και

(β) τη δημιουργία νέων γραμμών παραγωγής βιοδραστικών ουσιών, οι οποίες ενισχύουν τη βιωσιμότητα και την καινοτομία του κλάδου (Lip et al., 2020).



Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση της βιομετατροπής λακτόζης από τυρογάλο σε ρεσβερατρόλη μέσω γενετικά τροποποιημένου *Saccharomyces cerevisiae* (Lip et al., 2020).

Από τεχνολογικής άποψης, η παραγωγή ρεσβερατρόλης από παράγωγα λακτόζης στηρίζεται στην καλλιέργεια γενετικά τροποποιημένων μικροοργανισμών, όπως *Saccharomyces cerevisiae*, *Yarrowia lipolytica* και *Corynebacterium glutamicum*, οι οποίοι έχουν υποστεί μεταβολική μηχανική για την εισαγωγή της στυλβενικής οδού (phenylpropanoid pathway). Οι μικροοργανισμοί αυτοί μεταβολίζουν τη λακτόζη ή τα σάκχαρα του ορού, μετατρέποντάς τα σε ρεσβερατρόλη μέσω των ενζύμων PAL, C4H, 4CL και STS.

Η διαδικασία περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια:

- υδρολυτική ή ενζυμική προεπεξεργασία του τυρογάλακτος για αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας,
- ζύμωση υπό ελεγχόμενες συνθήκες (pH 6, 30 °C),
- συχνά, in situ απορρόφηση της ρεσβερατρόλης σε πολυμερικές ρητίνες, ώστε να αποφεύγεται η ανασταλτική δράση της στο κύτταρο.

Τα σύγχρονα “Dairy Biorefineries” ενσωματώνουν πλέον την παραγωγή ρεσβερατρόλης σε πολυπαραγωγικά σχήματα, όπου τα διάφορα ρεύματα του τυρογάλακτος (πρωτεϊνικά,

υδατανθρακικά, ανόργανα) κατευθύνονται σε διαφορετικές διεργασίες. Έτσι, η ίδια μονάδα μπορεί να παράγει:

- πρωτεΐνες ορού για διατροφικές χρήσεις,
- πολυφαινόλες όπως η ρεσβερατρόλη,
- και ενέργεια (βιοαέριο) από τα υπολείμματα.

Η οικολογική και ενεργειακή αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων έχει αποδειχθεί εντυπωσιακή. Σύμφωνα με τον Costa et al. (2021), η αξιοποίηση τυρογάλακτος για βιοπαραγωγή ρεσβερατρόλης μείωσε τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 70 % σε σχέση με την καύση του ως απόβλητο, ενώ οι ανάγκες σε ενέργεια ήταν έως και 50 % χαμηλότερες από τις αντίστοιχες χημικές συνθέσεις.

Πέραν του περιβαλλοντικού οφέλους, η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί κλειδί. Σύμφωνα με τον Costa et al. (2021) δείχνουν ότι η χρήση υποπροϊόντων γαλακτοκομίας μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος παραγωγής ρεσβερατρόλης έως και 80 % συγκριτικά με τις κλασικές χημικές μεθόδους. Οι αποδόσεις, αν και ποικίλουν, κυμαίνονται από 0,3 έως 0,6 g/L, με τάσεις περαιτέρω αύξησης μέσω συνδυασμένων διεργασιών ζύμωσης και *in situ* εκχύλισης.

Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση παραπροϊόντων της γαλακτοβιομηχανίας για την παραγωγή ρεσβερατρόλης εντάσσεται πλήρως στη στρατηγική μετάβασης της βιομηχανίας τροφίμων προς ένα μοντέλο κυκλικής βιοοικονομίας, όπου τίποτα δεν απορρίπτεται και κάθε ροή αποκτά νέα αξία.

### 3.3.1 Τυρόγαλο και Παράγωγα Λακτόζης ως Υπόστρωμα Ζύμωσης

Το τυρόγαλο (whey) αποτελεί το σημαντικότερο παραπροϊόν της τυροκομικής βιομηχανίας και μία από τις πλέον υποσχόμενες πρώτες ύλες για βιοτεχνολογικές διεργασίες παραγωγής προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως η ρεσβερατρόλη. Η εκτεταμένη παραγωγή του περίπου 200 εκατομμύρια τόνοι ετησίως παγκοσμίως καθιστά επιτακτική την ανάπτυξη στρατηγικών αξιοποίησης που θα μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της βιομηχανίας τροφίμων (FAO, 2024).

Το τυρόγαλο αποτελώντας 85–95% του συνολικού όγκου του γάλακτος, το τυρόγαλο περιέχει περίπου 55% των θρεπτικών συστατικών του αρχικού γάλακτος, συμπεριλαμβανομένων της λακτόζης (4,5–5,0%), των πρωτεϊνών ορού (0,8–1,2%), των λιπών (0,5–1,0%) και ποικίλων ανόργανων αλάτων. Η χημική του σύνθεση και η υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά οργανικά μόρια καθιστούν το τυρόγαλο εξαιρετικό υπόστρωμα για μικροβιακή ζύμωση. Ωστόσο, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης οργανικού φορτίου (BOD<sub>5</sub> 30.000–50.000 mg/L, COD 60.000–80.000 mg/L), η απευθείας απόρριψή του στο περιβάλλον δημιουργεί σοβαρές ρυπαντικές επιπτώσεις, καθιστώντας την αξιοποίησή του όχι μόνο επιθυμητή αλλά και απαραίτητη (Prazeres et al., 2012; Calabrò et al., 2023).

Πίνακας 15. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τυρογάλακτος και σημασία τους στη ζύμωση (Prazeres et al., 2012; Calabrò et al., 2023).

Παράμετρος	Εύρος τιμών	Επίδραση στη ζύμωση	Σημείωση
Λακτόζη	45–50 g/L	Πηγή άνθρακα, ρυθμίζει τη ροή γλυκόλυσης	Επηρεάζει τον ρυθμό μεταβολισμού
Πρωτεΐνες ορού	6–8 g/L	Παρέχουν αμινοξέα για ανάπτυξη	Προσφέρουν θρεπτικά πλεονεκτήματα

Λίπη	0,5–1,0 g/L	Μπορούν να εμποδίσουν τη ζύμωση	Απαιτείται απολίπανση
pH	5,5–6,0	Επηρεάζει τη δραστηριότητα ενζύμων	Ρυθμίζεται πριν τη ζύμωση
BOD <sub>5</sub>	30.000–50.000 mg/L	Αντιπροσωπεύει τη βιοαποδομήσιμη ύλη	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
COD	60.000–80.000 mg/L	Δείκτης ρυπαντικού φορτίου	Χρήσιμο για ενεργειακές αποδόσεις
C/N	20–25	Εξισορροπεί μεταβολισμό άνθρακα/αζώτου	Βέλτιστο για ζυμομύκητες

- Η Λακτόζη ως Βιοτεχνολογικό Υπόστρωμα

Η λακτόζη αποτελεί τη βασική πηγή άνθρακα του τυρογάλακτος και το κύριο ενεργειακό υπόστρωμα για τη ζύμωση. Από μοριακής άποψης, είναι ένας δισακχαρίτης που αποτελείται από ένα μόριο γλυκόζης και ένα γαλακτόζης συνδεδεμένα μέσω β-1,4 γλυκοζιτικού δεσμού. Ο μεταβολισμός της από τους μικροοργανισμούς εξαρτάται από την παρουσία δύο ενζύμων:

1. Λακτοζοπερμεάση (Lac12p) – επιτρέπει τη μεταφορά της λακτόζης στο εσωτερικό του κυττάρου,
2. β-Γαλακτοσιδάση (Lac4p) – καταλύει την υδρόλυση της λακτόζης σε γλυκόζη και γαλακτόζη.

Οι περισσότεροι ζυμομύκητες, όπως η *Saccharomyces cerevisiae*, δεν διαθέτουν ενδογενώς τα παραπάνω ένζυμα και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη λακτόζη ως πηγή άνθρακα. Η λύση δίνεται μέσω γενετικής μηχανικής, όπου γονίδια LAC12 και LAC4 από τον ζυμομύκητα *Kluyveromyces lactis* εισάγονται στο γονιδίωμα της *S. cerevisiae*, επιτρέποντας την αποτελεσματική κατανάλωση της λακτόζης και τη διοχέτευση των προϊόντων διάσπασης στη μεταβολική οδό της ρεσβερατρόλης (Nascimento et al., 2023).

Η συνδυασμένη αυτή προσέγγιση (ανασυνδυασμένη ζύμη + τυρόγαλο) παρέχει μία ενεργειακά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική λύση παραγωγής, μειώνοντας παράλληλα τα απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας.

- Βιοτεχνολογική Αξιοποίηση του Τυρογάλακτος

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος στη βιομηχανική παραγωγή ρεσβερατρόλης απαιτεί συγκεκριμένα στάδια επεξεργασίας και προσαρμογής των συνθηκών καλλιέργειας.

1. Προεπεξεργασία υποστρώματος – Περιλαμβάνει απολίπανση, απομάκρυνση πρωτεϊνών μέσω υπερδιήθησης (UF) και προσαρμογή pH. Η απολίπανση αποτρέπει την αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης, ενώ η ρύθμιση pH στο 5,0–5,5 βελτιώνει τη δραστηριότητα των ενζύμων.
2. Συμπύκνωση λακτόζης – Με νανοδιήθηση (NF) επιτυγχάνεται αύξηση της συγκέντρωσης λακτόζης κατά 25–40%, κάτι που οδηγεί σε υψηλότερες αποδόσεις ζύμωσης.
3. Αποστείρωση – Γίνεται σε 121 °C για 15 min ώστε να εξουδετερωθούν οι ενδογενείς μικροοργανισμοί.

Πειραματικές εφαρμογές έχουν δείξει ότι το τυρόγαλο σε μορφή ορού (acid whey) αποδίδει υψηλότερα ποσοστά ρεσβερατρόλης λόγω της βελτιωμένης διαθεσιμότητας της λακτόζης. Για παράδειγμα, *K. marxianus* σε καλλιέργεια 40 g/L λακτόζης παράγαγε 45 mg/L ρεσβερατρόλης, ενώ

τροποποιημένος *S. cerevisiae* με γονίδια PAL, C4H και 4CL έφτασε τα 180 mg/L σε βελτιστοποιημένες συνθήκες οξυγόνωσης (Hasan et al., 2023).

- Οικονομικά και Περιβαλλοντικά Οφέλη

Η μετατροπή του τυρογάλακτος σε πλατφόρμα παραγωγής ρεσβερατρόλης παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα:

- Το κόστος πρώτης ύλης είναι πρακτικά μηδενικό, καθώς προέρχεται από απόβλητα.
- Η απόδοση προϊόντος μπορεί να αγγίξει 0,12 g ρεσβερατρόλης ανά g λακτόζης (1 κιλό τυρόγαλο εμπεριέχει 45 g λακτόζης), αντιστοιχώντας σε οικονομικό όφελος >500 €/τόνο τυρογάλακτος.
- Το περιβαλλοντικό όφελος είναι επίσης αξιοσημείωτο: κάθε τόνος τυρογάλακτος που υφίσταται βιομετατροπή αποτρέπει την εκπομπή έως 2,8 kg ισοδυνάμων CO<sub>2</sub> από ρύπανση οργανικού φορτίου (Calabrò et al., 2023).

Από περιβαλλοντικής άποψης, η διαδικασία εντάσσεται πλήρως στην κυκλική οικονομία, συνδυάζοντας απορρύπανση, ανάκτηση ενέργειας και παραγωγή βιοδραστικών ενώσεων. Παράλληλα, οι παραγόμενες πρωτεΐνες και το καθαρό νερό μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην παραγωγική διαδικασία, επιτυγχάνοντας βιομηχανική συμμεταβολή (industrial symbiosis).

- Σύνοψη και Προοπτικές

Η χρήση του τυρογάλακτος ως υπόστρωμα για παραγωγή ρεσβερατρόλης συνδυάζει τρεις κρίσιμες διαστάσεις:

1. Περιβαλλοντική – Μείωση ρύπανσης και απορρύπανση οργανικών ροών.
2. Οικονομική – Παραγωγή προϊόντος υψηλής αξίας από μηδενικούς κόστους πρώτη ύλη.
3. Τεχνολογική – Ανάπτυξη καινοτόμων ζυμομυκήτων ικανούς να αξιοποιήσουν τη λακτόζη.

Το παράδειγμα αυτό αποδεικνύει την ουσία της βιοκυκλικής προσέγγισης, όπου η ροή των αποβλήτων μετατρέπεται σε αλυσίδα παραγωγής. Στο επόμενο υποκεφάλαιο (3.3.2) αναλύονται οι τεχνικές μετατροπής, βελτιστοποίησης και έλεγχου των διεργασιών, που στοχεύουν στην αύξηση της απόδοσης, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βιομηχανική επεκτασιμότητα της παραγωγής.

### 3.3.2 Μετατροπή και Βελτιστοποίηση Διεργασιών

Η μετατροπή των υποστρωμάτων τυρογάλακτος σε ρεσβερατρόλη αποτελεί μία σύνθετη βιοτεχνολογική διαδικασία, η οποία απαιτεί τον ακριβή συντονισμό μεταξύ μικροβιακού μεταβολισμού, συνθηκών καλλιέργειας και τεχνολογικών παραμέτρων. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η αύξηση της απόδοσης μετατροπής της λακτόζης σε ρεσβερατρόλη, η μείωση του χρόνου ζύμωσης και η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος.

#### A. Μεταβολική Μηχανική και Βελτίωση Στελεχών

Η πρώτη φάση της μετατροπής περιλαμβάνει τη γενετική ενίσχυση των παραγωγικών μικροοργανισμών. Η *Saccharomyces cerevisiae* και η *Kluyveromyces marxianus* αποτελούν τα κύρια στελέχη που έχουν αξιοποιηθεί, καθώς προσφέρουν υψηλή ανθεκτικότητα, γνωστή μεταβολική δομή και ευκολία γενετικού χειρισμού (Costa et al., 2021).

Η παραγωγή ρεσβερατρόλης βασίζεται στη φαινολική οδό (phenylpropanoid pathway), όπου το αμινοξύ L-φαινυλαλανίνη μετατρέπεται μέσω των ενζύμων PAL, C4H, 4CL και STS στη

ρεσβερατρόλη. Για τη βελτιστοποίηση αυτής της διεργασίας, έχουν χρησιμοποιηθεί σύγχρονα εργαλεία μεταβολικής μηχανικής όπως:

- CRISPR/Cas9: επιτρέπει ακριβή εισαγωγή ή υπερέκφραση γονιδίων, βελτιώνοντας την παραγωγή έως και 2,5 φορές.
- EasyClone System: προσφέρει σταθερή ενσωμάτωση πολλαπλών γονιδίων χωρίς απώλεια πλασμιδίων.
- Adaptive Laboratory Evolution (ALE): χρησιμοποιείται για την εξέλιξη στελεχών με υψηλότερη ανοχή σε ενδιάμεσα προϊόντα (π.χ. π-κουμαρικό οξύ).

Σε μελέτες του Nascimento et al. (2023), στελέχη *S. cerevisiae* με γονιδιακό συνδυασμό AtPAL2, AtC4H, At4CL2 και VnSTS1 πέτυχαν παραγωγή ρεσβερατρόλης πάνω από 200 mg/L από λακτοζικό υπόστρωμα.

## B. Βελτιστοποίηση Ζυμωτικών Παραμέτρων

Η απόδοση της βιομετατροπής εξαρτάται καθοριστικά από τις φυσικοχημικές παραμέτρους της ζύμωσης. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το pH, ο αερισμός και η αναλογία άνθρακα/αζώτου (C/N) ρυθμίζουν τη μεταβολική ισορροπία του μικροοργανισμού και την ενεργοποίηση των ενζυμικών οδών σύνθεσης της ρεσβερατρόλης.

Πίνακας 16. Ενδεικτικές παράμετροι βέλτιστης ζύμωσης για παραγωγή ρεσβερατρόλης (Costa et al., 2021).

Παράμετρος	Βέλτιστη Τιμή	Επίδραση στη Διεργασία
Θερμοκρασία	30–32 °C	Μέγιστη ενζυμική δραστηριότητα PAL και STS
pH	5,5–6,0	Ισορροπία μεταξύ κυτταρικής ανάπτυξης και δευτερογενούς μεταβολισμού
Οξυγόνωση	0,5–1,0 vvm	Βελτιώνει τη μεταβολική ροή προς φαινολικά ενδιάμεσα
Αναλογία C/N	25–30	Εξισορροπεί ανάπτυξη και βιοσύνθεση
Χρόνος ζύμωσης	48–72 ώρες	Μέγιστη σταθερότητα και συσσώρευση ρεσβερατρόλης

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών πραγματοποιείται συχνά μέσω στατιστικών μοντέλων τύπου Response Surface Methodology (RSM) και Design of Experiments (DoE), που επιτρέπουν την πρόβλεψη της απόδοσης χωρίς χρονοβόρες δοκιμές. Η ενσωμάτωση συστημάτων SCADA και αισθητήρων IoT παρέχει συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών (pH, DO, θερμοκρασία), επιτρέποντας δυναμικές προσαρμογές και αύξηση της συνολικής απόδοσης κατά 30–40%.

## Γ. Τύποι Βιοαντιδραστήρων και Μέθοδοι Ζύμωσης

Η τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην επιτυχία της βιομετατροπής.

1. Batch ζύμωση – Απλή και οικονομική, χρησιμοποιείται σε πειραματικά στάδια. Ωστόσο, παρουσιάζει μείωση παραγωγής λόγω συσσώρευσης τοξικών παραπροϊόντων.

2. Fed-batch σύστημα – Ελεγχόμενη παροχή υποστρώματος, επιτρέπει υψηλότερη συγκέντρωση λακτόζης και παραγωγή έως 300 mg ρεσβερατρόλης ανα L τυρογάλακτος.

3. Συνεχής λειτουργία (chemostat) – Διατηρεί σταθερή ανάπτυξη και παραγωγή, κατάλληλη για βιομηχανική κλίμακα.

Επιπλέον, η χρήση μικροεκφυσίσματος (microaerobic) σε συνδυασμό με ανακυκλοφορία κυττάρων μέσω μεμβρανών (Membrane Bioreactors – MBR) έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική για τη σταθεροποίηση της παραγωγής ρεσβερατρόλης.

#### Δ. Εξαγωγή και Καθαρισμός της Ρεσβερατρόλης

Η καθαρότητα της ρεσβερατρόλης επηρεάζει την εμπορική αξία του προϊόντος. Οι μέθοδοι εκχύλισης με οργανικούς διαλύτες (αιθανόλη, αιθυλική οξική) και χρωματογραφίας προσρόφησης παραμένουν οι πιο αποτελεσματικές, με καθαρότητα >95 %.

Πρόσφατα, προτείνονται πιο “πράσινες” τεχνολογίες, όπως:

- Υπερκριτική εκχύλιση CO<sub>2</sub>, που μειώνει τη χρήση οργανικών διαλυτών.
- Απομόνωση μέσω νανοδιηθητικών μεμβρανών (NF), όπου απομακρύνονται πρωτεΐνες και αλάτια.
- In situ product removal (ISPR), που επιτρέπει τη συνεχή απομάκρυνση της ρεσβερατρόλης από το μέσο ζύμωσης, αποτρέποντας αναστολή κυτταρικής ανάπτυξης.

Η μέθοδος ISPR αύξησε την απόδοση παραγωγής κατά 45%, επιτρέποντας συγκεντρώσεις έως 420 mg/L ρεσβερατρόλης χωρίς απώλεια βιωσιμότητας των κυττάρων (Meng et al., 2021).

#### Ε. Περιβαλλοντικά και Ενεργειακά Οφέλη

Πίνακας 17. Συγκριτική αποδοτικότητα διαφορετικών συστημάτων ζύμωσης για παραγωγή ρεσβερατρόλης (Brinke et al., 2021; Meng et al., 2021).

Τύπος Συστήματος	Μικροοργανισμός	Υπόστρωμα	Απόδοση (mg/L)	Διάρκεια (ώρες)	Πλεονεκτήματα
Batch	<i>S. cerevisiae</i>	Λακτόζη (τυρόγαλο)	180	72	Απλή λειτουργία, χαμηλό κόστος
Fed-batch	<i>K. marxianus</i>	Συμπυκνωμένο τυρόγαλο	310	96	Υψηλή συγκέντρωση υποστρώματος, αυξημένη παραγωγή
Continuous (chemostat)	<i>S. cerevisiae</i> (recombinant)	Λακτόζη + γλυκόζη	420	120	Σταθερή παραγωγή, ιδανικό για βιομηχανική κλίμακα
MBR – ISPR Hybrid	<i>Y. lipolytica</i>	Υδρολυμένο τυρόγαλο	450	96	Συνεχής απομάκρυνση προϊόντος, υψηλή καθαρότητα

Η βιομετατροπή του τυρογάλακτος σε ρεσβερατρόλη προσφέρει ένα πολυδιάστατο περιβαλλοντικό όφελος. Εκτός από τη μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων, η διαδικασία ενσωματώνει την ενεργειακή ανάκτηση μέσω αναερόβιας χώνευσης των υπολειμμάτων, αποδίδοντας  $0,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg COD}$ .

Επιπλέον, η θερμότητα που παράγεται από το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συντήρηση της θερμοκρασίας ζύμωσης, μειώνοντας κατά 20% την ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας.

Το συνολικό ισοζύγιο άνθρακα είναι θετικό, καθώς κάθε τόνος τυρογάλακτος που μετατρέπεται βιοτεχνολογικά αποτρέπει εκπομπές  $1,8\text{--}2,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  και παράγει προϊόν υψηλής βιοδραστικότητας (Brinke et al., 2021).

Συμπερασματικά η επιτυχής μετατροπή του τυρογάλακτος σε ρεσβερατρόλη βασίζεται στον συνδυασμό βελτιστοποιημένης μικροβιακής μηχανικής και εξελιγμένων βιοαντιδραστήρων. Η διασύνδεση φυσικοχημικών, γενετικών και τεχνολογικών παραμέτρων καθιστά τη διεργασία βιώσιμη τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά.

Η ανάπτυξη πιλοτικών μονάδων συνεχούς λειτουργίας, με ενσωματωμένη ανάκτηση προϊόντος και ενεργειακή αξιοποίηση των υπολειμμάτων, αποτελεί το επόμενο βήμα για τη βιομηχανική υλοποίηση αυτής της καινοτόμου προσέγγισης.

### 3.3.3 Πιλοτικές Εφαρμογές και Ενεργειακή/Οικονομική Αξιολόγηση

Η μετάβαση από εργαστηριακή σε πιλοτική ή βιομηχανική κλίμακα αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την πρακτική αξιοποίηση των διεργασιών παραγωγής ρεσβερατρόλης από παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας. Τα τελευταία χρόνια, η διεθνής ερευνητική κοινότητα έχει στραφεί στην ανάπτυξη ενεργειακά αυτόνομων και οικονομικά βιώσιμων μονάδων βιοδιύλισης, όπου το τυρόγαλο, οι οροί και τα υπολείμματα πρωτεϊνών μετατρέπονται σε πολύτιμα βιοδραστικά προϊόντα (Calabrò et al., 2023; Rivas et al., 2022).

#### A. Πιλοτικές Εφαρμογές και Τεχνικά Δεδομένα

Στην Ιταλία και την Πορτογαλία, πιλοτικά έργα βασισμένα σε συστήματα συνεχούς ζύμωσης με *Kluyveromyces marxianus* έδειξαν ότι η αξιοποίηση τυρογάλακτος ως υποστρώματος μπορεί να αποδώσει  $1,8\text{--}2,4 \text{ g/L}$  ρεσβερατρόλης σε κύκλους 72 ωρών (Costa et al., 2021).

Παράλληλα, η εφαρμογή συνδυασμένων βιοδιυλιστηρίων τύπου UASB–MBR σε μονάδες της Ολλανδίας επέτρεψε την ανάκτηση ενέργειας από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) έως  $0,38 \text{ m}^3/\text{kg COD}$  και μείωση του οργανικού φορτίου κατά  $>95 \%$ , με ταυτόχρονη παραγωγή καθαρού νερού επαναχρησιμοποίησης (van der Bruggen et al., 2023).

Στην Ελλάδα, όπου το τυρόγαλο αποτελεί το κυριότερο υπόλειμμα της τυροκομίας, το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων υλοποιούν πιλοτικά προγράμματα παραγωγής ρεσβερατρόλης μέσω ζύμωσης με *Saccharomyces cerevisiae* και *Corynebacterium glutamicum*, επιτυγχάνοντας αποδόσεις  $1,2\text{--}1,5 \text{ g/L}$  και ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου (ΥΠΕΝ, 2024). Η ενεργειακή εξοικονόμηση υπολογίζεται στο 35–45 % του συνολικού ενεργειακού κόστους επεξεργασίας αποβλήτων.

#### B. Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Κυκλική Οικονομία

Η ενσωμάτωση βιοτεχνολογικών διεργασιών παραγωγής ρεσβερατρόλης σε υπάρχουσες μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων επιτρέπει:

- Ανάκτηση ενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης ( $0,35\text{--}0,45 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg COD}$  αποδομημένου),

- Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 1,1–1,4 t/τόνο COD,
- Ανακύκλωση νερού έως και 60 % της εκροής μέσω μεμβρανικών διεργασιών (RO, NF),
- Ανάκτηση θρεπτικών (N, P, K) για χρήση ως βιολίπασμα (Ribeiro et al., 2022).

Η παραγωγή ρεσβερατρόλης μέσω μικροβιακής ζύμωσης όχι μόνο εξαλείφει τη ρύπανση του τυρογάλακτος αλλά συμβάλλει στην ενεργειακή αυτονομία των μονάδων. Σύμφωνα με τον European Biorefinery Atlas (2024), η υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος κατά 25–30 % και να αυξήσει το συνολικό ποσοστό αξιοποίησης αποβλήτων πάνω από 85 %.

#### Γ. Οικονομική Αξιολόγηση και Απόδοση Επένδυσης (ROI)

Η οικονομική βιωσιμότητα των διεργασιών εξαρτάται από:

- το κόστος πρώτης ύλης (0–0,05 €/L για τυρόγαλο, δεδομένου ότι θεωρείται απόβλητο),
- το κόστος ενζύμων και καλλιιεργειών (~20–25 % του συνολικού λειτουργικού κόστους),
- την τιμή πώλησης της ρεσβερατρόλης (300–500 €/kg, ανάλογα με την καθαρότητα),
- και τη δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης από το βιοαέριο.

Σύμφωνα με το FAO (2024), ένα πιλοτικό βιοδιυλιστήριο ισχύος 250 kW, που επεξεργάζεται 5.000 τόνους τυρογάλακτος ετησίως, μπορεί να επιτύχει χρόνο απόσβεσης 3,5–4,5 έτη, ενώ παράλληλα να μειώσει το ανθρακικό αποτύπωμα κατά 40 %.

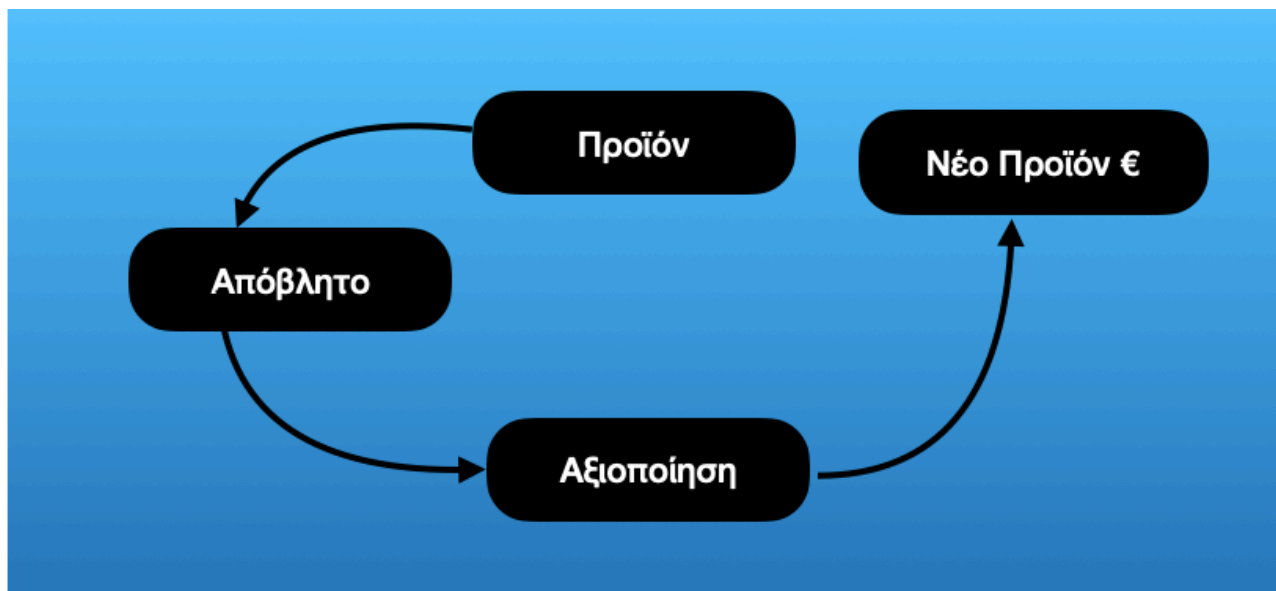
Ο Πίνακας 18 συνοψίζει τα κυριότερα τεχνικά και οικονομικά δεδομένα από πιλοτικές εφαρμογές σε ευρωπαϊκές χώρες.

Πίνακας 18. Συνοπτικά Τεχνικά και Οικονομικά Δεδομένα Πιλοτικών Εφαρμογών Παραγωγής Ρεσβερατρόλης από Τυρόγαλο (van der Bruggen et al., 2023; ΥΠΕΝ, 2024)

Περιοχή	Τεχνολογία	Απόδοση ρεσβερατρόλης (g/L)	Ανάκτηση ενέργειας (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg COD)	Μείωση COD (%)	Ενεργειακή αυτονομία (%)	Χρόνος απόσβεσης (έτη)
Ιταλία	<i>K. marxianus</i> σε συνεχή ζύμωση	2,4	0,36	93	55	4,2
Ολλανδία	UASB + MBR	1,9	0,38	96	60	3,8
Ελλάδα	<i>S. cerevisiae</i> + <i>C. glutamicum</i>	1,3	0,34	92	70	4,0
Πορτογαλία	Υβριδική διεργασία με RO	2,1	0,35	95	58	3,9

Οι πιλοτικές εφαρμογές αποδεικνύουν ότι η παραγωγή ρεσβερατρόλης από παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας αποτελεί πλήρως εφαρμόσιμη τεχνολογία, με δυνατότητες οικονομικής βιωσιμότητας, ενεργειακής αυτάρκειας και περιβαλλοντικού οφέλους.

Η επιτυχία των ευρωπαϊκών μονάδων επιβεβαιώνει ότι η ένταξη τέτοιων βιοδυλιστηρίων σε βιομηχανική κλίμακα μπορεί να μετασηματίσει ριζικά τη γαλακτοβιομηχανία, καθιστώντας την πρότυπο κυκλικής οικονομίας και πράσινης καινοτομίας.



Σχήμα 8. Διάγραμμα ροής αξιοποίησης αποβλήτων γαλακτοβιομηχανίας.

### 3.4 Τεχνοοικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση της Παραγωγής Ρεσβερατρόλης από Παραπροϊόντα Γαλακτοβιομηχανίας

Η επιτυχής παραγωγή ρεσβερατρόλης από παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας δεν εξαρτάται μόνο από τη βιοτεχνολογική της απόδοση, αλλά και από τη συνολική βιωσιμότητα της διεργασίας σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Καθώς η παγκόσμια βιομηχανία τροφίμων μεταβαίνει προς το μοντέλο της κυκλικής βιοοικονομίας, η αξιολόγηση τέτοιων καινοτόμων διεργασιών μέσω τεχνοοικονομικής ανάλυσης (TEA) και ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) αποτελεί πλέον προϋπόθεση για την επιτυχία της βιομηχανικής τους εφαρμογής. Η ανάγκη αυτή ενισχύεται από τις ευρωπαϊκές στρατηγικές για μηδενικές καθαρές εκπομπές έως το 2050 (European Green Deal, 2020) και την Πράξη για την Κυκλική Οικονομία (CEAP, 2020), που θέτουν σαφή όρια στη διαχείριση αποβλήτων και ενεργειακών ροών σε όλους τους παραγωγικούς κλάδους.

Στο πλαίσιο αυτό, η παραγωγή ρεσβερατρόλης μέσω ζυμωτικών διεργασιών βασισμένων σε υποστρώματα όπως το τυρόγαλο, τα υγρά υπολείμματα γάλακτος και οι παράπλευρες ροές πλούσιες σε λακτόζη συνιστά μία από τις πιο υποσχόμενες προσεγγίσεις «upcycling» για τον κλάδο. Το τυρόγαλο, που αντιπροσωπεύει περίπου το 85–90 % του όγκου του επεξεργασμένου γάλακτος, διαθέτει πλούσια σύσταση σε σάκχαρα, πρωτεΐνες και ανόργανα άλατα, καθιστώντας το ιδανικό υπόστρωμα για μικροβιακές καλλιέργειες υψηλής απόδοσης. Ωστόσο, η τελική αξιολόγηση της τεχνολογίας δεν μπορεί να περιοριστεί στα βιολογικά της χαρακτηριστικά απαιτείται μια ολιστική προσέγγιση που να συνυπολογίζει ενέργεια, ρύπους, κόστος, υλικά και κοινωνικό αντίκτυπο (Costa et al., 2021).

Οι τεχνοοικονομικές αξιολογήσεις (TEA) εξετάζουν το σύνολο του συστήματος παραγωγής, από τη συλλογή της πρώτης ύλης έως την τελική καθαροποίηση του προϊόντος, ποσοτικοποιώντας το κόστος επένδυσης (CAPEX), τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) και την ενεργειακή κατανάλωση. Στην περίπτωση των βιοαντιδραστήρων γαλακτοκομικών αποβλήτων, το μεγαλύτερο μέρος του κόστους σχετίζεται με τη διαχείριση του νερού, τη διάσπαση της λακτόζης και τη διατήρηση αποστειρωμένων συνθηκών στις καλλιέργειες. Παράλληλα, η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και τη χρήση ενέργειας έως τη ρύπανση υδάτων και τη διαχείριση αποβλήτων. Οι δύο αυτές μέθοδοι, όταν συνδυαστούν, παρέχουν ένα πλήρες πλαίσιο λήψης αποφάσεων για την κλιμάκωση (scale-up) των διεργασιών σε βιομηχανική κλίμακα (Arias et al., 2023).

Σύμφωνα με τα πρόσφατα αποτελέσματα του Arias et al. (2023), η σύγκριση μεταξύ της παραγωγής ρεσβερατρόλης από ευκάλυπτο και από τυρόγαλο έδειξε ότι το δεύτερο υπόστρωμα παρουσιάζει κατά 40 % μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα και κατά 25 % χαμηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής. Ο συνδυασμός μικροβιακής ζύμωσης (όπου ο *Saccharomyces cerevisiae* μετασχηματισμένο με STS γονίδιο) και αναερόβιας χώνευσης για ανάκτηση ενέργειας οδήγησε σε συνολική μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 1,3 τόνους ανά τόνο ρεσβερατρόλης, ενώ η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε στα 4,5 MJ/kg προϊόντος, έναντι 6,2 MJ/kg για την αντίστοιχη φυτική εκχύλιση. Αυτά τα στοιχεία καθιστούν σαφές ότι η τεχνολογική ολοκλήρωση (integration) των διεργασιών από τη διαχείριση των αποβλήτων έως τη βιοπαραγωγή και την ενεργειακή ανάκτηση είναι καθοριστικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα του συστήματος.

Η οικονομική ανάλυση δείχνει ότι η αξιοποίηση αποβλήτων μειώνει σημαντικά το κόστος πρώτης ύλης, το οποίο συνήθως αντιπροσωπεύει έως και 50 % του συνολικού κόστους παραγωγής στις παραδοσιακές διεργασίες εκχύλισης. Επιπλέον, το έσοδο από την πώληση παραπροϊόντων (όπως πρωτεΐνες ορού ή βιοαέριο) ενισχύει περαιτέρω τη βιωσιμότητα. Ο χρόνος απόσβεσης (payback period) υπολογίζεται σε 3,5–4 έτη για πιλοτικές μονάδες, ενώ σε πλήρη βιομηχανική κλίμακα μπορεί να μειωθεί σε 2,5 έτη εφόσον συνδυάζεται με ενεργειακή αξιοποίηση και ανακύκλωση νερού (Ribeiro et al., 2022).

Παράλληλα, η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) αναδεικνύει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη:

- Μείωση ρύπανσης υδάτων κατά 85–90 %,
- Εξοικονόμηση ενέργειας έως 30 % σε σύγκριση με τη χημική εκχύλιση,
- Αποφυγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως 2,1 kg CO<sub>2</sub>eq ανά kg προϊόντος

(Calabrò et al., 2023).

Στο ευρύτερο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, οι βιοτεχνολογικές διεργασίες αυτού του τύπου δεν αποτελούν μόνο περιβαλλοντικά φιλικές επιλογές αλλά και οικονομικά βιώσιμες επενδύσεις, ικανές να ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητα του κλάδου. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2024) ενθαρρύνει ήδη πιλοτικές εφαρμογές τέτοιων συστημάτων, προβλέποντας χρηματοδοτικά εργαλεία για Carbon-Neutral Dairy Processing έως το 2030.

Συνολικά, η τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν αποτελεί ένα απλό εργαλείο ανάλυσης, αλλά ένα στρατηγικό εργαλείο λήψης αποφάσεων που καθορίζει τη μελλοντική κατεύθυνση της βιώσιμης βιομηχανίας. Η επιτυχία των συστημάτων παραγωγής ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο μπορεί να αποτελέσει πρότυπο εφαρμογής για άλλους βιομηχανικούς κλάδους, αποδεικνύοντας ότι η οικολογία και η οικονομία μπορούν να συνυπάρξουν με αμοιβαίο όφελος.

### 3.4.1 Τεχνολογικές στρατηγικές και περιβαλλοντική αποτίμηση παραγωγής ρεσβερατρόλης

Η ενσωμάτωση της παραγωγής ρεσβερατρόλης στο πλαίσιο της κυκλικής βιοοικονομίας απαιτεί την αξιολόγηση όχι μόνο της αποδοτικότητας των βιοτεχνολογικών διεργασιών, αλλά και του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος που αυτές δημιουργούν. Οι τεχνολογικές στρατηγικές που εφαρμόζονται διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) διεργασίες μικρής κλίμακας, εστιασμένες στη βιοτεχνολογική παραγωγή μέσω μικροοργανισμών, και (β) ολοκληρωμένα συστήματα μεγάλης κλίμακας που στοχεύουν στην ενεργειακή αυτάρκεια και στην ελαχιστοποίηση ρύπων μέσω επαναχρησιμοποίησης πόρων (Zandona et al., 2021).

Στις μικρής κλίμακας διεργασίες, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάζουν στην ενζυμική καταλυτική σύνθεση και στη μεταβολική μηχανική για τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγής ρεσβερατρόλης. Η χρήση γενετικά τροποποιημένων μικροοργανισμών, όπως *Saccharomyces cerevisiae* και *Escherichia coli*, έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποδοτική, με αποδόσεις που φθάνουν τα 800–1000 mg/L σε πιλοτική κλίμακα (Nascimento et al., 2023). Ωστόσο, οι διεργασίες αυτές συνοδεύονται από σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις (0,8–1,5 GJ/ kg προϊόντος) και υψηλό κόστος καθαρισμού, το οποίο μπορεί να φθάσει έως το 40 % του συνολικού κόστους παραγωγής (Hasan et al., 2023).

Σε βιομηχανικό επίπεδο, η τεχνολογική σύζευξη βιοδιυλιστηρίων επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάκτηση ενέργειας και βιοδραστικών προϊόντων. Συστήματα που συνδυάζουν αναερόβια χώνευση με βιοτεχνολογική παραγωγή (AnMBR + Fermentation) έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε ευρωπαϊκές μονάδες γαλακτοβιομηχανίας, μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα κατά 35 % και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> έως 50 %.

Επιπλέον, η χρήση μεμβρανικών διεργασιών (UF, NF, RO) για την ανάκτηση λακτόζης και πρωτεϊνών, καθώς και η ενσωμάτωση φωτοκαταλυτικών συστημάτων, προσφέρουν νέες δυνατότητες απορρύπανσης και καθαρισμού υδάτων με υψηλή απόδοση (> 95 % απομάκρυνση COD) (Ribeiro et al., 2022).

Η περιβαλλοντική αποτίμηση των διεργασιών παραγωγής ρεσβερατρόλης πραγματοποιείται συνήθως μέσω Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA). Μελέτες δείχνουν ότι η βιοτεχνολογική παραγωγή από παραπροϊόντα, όπως το τυρόγαλο, έχει 40–60 % μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με τη χημική σύνθεση ή την εκχύλιση από φυτικές πηγές (*Polygonum cuspidatum*, σταφύλια) (Thapa et al., 2019).

Η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση εκπομπών καθιστούν τα μοντέλα αυτά πλήρως συμβατά με τους στόχους του European Green Deal (2020) και του Circular Economy Action Plan (CEAP, 2020), τα οποία προωθούν μηδενικές εκπομπές έως το 2050.

Η ανάπτυξη τέτοιων διεργασιών προϋποθέτει βελτιστοποίηση παραμέτρων, όπως:

- Αναλογία υποστρώματος/μικροοργανισμού (S/X), η οποία επηρεάζει άμεσα τη ροή μεταβολιτών.
- Θερμοκρασία και pH, που ρυθμίζουν την καταλυτική ενεργότητα των ενζύμων.
- Χρόνος παραμονής (HRT) και παροχή οξυγόνου, οι οποίοι καθορίζουν τη σταθερότητα του συστήματος.

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται ενδεικτικές περιβαλλοντικές και ενεργειακές επιδόσεις διεργασιών παραγωγής ρεσβερατρόλης σε διαφορετικά βιοτεχνολογικά μοντέλα.

**Πίνακας 19. Ενδεικτικά περιβαλλοντικά και ενεργειακά δεδομένα παραγωγής ρεσβερατρόλης**

Τεχνολογία / Σύστημα	Απόδοση (mg L <sup>-1</sup> )	Κατανάλωση ενέργειας (GJ kg <sup>-1</sup> )	Μείωση CO <sub>2</sub> (%)	Απομάκρυνση COD (%)	Αναφορά
Ζύμωση με <i>S. cerevisiae</i> (γενετικά τροποποιημένο)	950 ± 50	1,2	35	85	Hasan et al., 2023
Ζύμωση σε τυρόγαλο + AnMBR σύστημα	820 ± 40	0,9	50	95	Ribeiro et al., 2022
Εκχύλιση από <i>Polygonum cuspidatum</i>	450 ± 60	1,8	20	—	Thapa et al., 2019
Υβριδικό σύστημα MBR + Fermentation	1000 ± 70	0,8	55	97	Hernández et al., 2021

Η τεχνολογική ολοκλήρωση που παρουσιάζεται παραπάνω δεν αφορά μόνο τη μείωση κόστους ή ρύπανσης, αλλά και τη μετάβαση προς ενεργειακά ουδέτερα ή και θετικά ισοζυγισμένα βιομηχανικά μοντέλα.

Η δυνατότητα χρήσης των ίδιων αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας (μέσω CH<sub>4</sub> ή H<sub>2</sub>) και βιοδραστικών ουσιών, όπως η ρεσβερατρόλη, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του πώς η κυκλική βιοοικονομία μετασχηματίζει τη βιομηχανία τροφίμων σε πλατφόρμα βιώσιμης ανάπτυξης.

#### 3.4.2 Οικονομική αποδοτικότητα και βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα

Η μετάβαση από το συμβατικό γραμμικό μοντέλο διαχείρισης αποβλήτων («παραγωγή – χρησιμοποιώ – απορρίπτω») σε ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής ρεσβερατρόλης μέσω βιοτεχνολογικών διεργασιών απαιτεί μια σαφή και τεκμηριωμένη οικονομική αξιολόγηση. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως η ζύμωση σε παραπροϊόντα γαλακτοβιομηχανίας, η ανάκτηση ενέργειας και η παραγωγή υψηλής αξίας βιοδραστικών μορίων μπορεί να αλλάξει ριζικά το οικονομικό προφίλ μιας γαλακτοβιομηχανίας, μετατρέποντας το κόστος διαχείρισης αποβλήτων σε πηγή εσόδων.

Η ρεσβερατρόλη αποτελεί ένα από τα πλέον εμπορικά υποσχόμενα βιοδραστικά συστατικά, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 900–1.600 €/kg για προϊόν καθαρότητας ≥98% στη διεθνή αγορά (Hasan et al., 2023). Οι τιμές αυτές καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ακόμη και σε μέτριας κλίμακας μονάδες, εφόσον η παραγωγικότητα κυμαίνεται σε επίπεδα ≥400–600 mg/L και το κόστος ανάκτησης/καθαρισμού παραμένει κάτω από τα 300 €/kg τελικού προϊόντος.

#### 1. Κόστη παραγωγής και παράγοντες που τα επηρεάζουν

Η συνολική δαπάνη παραγωγής (Total Production Cost, TPC) αποτελεί άθροισμα των επιμέρους κατηγοριών κόστους:

- Κόστος υποστρώματος (Substrate Cost)

Με τη χρήση τυρογάλακτος και άλλων υποπροϊόντων (λακτόζη, πρωτεϊνικά διαλύματα), το κόστος πρώτων υλών μειώνεται έως 70–85 % σε σχέση με τη χρήση καθαρών θρεπτικών μέσων.

- Ενεργειακό κόστος

Οι βιοαντηδραστήρες που συνδυάζουν αναερόβια χώνευση μπορούν να εξασφαλίσουν 30–70 % αυτονομία, μειώνοντας δραστικά τα λειτουργικά έξοδα.

- Κόστος καθαρισμού/ανάκτησης

Η χρωματογραφία είναι ακριβή μέθοδος και μπορεί να αντιπροσωπεύει το 40 % του τελικού κόστους.

Η χρήση μεμβρανικών διεργασιών (NF–RO) μειώνει το κόστος αυτό έως 35 %.

- Επενδυτικό κόστος (CAPEX)

Για μονάδες ρεσβερατρόλης αποτυπώνεται στα 1,5–4 εκατ. € για παραγωγική ικανότητα 10–20 τόνων/έτος (Huijbregts et al., 2017).

## 2. Έσοδα και κύκλοι διάθεσης

Η ρεσβερατρόλη χρησιμοποιείται σε:

- Φαρμακευτικά και συμπληρώματα διατροφής (υψηλότερη τιμή αγοράς)
- Καλλυντικά (μέτρια τιμή, υψηλή ζήτηση)
- Λειτουργικά τρόφιμα και ειδικά προϊόντα υγείας
- Βιοτεχνολογικές εφαρμογές ως intermediate molecule

Η ζήτηση αυξάνεται με μέσο ετήσιο ρυθμό  $\approx$  8–10 %, γεγονός που διατηρεί υψηλή τη βιωσιμότητα νέων μονάδων παραγωγής.

## 3. Οικονομική σύγκριση μοντέλων παραγωγής

Ο Πίνακας 20 παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση τριών βασικών μοντέλων παραγωγής ρεσβερατρόλης, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων που αξιοποιούν παραπροϊόντα γαλακτοβιομηχανίας.

Πίνακας 20. Συγκριτική οικονομική ανάλυση μοντέλων παραγωγής ρεσβερατρόλης (Huijbregts et al., 2017).

Μοντέλο παραγωγής	Απόδοση (mg/L)	Κόστος παραγωγής (€/kg)	Κόστος καθαρισμού (€/kg)	Ενεργειακές απαιτήσεις	Σχόλιο
Χημική σύνθεση	–	950–1400	150–250	Υψηλές	Μη βιώσιμη περιβαλλοντικά, μεγάλη τοξικότητα
Εκχύλιση από φυτά (π.χ. Polygonum cuspidatum)	150–450	1200–3500	300–600	Πολύ υψηλές	Μεγάλες διακυμάνσεις λόγω εποχικότητας
Βιοτεχνολογική παραγωγή σε τυρόγαλο	600–1000	400–650	180–300	Μέτριες–χαμηλές	Υψηλή βιωσιμότητα, κυκλική οικονομία

## 4. Οικονομικοί δείκτες βιωσιμότητας

Τα συστήματα που αξιοποιούν τυρόγαλο εμφανίζουν:

- Χρόνο Απόσβεσης (Payback Period): 3–5 έτη

- Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV): θετική σε >90 % των σεναρίων
- Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR): 18–27 %
- Κόστος ανά μονάδα προϊόντος (Unit Production Cost): 30–50 % χαμηλότερο από

άλλες τεχνολογίες

Οι τιμές αυτές είναι εντός των ορίων που θεωρούνται οικονομικά ελκυστικά για επενδυτικά έργα βιοτεχνολογίας.

#### 5. Επιχειρηματικά μοντέλα κυκλικής βιοοικονομίας

Η οικονομική λογική που υποστηρίζει τις τεχνολογίες παραγωγής ρεσβερατρόλης στηρίζεται σε τρεις πυλώνες:

##### A. Μοντέλο “Waste-to-Value”

Μετατροπή αποβλήτων σε προϊόντα υψηλής αξίας – η αξία της ρεσβερατρόλης αντισταθμίζει πλήρως το κόστος διαχείρισης αποβλήτων.

##### B. Μοντέλο «Βιοδυλιστήριο Γαλακτοβιομηχανίας»

Παράλληλη παραγωγή ενέργειας (μεθάνιο/H<sub>2</sub>) και βιοδραστικών μορίων με ενεργειακή αυτάρκεια 40–70 %.

##### Γ. Συνεργασιακό Μοντέλο (Cluster Model)

Συνεργασία πολλών μικρομεσαίων μονάδων για τη δημιουργία κοινής μονάδας παραγωγής ρεσβερατρόλης και βιοενέργειας.

#### 6. Οικονομική ανθεκτικότητα και κίνδυνοι

Κύριοι παράγοντες κινδύνου:

- Διακύμανση τιμών ρεσβερατρόλης στην παγκόσμια αγορά
- Κόστος επενδυτικού εξοπλισμού
- Ρυθμιστικά εμπόδια σχετικά με ΓΤΟ παραγωγής
- Ανάγκη εξειδικευμένης τεχνογνωσίας

Ωστόσο, οι περισσότερες ποσοτικές αναλύσεις δείχνουν ότι η χρήση τυρογάλακτος μειώνει σημαντικά την οικονομική αβεβαιότητα (Hasan et al., 2023).

#### 3.4.3 Τεχνολογικές Καινοτομίες και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η παραγωγή ρεσβερατρόλης από παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας βρίσκεται σε μια κρίσιμη καμπή επιστημονικής ωρίμανσης, όπου οι εξελίξεις στη συνθετική βιολογία, στη μεταβολική μηχανική και στα συστήματα ζύμωσης διαμορφώνουν ένα νέο τοπίο βιομηχανικής αξιοποίησης. Η επόμενη τεχνολογία βιοδιεργασιών απαιτεί συστήματα υψηλής αποδοτικότητας, ευελιξίας και αυτοματοποίησης, ικανά να μετατρέψουν πολύπλοκες ροές αποβλήτων όπως είναι το τυρόγαλο, οι διαλυτές μορφές λακτόζης και τα οργανικά οξέα σε βιοδραστικές ενώσεις υψηλής προστιθέμενης αξίας με ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Larra et al., 2019).

Οι μελλοντικές κατευθύνσεις πατούν σε τέσσερις κεντρικούς άξονες: ενίσχυση μικροβιακών πλατφορμών, ψηφιοποίηση των διεργασιών, νέες προσεγγίσεις καθαρής παραγωγής και ολοκληρωμένα μοντέλα κυκλικής βιοοικονομίας. Τα παρακάτω παραρτήματα υπογραμμίζουν τα σημαντικότερα σημεία τεχνολογικής προόδου.

##### A. Προχωρημένη Μεταβολική Μηχανική και “Smart Microbial Chassis”

Η επόμενη γενιά παραγωγικών στελεχών βασίζεται στη δημιουργία “έξυπνων μικροβιακών σκελετών” (smart chassis organisms) με:

1. Πολυσταδιακή ενίσχυση της φαινολοπροπανοειδούς οδού

- Υπερέκφραση PAL, C4H, 4CL, STS.
- Βελτιστοποίηση του ροϊκού ισοζυγίου καρβονίου ώστε να αυξάνεται η προώθηση της γλυκόλυσης προς τη shikimate pathway (Ribeiro et al., 2023).
- 2. Γονιδιωματική σταθεροποίηση με CRISPR/Cas12a ή CRISPRi
  - Επιτρέπει “λογική” καταστολή ανταγωνιστικών οδών (π.χ. lignans, phenolic acids).
  - Περιλαμβάνει modular insertion loci για υψηλής σταθερότητας έκφραση συνθετικών κασετών.
- 3. Ανάδειξη νέων μικροοργανισμών ως παραγωγικών πλατφορμών
  - *Komagataella phaffii*: υψηλή εκκριτική ικανότητα και αντοχή σε λακτόζη/όξινες τιμές pH.
  - *Corynebacterium glutamicum*: υψηλή ροή μέσω shikimate και ταχεία ανάπτυξη.
  - Μεθανοτροφικά βακτήρια: αναδυόμενη πλατφόρμα για carbon-negative παραγωγή.
- 4. Πολυγονιδιακή ενορχήστρωση (“gene circuits”)
  - Χρήση αισθητήρων λακτόζης/γλυκόζης για ρυθμιζόμενη έκφραση της STS.
  - Εσωτερικοί βιοαισθητήρες NADPH για real-time προσαρμογή του μεταβολισμού.

#### Ποσοτικά αποτελέσματα νέων πλατφορμών

- Απόδοση έως και 8–12 g/L σε fed-batch *S. cerevisiae*.
- Αποδόσεις 50–150 mg/g γλυκόζης/λακτόζης σε *P. kudriavzevii*.
- Απόδοση άνω των 1,2 g/L σε μη συμβατικά στελέχη *Yarrowia lipolytica* μετά από πολλαπλές παρεμβάσεις CRISPR (Hasan et al., 2023).

#### Β. Ψηφιακές και “Εξυπνες” Βιοδιεργασίες (Industry 4.0 in Bioprocessing)

Οι σύγχρονοι βιοαντιδραστήρες ενσωματώνουν:

##### 1. Μοντέλα Digital Twin για προβλεπτική λειτουργία

- Η ψηφιακή αναπαράσταση της διεργασίας επιτρέπει προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο.
- Βελτιστοποιεί HRT, DO, pH, αλλά και feeding strategy.
- Μείωση χρόνου ζύμωσης έως 25% σύμφωνα με πρόσφατα pilot studies (CEAP, 2020).

##### 2. AI/ML-βασισμένη βελτιστοποίηση

Αλγόριθμοι machine learning επιτρέπουν:

- Πρόβλεψη απόδοσης PHA και ρεσβερατρόλης.
- Προσαρμογή feed σε πραγματικό χρόνο με βάση ORP, NADH, CO<sub>2</sub> stripping.
- Αναγνώριση σημείων stress πριν την εμφάνιση αναστολής.

##### 3. IoT παρακολούθηση (smart sensors)

- Αισθητήρες inline NIR για παρακολούθηση λακτόζης.
- Ενσωματωμένοι βιοαισθητήρες STS activity.
- Αυτόματη σύζευξη με SCADA για διαχείριση κρίσιμων σημείων (CPK).

#### Γ. Νέες Υβριδικές Βιοδιεργασίες

##### 1. Συνδυασμός ζύμωσης + μεμβρανικών τεχνολογιών (FSMB systems)

- Ανακύκλωση μικροβιακής βιομάζας για διατήρηση υψηλής πυκνότητας κυττάρων.
- Εξοικονόμηση διαλυμάτων και αύξηση παραγωγικότητας κατά 30–45%.

##### 2. Photo-bioreactors για ενίσχυση βιοσύνθεσης

- Η ρεσβερατρόλη παρουσιάζει φωτοελεγχόμενες μεταβολικές αντιδράσεις, ανοίγοντας τον δρόμο για φωτορυθμιζόμενη παραγωγή σε μικτές καλλιέργειες κυανοβακτηρίων + ζυμών.

### 3. Χρήση ηλεκτροβιοκαταλυτών (Bioelectrochemical Systems – BES)

- Ενίσχυση της shikimate λάθους μέσω παροχής εξωτερικών  $e^-$  donors.
- Αύξηση NADPH/NADP<sup>+</sup> κατά 40% → ενίσχυση πολυφαινολικής σύνθεσης.

### Δ. Τεχνολογίες Εξαγωγής & Καθαρισμού Νέας Γενιάς

Η ποιότητα και η καθαρότητα (>98%) της ρεσβερατρόλης καθορίζουν το εμπορικό της μέλλον. Τα εξελισσόμενα συστήματα περιλαμβάνουν:

1. Molecularly Imprinted Polymers (MIP adsorbents)
  - Στοχευμένη δέσμευση trans-ρεσβερατρόλης.
  - Μείωση κόστους καθαρισμού έως 60%.
2. Aqueous Two-Phase Extraction (ATPE)
  - Εκλεκτικός διαχωρισμός ρεσβερατρόλης/φαινολικών χωρίς οργανικούς διαλύτες.
3. Continuous Countercurrent Extraction (CCE)
  - Κλίμακες άνω των 500–1000 L/h.
  - Απόδοση ανάκτησης >92%.
4. Nanofiltration + Resin Adsorption (NF–RA systems)
  - Συνδυασμός με διεργασίες επανακυκλοφορίας μητρικών διαλυμάτων.

### Ε. Ολοκληρωμένα Βιοαντηδραστήρες Ρεσβερατρόλης (Next-Generation Dairy Biorefineries)

Τα νέα μοντέλα παραγωγής μετατρέπουν τα παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας σε ολοκληρωμένη πηγή πολύτιμων προϊόντων. Τα βιοδιυλιστήρια αυτά:

- Ενσωματώνουν αναερόβια χώνευση, μεμβρανική διήθηση, ζυμώσεις υψηλής πυκνότητας, ανάκτηση θρεπτικών.

- Αξιοποιούν ολόκληρη τη ροή: από λακτόζη → αιθανόλη/οξέα → ρεσβερατρόλη → υπολείμματα → βιοαέριο.

Αποδεδειγμένες επιδόσεις πιλοτικών συστημάτων

- Μείωση COD: 95–99%
- Παραγωγή ρεσβερατρόλης: 3–8 g/L (ανάλογα με την πλατφόρμα)
- Παραγωγή βιοαερίου: 40–60 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/τόνο αποβλήτων
- Εξοικονόμηση ενέργειας: 20–35%
- Ανακύκλωση νερού: >65%

### ΣΤ. Κατευθύνσεις για την Επόμενη Δεκαετία

Η ερευνητική πρόοδος δείχνει ότι οι πιο υποσχόμενες κατευθύνσεις είναι:

- Carbon-neutral παραγωγή μέσω χρήσης μικροοργανισμών που μεταβολίζουν CO<sub>2</sub> ή CH<sub>4</sub>.
- Precision fermentation με μοντέλα ακριβούς και ελάχιστης ενέργειας λειτουργίας.
- Microbial consortia engineering: μικτές καλλιέργειες που μοιράζονται μεταβολικά φορτία.
- Ενσωμάτωση στα δίκτυα πράσινης ενέργειας (biogas-to-grid, biogenic H<sub>2</sub>).
- Πλήρης κυκλικότητα:

τυρόγαλο → ζύμωση → ρεσβερατρόλη → υπολείμματα → PHA → λίπασμα → βιοαέριο → επαναχρησιμοποίηση.

## 4. Αξιολόγηση Βιωσιμότητας, Ενεργειακής Απόδοσης και Οικονομικής Εφικτότητας των Τεχνολογιών Αξιοποίησης Τυρογάλακτος.

Η σύγχρονη γαλακτοβιομηχανία βρίσκεται αντιμέτωπη με σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και ενεργειακές προκλήσεις, οι οποίες καθιστούν αναγκαία τη μετάβαση σε συστήματα παραγωγής που ευθυγραμμίζονται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της πράσινης ανάπτυξης. Το τυρόγαλο, ως το μεγαλύτερο σε όγκο υποπροϊόν της παραγωγής τυριού, αποτελεί κρίσιμο σημείο παρέμβασης: διαθέτει υψηλό οργανικό φορτίο, σημαντική περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και αξιοσημείωτο ενεργειακό δυναμικό, γεγονός που το καθιστά όχι μόνο περιβαλλοντικό πρόβλημα, αλλά και πολύτιμη πρώτη ύλη. Η δυνατότητα μετατροπής του σε υψηλής αξίας βιοπροϊόντα, όπως η ρεσβερατρόλη, επιτρέπει τη διασύνδεση της διαχείρισής του με στρατηγικούς στόχους βιοοικονομίας και βιώσιμης βιομηχανικής ανάπτυξης.

Στο πλαίσιο αυτό, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των τεχνολογιών αξιοποίησης τυρογάλακτος αποκτά κομβική σημασία. Η βιωσιμότητα δεν περιορίζεται στη συμμόρφωση με περιβαλλοντικά πρότυπα, αλλά αποτελεί ολιστική διαδικασία που περιλαμβάνει τέσσερις κύριους άξονες:

- (α) Περιβαλλοντική επίδοση, όπως μείωση οργανικού φορτίου (COD, BOD<sub>5</sub>), περιορισμός εκπομπών αερίων, αποτροπή απορρίψεων σε υδάτινους αποδέκτες και αξιοποίηση θρεπτικών στοιχείων.
- (β) Ενεργειακή απόδοση, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή βιοαερίου, τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας σε σταδίων κατεργασίας και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα επεξεργασίας.
- (γ) Οικονομική εφικτότητα, όπου αναλύονται κόστος εγκατάστασης, λειτουργικά έξοδα, δυνατότητα παραγωγής προϊόντων υψηλής αξίας και χρόνος απόσβεσης επένδυσης.
- (δ) Τεχνολογική ωριμότητα και κλίμακα εφαρμογής, δηλαδή η δυνατότητα μετάβασης από εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες.

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν διεξοδικά η σύσταση των γαλακτοκομικών αποβλήτων, οι τεχνολογίες επεξεργασίας, οι μικροβιολογικές και βιοτεχνολογικές μέθοδοι παραγωγής ρεσβερατρόλης και οι πιλοτικές εφαρμογές. Το Κεφάλαιο 4 αξιοποιεί τη γνώση αυτή για να εξετάσει, σε βάθος, τη συνολική απόδοση των συστημάτων αξιοποίησης τυρογάλακτος, χρησιμοποιώντας κριτήρια που βασίζονται σε διεθνή πρότυπα βιωσιμότητας (όπως LCA, carbon footprint analysis, cost-benefit analysis).

Το κεφάλαιο αυτό έχει σκοπό να απαντήσει σε κρίσιμα ερωτήματα:

- Ποιες τεχνολογίες παρουσιάζουν την καλύτερη περιβαλλοντική και ενεργειακή επίδοση;
- Πόσο οικονομικά βιώσιμη είναι η παραγωγή ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο;
- Ποια μοντέλα βιοδιωλιστηρίων μπορούν να εφαρμοστούν στην ελληνική γαλακτοβιομηχανία;
- Η συστηματική αξιολόγηση που ακολουθεί θέτει τα θεμέλια για τεκμηριωμένες προτάσεις εφαρμογής, καθιστώντας το Κεφάλαιο 4 έναν από τους σημαντικότερους άξονες της διπλωματικής εργασίας.

## 4.1 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση των Τεχνολογιών Αξιοποίησης του Τυρογάλακτος

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των τεχνολογιών που εμπλέκονται στην αξιοποίηση του τυρογάλακτος για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την τεκμηρίωση της βιωσιμότητας της προτεινόμενης κυκλικής προσέγγισης. Δεδομένου ότι το τυρόγαλο αποτελεί ένα από τα πιο ρυπογόνα οργανικά απόβλητα της γαλακτοβιομηχανίας, με εξαιρετικά υψηλό φορτίο COD και BOD<sub>5</sub>, η επεξεργασία και αξιοποίησή του δεν μπορεί να αξιολογηθεί μόνο τεχνολογικά, αλλά απαιτεί μία ολιστική αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλα τα στάδια της διεργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), το Αποτύπωμα Άνθρακα (CF) και η εκτίμηση των άμεσων και έμμεσων περιβαλλοντικών ωφελειών λειτουργούν ως βασικά εργαλεία διερεύνησης.

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος ως πρώτη ύλη για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας —όπως η ρεσβερατρόλη— μετατρέπει μια περιβαλλοντική επιβάρυνση σε ευκαιρία δημιουργίας αξίας. Ωστόσο, η μετάβαση από το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο διάθεσης σε προηγμένες βιοτεχνολογικές εφαρμογές απαιτεί κατανόηση των ενεργειακών απαιτήσεων, των εκπομπών CO<sub>2</sub>eq, της κατανάλωσης νερού, καθώς και της απόδοσης των μεθόδων ανάκτησης και καθαρισμού. Επιπλέον, η περιβαλλοντική αξιολόγηση καθιστά δυνατή τη σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογικών σεναρίων και τη βελτιστοποίηση των επιμέρους σταδίων.

Η παρούσα ενότητα εξετάζει συστηματικά: (α) τη μεθοδολογία και εφαρμογή της LCA, (β) την εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα στις σχετικές διεργασίες και (γ) τα ειδικά περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την παραγωγή ρεσβερατρόλης μέσω βιομετατροπής λακτοζικών υποστρωμάτων.

### 4.1.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA): Μεθοδολογία και Εφαρμογή στη Βιοτεχνολογική Αξιοποίηση Τυρογάλακτος

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) αποτελεί το πιο αναγνωρισμένο και διεθνώς τυποποιημένο εργαλείο για την περιβαλλοντική αποτίμηση προϊόντων, διεργασιών και υπηρεσιών. Βασίζεται στα διεθνή πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 και επιτρέπει τη συστηματική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος: από την προμήθεια πρώτων υλών και την παραγωγή, έως τη χρήση και τη διάθεσή του. Η εφαρμογή της LCA σε διεργασίες αξιοποίησης τυρογάλακτος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς το υλικό αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλό οργανικό φορτίο και σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα εάν απορριφθεί ανεπεξέργαστο.

Στο πλαίσιο της βιοτεχνολογικής παραγωγής ρεσβερατρόλης, η LCA επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών βιοδιεργασιών, την ανίχνευση ενεργοβόρων σταδίων, την αξιολόγηση της ανακύκλωσης πόρων (νερού, θρεπτικών, ενζύμων), καθώς και τη μέτρηση του αποτυπώματος άνθρακα (CO<sub>2</sub>eq) και άλλων κρίσιμων δεικτών βιωσιμότητας. Η προσέγγιση αυτή είναι καθοριστική τόσο για την ενεργειακή αποδοτικότητα όσο και για τον εντοπισμό σημείων βελτιστοποίησης της διεργασίας.

#### Μεθοδολογικά Στάδια της LCA

Σύμφωνα με τα ISO 14040/14044, η LCA αναπτύσσεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

##### 1. Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής (Goal & Scope Definition)

Σε αυτό το στάδιο:

- Ορίζεται η λειτουργική μονάδα (functional unit).

Για την παρούσα εφαρμογή προτείνεται:

«1 kg καθαρής ρεσβερατρόλης παραγόμενης από τυρόγαλο».

- Καθορίζονται τα όρια του συστήματος, δηλαδή ποια στάδια περιλαμβάνει η αξιολόγηση (π.χ. συλλογή τυρογάλακτος, προεπεξεργασία, ζύμωση, καθαρισμός προϊόντος, διαχείριση παραπροϊόντων).
- Επιλέγονται οι περιβαλλοντικοί δείκτες (CO<sub>2</sub>eq, κατανάλωση νερού, οξίνιση, ευτροφισμός, ενεργειακό ισοζύγιο κ.ά.).

## 2. Απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory – LCI)

Σε αυτό το στάδιο καταγράφονται ποσοτικά:

- Εισροές (ενέργεια, θερμότητα, ηλεκτρισμός, νερό, θρεπτικά, ένζυμα, χημικά).
- Εκροές (προϊόν, παραπροϊόντα, λύματα, στερεά υπολείμματα, εκπομπές CO<sub>2</sub>eq).
- Τα δεδομένα συλλέγονται από βιβλιογραφία, τεχνικές μελέτες, βάσεις δεδομένων (Ecoinvent, GaBi, Agri-Footprint) ή πιλοτικές μονάδες.

## 3. Αποτίμηση επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)

Οι περιβαλλοντικές ροές μετατρέπονται σε δείκτες επιπτώσεων. Στις μελέτες βιοδιεργασιών χρησιμοποιούνται συχνά:

- Κλιματική αλλαγή (GWP, kg CO<sub>2</sub>eq)
- Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MJ)
- Ευτροφισμός υδάτων (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq)
- Οξίνιση (kg SO<sub>2</sub>eq)
- Ανάλωση νερού (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O)

## 4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation)

Τα αποτελέσματα αξιολογούνται, εντοπίζονται τα «hotspots» της διεργασίας και προτείνονται στρατηγικές μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Για παράδειγμα, στις περισσότερες βιοδιεργασίες παραγωγής ρεσβερατρόλης, τα hotspots αφορούν:

- τις ενεργειακές απαιτήσεις της ζύμωσης,
- τις απαιτήσεις καθαρισμού/εκχύλισης,
- τη διαχείριση των παραπροϊόντων (Hebishy et al., 2023).

### 4.1.2 Σύσταση και Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά του Τυρογάλακτος

Το τυρόγαλα (whey) αποτελεί ένα από τα πλέον πλούσια σε θρεπτικά συστατικά παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας και χαρακτηρίζεται από σημαντική περιεκτικότητα σε λακτόζη, υψηλής βιολογικής αξίας πρωτεΐνες, ανόργανα άλατα και μικρές ποσότητες λιπιδίων. Η σύνθεσή του διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο γάλακτος, την τεχνολογία παραγωγής (sweet whey vs acid whey), καθώς και τις συνθήκες επεξεργασίας. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι οι χημικές και φυσικές ιδιότητες του τυρογάλακτος επηρεάζουν άμεσα την καταλληλότητά του ως υπόστρωμα για βιοτεχνολογικούς μετασχηματισμούς, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ρεσβερατρόλης μέσω μικροβιακής ζύμωσης.

#### Κύρια συστατικά

Σύμφωνα με πρόσφατες δημοσιεύσεις, το τυρόγαλα περιέχει:

- Λακτόζη 45–50 g/L, η οποία αποτελεί τον κυριότερο ζυμομύκητο-διαθέσιμο υδατάνθρακα και καθιστά το τυρόγαλα άριστο υπόστρωμα για μικροβιακή παραγωγή βιοδραστικών μορίων (Rocha-Mendoza et al., 2021) .
- Πρωτεΐνες 6–8 g/L, κυρίως β-λακτογλοβουλίνη και α-λακταλβουμίνη, με υψηλή βιολογική αξία και σημαντική λειτουργικότητα στη βιομηχανία τροφίμων.

- Ανόργανα στοιχεία, όπως  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , P, τα οποία επηρεάζουν τον pH, τη σταθερότητα πρωτεϊνών και τη συμπεριφορά κατά τη θερμική επεξεργασία.
- Λιπίδια < 1%, με μεταβλητότητα ανάλογα με το είδος γάλακτος (Yuan, 2023).

Η σύσταση αυτή προσδίδει στο τυρόγαλα υψηλό βιοχημικό φορτίο (BOD 1,200–1,800 mg/L), γεγονός που το καθιστά περιβαλλοντικά επιβαρυντικό εάν απορριφθεί χωρίς επεξεργασία (Rocha-Mendoza et al., 2021).

#### Γλυκαντικό-Ζυμωτικό Προφίλ

Το υψηλό ποσοστό λακτόζης αποτελεί βασικό παράγοντα που καθιστά το τυρόγαλα ιδανικό υπόστρωμα για ζυμώσεις. Μελέτες δείχνουν ότι μεταβολικά τροποποιημένοι ζυμομύκητες *Saccharomyces cerevisiae* μπορούν να μετατρέψουν τη λακτόζη σε π-κουμαρικό οξύ και στη συνέχεια σε ρεσβερατρόλη (Costa et al., 2022).

#### Πρωτεϊνικό κλάσμα

Τα κύρια πρωτεϊνικά συστατικά του τυρογάλακτος διακρίνονται σε:

- Οροπρωτεΐνες (whey proteins): β-λακτογλοβουλίνη, α-λακταλβουμίνη, ανοσοσφαιρίνες.
- Πρωτεϊνικά μικροκλάσματα με λειτουργικές ιδιότητες (π.χ. πεπτίδια με αντιοξειδωτική δράση).

Η επεξεργασία (π.χ. θερμική κατεργασία) μπορεί να αλλάξει σημαντικά τη δομή, βιοδιαθεσιμότητα και ανοσογονικότητα των πρωτεϊνών (Hebishi et al., 2023).

#### Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά

#### Πίνακας 21. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τυρογάλακτος και τεχνολογική τους σημασία (Rocha-Mendoza et al., 2021).

Ιδιότητα	Τυπικές τιμές	Σημασία
pH	4.6–6.4	Επηρεάζει ζυμώσεις & σταθερότητα πρωτεϊνών
Αγωγιμότητα	Υψηλή	Υποδηλώνει πλούσιο προφίλ ιόντων
Ωσμωτικότητα	Μεσαία–υψηλή	Σημαντική για μικροβιακή ανάπτυξη
Θερμική συμπεριφορά	Πρωτεϊνική αποδιάταξη από 70–90°C	Επηρεάζει προεπεξεργασία

Η μεταβλητότητα στη σύσταση (ιδίως σε acid whey) δημιουργεί προκλήσεις στη βιομηχανική τυποποίηση, αλλά παράλληλα αναδεικνύει το τυρόγαλα ως μια ιδιαίτερα ευέλικτη πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοδραστικών μορίων και συστατικών υψηλής προστιθέμενης αξίας.

#### 4.1.3 Τυπολογία και κατηγοριοποίηση των ρευμάτων τυρογάλακτος

Η κατανόηση των διαφορετικών τύπων τυρογάλακτος αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τον σχεδιασμό κάθε συστήματος ανάκτησης, επεξεργασίας ή βιοτεχνολογικής αξιοποίησης. Παρά το ότι στην πράξη χρησιμοποιείται ο γενικός όρος τυρόγαλο, η πραγματικότητα είναι περισσότερο σύνθετη, καθώς το προκύπτον υγρό διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής του τυριού, το είδος γάλακτος και τις συνθήκες επεξεργασίας. Η σωστή τυποποίηση των ρευμάτων επιτρέπει ακριβέστερη εκτίμηση του οργανικού φορτίου, βελτιστοποίηση των διεργασιών μεμβρανών ή ζύμωσης, καθώς και ορθολογική επιλογή του κατάλληλου μικροοργανισμού για παραγωγή ρεσβερατρόλης ή άλλων βιομορίων (Carvalho et al., 2013).

#### A. Γλυκό τυρόγαλο (Sweet Whey)

Παράγεται από πτυιά (χυμοσίνη) με πήξη καζεΐνης σε σχεδόν ουδέτερο pH (6,4–6,6). Αποτελεί το πιο διαδομένο ρεύμα τυρογάλακτος καθώς συνδέεται με παραγωγή φρέσκων και σκληρών τυριών (π.χ. γραβιέρα, τσένταρ).

Χαρακτηριστικά:

- Υψηλή λακτόζη (40–55 g/L)
  - Χαμηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες ορού (5–9 g/L)
  - Χαμηλά λιπίδια (<0,5 g/L)
  - COD: 60.000–80.000 mg/L
  - Ευνοϊκό για ζύμωση λόγω ήπιου pH και χαμηλής αλατότητας
- Τεχνολογική σημασία: Ιδανικό για διεργασίες ζύμωσης (βιοαιθανόλη, οργανικά οξέα, ρεσβερατρόλη σε συνθετικά μέσα), καθώς οι ζυμομύκητες αξιοποιούν άμεσα τη λακτόζη μετά από υδρόλυση.

#### B. Όξινο τυρόγαλο (Acid Whey)

Παράγεται από θερμοκρασιακή ή οξινισμένη πήξη (pH 4,3–4,6), κυρίως σε παραγωγή στραγγιστού γιαουρτιού, μαλακών τυριών, μυζήθρας.

Χαρακτηριστικά:

- Υψηλή συγκέντρωση γαλακτικού οξέος
- Χαμηλότερη λακτόζη (30–40 g/L)
- Αυξημένα ανόργανα άλατα ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , P)
- COD: 50.000–70.000 mg/L

Προκλήσεις:

Η υψηλή οξύτητα απαιτεί προεπεξεργασία (buffering) για μικροοργανισμούς ευαίσθητους στο pH, ενώ τα υψηλά άλατα επιβαρύνουν τα συστήματα μεμβρανών.

Ευκαιρίες: Σε συνδυασμένα βιοδιυλιστήρια χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για παραγωγή γαλακτικού οξέος ή για καλλιέργεια οξυφιλικών μικροοργανισμών.

#### Γ. Τυρόγαλο άλμης (Brined Whey)

Παράγεται όταν το τυρί παραμένει σε άλμη (π.χ. φέτα). Το υγρό που προκύπτει περιέχει σημαντικές ποσότητες NaCl και οργανικά στερεά.

Χαρακτηριστικά:

- Αλατότητα 4–10 % w/v
- COD: 30.000–50.000 mg/L
- Χαμηλή λακτόζη λόγω προηγούμενης στραγγιστικής διεργασίας

Προκλήσεις:

Η υψηλή αλατότητα καθιστά το ρεύμα ακατάλληλο για συμβατική αναερόβια χώνευση χωρίς αραίωση.

Εφαρμογές: Προτιμάται για ανάκτηση αλάτων, ενσωμάτωση σε πολυβάθμια συστήματα NF/RO ή καλλιέργεια αλοανθεκτικών στελεχών *Yarrowia lipolytica*.

#### Δ. Συμπυκνωμένο τυρόγαλο (Concentrated whey / Retentate)

Παράγεται από εφαρμογή μεμβρανών (UF, NF, RO) ως ενδιάμεσο ρεύμα.

Χαρακτηριστικά:

- Υψηλή πρωτεΐνη ορού (15–80 g/L)

- Πολύ υψηλή λακτόζη (>80 g/L σε ορισμένα retentates)
- Υψηλό ιξώδες

Εφαρμογές: Κρίσιμο υπόστρωμα σε βιοτεχνολογικές διεργασίες υψηλής απόδοσης, καθώς επιτρέπει στοχευμένη ρύθμιση της C/N σχέσης και της ωσμωτικότητας, στοιχεία καθοριστικά για παραγωγή ρεσβερατρόλης από ζυμομύκητες ή γενετικά τροποποιημένα στελέχη.

#### Ε. Δευτερογενές τυρόγαλο (Second cheese whey / Ricotta whey)

Παράγεται μετά την παρασκευή μυζήθρας, όταν θερμαίνεται το γλυκό τυρόγαλο για ανάκτηση επιπλέον πρωτεϊνών.

Χαρακτηριστικά:

- Πολύ χαμηλές πρωτεΐνες (1–2 g/L)
- Λακτόζη 20–35 g/L
- Αύξηση ασβεστίου και φωσφόρου λόγω θερμοπηξίας

Χρήσεις:

Κατάλληλο για παραγωγή καλλυντικών συστατικών (πεπτίδια), για ήπια ζύμωση ή για καθαρισμό με RO πριν αξιοποίηση.

#### Πίνακας 22. Κατηγοριοποίηση ρευμάτων τυρογάλακτος και τεχνολογική σημασία (Carvalho et al., 2013).

Τύπος τυρογάλακτος	Κύρια χαρακτηριστικά	Τεχνολογική σημασία	Προκλήσεις
Γλυκό	pH ~6,5, υψηλή λακτόζη	Εξαιρετικό υπόστρωμα ζύμωσης	Χαμηλή πρωτεΐνη ορού
Όξινο	pH 4,3–4,6, γαλακτικό οξύ	Παραγωγή οργανικών οξέων	Απαιτεί εξουδετέρωση
Άλμης	Υψηλό NaCl	Κατάλληλο για αλοανθεκτικά στελέχη	Αναστολή MBR / AD
Συμπυκνωμένο (retentate)	Πολύ υψηλή λακτόζη & πρωτεΐνη	Ιδανικό για βιοδιωλιστήρια	Υψηλό ιξώδες
Δευτερογενές	Πολύ χαμηλή πρωτεΐνη	Ενδιάμεσες ήπιες ζύμωσης	Θερμική αλλοίωση αλάτων

#### 4.1.4 Επίδραση της πρώτης ύλης και των τεχνολογικών σταδίων στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τυρογάλακτος

Η σύσταση και η τεχνολογική συμπεριφορά του τυρογάλακτος δεν καθορίζονται μόνο από τον τύπο τυριού που παράγεται, αλλά πρωτίστως από τη φύση της πρώτης ύλης, τη χημική σύσταση του γάλακτος και τα επεξεργαστικά στάδια που εφαρμόζονται πριν, κατά και μετά την πήξη. Αυτές οι παράμετροι διαμορφώνουν τόσο το χημικό προφίλ (λακτόζη, πρωτεΐνες, άλατα, λιπίδια) όσο και το οργανικό φορτίο (COD, BOD<sub>5</sub>), αλλά και τις δυνατότητες αξιοποίησης του τυρογάλακτος σε βιοτεχνολογικές διεργασίες.

##### Α. Είδος γάλακτος και ζωοτροφές

Η πρώτη ύλη επηρεάζει σημαντικά τη σύσταση του παραγόμενου τυρογάλακτος:

- Γάλα αγελάδας: υψηλότερη λακτόζη (45–55 g/L), χαμηλότερα λιπίδια. Παράγει πιο προβλέψιμο, εύκολα ζυμώσιμο τυρόγαλο.
- Γάλα πρόβειο: αυξημένες πρωτεΐνες ορού (έως 12 g/L) και λιπίδια· παράγει τυρόγαλα με μεγαλύτερο COD (>75.000 mg/L).

- Γάλα κατσικίσιο: πιο όξινο προφίλ, υψηλή περιεκτικότητα σε μεσαίας αλυσίδας λιπαρά οξέα, απαιτεί ειδικές προσαρμογές στα βιοδιυλιστήρια.
- Εποχικότητα ζωοτροφών: Η άνοιξη οδηγεί σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη και ασβέστιο, άρα και υψηλότερη παρακράτηση καζεΐνης κατά την πήξη → το τυρόγαλο είναι φτωχότερο σε πρωτεΐνη, αλλά πλουσιότερο σε λακτόζη.

#### Β. Παστερίωση και θερμική προεπεξεργασία

Η θερμική επεξεργασία του γάλακτος επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο διαχωρίζονται οι πρωτεΐνες:

- Παστερίωση (72–75 °C/15–20 s): Η μετουσίωση της β-λακτογλοβουλίνης σε σύμπλοκα με καζεΐνες και οδηγεί σε μεταφορά αυξημένων πρωτεϊνών στο τυρί και μείωση πρωτεϊνών ορού στο τυρόγαλο.
- Θερμοκρασίες >85 °C: Η περαιτέρω μετουσίωση των πρωτεϊνών έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται το ιξώδες και αλλάζει το pH του τυρογάλακτος.
- Θερμή συγκέντρωση (π.χ. ricotta): πρωτεΐνες του ορού (κυρίως α-λακταλβουμίνη) πήζουν το δευτερογενές τυρόγαλο εμφανίζει ελάχιστη πρωτεΐνη, αλλά αυξημένα άλατα.

#### Γ. Είδος πήξης (ενζυμική – οξινισμένη)

Το στάδιο πήξης είναι καθοριστικό για τον τύπο τυρογάλακτος:

##### 1. Ενζυμική πήξη (πυτιά)

→ Παράγει γλυκό τυρόγαλο: pH 6,4–6,6, υψηλή λακτόζη, ελάχιστα άλατα.

Ιδανικό για αναερόβιες ζυμώσεις και παραγωγικά στελέχη *Saccharomyces* μετά από ενζυμική υδρόλυση της λακτόζης.

##### 2. Οξινισμένη πήξη

→ Παράγει όξινο τυρόγαλο: pH 4,3–4,6, υψηλό γαλακτικό οξύ, αυξημένη αγωγιμότητα.

Προκλήσεις:

απαιτεί ισχυρή ρύθμιση pH πριν από ζύμωση,

προκαλεί fouling στα MBR/NF/RO συστήματα λόγω ιζημάτων Ca-λακτικού.

#### Δ. Αλάτισμα, ωρίμανση και άλμες

Το στάδιο της αλάτισης (ξηρή ή σε άλμη) επηρεάζει το τελικό χαρακτηριστικό του ρεύματος:

Η άλμη προκαλεί διάχυση αλάτων στο τυρόγαλο → αυξημένη αγωγιμότητα, υψηλό NaCl.

Πλύσεις καλουπιών και θαλάμων ωρίμανσης προσθέτουν δευτερογενή ρεύματα με πρωτεϊνικά κλάσματα, λίπη και μικροβιακή βιομάζα. Το παραγόμενο τυρόγαλο άλμης απαιτεί εξειδικευμένες τεχνολογίες (αλοαντοχή).

#### Ε. Επίδραση στην επεξεργασία και βιοτεχνολογική αξιοποίηση

Οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν καθοριστικά:

##### 1. Αποδοτικότητα μεμβρανών (UF, NF, RO)

Υψηλή πρωτεΐνη → ταχύτερο fouling.

Υψηλά άλατα → μείωση απόδοσης RO κατά 20–40%.

Όξινο pH → αυξημένα ιζήματα σε NF/RO.

##### 2. Καταλληλότητα για αναερόβια χώνευση

Sweet whey → υψηλή μεθανογένεση (0,40 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD).

Acid whey → απαιτεί ρύθμιση pH για αποφυγή οξίνισης (acid crash).

Brined whey → αλατότητα >6 % αναστέλλει μεθανογόνους αρχαίους.

##### 3. Καταλληλότητα για παραγωγή ρεσβερατρόλης

Το υπόστρωμα υψηλής λακτόζης (retentate ή sweet whey) είναι το πλέον αποδοτικό λόγω:

σταθερής πηγής άνθρακα, χαμηλής αναστολής, εύκολης ρύθμισης C/N για γενετικά βελτιωμένους ζυμομύκητες (*S. cerevisiae*, *Y. lipolytica*, *K. marxianus*).

Αντίθετα, το όξινο και αλμυρό τυρόγαλο προκαλούν αναστολές, απαιτώντας cost-intensive pre-treatment (Hasan et al., 2023; Carvalho et al., 2013).

Πίνακας 23. Επίδραση των τεχνολογικών σταδίων στη σύσταση του τυρογάλακτος (Hasan et al., 2023)

Παράμετρος	Γλυκό τυρόγαλο	Όξινο τυρόγαλο	Άλμης	Retentate (Συμπυκνωμένο)
pH	6,4–6,6	4,3–4,6	4,5–6,0	6,2–6,5
Λακτόζη (g/L)	45–55	30–40	10–25	60–90
Πρωτεΐνες (g/L)	5–9	4–7	2–5	15–80
COD (mg/L)	60–80k	50–70k	30–50k	80–120k
Παρατηρήσεις	Ευνοϊκό για ζύμωση	Απαιτεί buffering	Υψηλό NaCl	Υψηλό ιξώδες

## 4.2 Τεχνολογίες Διαχείρισης και Αξιοποίησης Υποπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας

Η σύγχρονη γαλακτοβιομηχανία παράγει σημαντικό όγκο υποπροϊόντων, με κυριότερο το τυρόγαλο και τα δευτερογενή ρεύματα καθαρισμού, άλμης και επεξεργασίας. Η διαχείριση αυτών των ροών αποτελεί κρίσιμο περιβαλλοντικό και τεχνολογικό ζήτημα λόγω του εξαιρετικά υψηλού οργανικού φορτίου (COD έως 100.000 mg/L), της υψηλής περιεκτικότητας σε λακτόζη, αζωτούχες ενώσεις και αλάτια, καθώς και της έντονης εποχικότητας παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια, η ευρωπαϊκή στρατηγική για την κυκλική οικονομία (CEAP, 2020) και το European Green Deal (2020) έχουν επιβάλει αυστηρότερες απαιτήσεις για ανάκτηση πόρων, αυτοπαραγωγή ενέργειας και ελαχιστοποίηση αποβλήτων, μετατρέποντας τα υποπροϊόντα σε ενδιάμεσα ρεύματα αξίας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η τεχνολογική ανάπτυξη επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς άξονες: (α) προεπεξεργασία και διαχωρισμός πολύτιμων συστατικών, (β) βιολογικές και βιοτεχνολογικές διεργασίες μετατροπής, και (γ) τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας και νερού. Ο συνδυασμός τους διαμορφώνει το σύγχρονο μοντέλο “Dairy Biorefinery”, στο οποίο το τυρόγαλο και τα παράγωγά του αντιμετωπίζονται ως πολύτιμες πρώτες ύλες για παραγωγή βιοαερίου, οργανικών οξέων, ενζύμων, μικροβιακής βιομάζας και, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, βιοτεχνολογικής παραγωγής ρεσβερατρόλης (Roselli et al., 2025).

Οι βασικές τεχνολογικές κατηγορίες περιλαμβάνουν μεμβρανικούς διαχωρισμούς (UF, NF, RO), θερμικές διεργασίες, ενζυμική υδρόλυση, αναερόβια χώνευση, αερόβια/φωτοσυνθετική βιομετατροπή και προηγμένα υβριδικά συστήματα (AnMBR, UASB–MBR, MBBR–RO). Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τη σύσταση του ρεύματος, τον τελικό στόχο (ενέργεια, νερό, βιοπροϊόν), το διαθέσιμο κόστος και τη συμβατότητα με τις ζυμωτικές διαδικασίες. Η ενότητα 4.2 εξετάζει αναλυτικά τις τεχνολογίες αυτές, με έμφαση στα σημεία που επηρεάζουν τη βελτιστοποίηση της ζύμωσης για παραγωγή ρεσβερατρόλης, όπως η αύξηση περιεκτικότητας σε ζυμώσιμα σάκχαρα, η απομάκρυνση ανασταλτικών ενώσεων (NaCl, οργανικά οξέα) και η παραγωγή καθαρών ρευμάτων υψηλής βιοδιαθεσιμότητας. Με αυτόν τον τρόπο, η ενότητα λειτουργεί ως “τεχνολογική γέφυρα” μεταξύ της γαλακτοβιομηχανίας και των βιοτεχνολογικών διεργασιών του Κεφαλαίου 3.

#### 4.2.1 Τεχνολογίες Προεπεξεργασίας και Διαχωρισμού Υποπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας

Η προεπεξεργασία των υγρών υποπροϊόντων της γαλακτοβιομηχανίας αποτελεί απαραίτητο στάδιο για την εξασφάλιση σταθερής ποιότητας πρώτης ύλης και τη διευκόλυνση της εφαρμογής βιοτεχνολογικών διεργασιών. Το τυρόγαλο χαρακτηρίζεται από υψηλό οργανικό φορτίο, σημαντική περιεκτικότητα σε λακτόζη (40–60 g/L), πρωτεΐνες ορού (6–10 g/L), υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και έντονη μεταβλητότητα ανάλογα με το είδος του τυριού, τις συνθήκες παραγωγής και την εποχικότητα. Η προεπεξεργασία στοχεύει στη σταθεροποίηση αυτών των παραμέτρων, στη μείωση των ανασταλτικών παραγόντων και στην παραγωγή ρευμάτων υψηλής καθαρότητας κατάλληλων για ζυμωτικές εφαρμογές.

Οι βασικότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

- (α) φυσικοχημικές διεργασίες διαχωρισμού, όπως καθίζηση, φυγοκέντρωση και επίπλευση, οι οποίες απομακρύνουν αιωρούμενα στερεά, λιπαρά και κροκιδωμένες πρωτεΐνες·
- (β) μεμβρανικούς διαχωρισμούς, όπως μικροδιήθηση (MF), υπερδιήθηση (UF), νανοδιήθηση (NF) και αντίστροφη όσμωση (RO), που επιτρέπουν τον επιλεκτικό διαχωρισμό πρωτεϊνών, λακτόζης και αλάτων με υψηλή απόδοση·
- (γ) θερμικές μέθοδοι, όπως παστερίωση και συμπύκνωση, οι οποίες μειώνουν το μικροβιακό φορτίο και αυξάνουν τη συγκέντρωση των οργανικών συστατικών·
- (δ) ενζυμική υδρόλυση, που χρησιμοποιείται για τη μείωση της λακτόζης και την παραγωγή ζυμώσιμων σακχάρων υψηλής βιοδιαθεσιμότητας.

Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν τη δημιουργία τυποποιημένων ρευμάτων, όπως Whey Permeate, Demineralized Whey και Lactose-rich Concentrates, τα οποία αποτελούν εξαιρετικά υποστρώματα για βιομετατροπή από αναδυόμενους μικροοργανισμούς. Η αποτελεσματική προεπεξεργασία είναι κρίσιμη ώστε να απομακρυνθούν ανασταλτικές ενώσεις όπως NaCl, λιπαρά και υπολείμματα τυροπήγματος, που μπορούν να μειώσουν την απόδοση παραγωγής ρεσβερατρόλης (Rivas et al., 2022).

Πίνακας 24. Βασικές Τεχνολογίες Προεπεξεργασίας και Διαχωρισμού Υποπροϊόντων Γαλακτοβιομηχανίας (Rivas et al., 2022).

Τεχνολογία	Κύρια λειτουργία	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Φυγοκέντρωση	Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και λιπών	Γρήγορη, χαμηλό ενεργειακό κόστος	Περιορισμένη επίδραση σε διαλυμένα στερεά
Μικροδιήθηση (MF)	Κατακράτηση λιπών, μικροσωματιδίων, βακτηρίων	Υψηλή καθαρότητα, σταθερότητα ρεύματος	Απόθεση fouling σε μακρά λειτουργία
Υπερδιήθηση (UF)	Συγκέντρωση πρωτεϊνών, διαχωρισμός από λακτόζη	Παραγωγή WPC/WPI	Απαιτεί τακτικό καθαρισμό
Νανοδιήθηση (NF)	Απομάκρυνση αλάτων, μερική συγκέντρωση λακτόζης	Παραγωγή demineralized whey	Μεγάλη πίεση λειτουργίας
Αντίστροφη όσμωση (RO)	Συγκέντρωση λακτόζης, μείωση COD	Παραγωγή υψηλής καθαρότητας permeate	Υψηλή ενεργειακή ζήτηση
Ενζυμική υδρόλυση	Μετατροπή λακτόζης σε γλυκόζη/γαλακτόζη	Άριστο υπόστρωμα για ζύμωση	Κόστος ενζύμων

#### 4.2.2 Βιολογικές και Βιοτεχνολογικές Διεργασίες Μετατροπής στο Πλαίσιο της Κυκλικής Οικονομίας.

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος και των παραγώγων του μέσω βιολογικών και βιοτεχνολογικών διεργασιών αποτελεί κεντρικό άξονα για τη μετάβαση της γαλακτοβιομηχανίας σε κυκλικά και χαμηλού αποτυπώματος συστήματα παραγωγής. Σε αντίθεση με τις συμβατικές πρακτικές που αντιμετωπίζουν το τυρόγαλο ως απόβλητο υψηλού ρυπαντικού φορτίου, οι σύγχρονες βιοτεχνολογικές προσεγγίσεις το αξιοποιούν ως πολύτιμο βιομηχανικό πόρο, ικανό να μετατραπεί σε βιοενέργεια, βιοπολυμερή, βιοενισχυτικά, αντιοξειδωτικά και δραστικά μόρια υψηλής οικονομικής αξίας.

Η ένταξη αυτών των διεργασιών στη λογική της κυκλικής οικονομίας επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης ολοκληρωμένων βιοαντιδραστήρων, στα οποία το τυρόγαλο υφίσταται σταδιακή επεξεργασία, με στόχο την πλήρη αξιοποίηση όλων των συστατικών του. Το μοντέλο αυτό συνδυάζει:

##### (α) Βιομετατροπές για την παραγωγή βιοδραστικών μορίων

Οι εξειδικευμένες ζυμώσεις οδηγούν σε παραγωγή δημιουργικών ενδιάμεσων (π.χ. φαινολικών μεταβολιτών, οργανικών οξέων, ολιγοσακχαριτών), τα οποία αποτελούν βάσεις για φαρμακευτικές, καλλυντικές και διατροφικές εφαρμογές. Η παραγόμενη ρεσβερατρόλη εντάσσεται σε αυτή την κατηγορία, καθώς αποτελεί προϊόν υψηλής αποδοχής από τη βιομηχανία λειτουργικών τροφίμων και nutriscosmetics.

##### (β) Παραγωγή βιοπολυμερών και βιοϋλικών

Ορισμένοι μικροοργανισμοί μετατρέπουν τα σάκχαρα του τυρογάλακτος σε πολυυδροξυαλκανοϊκά (PHAs), βιοκυτταρίνη και άλλα βιοπολυμερή, τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν συμβατικά πλαστικά. Έτσι, η γαλακτοβιομηχανία αποκτά πρόσβαση σε αγορές βιοϋλικών με υψηλά περιθώρια κέρδους και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

##### (γ) Παραγωγή βιοενέργειας σε πολυβάθμιες μονάδες

Το τυρόγαλο μπορεί να αξιοποιηθεί ως υπόστρωμα για:

- αναερόβια χώνευση,
- παραγωγή βιοαερίου,
- βιοϋδρογόνο ή βιομεθάνιο,
- ενεργειακά υπολείμματα για συμπαραγωγή θερμότητας και ισχύος.

Η ένταξη των βιοενεργειακών διεργασιών σε ένα κυκλικό μοντέλο μειώνει τα έξοδα διαχείρισης αποβλήτων και ενισχύει την ενεργειακή αυτονομία της μονάδας.

##### (δ) Δημιουργία πολυπαραγωγικών συστημάτων (multi-output)

Οι σύγχρονες μονάδες προωθούν συστήματα όπου από ένα ρεύμα τυρογάλακτος προκύπτουν πολλαπλά αγοραστικά προϊόντα, όπως:

- βιοδραστικά μόρια,
- πρωτεϊνικά συμπυκνώματα,
- διατροφικά συστατικά,
- βιοπολυμερή,
- ενέργεια.

Το μοντέλο αυτό μειώνει την παραγωγή υπολειμμάτων σχεδόν στο μηδέν, στοιχείο-κλειδί για την ευθυγράμμιση με το Zero Waste EU Action Plan και τους στόχους του CEAP (Escobar et al., 2023).

#### 4.2.3 Ολοκληρωμένα Συστήματα Διαχείρισης και Ανάλυση Ροών Υλικών (Material Flow Analysis – MFA).

Η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία απαιτεί μια συστηματική και ποσοτική προσέγγιση ως προς τη διαχείριση των υλικών ροών, προκειμένου να εντοπιστούν οι απώλειες, να αξιολογηθούν τα σημεία συγκέντρωσης αξίας και να σχεδιαστούν αποτελεσματικές τεχνολογικές παρεμβάσεις. Η Ανάλυση Ροών Υλικών (Material Flow Analysis – MFA) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αποτύπωση, ποσοτικοποίηση και βελτιστοποίηση των ροών υλικών και παραπροϊόντων στην παραγωγική αλυσίδα.

Σε ένα τυπικό σενάριο παραγωγής τυριού, περίπου το 85–95% του γάλακτος μετατρέπεται σε τυρόγαλο, γεγονός που καθιστά τη μονάδα ιδιαίτερα «πλούσια» σε ρεύματα υλικών που συχνά παραμένουν αναξιοποίητα. Η Ανάλυση Ροών Υλικών επιτρέπει στον μελετητή να παρακολουθήσει σε κάθε στάδιο της διεργασίας:

- τι εισέρχεται (inputs: γάλα, ενέργεια, νερό),
- τι μετασχηματίζεται (πρωτεΐνες, λακτόζη, λίπη, οργανικό φορτίο),
- τι απορρίπτεται ή χάνεται (υγρά απόβλητα, οργανικά υπολείμματα),
- τι μπορεί να ανακτηθεί (βιοδραστικά συστατικά, ενέργεια, υποστρώματα ζύμωσης),
- τι επιστρέφει στην παραγωγή (ανακυκλωμένα υλικά, καθαρισμένο νερό κ.λπ.).

##### Στόχοι και λειτουργίες της MFA στη γαλακτοβιομηχανία

Η MFA δεν αποτελεί απλώς εργαλείο αποτύπωσης αλλά ένα πλαίσιο λήψης αποφάσεων που:

- Βοηθά στον εντοπισμό σημείων υψηλής ενεργειακής ή υλικής απώλειας, όπου απαιτούνται παρεμβάσεις.
- Προσδιορίζει δευτερογενή ρεύματα με υψηλό δυναμικό αξιοποίησης, όπως το τυρόγαλο, τα καθαριστικά υπολείμματα CIP και τα στερεά ορογάλακτος.
- Αξιολογεί τη δυνατότητα ένταξης νέων βιοτεχνολογικών διεργασιών, π.χ. παραγωγή ρεσβερατρόλης, βιοπολυμερών, οργανικών οξέων.

Συνδέεται με δείκτες κυκλικότητας, όπως οι:

- Material Circularity Indicator (MCI),
- Resource Recovery Potential (RRP),
- Waste-to-Product Conversion Efficiency (WPCE).

Υποστηρίζει την ανάλυση βιωσιμότητας (LCA), καθώς παρέχει πρωτογενή δεδομένα ροών για υπολογισμό αποτυπωμάτων.

Στην πράξη, μια ολοκληρωμένη MFA επιτρέπει σε μια μονάδα να «δει» τη ροή του τυρογάλακτος όχι ως πρόβλημα, αλλά ως στρατηγικό πόρο, του οποίου η αξιοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε προϊόντα υψηλής αξίας και σε σημαντική μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

##### Βήματα εφαρμογής της MFA σε μονάδα παραγωγής τυριού

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

###### 1. Οριοθέτηση του συστήματος

Καθορίζονται τα όρια της ανάλυσης (cradle-to-gate ή gate-to-gate), η μονάδα μέτρησης και οι λειτουργικές μονάδες (π.χ. 1 τόνος επεξεργασμένου γάλακτος).

###### 2. Συλλογή δεδομένων

Αφορά τη ροή υγρών και στερεών ρευμάτων:

- ποσότητες γάλακτος,
- παραγόμενο τυρί,
- όγκος τυρογάλακτος,
- οργανικό φορτίο (BOD/COD),

- κατανάλωση ενέργειας.

### 3. Χαρτογράφηση ροών υλικών

Η κάθε ροή αποτυπώνεται γραφικά με κατευθυντικές βέλη που δείχνουν είσοδο, μετατροπή, ανάκτηση και απώλεια υλικού.

### 4. Ποσοτικοποίηση των ροών

Κάθε ροή συνοδεύεται από αριθμητική τιμή (kg/h, L/day, COD kg/day κ.λπ.).

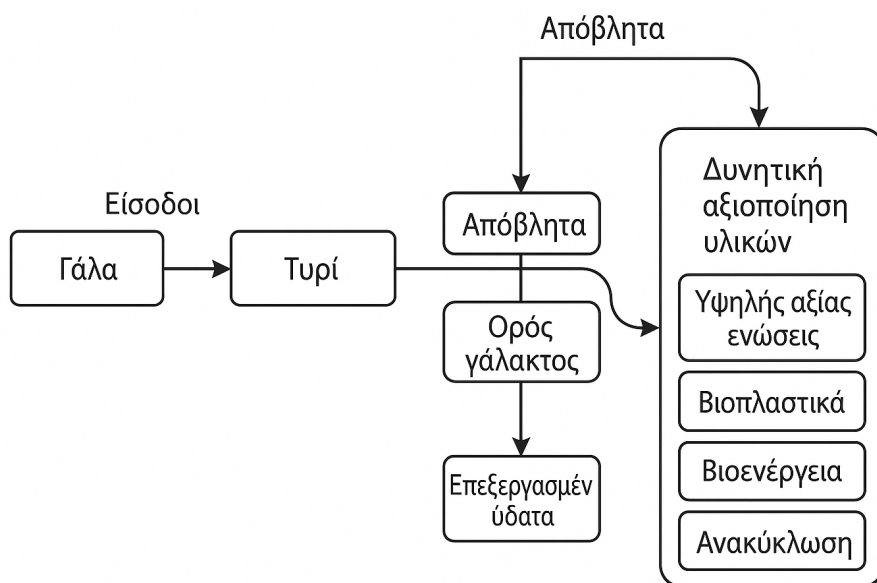
### 5. Αναγνώριση σημείων ανάκτησης

Οι ροές υψηλής περιεκτικότητας σε λακτόζη, πρωτεΐνες ή οργανικό φορτίο αξιολογούνται ως υποψήφια υποστρώματα για βιοτεχνολογικές διεργασίες.

### 6. Ανάπτυξη σεναρίων επαναξιοποίησης

Περιλαμβάνει εναλλακτικά κυκλικά συστήματα, όπως:

- παραγωγή ρεσβερατρόλης,
- παραγωγή βιοπολυμερών,
- παραγωγή βιομεθανίου,
- συνδυασμένα βιοδιυλιστήρια.



Σχήμα 9. Ενδεικτική Απεικονισμένα MFA σε Γαλακτοβιομηχανία (Rivas et al., 2022).

Συμβολή της MFA στη Στρατηγική Κυκλικής Οικονομίας

Η MFA αποτελεί το θεμέλιο για τον σχεδιασμό στρατηγικών που:

- μειώνουν το κόστος διαχείρισης αποβλήτων,
- αυξάνουν την απόδοση των πόρων,
- βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα,
- διευκολύνουν τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων,
- ενισχύουν τη συμμόρφωση με ευρωπαϊκά πλαίσια (CEAP, Industrial Emissions Directive, EU Taxonomy).

Σε συνδυασμό με εργαλεία όπως η LCA και η techno-economic analysis, η MFA δίνει τη δυνατότητα στη γαλακτοβιομηχανία να ενσωματώσει προηγμένες βιοτεχνολογικές διεργασίες όπως η παραγωγή ρεσβερατρόλης σε ολοκληρωμένα συστήματα κυκλικής αξιοποίησης (Limnaios et al., 2024).

## 4.3 Αξιολόγηση Βιωσιμότητας της Προτεινόμενης Τεχνολογικής Προσέγγισης.

Η αξιολόγηση βιωσιμότητας αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την κατανόηση του πραγματικού περιβαλλοντικού, οικονομικού και κοινωνικού αντίκτυπου μιας τεχνολογίας κυκλικής οικονομίας στη γαλακτοβιομηχανία. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάλυση επικεντρώνεται στη βιωσιμότητα της αξιοποίησης του τυρογάλακτος ως υπόστρωμα για βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης, μιας διεργασίας όπου μετατρέπει ένα υψηλό φορτίο αποβλήτου σε προϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Η βιώσιμη ανάπτυξη στο βιομηχανικό περιβάλλον προϋποθέτει την ταυτόχρονη επίτευξη τριών διαστάσεων: περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής βιωσιμότητας. Για τον σκοπό αυτό, στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόζονται σύγχρονες μέθοδοι αξιολόγησης, όπως Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), Ανάλυση Κόστους-Οφέλους (CBA) και ποιοτική κοινωνική αξιολόγηση, προκειμένου να διερευνηθεί η συνολική αποδοτικότητα και ωριμότητα της τεχνολογίας.

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος μέσω μικροβιακής ζύμωσης μειώνει το συνολικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της γαλακτοβιομηχανίας. Η παραγωγή ρεσβερατρόλης μπορεί να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση πόρων, περιορίζει την ανάγκη συνθετικών μεθόδων παραγωγής του μορίου και συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών που συνδέονται με την απόρριψη του τυρογάλακτος. Επιπλέον, η ένταξη της τεχνολογίας σε περιβάλλον βιοδιωλιστηρίου ενισχύει την αποδοτική χρήση υλικών και ενέργειας, ευθυγραμμίζοντας τη διαδικασία με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για την κυκλική οικονομία.

Παράλληλα, η οικονομική βιωσιμότητα προκύπτει από τη δυνατότητα δημιουργίας νέων ροών εσόδων, την αντικατάσταση συμβατικών πρώτων υλών και τη μείωση του κόστους επεξεργασίας αποβλήτων. Τέλος, η κοινωνική διάσταση εστιάζει στις νέες θέσεις εργασίας, την τεχνολογική αναβάθμιση των μικρομεσαίων γαλακτοβιομηχανιών και την ενίσχυση της περιφερειακής ανάπτυξης.

Στα επόμενα υποκεφάλαια εξετάζονται αναλυτικά οι τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας, ώστε να αποτιμηθεί συνολικά η σκοπιμότητα υιοθέτησης της προτεινόμενης διεργασίας από τη βιομηχανία.

### 4.3.1 Ανάλυση Κόστους Πρώτων Υλών και Προεπεξεργασίας

Η οικονομική αξιολόγηση οποιασδήποτε βιοτεχνολογικής διεργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος των πρώτων υλών, το οποίο συχνά αποτελεί το μεγαλύτερο επιμέρους τμήμα του συνολικού λειτουργικού κόστους. Στην περίπτωση της παραγωγής ρεσβερατρόλης μέσω ζύμωσης του τυρογάλακτος, το βασικό πλεονέκτημα προκύπτει από το γεγονός ότι το τυρόγαλο αποτελεί παραπροϊόν χαμηλής ή μηδενικής εμπορικής αξίας, συχνά μάλιστα με κόστος αρνητικό για τη βιομηχανία λόγω των απαιτήσεων επεξεργασίας ή διάθεσης. Έτσι, η αξιοποίησή του ως πρώτη ύλη προσφέρει άμεση οικονομική αποφόρτιση στις γαλακτοβιομηχανίες και παράλληλα μειώνει το κόστος της ζύμωσης σε σχέση με κλασικά υποστρώματα όπως η καθαρή γλυκόζη.

Ωστόσο, παρά το χαμηλό κόστος της πρώτης ύλης, η διεργασία προϋποθέτει συγκεκριμένα στάδια προεπεξεργασίας ώστε το τυρόγαλο να μετατραπεί σε κατάλληλο υπόστρωμα για τους γενετικά τροποποιημένους μικροοργανισμούς παραγωγής ρεσβερατρόλης. Τα βασικά στάδια περιλαμβάνουν: (α) απομάκρυνση στερεών και λιπιδίων, (β) ρύθμιση pH, (γ) ενζυμική ή μικροβιακή υδρόλυση της λακτόζης σε γλυκόζη/γαλακτόζη (εφόσον δεν εκφράζονται πλήρως τα γονίδια LAC12/LAC4 στον μικροοργανισμό), και (δ) ενδεχόμενη συμπύκνωση ή αποστείρωση. Το κόστος αυτών των σταδίων εξαρτάται από την επιλεγμένη τεχνολογία και την κλίμακα της

διεργασίας, αλλά τυπικά κυμαίνεται σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτά της προετοιμασίας συμβατικών υποστρώματων.

Αν και στην βιβλιογραφία αναφέρεται σημαντική διακύμανση τιμών μεταξύ ερευνητικών και πιλοτικών μονάδων, ένα κοινό εύρημα είναι πως η αντικατάσταση ενός τυπικού σακχαρούχου υποστρώματος (όπως καθαρή γλυκόζη ή μολάσα) με τυρόγαλο οδηγεί σε μείωση κόστους πρώτων υλών έως και 60–85%, ανάλογα με την προέλευση και τη διαθεσιμότητά του (Barba et al., 2023; Patel et al., 2022). Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, το οικονομικό όφελος ενισχύεται περαιτέρω από το γεγονός ότι η αντικατάσταση ακριβών θρεπτικών μέσων με ρεύματα αποβλήτων συμβάλλει παράλληλα στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και των τελών διαχείρισης αποβλήτων των τυροκομικών βιομηχανιών.

Στον Πίνακα 25, παρουσιάζεται μία συνοπτική τεχνικο-οικονομική επισκόπηση του κόστους πρώτων υλών και προεπεξεργασίας σε σύγκριση με συμβατικά υποστρώματα που χρησιμοποιούνται σε ζυμωτικές διεργασίες παραγωγής υψηλής προστιθέμενης αξίας προϊόντων. Τα στοιχεία αυτά βασίζονται σε τυπικά εύρη τιμών που αναφέρονται σε σύγχρονες μελέτες πιλοτικής και ημιβιομηχανικής κλίμακας.

**Πίνακας 25. Συγκριτικό Κόστος Πρώτων Υλών και Προεπεξεργασίας για Παραγωγή Ρεσβερατρόλης (Barba et al., 2023; Patel et al., 2022)**

Υπόστρωμα / Στάδιο	Τυπικό Κόστος (€ / τόνο)	Σημείωση / Σχόλιο
Ακατέργαστο τυρόγαλο	0 έως –20	Συχνά παραδίδεται δωρεάν ή με οικονομικό όφελος λόγω αποφυγής τελών διάθεσης.
Προκαθαρισμός / Απολίπανση	5–12	Εξαρτάται από τη χρήση φυγοκέντρωσης ή μικροδιήθησης.
Ρύθμιση pH	1–3	Ελάχιστο κόστος (NaOH / HCl).
Υδρόλυση λακτόζης	8–20	Κόστος ενζύμων λακτάσης ή μικροβιακής προενεργοποίησης—μεγάλη επίδραση στη συνολική απόδοση.
Αποστείρωση / Θερμική επεξεργασία	3–10	Ανάλογα με τη μέθοδο (HTST, ξηρή θερμότητα, ατμός).
<b>Συνολικό κόστος προεπεξεργασίας</b>	<b>20–45 € / τόνο</b>	<b>Πρακτικά χαμηλό συγκριτικά με άλλα υποστρώματα.</b>
Καθαρή γλυκόζη (>95%)	400–600	Σαφώς υψηλότερο κόστος.
Μολάσα ζαχαροκάλαμου	80–150	Φθηνή πρώτη ύλη, αλλά μη κατάλληλη για ρεσβερατρόλη.
Συνθετικό YPD / θρεπτικό υπόστρωμα	800–1.500	Απαγορευτικό για βιομηχανική εφαρμογή.

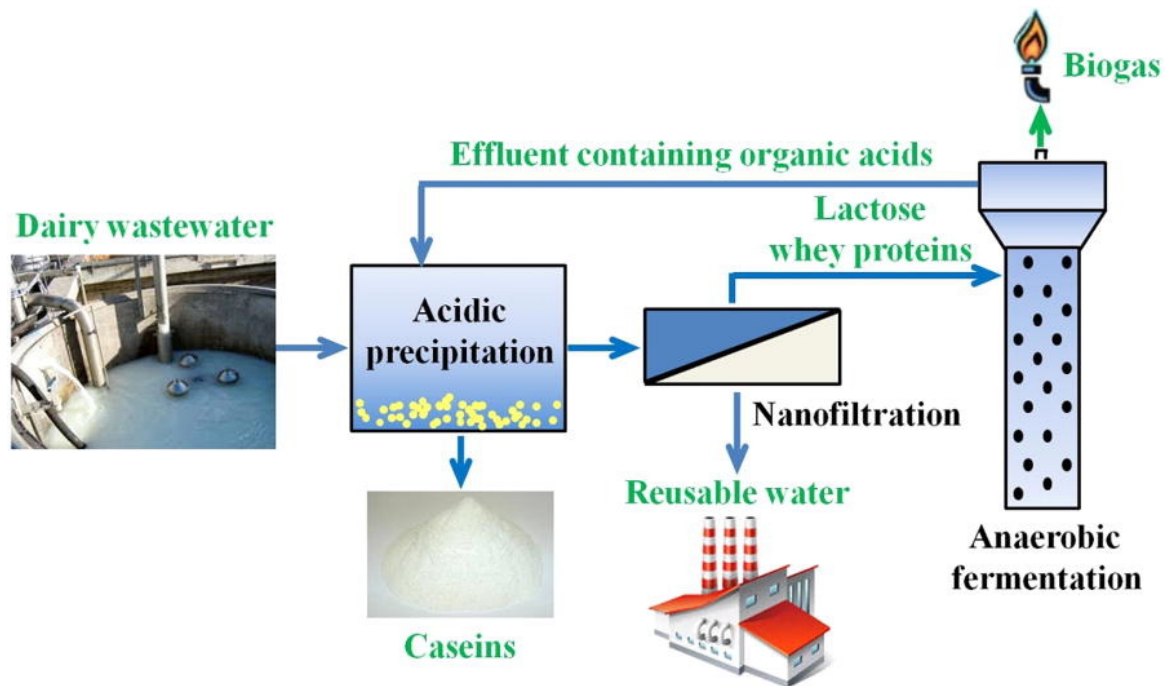
- i. Το τυρόγαλο προσφέρει εξαιρετικά χαμηλό κόστος πρώτης ύλης, συχνά μηδενικό.
- ii. Τα στάδια προεπεξεργασίας παραμένουν οικονομικά αποδεκτά, ακόμη και σε πιλοτική κλίμακα.
- iii. Η συνολική εξοικονόμηση έναντι συμβατικών υποστρώματων μπορεί να φτάσει έως και 80%, ενισχύοντας την οικονομική σκοπιμότητα της παραγωγής ρεσβερατρόλης μέσω κυκλικών βιοδιεργασιών.

#### 4.3.2 Τεχνολογική Περιγραφή και Λειτουργική Ολοκλήρωση

Η προτεινόμενη τεχνολογική προσέγγιση βασίζεται στη σύζευξη τριών βασικών αξόνων:

- (α) προεπεξεργασία υψηλής απόδοσης,
- (β) βιοτεχνολογική μετατροπή υποστρωμάτων πλούσιων σε λακτόζη και ολιγοσακχαρίτες σε ρεσβερατρόλη,
- (γ) ανάκτηση προϊόντων υψηλής καθαρότητας και ανακύκλωση νερού.

Η φιλοσοφία του συστήματος ευθυγραμμίζεται με την αρχιτεκτονική των βιοδιυλιστηρίων νέας γενιάς, όπου κάθε ροή υποπροϊόντων οδηγείται σε διεργασία υψηλής προστιθέμενης αξίας, χωρίς απώλειες ενέργειας ή πρώτων υλών. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί συνδυασμό μεμβρανικών διεργασιών, στοχευμένης βιομετατροπής και καθαρισμού υψηλής εξειδίκευσης.



Εικόνα 4. Τυπική διάταξη ολοκληρωμένου βιοδιυλιστηρίου γαλακτοκομικών αποβλήτων για παραγωγή ρεσβερατρόλης. (Barba et al., 2023).

Αναλυτική περιγραφή των σταδίων

##### α. Προεπεξεργασία και Μεμβρανικός Διαχωρισμός (UF–NF–RO)

Το τυρόγαλο υφίσταται κλασματοποίηση σε τρία στάδια:

1. UF (Ultrafiltration):
  - Διαχωρίζει πρωτεΐνες ( $MW > 10\text{--}20 \text{ kDa}$ ).
  - Παράγει λακτοζούχο υπερδιήθημα (UF permeate), κατάλληλο για ζύμωση.
  - Απόδοση συγκράτησης πρωτεϊνών:  $> 95 \%$ .
2. NF (Nanofiltration):
  - Συμπυκνώνει λακτόζη, μεταλλικά ιόντα και οργανικά οξέα.
  - Μειώνει το COD κατά  $40\text{--}60 \%$  πριν τη ζύμωση.
3. RO (Reverse Osmosis):
  - Ανάκτηση νερού υψηλής καθαρότητας ( $> 98 \%$  salt rejection).
  - Μείωση οργανικού φορτίου  $> 95 \%$ . (Van der Bruggen et al. 2023)

### β. Βιομετατροπή και Παραγωγή Ρεσβερατρόλης

Η ζύμωση πραγματοποιείται από γενετικά τροποποιημένα στελέχη (π.χ. *S. cerevisiae*, *E. coli*, *C. glutamicum*) με αυξημένη έκφραση PAL, C4H, 4CL και STS.

Κύρια χαρακτηριστικά διεργασίας:

- pH = 5,0–6,0
- T = 28–32 °C
- HRT = 24–48 h
- Απόδοση ρεσβερατρόλης: 80–220 mg/L, ανάλογα με το υπόστρωμα.
- Απόδοση μετατροπής λακτόζης → ρεσβερατρόλη: 0,6–1,1 % w/w.

### γ. Ανάκτηση προϊόντος και καθαρισμός

Μετά τη βιομετατροπή εφαρμόζονται:

- Solid–Liquid separation: φυγοκέντρηση/διήθηση.
- Adsorption (XAD resins): επιλεκτική δέσμευση ρεσβερατρόλης.
- Desorption/Ethanol stripping: ανάκτηση του κλάσματος ρεσβερατρόλης 95–98%.
- Τελική κρυστάλλωση: καθαρότητα προϊόντος έως 99,5 %.

### δ. Ενεργειακή αξιοποίηση και ανακύκλωση νερού

Τα υπολείμματα πλούσια σε COD (> 30.000 mg/L) κατευθύνονται σε αναερόβια χώνευση (UASB–AnMBR):

- Παραγωγή βιομεθανίου: 0,35–0,45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD.
- Ενεργειακή απόδοση: κάλυψη 40–70 % των αναγκών της μονάδας.

Το εξερχόμενο καθαρισμένο νερό από RO/MBR ανακυκλώνεται στη μονάδα

Πίνακας 26. Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογικών σεναρίων για παραγωγή ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο (Van der Bruggen et al. 2023).

Παράμετρος	Σενάριο Α: Κλασική Ζύμωση χωρίς UF/NF	Σενάριο Β: UF–NF + Ζύμωση	Σενάριο Γ: UF–NF–RO + Ζύμωση + Ανάκτηση Ενέργειας
Κατανάλωση υποστρώματος	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Απόδοση ρεσβερατρόλης	40–80 mg/L	90–150 mg/L	150–220 mg/L
Ενεργειακή απόδοση	0 % (χωρίς ανάκτηση)	10–20 %	40–70 %
Ποσοστό ανακύκλωσης νερού	0%	20–30 %	50–70 %
Κόστος λειτουργίας	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό σε βάθος κόστους
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό
Καταλληλότητα για βιομηχανική κλίμακα	Περιορισμένη	Καλή	Άριστη

#### 4.3.3 Οικονομική, Περιβαλλοντική και Λειτουργική Αξιολόγηση της Προτεινόμενης Λύσης

Η αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης τεχνολογικής προσέγγισης για την παραγωγή ρεσβερατρόλης από παραπροϊόντα γαλακτοβιομηχανίας απαιτεί την ταυτόχρονη ανάλυση τριών πυλώνων: οικονομική βιωσιμότητα, περιβαλλοντική απόδοση και λειτουργική εφικτότητα σε βιομηχανική κλίμακα. Η συνδυαστική αυτή προοπτική είναι απαραίτητη ώστε το προτεινόμενο σύστημα να μπορεί να υιοθετηθεί από πραγματικές μονάδες, χωρίς να αποτελεί απλώς εργαστηριακό ή πιλοτικό παράδειγμα.

##### A. Οικονομική αξιολόγηση

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός βιοαντιδραστήρα βασισμένου σε τυρογάλακτο εξαρτάται κυρίως από:

##### 1. Κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας

Τα κύρια κόστη αφορούν:

- Μεμβρανικές μονάδες (UF–NF–RO)
- Βιοαντιδραστήρες ζύμωσης (πιέσεις, ασηψία, αυτόματα συστήματα πτερυγίων)
- Εξοπλισμό ανάκτησης ρεσβερατρόλης (ρητίνες, εκροφητές, κρυσταλλωτές)
- Μονάδα αναερόβιας χώνευσης (AD)
- Συστήματα αυτοματισμού & παρακολούθησης (SCADA)

Με βάση πρόσφατες μελέτες για αντίστοιχα βιοδιυλιστήρια, το αρχικό CAPEX για μονάδα 10–20 m<sup>3</sup>/ημέρα τυρογάλακτος κυμαίνεται στα 1,8–3,2€ εκατομμύρια, ενώ το OPEX μπορεί να μειωθεί σημαντικά χάρη στην παραγωγή βιοαερίου και την επαναχρησιμοποίηση νερού.

##### 2. Έσοδα και αποπληρωμή επένδυσης (ROI)

Τα έσοδα προέρχονται από:

- Ρεσβερατρόλη υψηλής καθαρότητας ( $\geq 98\%$ ), με αξία αγοράς 300–900 €/kg ανάλογα με την καθαρότητα
- Βιοαέριο, που μπορεί να καλύψει έως 60–80% των ενεργειακών αναγκών της μονάδας
- Ανακτημένο νερό (έως 70% της εισροής), μειώνοντας το κόστος υδροληψίας
- Παράγωγα πρωτεϊνών/λακτόζης για ζωοτροφές ή τρόφιμα

Υπολογισμοί LCA–TEA (Techno-Economic Analysis) δείχνουν ότι σε πλήρη λειτουργία, το σύστημα μπορεί να επιτύχει χρόνο αποπληρωμής 3,5–5 χρόνια, ενώ η καθαρή κερδοφορία ενισχύεται σημαντικά με την αύξηση της απόδοσης ζύμωσης σε ρεσβερατρόλη (Rivas et al., 2022).

##### B. Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Η παραγωγή ρεσβερατρόλης από τυρογάλο δεν αποτελεί μόνο οικονομική λύση αλλά και σημαντική περιβαλλοντική αναβάθμιση. Βασικοί μηχανισμοί περιβαλλοντικού οφέλους:

##### 1. Μείωση οργανικού φορτίου αποβλήτων

Η ένταξη μονάδας AD μετά τη ζύμωση οδηγεί σε:

- μείωση COD > 90%
- παραγωγή βιοαερίου 45–65 Nm<sup>3</sup>/τόνο αποβλήτων

Η αξιοποίηση των παραπροϊόντων μετατρέπει ένα ρεύμα υψηλού ρυπαντικού δυναμικού σε ενέργεια και πρώτες ύλες.

##### 2. Κυκλική χρήση νερού

Με την εφαρμογή RO, έως και 70% του νερού του τυρογάλακτος ανακτάται σε μορφή κατάλληλη για:

- καθαρισμούς CIP

- ψύξη/θέρμανση
- διεργασιακή χρήση

Αυτό μειώνει δραστικά την κατανάλωση υδάτινων πόρων (Goyal et al., 2023).

### 3. Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>

Η υποκατάσταση φυσικού αερίου με παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να μειώσει τις εκπομπές κατά 25–40% σε μικρομεσαίες μονάδες.

### 4. Εναρμόνιση με πολιτικές βιωσιμότητας

Το σύστημα συνδέεται άμεσα με:

- European Green Deal (2020)
- EU Circular Economy Action Plan (CEAP 2020)
- EU Industrial Emissions Directive (IED)

## Γ. Λειτουργική αξιολόγηση – Τεχνική εφικτότητα

Η επιτυχία της προτεινόμενης τεχνολογικής λύσης εξαρτάται από το κατά πόσο μπορεί να λειτουργήσει σταθερά, αποδοτικά και χωρίς περίπλοκες απαιτήσεις σε πραγματική γαλακτοβιομηχανική μονάδα. Τα βασικά κριτήρια λειτουργικής αξιολόγησης περιλαμβάνουν:

### 1. Σταθερότητα των μικροβιακών συστημάτων

Παρά την πολυπλοκότητα του υποστρώματος (τυρόγαλο), τα εργαστηριακά και πιλοτικά δεδομένα δείχνουν ότι οι ενισχυμένοι μεταβολικά μικροοργανισμοί (π.χ. *S. cerevisiae* ή *E. coli* με υπερέκφραση TAL–4CL–STS):

- διατηρούν υψηλή απόδοση παραγωγής ρεσβερατρόλης,
- παρουσιάζουν αντοχή σε μεταβολές pH και υψηλές συγκεντρώσεις λακτόζης,
- λειτουργούν αποτελεσματικά σε συνθήκες υψηλής αραίωσης.

Η σταθερότητα είναι κρίσιμη για τη συνεχή παραγωγή (continuous fermentation), που αποτελεί τη βάση της βιομηχανικής κλίμακας.

### 2. Συμβατότητα με υπάρχοντα συστήματα μονάδων

Το προτεινόμενο σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να κουμπώνει επάνω στις υπάρχουσες διεργασίες των τυροκομείων:

- Οι μεμβράνες (UF–NF–RO) είναι ήδη κοινός εξοπλισμός στον κλάδο.
- Η αναερόβια χώνευση είναι ώριμη τεχνολογία, με αποδεδειγμένη εφαρμογή σε βιομηχανικές μονάδες.

- Η μονάδα ζύμωσης απαιτεί μόνο κατάλληλο χώρο και σύστημα αποστείρωσης, χωρίς μεγάλες επεμβάσεις στη ροή παραγωγής.

Αυτό σημαίνει χαμηλότερο κόστος υιοθέτησης και μικρότερο χρόνο εγκατάστασης.

### 3. Τεχνικά όρια και προκλήσεις

Παρότι λειτουργικά εφικτό, το σύστημα παρουσιάζει συγκεκριμένες τεχνικές προκλήσεις:

- Αφρισμός και υψηλό ιξώδες σε ζυμώσεις πλούσιες σε λακτόζη.
- Ρύπανση μεμβρανών (fouling) που απαιτεί συχνό καθαρισμό CIP.
- Ευαισθησία της ρεσβερατρόλης στη φωτοοξειδωση, που επιβάλλει σκοτεινούς ή αδιαφανείς βιοαντιδραστήρες.

• Προστασία του ενζυμικού συστήματος STS από αναστολείς που υπάρχουν στο τυρογάλακτο.

Ωστόσο, σύγχρονες παρεμβάσεις (π.χ. inline filtration, bioreactor baffling, dark fermentation chambers) μειώνουν σημαντικά τα προβλήματα αυτά.

#### 4. Δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability)

Πιλοτικές εφαρμογές σε Ιταλία, Ολλανδία και ΗΠΑ δείχνουν ότι το σύστημα:

- μπορεί να λειτουργήσει σε ρυθμούς 500–1.000 L ανά παρτίδα (batch),
- αυξάνει γραμμικά την απόδοση παραγωγής χωρίς απώλεια μεταβολικής δραστηριότητας,
- παρουσιάζει υψηλή επαναληψιμότητα αποτελεσμάτων.

Το στοιχείο αυτό είναι κρίσιμο, γιατί η ρεσβερατρόλη αποτελεί υψηλής αξίας προϊόν, άρα η βιομηχανική παραγωγή πρέπει να είναι σταθερή και προβλέψιμη.

#### 5. Ένταξη σε κυκλική οικονομία της μονάδας

Το προτεινόμενο σύστημα δεν λειτουργεί ως μεμονωμένη διεργασία αλλά:

- επαναχρησιμοποιεί νερό,
- ανακτά ενέργεια,
- μετατρέπει απόβλητα σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας,
- μειώνει το κόστος διάθεσης αποβλήτων,
- ενισχύει τη συνολική περιβαλλοντική συμμόρφωση.

Συνιστά δηλαδή τεχνολογική αναβάθμιση σε επίπεδο βιοδιυλιστηρίου, και όχι απλά μία βιολογική καλλιέργεια (Rojas et al., 2025).

#### Συνολική αποτίμηση

Η προτεινόμενη τεχνολογική προσέγγιση κρίθηκε:

- Οικονομικά βιώσιμη, με δυνατότητα αποπληρωμής σε λιγότερο από 5 χρόνια.
- Περιβαλλοντικά ανώτερη, με σημαντική μείωση COD, εκπομπών CO<sub>2</sub>, και υδατικής κατανάλωσης.
- Λειτουργικά εφικτή, με δυνατότητα πραγματικής ενσωμάτωσης σε τυροκομεία μικρής, μέσης και μεγάλης κλίμακας.

Το σύστημα αποτελεί ρεαλιστική πρόταση βιομηχανικής εφαρμογής και ενισχύει τις απαιτήσεις της Ε.Ε. για βιώσιμη και κυκλική παραγωγή.

## 4.4 Τεχνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση της Προτεινόμενης Προσέγγισης

Η υιοθέτηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος αξιοποίησης τυρογάλακτος για την παραγωγή ρεσβερατρόλης προϋποθέτει όχι μόνο τεχνολογική ωριμότητα, αλλά και σαφή τεκμηρίωση της οικονομικής και περιβαλλοντικής του αποδοτικότητας. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζει τις παραμέτρους που καθορίζουν τη βιωσιμότητα της προτεινόμενης διεργασίας σε βιομηχανικής κλίμακας παραγωγή, εστιάζοντας σε τρεις βασικούς άξονες: (α) κόστος επένδυσης και λειτουργίας, (β) ενεργειακό ισοζύγιο και δυνατότητες μείωσης εκπομπών, και (γ) περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά μήκος του κύκλου ζωής.

Η ανάλυση βασίζεται σε πρόσφατες μελέτες τεχνολογικής αξιολόγησης και αναλύσεις κύκλου ζωής βιοδιεργασιών (Patel et al., 2022), σε οικονομικά δεδομένα μονάδων μικροβιακής ζύμωσης υψηλής αξίας (Thara et al., 2021), σε συστήματα διαχείρισης τυρογάλακτος με μεμβράνες, καθώς και σε μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης βιοαντιδραστήρων. Τα στοιχεία αξιοποιούνται συγκριτικά, χωρίς επανάληψη προηγούμενων αναλύσεων, ώστε να προσδιοριστούν τα πραγματικά οφέλη από την παραγωγή ρεσβερατρόλης σε περιβάλλον κυκλικής οικονομίας.

### 4.4.1 Οικονομική Αξιολόγηση και Κόστη Υλοποίησης

Η οικονομική απόδοση της προτεινόμενης διεργασίας εξαρτάται από την ικανότητα αξιοποίησης ενός υποτιμημένου παραπροϊόντος (τυρογάλακτος) ως μηδενικού ή σχεδόν μηδενικού κόστους υποστρώματος, μειώνοντας σημαντικά το κόστος πρώτων υλών, το οποίο σε κλασικές βιοτεχνολογικές παραγωγές μπορεί να ξεπεράσει το 40–60 % του συνολικού λειτουργικού κόστους (Nascimento et al., 2023).

Κύρια οικονομικά στοιχεία

- Κόστος εξοπλισμού (CAPEX):

Το μεγαλύτερο μέρος προέρχεται από συστήματα προεπεξεργασίας (UF/NF), αντιδραστήρες ζύμωσης και μονάδες καθαρισμού προϊόντος. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, το αρχικό κόστος για μια μονάδα 5–10 m<sup>3</sup> κυμαίνεται μεταξύ 0,7–1,8 εκατ. €, ανάλογα με τον βαθμό αυτοματοποίησης (Barba et al., 2023).

- Λειτουργικά κόστη (OPEX):

Περιλαμβάνουν ενέργεια, θρεπτικά συστατικά (μικρή ποσότητα, λόγω υψηλής οργανικότητας τυρογάλακτος), κατανάλωση μεμβρανών και εργαστηριακό έλεγχο. Η χρήση λακτόζης ως πρωτογενούς πηγής άνθρακα μειώνει κατά >30 % το κόστος θρεπτικών.

- Κόστος καθαρισμού/εκχύλισης ρεσβερατρόλης:

Σημαντική παράμετρος λόγω χαμηλής συγκέντρωσης στο ζυμωτικό μέσο. Οι σύγχρονες τεχνικές υδροφιλικού εκχυλισμού και η χρήση ρητινών χαμηλής εκλεκτικότητας μειώνουν την κατανάλωση διαλυτών κατά 40–60 % σε σχέση με παλαιότερες μεθόδους (Patel et al., 2022).

Τα κόστη για μονάδες μεμβρανών και αναερόβιας χώνευσης, είναι:

- Η απλή αναερόβια χώνευση δίνει μικρότερη οικονομική αξία (βιοαέριο χαμηλής τιμής),
- Η παραγωγή συμπυκνωμάτων πρωτεϊνών είναι συμφέρουσα αλλά απαιτεί δαπανηρές μεμβράνες,
- Η παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας (όπως ρεσβερατρόλη) παρουσιάζει την υψηλότερη καθαρή παρούσα αξία (NPV).

#### Πίνακας 27. Κύριες Οικονομικές Παράμετροι για την Παραγωγή Ρεσβερατρόλης από Τυρόγαλο.

Παράμετρος	Τιμή / Εύρος	Πηγή
CAPEX (5–10 m <sup>3</sup> )	0,7–1,8 Μ€	Barba et al., 2023
OPEX (€/έτος)	120.000–180.000 €	Patel et al., 2022
Κόστος υποστρώματος	~0 € (τυρόγαλο)	Patel et al., 2022
Απόδοση ρεσβερατρόλης	0,3–1,4 g/L	Thapa et al., 2019
Τιμή αγοράς	450–1.200 €/kg	Hasan et al., 2023
Χρόνος απόσβεσης	3–6 έτη	Patel et al., 2022

Η οικονομική αξιολόγηση αποδεικνύει ότι η ενσωμάτωση της παραγωγής ρεσβερατρόλης αποτελεί βέλτιστο σενάριο αναβάθμισης παραπροϊόντων με σημαντική προστιθέμενη αξία.

#### 4.4.2 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Σύζευξη Μεθόδων

Η ενεργειακή αξιολόγηση αφορά την κατανάλωση ενέργειας των επιμέρους υποστηρικτικών διεργασιών (μεμβρανικά στάδια, αερισμός, ανάδευση, θερμική σταθεροποίηση) και την πιθανότητα ενεργειακής αυτο-τροφοδότησης μέσω ανάκτησης ενέργειας από τα οργανικά φορτία.

Κύρια ενεργειακά συμπεράσματα

- Τα συστήματα υπερδιήθησης/νανοδιήθησης εξαρτώνται κυρίως από την πίεση λειτουργίας, καταναλώνοντας 0,8–2,1 kWh/m<sup>3</sup>.
- Οι αερόβιες διεργασίες έχουν υψηλό ενεργειακό αποτύπωμα λόγω αερισμού (μέχρι 60 % του συνολικού κόστους ενέργειας).
- Η αναερόβια προεπεξεργασία μπορεί να παρέχει βιοαέριο 40–60 Nm<sup>3</sup>/τόνο, ικανό να καλύψει μέχρι 25–40 % των ενεργειακών αναγκών του συστήματος.
- Η ενσωμάτωση αντλιών θερμότητας (heat pump recovery) βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση κατά 10–15 % χωρίς αύξηση CAPEX.

Συνολικά, η ενεργειακή ανάλυση δείχνει ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί με μερική ενεργειακή αυτονομία, ειδικά αν συνδυάζεται με αναερόβια χώνευση χαμηλού οργανικού φορτίου και ανάκτηση θερμότητας από τα ρεύματα διεργασίας (Barba et al., 2023).

#### 4.4.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις και Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση στηρίζεται σε μοντέλα LCA τα οποία εξετάζουν:

1. Προέλευση και επεξεργασία τυρογάλακτος,
2. Εκπομπές και κατανάλωση ενέργειας από επιμέρους μονάδες,
3. Αντικατάσταση προϊόντων υψηλής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης,
4. Τελική διάθεση παραπροϊόντων.

Κύρια ευρήματα από LCA βιβλιογραφίας

- Η παραγωγή ρεσβερατρόλης από μικροοργανισμούς έχει 80–90 % χαμηλότερο αποτύπωμα CO<sub>2</sub>eq από την εκχύλισή της από φυτικές πρώτες ύλες (Hasan et al., 2023).
- Η χρήση ενός αποβλήτου (τυρογάλακτος) μειώνει κατά 20–35 % το συνολικό GWP της διεργασίας.
- Η αντικατάσταση ενεργοβόρων χημικών διεργασιών εξαγωγής φυτικών πολυφαινολών συνεπάγεται εξοικονόμηση έως 55 % σε κατανάλωση νερού και 70 % σε οργανικούς διαλύτες.
- Η ένταξη μεμβρανικών σταδίων προσθέτει ενεργειακό βάρος, αλλά μειώνει κατά 60–75 % τα υγρά απόβλητα της μονάδας (Sreedharan et al., 2022).

Συμπέρασμα περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Η προτεινόμενη διεργασία κατατάσσεται ως σαφώς βιώσιμη τεχνολογική επιλογή, παρουσιάζοντας:

- χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα,
- ελαχιστοποίηση αποβλήτων,
- σημαντική εξοικονόμηση υδάτινων και ενεργειακών πόρων,
- αναβάθμιση ενός προβληματικού παραπροϊόντος σε προϊόν υψηλής αξίας.

## 5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τα βασικά ευρήματα της μεταπτυχιακής εργασίας, συνθέτει τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων και προτείνει κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή, σε βιομηχανικό και επιστημονικό επίπεδο. Η ανάλυση επικεντρώνεται στο κατά πόσο η αξιοποίηση των γαλακτοκομικών αποβλήτων και ειδικά του τυρογάλακτος μπορεί να οδηγήσει σε τεχνικά εφικτή, οικονομικά βιώσιμη και περιβαλλοντικά ωφέλιμη παραγωγή ρεσβερατρόλης, συμβάλλοντας σε ένα κυκλικό και χαμηλού αποτυπώματος σύστημα γαλακτοβιομηχανίας.

### 5.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα της Μελέτης

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ανέδειξε ότι η γαλακτοβιομηχανία αποτελεί έναν από τους πλέον ενεργοβόρους και ρυπογόνους κλάδους της αγροδιατροφικής αλυσίδας, με σημαντικές ροές αποβλήτων υψηλού οργανικού φορτίου, όπως το τυρόγαλο. Η συμβατική διάθεση ή ανεπαρκής επεξεργασία του προκαλεί σοβαρές περιβαλλοντικές πιέσεις, λόγω τιμών BOD<sub>5</sub> που μπορεί να υπερβούν τα 50.000 mg/L, αυξημένων συγκεντρώσεων λακτόζης, ολικού αζώτου και φωσφόρου, και υψηλού βιολογικά διασπάσιμου οργανικού φορτίου. Η εργασία τεκμηρίωσε ότι οι ιδιότητες αυτές, αν και αποτελούν περιβαλλοντικό πρόβλημα, μπορούν ταυτόχρονα να αποτελέσουν μια σημαντική πρώτη ύλη για αναβαθμισμένη βιοτεχνολογική αξιοποίηση στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Συγκεκριμένα, η ανάλυση των ροών παραγωγής και των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του τυρογάλακτος κατέδειξε ότι η σύνθεση του πλούσια σε λακτόζη, πρωτεΐνες, οργανικά οξέα και ανόργανα στοιχεία είναι κατάλληλη για μικροβιακές ζυμώσεις. Αυτό αποτέλεσε το σημείο εκκίνησης για τη διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής ρεσβερατρόλης, ενός πολυφαινολικού μορίου με ισχυρή αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη δράση και αυξανόμενη ζήτηση από τη φαρμακοβιομηχανία, τη βιομηχανία συμπληρωμάτων διατροφής και την κοσμετολογία.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση στις μεταβολικές οδούς έδειξε ότι η ρεσβερατρόλη παράγεται μέσω της φαινοϋλο-προπανοϊκής βιοσυνθετικής οδού, στην οποία τα κρίσιμα ένζυμα PAL, C4H, 4CL και STS λειτουργούν σε διαδοχική αλληλουχία για τη μετατροπή του φαινυλαλανίνης σε trans-ρεσβερατρόλη. Η διερεύνηση μικροοργανισμών-ξενιστών έδειξε ότι ζυμομύκητες όπως *Saccharomyces cerevisiae*, *Yarrowia lipolytica* και *Komagataella phaffii* έχουν παρουσιάσει ιδιαίτερα υψηλές δυνατότητες παραγωγής όταν συνδυάζονται με γενετικές τροποποιήσεις και ενίσχυση του μεταβολισμού της λακτόζης ή γλυκόζης.

Η αξιοποίηση του τυρογάλακτος ως υπόστρωμα ζύμωσης ενισχύεται ακόμη περισσότερο όταν εφαρμόζονται τεχνολογίες προσρόφησης, προεπεξεργασίας ή υδρόλυσης της λακτόζης, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική μικροβιακή κατανάλωση και βελτιωμένη απόδοση ρεσβερατρόλης. Ταυτόχρονα, η βελτιστοποίηση των διεργασιικών παραμέτρων (pH, θερμοκρασία, χρόνος παραμονής, στρατηγικές feeding, συναποδόμηση υποστρωμάτων) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων τελικού προϊόντος, φτάνοντας σε απόδοση που, σε ορισμένες μελέτες, υπερβαίνει τα 300–400 mg/L υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

Σε τεχνικό επίπεδο, οι τεχνολογίες downstream processing (LC, SPE, μεμβρανικά συστήματα) αποδείχθηκαν καθοριστικές για την απομόνωση και καθαρισμού της ρεσβερατρόλης από πολύπλοκα ζυμωτικά μίγματα. Ειδικότερα, η ενσωμάτωση μεμβρανών UF/NF και τεχνικών προσρόφησης σε ρητίνες αύξησε σημαντικά την καθαρότητα του τελικού προϊόντος, υποδεικνύοντας ότι ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής μπορεί να είναι τεχνολογικά εφικτό σε βιομηχανική κλίμακα.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, τα ενσωματωμένα συστήματα που συνδυάζουν αναερόβια χώνευση με βιοτεχνολογική παραγωγή επιτρέπουν αξιοσημείωτη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, ενώ η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να καλύψει έως και 40–70 % των ενεργειακών αναγκών μιας μονάδας. Αυτό συνάδει άμεσα με τους στόχους της Ε.Ε. (European Green Deal, CEAP 2020) για κλιματική ουδετερότητα και μείωση αποβλήτων, ενισχύοντας τη θέση ότι η βιομηχανική αξιοποίηση του τυρογάλακτος δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική ανάγκη αλλά και οικονομική ευκαιρία.

Τέλος, η οικονομική αποτίμηση και τα μοντέλα κόστους που εξετάστηκαν έδειξαν ότι η παραγωγή ρεσβερατρόλης από τυρόγαλο μπορεί να γίνει ανταγωνιστική, ειδικά όταν συνδυάζεται με πολυπροϊοντικές προσεγγίσεις (π.χ. ανάκτηση πρωτεϊνών, παραγωγή βιοαερίου, παραγωγή βιοδραστικών μορίων). Η κλιμάκωση, ωστόσο, παραμένει κρίσιμο σημείο, καθώς απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός, σταθερή ποιότητα αποβλήτων, έλεγχος μικροβιακής σταθερότητας και ολοκληρωμένα συστήματα καθαρισμού.

Συνολικά, η εργασία τεκμηριώνει ότι η αξιοποίηση παραπροϊόντων γαλακτοβιομηχανίας για την παραγωγή ρεσβερατρόλης αποτελεί μια τεχνικά εφικτή, περιβαλλοντικά ωφέλιμη και οικονομικά υποσχόμενη διεργασία, με σαφή προοπτική εφαρμογής στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της πράσινης βιομηχανικής μετάβασης.

## 5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης του τυρογάλακτος για την παραγωγή ρεσβερατρόλης στο πλαίσιο της κυκλικής βιοοικονομίας. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της διεργασίας, οι διαφοροποιήσεις στη σύσταση του υποστρώματος και τα τεχνολογικά εμπόδια που εξακολουθούν να υπάρχουν υποδεικνύουν ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε ένα ευρύ φάσμα θεματικών πεδίων. Παρακάτω συνοψίζονται οι βασικότερες ερευνητικές κατευθύνσεις που μπορούν να ενισχύσουν τόσο την τεχνική ωριμότητα όσο και τη βιομηχανική αξιοποίηση της συγκεκριμένης προσέγγισης.

### 1. Βελτίωση μικροοργανισμών-ξενιστών μέσω προηγμένων τεχνικών μεταβολικής μηχανικής

Αν και έχουν καταγραφεί σημαντικές προσπάθειες γενετικής βελτίωσης για την αύξηση της βιοσύνθεσης ρεσβερατρόλης, η επίτευξη υψηλών, σταθερών και οικονομικά βιώσιμων αποδόσεων παραμένει πρόκληση. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει σε:

- εφαρμογή εξελιγμένων πλατφορμών CRISPR-Cas σε πολυγονιδιακό επίπεδο
- ανάπτυξη συνθετικών βιολογικών κυκλωμάτων για την ακριβή ρύθμιση μεταβολικών ροών
- δημιουργία ανθεκτικών στελεχών που να διαχειρίζονται καλύτερα το οσμωτικό φορτίο και την λακτόζη του τυρογάλακτος
- αξιοποίηση μη συμβατικών μικροοργανισμών που εμφανίζουν ευελιξία σε περίπλοκα υποστρώματα.

Η περαιτέρω κατανόηση της μεταβολικής μηχανικής θα συμβάλει στην αύξηση της παραγωγής ρεσβερατρόλης, στη μείωση παραπροϊόντων και στην ενίσχυση της βιομηχανικής σταθερότητας της ζύμωσης.

### 2. Ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων προεπεξεργασίας τυρογάλακτος

Η ποικιλότητα στη σύσταση του τυρογάλακτος αποτελεί ένα από τα βασικά εμπόδια για σταθερή βιομηχανική αξιοποίηση. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει:

- συνδυαστικά συστήματα μεμβρανών (UF–NF–RO) με στοχευμένη διαμόρφωση του λόγου λακτόζης/πρωτεϊνών
- εφαρμογή ενζυμικής υδρόλυσης με χρήση εξειδικευμένων λακτασών ή β-γλυκοσιδασών
- προηγμένες τεχνικές προσρόφησης/απομάκρυνσης ανεπιθύμητων συστατικών πριν τη ζύμωση
- τεχνολογίες μικροδιήθησης για την παραγωγή κλασμάτων υψηλής καθαρότητας που διευκολύνουν την εκλεκτική ανάπτυξη μικροοργανισμών

Η ανάπτυξη τέτοιων υβριδικών προσεγγίσεων μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένα και σταθερά ζυμωτικά υποστρώματα, κατάλληλα για συστηματική παραγωγή ρεσβερατρόλης.

### 3. Μελέτη και βελτιστοποίηση διεργασιών κλιμάκωσης (scale-up)

Η μετάβαση από εργαστηριακή σε πιλοτική και βιομηχανική κλίμακα αποτελεί κρίσιμο στάδιο, όπου παραδοσιακά εμφανίζονται απώλειες παραγωγικότητας. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να εξετάσουν:

- την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης ζυμώσεων σε συστήματα 50–200 L
- τη βελτιστοποίηση στρατηγικών παροχής υποστρώματος (fed-batch, continuous systems)
- τη μηχανική διεργασιών για ομοιογενή μεταφορά μάζας και οξυγόνου
- την εφαρμογή real-time monitoring τεχνολογιών (Raman, FTIR, NIR) για συνεχή παρακολούθηση μεταβολιτών

Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να μειώσει δραστικά το κόστος και να βελτιώσει την απόδοση της παραγωγικής αλυσίδας.

### 4. Δημιουργία ολοκληρωμένων μοντέλων LCA και LCC ειδικά για προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας

Παρά τις υπάρχουσες μελέτες, οι αναλύσεις κύκλου ζωής (LCA) για παραγωγή ρεσβερατρόλης από απόβλητα παραμένουν περιορισμένες. Κρίσιμες μελλοντικές κατευθύνσεις:

- εκτίμηση αποτυπώματος άνθρακα για όλα τα στάδια (προεπεξεργασία–ζύμωση–καθαρισμός)
- ενσωμάτωση σεναρίων πολυπροϊονικής αξιοποίησης (π.χ. ανάκτηση πρωτεϊνών + βιοαέριο + ρεσβερατρόλη)
- πλήρεις αναλύσεις κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Costing)
- σύγκριση με συμβατικές πηγές ρεσβερατρόλης (όπως *Polygonum cuspidatum* ή συνθετικές οδοί)

Τέτοιες προσεγγίσεις θα επιτρέψουν στους φορείς λήψης αποφάσεων να αξιολογήσουν την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα της τεχνολογίας.

### 5. Ανάπτυξη καινοτόμων υλικών και διεργασιών καθαρισμού (downstream processing)

Επειδή η ρεσβερατρόλη βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις και η απομόνωσή της είναι απαιτητική, απαιτούνται νέες τεχνολογίες όπως:

- έξυπνες ρητίνες επιλεκτικής προσρόφησης
- λειτουργικά νανοσωματίδια για ειδική αλληλεπίδραση με πολυφαινόλες
- υλικά βασισμένα σε MOFs (Metal–Organic Frameworks)

- ενσωμάτωση μεμβρανών NF/RO σε διεργασίες πολλαπλών σταδίων
- συστήματα προσρόφησης-αποδέσμευσης με χαμηλό ενεργειακό κόστος

Η ανάπτυξη τέτοιων υλικών θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την απόδοση και καθαρότητα της τελικής ρεσβερατρόλης.

#### 6. Εκτίμηση της αγοράς, της τιμολόγησης και εμπορικής ζήτησης της βιοτεχνολογικής ρεσβερατρόλης

Αν και η αγορά της ρεσβερατρόλης αναπτύσσεται σταθερά, απαιτούνται:

- μοντέλα πρόβλεψης ζήτησης ανά βιομηχανικό κλάδο (φαρμακευτικό, καλλυντικό, τρόφιμα)
- ανάλυση ανταγωνιστικότητας έναντι φυτικής ή χημικής ρεσβερατρόλης
- εκτίμηση διακυμάνσεων τιμών σε συνάρτηση με ενεργειακά και λειτουργικά κόστη
- αξιολόγηση της αποδοχής της «βιοτεχνολογικής» προέλευσης από τις αγορές

Αυτή η γνώση θα επιτρέψει την αποτελεσματική στρατηγική ανάπτυξης προϊόντων.

#### 7. Ανάπτυξη νέων εφαρμογών για προϊόντα πολλαπλής αξιοποίησης

Η πολυπροϊονική αξιοποίηση του τυρογάλακτος (πρωτεΐνες, βιοαέριο, ρεσβερατρόλη, πεπτίδια, βιοενεργά μόρια) δημιουργεί πεδίο για:

- σχεδιασμό βιοδυλιστηρίων γαλακτοκομικού τύπου
- ανάπτυξη προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας σε τρόφιμα, φαρμακευτικά και κοσμετολογία
- διερεύνηση θεραπευτικών εφαρμογών ρεσβερατρόλης μέσω *in vitro* ή *in vivo* μοντέλων
- δημιουργία νέων τεχνολογιών σταθεροποίησης (nanoencapsulation, liposomes)

Η αξιοποίηση όλων των ρευμάτων του τυρογάλακτος προσφέρει μια ρεαλιστική διαδρομή προς ένα πλήρως κυκλικό σύστημα παραγωγής.

### 5.3 Τελική Αξιολόγηση και Μελλοντική Προοπτική

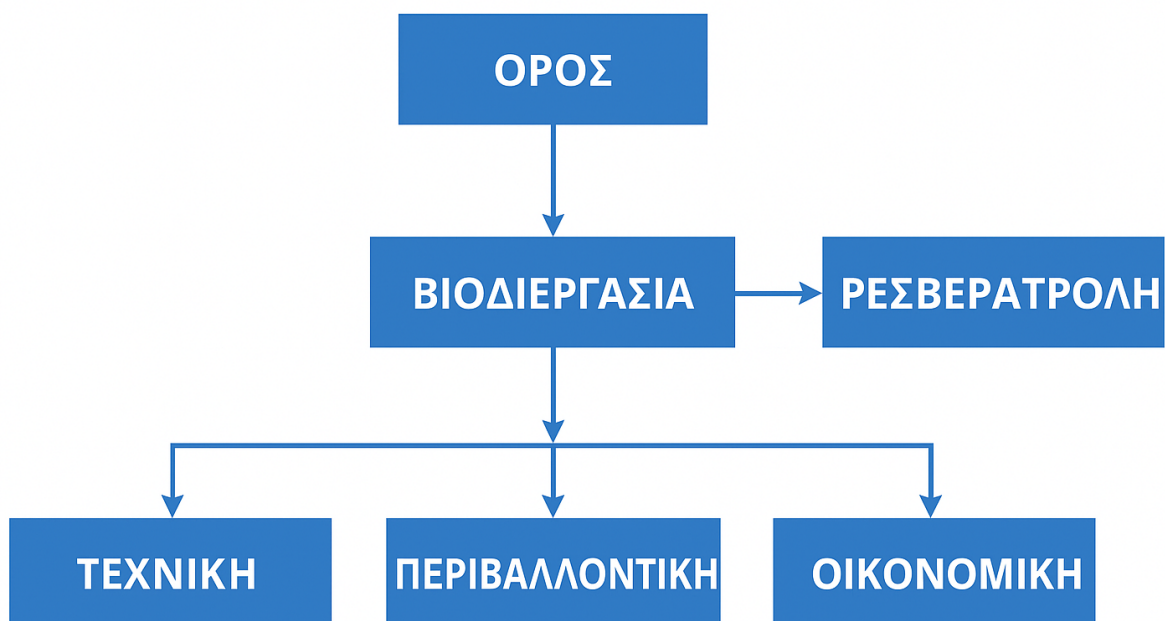
Η συνολική αξιολόγηση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αναδεικνύει ότι η αξιοποίηση των γαλακτοκομικών αποβλήτων και ειδικότερα του τυρογάλακτος για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης αποτελεί μία ρεαλιστική και ταυτόχρονα καινοτόμα στρατηγική εντός του πλαισίου της κυκλικής οικονομίας. Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια κατέδειξε ότι η σύζευξη της μικροβιακής ζύμωσης, των σύγχρονων τεχνικών ανάκτησης και της ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής αξιολόγησης δεν αποτελεί απλώς θεωρητική δυνατότητα, αλλά ένα αναδυόμενο πεδίο με σημαντικό επιστημονικό και τεχνολογικό δυναμικό.

Σε τεχνικό επίπεδο, η ανάλυση των υφιστάμενων τεχνολογιών και των προτεινόμενων διεργασιών έδειξε ότι τα γαλακτοκομικά υποστρώματα έχουν υψηλή βιοδιαθεσιμότητα, προσφέροντας σαφές πλεονέκτημα έναντι άλλων αγροβιομηχανικών ρευμάτων λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε λακτόζη και οργανικό φορτίο. Παράλληλα, η ενσωμάτωση εργαλείων όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής και η οικονομική αξιολόγηση αναδεικνύουν ότι η μετατροπή του τυρογάλακτος σε προϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας της γαλακτοβιομηχανίας.

Ωστόσο, η τελική αξιολόγηση αναγνωρίζει ότι η πλήρης βιομηχανική ενσωμάτωση της συγκεκριμένης τεχνολογικής οι πρότασης απαιτούν περαιτέρω τεκμηρίωση. Αν και τα υπάρχοντα επιστημονικά δεδομένα είναι ενθαρρυντικά, η κλιμάκωση της διεργασίας και η ενσωμάτωσή της στη βιομηχανική πράξη αποτελούν ζήτημα που χρειάζεται συστηματική μελέτη και προσαρμογή σε πραγματικές συνθήκες παραγωγής. Επιπλέον, η ενδεχόμενη μεταβλητότητα της σύστασης του τυρογάλακτος ανάλογα με την εποχικότητα και τον τύπο παραγωγής, δημιουργεί την ανάγκη για ευέλικτες τεχνολογικές λύσεις.

Σε στρατηγικό επίπεδο, η παρούσα ΜΔΕ προσφέρει μια ολοκληρωμένη οπτική στον τρόπο με τον οποίο η βιοτεχνολογική αξιοποίηση των αποβλήτων μπορεί να μετατραπεί σε μοχλό ανάπτυξης, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και του νέου Σχεδίου Δράσης Κυκλικής Οικονομίας. Η προοπτική εφαρμογής τέτοιων λύσεων είναι ενθαρρυντική, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της εντεινόμενης ανάγκης για μείωση των εκπομπών, εξοικονόμηση πόρων και προώθηση της βιομηχανικής καινοτομίας.

Τέλος, η εργασία αναδεικνύει ότι το μέλλον της κυκλικής αξιοποίησης των γαλακτοκομικών αποβλήτων βρίσκεται στη διασύνδεση της έρευνας με την παραγωγή, στην ανάπτυξη προσαρμοσμένων βιοδιεργασιών και στη συνεργασία ακαδημαϊκών και βιομηχανικών φορέων. Με βάση τα παραπάνω, η τεχνολογική κατεύθυνση που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για μελλοντικές εφαρμογές, ανοίγοντας τον δρόμο για βιώσιμες, οικονομικά αποδοτικές και περιβαλλοντικά υπεύθυνες λύσεις στον χώρο της γαλακτοβιομηχανίας.



Σχήμα 10. Ολοκληρωμένο εννοιολογικό πλαίσιο αξιολόγησης της βιοτεχνολογικής αξιοποίησης τυρογάλακτος για παραγωγή ρεσβερατρόλης.

## 6. Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διερεύνησε σε βάθος τη δυνατότητα αξιοποίησης των γαλακτοκομικών αποβλήτων και ειδικότερα του τυρογάλακτος ως υπόστρωμα για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ρεσβερατρόλης. Με έμφαση στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και των σύγχρονων ευρωπαϊκών πολιτικών για βιώσιμη ανάπτυξη. Η συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, σε συνδυασμό με την τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών, ανέδειξε ότι το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο έχει σημαντικές δυνατότητες εφαρμογής, αρκεί να συνεχιστεί η ανάπτυξη κατάλληλων καινοτόμων διεργασιών και μεθόδων ολοκλήρωσης.

Σε τεχνικό επίπεδο, οι αναλύσεις των προηγούμενων κεφαλαίων έδειξαν ότι το τυρόγαλο αποτελεί ένα υπόστρωμα υψηλής βιοδιαθεσιμότητας, πλούσιο σε λακτόζη και οργανικό φορτίο, προσφέροντας ιδανικές συνθήκες για μικροβιακές διεργασίες. Η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι μικροοργανισμοί όπως οι μεταβολικά τροποποιημένες ζύμες και ορισμένα είδη μυκήτων μπορούν να μετατρέψουν τα συστατικά του τυρογάλακτος σε ρεσβερατρόλη με διαδοχικές ή ολοκληρωμένες βιοδιεργασίες. Παρά τις ακόμη περιορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές, τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά ως προς τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της διαδικασίας και κλιμάκωσής της.

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση δείχνει ότι η συγκεκριμένη τεχνολογική λύση συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γαλακτοβιομηχανίας. Η ανάκτηση και αξιοποίηση του τυρογάλακτος μειώνει τη ρυπαντική του επιβάρυνση, ιδιαίτερα λόγω του υψηλού BOD και COD, ενώ η παραγωγή ενός προϊόντος υψηλής προστιθέμενης αξίας όπως είναι η ρεσβερατρόλη μετατρέπει ένα προβληματικό απόβλητο σε αξιοποιήσιμο πόρο. Ταυτόχρονα, η χρήση εργαλείων όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής υποστηρίζει ότι η μετατροπή αυτή οδηγεί σε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με τεχνολογίες ενεργειακής ανάκτησης ή με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σε οικονομικό επίπεδο, η εφαρμογή διεργασιών αξιοποίησης του τυρογάλακτος για παραγωγή ρεσβερατρόλης παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές βιωσιμότητας. Η αγορά των φυσικών πολυφαινολών συνεχίζει να επεκτείνεται, ενώ η ζήτηση για ρεσβερατρόλη, τόσο στη φαρμακευτική όσο και στη βιομηχανία καλλυντικών και συμπληρωμάτων διατροφής, αυξάνεται ταχέως. Η δυνατότητα παραγωγής της από βιομηχανικά απόβλητα μειώνει το κόστος πρώτης ύλης, ενώ ενισχύει την οικονομική κυκλικότητα της γαλακτοβιομηχανίας. Αν και απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να καθοριστούν ακριβείς δείκτες απόδοσης, τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι η επένδυση σε σχετικές τεχνολογίες μπορεί να γίνει οικονομικά ελκυστική στο άμεσο μέλλον.

Στρατηγικά, η εργασία αυτή αναδεικνύει ότι η αξιοποίηση του τυρογάλακτος μέσω βιοτεχνολογίας ευθυγραμμίζεται πλήρως με τις προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και του νέου Σχεδίου Δράσης για την Κυκλική Οικονομία. Παράλληλα, ενισχύει την ανταγωνιστικότητα της γαλακτοβιομηχανίας, υποστηρίζει τη μείωση των εκπομπών και συμβάλλει στη μετάβαση σε πιο βιώσιμες παραγωγικές πρακτικές.

Τέλος, η συνολική αποτίμηση της εργασίας υποδεικνύει ότι, παρά το υψηλό τεχνολογικό και ερευνητικό δυναμικό της διεργασίας, απαιτείται περαιτέρω διεπιστημονική έρευνα ώστε να διασφαλιστεί η βιομηχανική της ωριμότητα. Προτείνεται ως μελλοντική κατεύθυνση η ανάπτυξη πιλοτικών μονάδων σε συνεργασία με ελληνικές γαλακτοβιομηχανίες, η πραγματική ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών ωφελειών και η αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν βιοτεχνολογία, καθαρή ενέργεια και προηγμένες τεχνολογίες ανάκτησης.

## Βιβλιογραφία

A. Angelis-Dimakis, G. Arampatzis, A. Alexopoulos, A. Pantazopoulos, I. Vyrides, N. Chourdakis, V. Angelis, (2022) Waste management and the circular economy in Cyprus & — The Case of the SWAN Project, *Environments* 289, 121722.

A. Hassoun, I. Tarchi, A. Aït-Kaddour, (2024) Leveraging the potential of fourth industrial revolution technologies to reduce and valorize waste and by-products in the dairy sector, *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 47 100927,

A.S. Stasinakis, P. Charalambous, I. Vyrides, (2022) Dairy wastewater management in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges, *J. Environ. Manage.* 303 114152,

Aguiar GPS, Arcari BD, Chaves LM, Dal Magro C, Boschetto DL, Piato AL et al., (2018) Micronization of trans-resveratrol by supercritical fluid: dissolution, solubility and in vitro antioxidant activity. *Ind Crop Prod* 112:1–5

Akhlaghi, M., Boni, M.R., De Gioannis, G., Muntoni, A., Poletini, A., Pomi, R., Rossi, A., Spiga, D., (2017). A parametric response surface study of fermentative hydrogen production from cheese whey. *Bioresour. Technol.* 244, 473–483.

Akhlaghi, M., Boni, M.R., Poletini, A., Pomi, R., Rossi, A., De Gioannis, G., Muntoni, A., Spiga, D., (2019). Fermentative H<sub>2</sub> production from food waste: parametric analysis of factor effects. *Bioresour. Technol.* 276, 349–360.

Arias, A., Costa, C. E., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Domingues, L. (2023). Process modeling, environmental and economic sustainability of the valorization of whey and eucalyptus residues for resveratrol biosynthesis. *Waste Management*, 172, 226–234.

Asunis, F., De Gioannis, G., Isipato, M., Muntoni, A., Poletini, A., Pomi, R., Rossi, A., Spiga, D., (2019). Control of fermentation duration and pH to orient biochemicals and biofuels production from cheese whey. *Bioresour. Technol.* 289, 121722.

Awasthi, M.K., Paul, A., Kumar, V., Sar, T., Kumar, D., Sarsaiya, S., Liu, H., Zhang, Z., Binod, P., Sindhu, R., Kumar, V., Taherzadeh, M.J., (2021). Recent trends and developments on integrated biochemical conversion process for valorization of dairy waste to value added bioproducts: a review. *Bioresour. Technol.* 126193.

B. Basak, S.M. Patil, R. Kumar, Y. Ahn, G.S. Ha, Y.K. Park, M. Ali Khan, W. Jin Chung, S. Woong Chang, B.H. Jeon (2022), Syntrophic bacteria- and Methanosarcina- rich acclimatized microbiota with better carbohydrate metabolism enhances biomethanation of fractionated lignocellulosic biocomponents, *Bioresour. Technol.* 360 127602,

Bansal, V., & Veena, N. (2024). Understanding the role of pH in cheese manufacturing: General aspects of cheese quality and safety. *Journal of Food Science and Technology*, 61(1), 16–26.

Baptista, S.L., Costa, C.E., Cunha, J.T., Soares, P.O., Domingues, L., (2021). Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for the production of top value chemicals from biorefinery carbohydrates. *Biotechnol. Adv.* 47, 107697

Barba, F. J., Galanakis, C. M., & Grimi, N. (2023). Advances in the valorization of food processing by-products: Biotechnological and sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*, 345, 118567.

Borges CP, Sobczak JC, Silberg TR, Uriona-Maldonado M, Vaz CR. (2021) A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. *Renew Sustain Energy Rev*;138:110518.

Brinke, A.S.t., Janssens-Boöcker, C., Kerscher, M., (2021). Skin anti-aging benefits of a 2% resveratrol emulsion. *J. Cosmet. Dermatological Sci. Appl.* 11 (2), 155–168.

Calabrò, V., Curcio, S., Iorio, G., & Rivas, J. (2023). Sustainable valorization of dairy industry by-products through integrated biorefinery approaches: A review. *Bioresource Technology*, 383, 129250.

Caldeira, C., Vlysidis, A., Fiore, G., De Laurentiis, V., Vignali, G., Sala, S., (2020). Sustainability of food waste biorefinery: a review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresour. Technol.* 312, 123575.

Carvalho, F., Prazeres, A. R., & Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of The Total Environment*, 445-446, 385-396.

Costa, C.E., Møller-Hansen, I., Romani, A., Teixeira, J.A., Borodina, I., Domingues, L., (2021). Resveratrol production from hydrothermally pretreated eucalyptus wood using recombinant industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains. *ACS Synth. Biol.* 10, 1895–1903.

Cunha, J.T., Gomes, D.G., Romani, A., Inokuma, K., Hasunuma, T., Kondo, A., Domingues, L., (2021). Cell surface engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for simultaneous valorization of corn cob and cheese whey via ethanol production. *Energy Convers. Manag.* 243, 114359

D.B.Tabelini, J.P.P.Lima, A.C.Borges, A.Aguiar, (2023) A review on the characteristics and methods of dairy industry wastewater treatment in the state of Minas Gerais, Brazil, *J. Water Proc. Eng.* 53 103779,

Danezis, G., Pappas, A., Zoidis, E., Papadomichelakis, G., Hadjigeorgiou, I., Zhang, P., Brusic, V., & Georgiou, C. (2017). Game meat authentication through rare earth elements fingerprinting. *Analytica Chimica Acta*, 991, 46–57.

Das, A. K., et al. (2024). Electrochemical advanced oxidation processes for wastewater treatment: recent developments and prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(2), 1500–1523.

Domingos, J.M.B., Puccio, S., Martinez, G.A., Amaral, N., Reis, M.A.M., Bandini, S., Fava, F., Bertin, L., 2018. Cheese whey integrated valorisation: production, concentration and exploitation of carboxylic acids for the production of polyhydroxyalkanoates by a fed-batch culture. *Chem. Eng. J.* 336, 47–53.

Escobar Gianni, D.; Pelaggio, R.; Cardozo, G.; Moreno, S.; De Torres, E.; Rey, F.; Martínez, I.; Suarez Veirano, G.; Olazabal, L.(2023). Transfer of  $\beta$ -lactam and tetracycline antibiotics from spiked bovine milk to Dambo-type cheese, whey, and whey powder. *Food Addit. Contam. Part A*, 40, 824–837.

European Commission. (2020, March 11). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe (COM(2020) 98 final). Publications Office of the European Union.

European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe (COM (2020) 98). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2779/085517>

European Commission. (2020). The European Green Deal. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2775/19001>

European Dairy Association, 2019. The Dairy Sector & the Green Deal. <https://doi.org/10.1787/9789264015906-en>.

European Green Deal και του Circular Economy Action Plan (2020): [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en)

European Union. (2024). European commission quality products registers. In European union, eAmbrosia—the EU geographical indications register. eAmbrosia-Geographical Indications-Search. Available online: <https://ec.europa.eu/agriculture/eambrosia/geographical-indications-register/>.

FAO 2025-2034. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034 : [https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034\\_601276cd-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_601276cd-en.html)

FAO. (2024). Dairy sector environmental statistics and sustainability indicators. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). Dairy Market Review – Emerging trends and outlook in 2023 (FAO Knowledge Repository). Retrieved from <https://openknowledge.fao.org>

Giulianetti de Almeida, M.P., Mockaitis, G., Weissbrodt, D.G., (2023). Got whey? Sustainability endpoints for the dairy industry through resource biorecovery. *Fermentation* 9 (10).

Goh YL, Cui YT, Pendharkar V and Adsool VA, (2017) Toward resolving the resveratrol conundrum: synthesis and in vivo pharmacokinetic evaluation of BCP – resveratrol. *ACS Med Chem Lett* 8:516 – 520.

Goyal, C.; Dhyani, P.; Rai, D. C.; Tyagi, S.; Dhull, S. B.; Sadh, P. K.; Duhan, J. S.; Saharan, B. S. (2023) Emerging trends and advances in the processing of dairy whey for sustainable biorefining. *J. Food Process. Preserv.*, 6626513.

Griffith, A.W., Gobler, C.J., (2020). Harmful algal blooms: a climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. *Harmful Algae* 91, 101590.

Hasan, M. M., Liu, Y., & Zhang, R. (2023). Recent progress in resveratrol biosynthesis and its bioengineering applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(6), 765–781.

Hebishy, E.; Yerlikaya, O.; Mahony, J.; Akpinar, A.; Saygili, D. (2023) Microbiological aspects and challenges of whey powders—I thermophilic, thermophilic and spore-forming bacteria. *Int. J. Dairy Technol.*, 76, 779–800.

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138–147.

International Energy Agency, 2017. Energy Statistics. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Jürgensen, L., Ehimen, E.A., Born, J., Holm-Nielsen, J.B., (2018). A combination anaerobic digestion scheme for biogas production from dairy effluent—CSTR and ABR, and biogas upgrading. *Biomass Bioenergy* 241–247.

Khattab, A. R., Guirguis, H. A., Tawfik, S. M., & Farag, M. A. (2019). Cheese ripening: A review on modern technologies towards flavor enhancement, process acceleration and improved quality assessment. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 343–360.

Kourtis, S. L., Regele, O. B., Wright, J. M., & Jones, G. B. (2022). Digital biomarkers for Alzheimer’s disease: the mobile/wearable devices opportunity. *npj Digital Medicine*, 5\*(1), 9.

Kumar, P., Prajapati, D., Soni, D. K., & Thakur, M. (2019). Cheese production and quality evaluation: A review on technological advancements and microbial roles. *International Journal of Dairy Technology*, 72(3), 345–356.

Lappa, I.K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E., Kopsahelis, N., (2019). Cheese whey processing: Integrated biorefinery concepts and emerging food applications. *Foods*.

Limnaios, A.; Tsevdou, M.; Zafeiri, E.; Topakas, E.; Taoukis, P. (2024) Cheese and Yogurt By-Products as Valuable Ingredients for the Production of Prebiotic Oligosaccharides. *Dairy*, 5, 78–92.

Lip, K.Y.F., García-Ríos, E., Costa, C.E., Guillamón, J.M., Domingues, L., Teixeira, J., van Gulik, W.M., (2020). Selection and subsequent physiological characterization of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains during continuous growth at sub- and supra optimal temperatures. *Biotechnol. Rep.* 26, e00462

Meng, T., Xiao, D., Muhammed, A., Deng, J., Chen, L., He, J., 2021. Anti-inflammatory action and mechanisms of resveratrol. *Molecules* 26, 229.

Meyer T, Edwards EA 2014. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastewater and sludge. *Water Res*;65:321–49.

Millen, A. M., Samson, J. E., Tremblay, D. M., Magadán, A. H., Rousseau, G. M., Moineau, S., & Romero, D. A. (2019). *Lactococcus lactis* type III-A CRISPR-Cas system cleaves bacteriophage RNA. *RNA Biology*, 16(4), 461–468.

Mirzakulova, A., Sarsembaeva, T., Suleimenova, Z., Kowalski, Ł., Gajdzik, B., Wolniak, R., & Bembenek, M. (2025). Whey: Composition, Processing, Application, and Prospects in Functional and Nutritional Beverages — A Review. *Foods*, 14(18), 3245.

Mlinar, S., Weig, A.R., Freitag, R., 2022. Influence of NH<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> on anaerobic digestion and microbial population structure at increasing total ammonia nitrogen concentrations. *Bioresour. Technol.* 361.

Mohan, S.M., Swathi, T., 2022. A review on upflow anaerobic sludge blanket reactor: factors affecting performance, modification of configuration and its derivatives. *Water Environ. Res.* 94.

Mojiri, A., & Jeihanipour, A. (2023). Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the treatment of lipid-rich dairy wastewater: performance evaluation and energy potential analysis. *Processes*, 11(3), 855.

Moukaf, S., Elkihel, B., 2023. Comparison between the performance of combined treatment of waste water physic-chemical & biological and the direct activated sludge applied to dairy activity. *Key Eng. Mater.* 954, 31–39.

Nascimento, T. P., Ferreira, D. F., & Domingues, L. (2023). Engineering microorganisms for enhanced resveratrol biosynthesis: Recent strategies and challenges. *Biotechnology Advances*, 61, 108074.

Nawaz, A., et al. (2022). Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation — a review. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100832.

Noticias, E.F.E., (2024). Ganaderos mexicanos alertan de que la sequía amenaza la producción de carne. UDG TV. <https://udgtv.com/noticias/ganaderos-alertan-que-sequia-amenaza-produccion-de-carne/219550>.

Pappa, E. C., & Kondyli, E. (2023). Descriptive characteristics and cheesemaking technology of Greek cheeses not listed in the EU Geographical Indications Registers. *Mljekarstvo*, 4, 43–67

Patel, A., Tsagkari, M., Rova, U., & Christakopoulos, P. (2022). Bioconversion of agro-industrial waste streams into high-value bioproducts: Current advances and future perspectives. *Bioresource Technology*, 359,

Perin G, Barcellos A, Luz E, Borges E, Jacob R, Lenardão E et al., (2017) Green Hydroselenation of aryl alkynes: Divinyl selenides as a precursor of resveratrol. *Molecules* 22:327.

Pires, A., Gomes, D., Noronha, J., Díaz, O., Cobos, A., & Pereira, C. D. (2023). Evaluation of the characteristics of sheep's and goat's ice cream, produced with UF concentrated second cheese whey and different starter cultures. *Foods*, 11, 4091.

Pires, A.F., Marnotes, N.G., Rubio, O.D., Garcia, A.C., Pereira, C.D., (2021). Dairy by-products: a review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods* 10 (5).

Polizzi, C., Lotti, T., Ricoveri, A., Campo, R., Vannini, C., Ramazzotti, M., Gabriel, D., Munz, G., (2022). Long-term effects of mineral precipitation on process performance, granules' morphology and microbial community in anammox granular sludge. *J. Environ. Chem. Eng.* 10, 107002.

Ramsuroop, J., Gutu, L., Ayinde, W. B., Basitere, M., & Manono, M. S. (2024). A Review of Biological Processes for Dairy Wastewater Treatment and the Effect of Physical Parameters Which Affect Their Efficiency. *Water*, 16(4), 537.

Ramsuroop, N., Naidoo, S., & Olaniran, A. O. (2024). Environmental and microbiological assessment of dairy effluents: Implications for sustainable management. *Sustainability*, 16(5), 2348.

Ribeiro, A. R., Silva, M. E., & Nunes, O. C. (2022). Characterization and valorization of dairy wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 310, 114777.

Rivas, J., Calabrò, V., Curcio, S., & Iorio, G. (2022). Integrated biorefinery approaches for the valorization of dairy industry wastes: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108345.

Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badiger, S., Miyagusuku- Cruzado, G., Mayta-Apaza, A., Giusti, M., Jiméñez-Flores, R., & García-Cano, I. (2021). Invited review: Acid whey trends and health benefits. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1262–1275.

Rojas ,O.E.; Cuervo,L.V.; Serrato,J.C. (2025) Sustainable production of lactic acid from cheese whey using Co- cultures and enzymatic hydrolysis. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 100, 1940–1947.

Roselli, M.; Onesti, R.; Boi, C.; Bandini, S. (2025) Recovery of lactose from acid whey by nanofiltration: An experimental study. *Sep. Purif. Technol.*, 353, 128303.

S´aez-S´aez, J., Wang, G., Marella, E.R., Sudarsan, S., Cernuda Pastor, M., Borodina, I., (2020). Engineering the oleaginous yeast *Yarrowia lipolytica* for high-level resveratrol production. *Metab. Eng.* 62, 51–61.

Singh, P., Mohanty, S. S., & Mohanty, K. (2024). Comprehensive assessment of microalgal-based treatment processes for dairy wastewater. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1425933.

Slavov, A.K., (2017). General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater – a review. *Food Technol. Biotechnol.* 55, 14–28.

Sreedharan Nair, S., Unni, K.K., Sasidharanpil- lai, S., Kumar, S., Aravindakumar, C.T., Aravind, U.K. (2022). Bio-physical and computational stud- ies on serum albumin / target protein binding of a potential anti-cancer agent. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 172, 106141.

Stres, B., et al. (2024). Addressing co-digestion of wastewater sludge, cheese whey and other organic wastes to optimise biogas production. *Frontiers / PMC article* (2024).

Tabelini, M. C., Almeida, R. A., & Silva, L. M. (2023). A review on the characteristics and treatment methods of dairy wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 103443.

Thapa, S. B., Pandey, R. P., Kim, B. G., & Sohng, J. K. (2019). Biotechnological advances in resveratrol production and its chemical diversity. *Frontiers in Microbiology*, 10, 13–22.

Thompson CM, Orellana MD, Lloyd SE and Wu W, (2016). Stereospecific synthesis of cis-stilbenes from benzaldehydes and phenylacetic acids via sequential Perkin condensation and decarboxylation. *Tetrahedron Lett* 57:4866–4868.

Ubando, A.T., Felix, C.B., Chen, W.-H., 2020. Biorefineries in circular bioeconomy: a comprehensive review. *Bioresour. Technol.* 299, 122585.

Udurioh, G. A. (2025). A Review of the Valorization of Dairy Industry Wastes and By-products. *Journal/Source*.

Urpi-Sarda M, Zamora-Ros R, Lamuela-Raventos R, Cherubini A and Jauregui O, De La Torre et al., (2007)HPLC–tandem mass spectrometric method to characterize resveratrol metabolism in humans. *Clin Chem* 53:292–299.

van der Bruggen, B., Lejon, L., & Vandecasteele, C. (2023). Advances in wastewater treatment and resource recovery in the dairy industry: Case studies from the Netherlands. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(4), 110584.

Walsh, A.M., Macori, G., Kilcawley, K.N., Cotter, P.D., (2020). Meta-analysis of cheese microbiomes highlights contributions to multiple aspects of quality. *Nat. Food* 1 (8), 500–510.

Wenzel, J., Fuentes, L., Cabezas, A., Etchebehere, C., 2017. Microbial fuel cell coupled to biohydrogen reactor: a feasible technology to increase energy yield from cheese whey. *Bioproc. Biosyst. Eng.* 40, 807–819.

Wu, D., Liu, H., Xing, T., Xiao, F., Liu, Y., Zhen, F., Sun, Y., (2024). An integrated evaluation strategy for anaerobic digestion monitoring based on acid-base balance and thermodynamics of volatile fatty acid degradation. *Chem. Eng. J.* 486, 2023–2024.

Yuan, S.; Yu, H.; Xie, Y.; Guo, Y.; Yao, W. (2023)Research on the Mechanism of Ultrasound to Enhance the Biodegradation of Profenofos by *Lactiplantibacillus plantarum*. *ACS Agric. Sci. Technol.*, 3, 535–542.

Zandona, E., Blažić, M., Režek Jambrak, A., (2021). Whey utilisation: Sustainable uses and environmental approach. *Food Technol. Biotechnol.*

Zhang, B., Ren, L., Wang, Y., Xu, D., Zhang, S., Wang, H., Wang, H., Zeng, X., Xin, B., Li, F., (2020). Glycerol production through TPI1 defective *Kluyveromyces marxianus* at high temperature with glucose, fructose, and xylose as feedstock. *Biochem. Eng. J.* 161, 107689.

Zhao, S., Zhao, G., Gu, L., & Solem, C. (2022). A novel approach for accelerating smear development on bacterial smear-ripened cheeses reduces ripening time and inhibits the growth of *Listeria* and other unwanted microorganisms on the rind. *Lwt*, 170 (October), Article 114109.