



«Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο»

«Χημική και Βιομοριακή Ανάλυση»

Διπλωματική Εργασία

« Ενόργανες μέθοδοι διασφάλισης της γεωγραφικής προέλευσης
γαλακτοκομικών προϊόντων »

«Μαρία Καρυπίδου»

Επιβλέπων καθηγητής: «Κωνσταντίνος Τσιαφούλης»

Πάτρα, «Ιούνιος» «2026»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») 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.

« Ενόργανες μέθοδοι διασφάλισης της γεωγραφικής προέλευσης
γαλακτοκομικών προϊόντων »

«Μαρία Καρυπίδου»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

« Κωνσταντίνος Τσιαφούλης »

« Μέλος Ε.Δ.Ι.Π., Βαθμός Α του
Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Τμήμα
Χημείας, Εργαστήριο Αναλυτικής
Χημείας, Κέντρο NMR Μέλος ΣΕΠ του
Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου,
ΜΠΣ “Χημική και Βιομοριακή
Ανάλυση“»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Αναστάσιος Καμπόλης»

«Πανεπιστήμιο Πατρών»

Πάτρα, «Ιούνιος» «2026»

«Ευχαριστίες ή Αφιέρωση»

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε για το Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Πατρών και συγκεκριμένα για το τμήμα Χημικής και Βιομοριακής Ανάλυσης κατά το έτος 2025-2026. Η ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του υπεύθυνού μου καθηγητή κ.Τσιαφούλη Κωνσταντίνου. Του εκφράζω ένα μεγάλο ευχαριστώ για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Περίληψη

Η διασφάλιση της αυθεντικότητας και της γεωγραφικής προέλευσης των τροφίμων αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη σύγχρονη βιομηχανία τροφίμων, καθώς συνδέεται άμεσα με την προστασία των καταναλωτών, την ενίσχυση της εμπιστοσύνης στην αγορά και τη διατήρηση της αξίας προϊόντων υψηλής ποιότητας και προστατευόμενης ονομασίας. Ιδιαίτερα στον τομέα των γαλακτοκομικών προϊόντων, η γεωγραφική προέλευση συνδέεται στενά με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προϊόντων, τα οποία επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς, γεωλογικούς και παραγωγικούς παράγοντες. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει και παρουσιάζει συστηματικά τις σύγχρονες ενόργανες αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης του γάλακτος και των γαλακτοκομικών προϊόντων. Αρχικά, αναλύεται το θεσμικό και νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την προστασία των γεωγραφικών ενδείξεων, των προϊόντων ΠΟΠ και ΠΓΕ, καθώς και οι μηχανισμοί ελέγχου και πιστοποίησης της αυθεντικότητας των τροφίμων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι εφαρμογές των σημαντικότερων ενόργανων τεχνικών, όπως η ανάλυση σταθερών ισοτόπων, η στοιχειακή ανάλυση, οι φασματοσκοπικές και χρωματογραφικές μέθοδοι, καθώς και οι σύγχρονες χημειομετρικές προσεγγίσεις. Εξετάζονται τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και η αξιοπιστία κάθε τεχνικής ως προς τη δυνατότητα ταυτοποίησης της γεωγραφικής προέλευσης και ανίχνευσης περιπτώσεων νοθείας. Επιπλέον, αναδεικνύεται η σημασία της συνδυαστικής εφαρμογής πολλαπλών αναλυτικών μεθόδων και της επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων για τη δημιουργία αξιόπιστων συστημάτων ελέγχου αυθεντικότητας. Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης καταδεικνύουν ότι η χρήση προηγμένων ενόργανων τεχνικών, σε συνδυασμό με κατάλληλες χημειομετρικές μεθόδους, αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη διασφάλιση της γεωγραφικής προέλευσης των γαλακτοκομικών προϊόντων, συμβάλλοντας στην προστασία των καταναλωτών, στην καταπολέμηση της απάτης τροφίμων και στη διατήρηση της αξίας των παραδοσιακών προϊόντων.

Λέξεις – Κλειδιά: Αυθεντικότητα τροφίμων, Ενόργανες αναλυτικές μέθοδοι, Ανάλυση σταθερών ισοτόπων, Χημειομετρία, ΠΟΠ

« Analytical Methods for the Authentication of the Geographical Origin of Dairy Products»

«Karypidou Maria»

Abstract

This thesis investigates the application of modern instrumental analytical techniques for the authentication and verification of the geographical origin of milk and dairy products. Food authenticity and geographical traceability have become critical issues in the contemporary food industry due to the increasing incidence of food fraud, consumer demand for transparency, and the need to protect products with geographical indications and high commercial value. In dairy products, geographical origin is closely associated with environmental, geological, and production-related factors that influence their chemical composition and quality characteristics. This study reviews the European regulatory framework governing Protected Designations of Origin (PDO) and Protected Geographical Indications (PGI), as well as the current systems for food authenticity control and certification. Furthermore, it presents the principles, applications, advantages, and limitations of major instrumental analytical techniques used for geographical origin authentication, including stable isotope analysis, elemental analysis, spectroscopic and chromatographic methods, and advanced chemometric approaches. Special emphasis is placed on the development of chemical and isotopic fingerprints that enable the differentiation and classification of dairy products according to their geographical origin. The role of chemometrics and multivariate statistical analysis in improving the accuracy and reliability of authentication systems is also examined. The literature findings demonstrate that the combination of advanced analytical techniques with robust chemometric tools provides an effective strategy for the verification of geographical origin, the detection of food fraud, and the protection of consumers and traditional dairy products with added commercial and cultural value.

Keywords: Food authenticity, Instrumental analytical methods, Stable isotope analysis, Chemometrics, PDO

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων	9
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	10
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αυθεντικότητα και Γεωγραφική Προέλευση Τροφίμων	1
1.2 Το Σύστημα ΠΟΠ – ΠΓΕ στην Ευρωπαϊκή Ένωση	3
1.3 Νομοθεσία για την Επισήμανση Γεωγραφικής Προέλευσης.....	6
1.4 Σκοπός και Ερευνητικοί Στόχοι της Εργασίας	9
2. Νομοθετικό και Θεσμικό Πλαίσιο για την Προστασία της Γεωγραφικής Προέλευσης Τροφίμων	11
2.1 Ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας τροφίμων	11
2.2 Κανονισμοί ΠΟΠ και ΠΓΕ	15
2.3 Έλεγχος και πιστοποίηση αυθεντικότητας	19
2.4 Προβλήματα εφαρμογής και προκλήσεις	23
3. Ενόργανες Αναλυτικές Τεχνικές για τον Προσδιορισμό Γεωγραφικής Προέλευσης	27
3.1 Φασματοσκοπικές Τεχνικές.....	28
3.2 Χρωματογραφικές Μέθοδοι.....	35
3.3 Φασματομετρία Μάζας και Ισοτοπική Ανάλυση	38
4. Εφαρμογές των Αναλυτικών Τεχνικών στα Γαλακτοκομικά Προϊόντα.....	43
4.1 Ανάλυση Σύστασης Γάλακτος και Τυριών	43
4.2 Διαφοροποίηση Προϊόντων ΠΟΠ.....	45
4.3 Ανίχνευση νοθείας και απάτης	51
4.4 Συνδυασμός τεχνικών και πολυπαραμετρική ανάλυση	55
5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	60
Βιβλιογραφία	64

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1-1 *Eutopean Commission PDO – PGI Labels.* 2

Εικόνα 1-2 *Κύριες μορφές νοθείας στο γάλα και ενδεικτικές αναλυτικές τεχνικές που
χρησιμοποιούνται για την ανίχνευσή τους.*..... 2

Σχήμα 1-1 *Συχνότητα εμφάνισης των κυριότερων αναλυτικών τεχνικών στη βιβλιογραφία για την
αυθεντικοποίηση τροφίμων.* 3

Σχήμα 1-2 *Διαχωρισμός δειγμάτων Γραβιέρας διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης με χρήση
Διακριτικής Ανάλυσης (LDA)* 4

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1. Ενδεικτικά γαλακτοκομικά προϊόντα Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ) στην Ευρωπαϊκή Ένωση	5
Πίνακας 2-1. Βασικά κανονιστικά και τεχνικά εργαλεία για την προστασία και επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης τροφίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση	13
Πίνακας 3-1. Φασματοσκοπικές τεχνικές και χημειομετρικές προσεγγίσεις για την αυθεντικοποίηση τροφίμων	28

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

EU European Union

EU Food Fraud Network European Union Food Fraud Network

ISO International Organization for Standardization

JRC Joint Research Centre

NMR Nuclear Magnetic Resonance

PDO Protected Designation of Origin

PGI Protected Geographical Indication

ΠΓΕ Προστατευόμενη Γεωγραφική Ένδειξη

ΠΟΠ Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης

1. Εισαγωγή

1.1 Αυθεντικότητα και Γεωγραφική Προέλευση Τροφίμων

Η αυθεντικότητα των τροφίμων αποτελεί θεμελιώδη έννοια στη σύγχρονη επιστήμη τροφίμων και σχετίζεται άμεσα με την προστασία του καταναλωτή, τη διασφάλιση της διαφάνειας της αγοράς και τη διατήρηση της εμπιστοσύνης στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων. Με τον όρο αυθεντικότητα νοείται η επιβεβαίωση ότι ένα τρόφιμο είναι αυτό που δηλώνει ότι είναι, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της προέλευσης, της σύνθεσης, της μεθόδου παραγωγής και της επισήμανσής του. Η έννοια αυτή συνδέεται στενά με ζητήματα όπως η νοθεία τροφίμων, η παραπλανητική επισήμανση και η οικονομικά υποκινούμενη νοθεία (economically motivated adulteration), φαινόμενα που έχουν αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της παγκοσμιοποίησης της αγοράς τροφίμων και της πολυπλοκότητας των εφοδιαστικών αλυσίδων (Robson et al., 2021; Spink, 2019).

Η αυθεντικότητα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια και την ποιότητα των τροφίμων, καθώς η παραποίηση ενός προϊόντος μπορεί να επηρεάσει όχι μόνο την οικονομική αξία του αλλά και την υγεία του καταναλωτή. Στη διεθνή βιβλιογραφία, η νοθεία τροφίμων ορίζεται ως η σκόπιμη αντικατάσταση, προσθήκη, αλλοίωση ή παραπλανητική παρουσίαση ενός τροφίμου, με στόχο την οικονομική ωφέλεια (Moore et al., 2012; Everstine et al., 2013). Η πρακτική αυτή μπορεί να περιλαμβάνει την αντικατάσταση ενός συστατικού με φθηνότερο, την ψευδή δήλωση γεωγραφικής προέλευσης ή την εσφαλμένη επισήμανση της μεθόδου παραγωγής. Σύμφωνα με τους Robson et al. (2021), η απάτη τροφίμων αποτελεί πολυδιάστατο φαινόμενο που περιλαμβάνει διάφορες μορφές, όπως η αραίωση προϊόντων, η αντικατάσταση πρώτων υλών, η παραποίηση της ετικέτας και η ψευδής δήλωση της προέλευσης.

Η γεωγραφική προέλευση των τροφίμων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες αυθεντικότητας και ποιότητας. Η προέλευση ενός προϊόντος συχνά συνδέεται με συγκεκριμένα περιβαλλοντικά, γεωλογικά και πολιτισμικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σύσταση και τα οργανοληπτικά του γνωρίσματα. Για τον λόγο αυτό, η γεωγραφική ένδειξη χρησιμοποιείται ως εργαλείο διαφοροποίησης προϊόντων υψηλής ποιότητας και ως μέσο προστασίας της τοπικής παραγωγής. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η σημασία της γεωγραφικής προέλευσης αποτυπώνεται σε συστήματα πιστοποίησης όπως η Προστατευόμενη Ονομασία

Προέλευσης (ΠΟΠ) και η Προστατευόμενη Γεωγραφική Ένδειξη (ΠΓΕ), τα οποία διασφαλίζουν ότι ένα προϊόν παράγεται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και σύμφωνα με καθορισμένες προδιαγραφές (Katerinopoulou et al., 2020).

Η αξία της γεωγραφικής προέλευσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα αγροδιατροφικά προϊόντα υψηλής ποιότητας, καθώς συνδέεται με την έννοια του “terroir”, δηλαδή τη μοναδική αλληλεπίδραση μεταξύ περιβάλλοντος, πρώτων υλών και παραδοσιακών πρακτικών παραγωγής. Αυτή η αλληλεπίδραση επηρεάζει τη χημική σύσταση των τροφίμων, δημιουργώντας χαρακτηριστικά «αποτυπώματα» που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση της προέλευσης (Katerinopoulou et al., 2020). Ως αποτέλεσμα, η γεωγραφική προέλευση λειτουργεί όχι μόνο ως δείκτης ποιότητας αλλά και ως στοιχείο ταυτότητας και πολιτιστικής κληρονομιάς για πολλά παραδοσιακά προϊόντα.

Ωστόσο, η υψηλή εμπορική αξία προϊόντων με συγκεκριμένη γεωγραφική προέλευση τα καθιστά ευάλωτα σε πρακτικές απάτης. Η ψευδής δήλωση προέλευσης αποτελεί μία από τις πιο συχνές μορφές νοθείας, καθώς επιτρέπει την πώληση φθηνότερων προϊόντων ως προϊόντων υψηλής ποιότητας ή προστατευόμενης ονομασίας. Η πρακτική αυτή έχει σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, καθώς πλήττει τόσο τους καταναλωτές όσο και τους παραγωγούς που ακολουθούν τις προδιαγραφές ποιότητας (Rocchi et al., 2020). Επιπλέον, μπορεί να υπονομεύσει την αξιοπιστία των συστημάτων πιστοποίησης και να μειώσει την εμπιστοσύνη στην αγορά τροφίμων.

Η αυξανόμενη συχνότητα περιστατικών απάτης στον αγροδιατροφικό τομέα έχει οδηγήσει στη δημιουργία διεθνών μηχανισμών ελέγχου και συνεργασίας. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η καταπολέμηση της απάτης τροφίμων υποστηρίζεται από δίκτυα συνεργασίας μεταξύ κρατών-μελών, όπως το EU Food Fraud Network, το οποίο διευκολύνει την ανταλλαγή πληροφοριών και τον συντονισμό ελέγχων μεταξύ αρμόδιων αρχών (European Commission, 2018). Παράλληλα, η νομοθεσία της ΕΕ προβλέπει την εφαρμογή επίσημων ελέγχων σε όλα τα στάδια της αλυσίδας τροφίμων, προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τους κανόνες ασφάλειας και επισήμανσης (Regulation (EU) 2017/625).

Στον τομέα των γαλακτοκομικών προϊόντων, η αυθεντικότητα και η γεωγραφική προέλευση έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς πολλά προϊόντα, όπως τα παραδοσιακά τυριά, συνδέονται στενά με συγκεκριμένες περιοχές παραγωγής και μεθόδους επεξεργασίας. Η ποιότητα του γάλακτος επηρεάζεται από παράγοντες όπως η διατροφή των ζώων, το κλίμα, το

γεωλογικό υπόβαθρο και οι πρακτικές εκτροφής, οι οποίοι διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Αυτές οι διαφορές δημιουργούν μοναδικά χημικά και ισοτοπικά χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση της γεωγραφικής προέλευσης (Camin et al., 2016).

Παράλληλα, η αλυσίδα παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων είναι ιδιαίτερα ευάλωτη σε περιστατικά απάτης, όπως η αραίωση του γάλακτος, η χρήση μη δηλωμένων συστατικών ή η ψευδής δήλωση της προέλευσης. Σύμφωνα με τους Montgomery et al. (2020), τα περιστατικά απάτης στον τομέα των γαλακτοκομικών έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για αξιόπιστες μεθόδους ελέγχου της αυθεντικότητας. Η ανάπτυξη σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών, όπως η ανάλυση σταθερών ισοτόπων, η στοιχειακή ανάλυση και οι φασματοσκοπικές μέθοδοι, επιτρέπει την ακριβέστερη ταυτοποίηση της προέλευσης και την ανίχνευση νοθείας στα τρόφιμα (Danezis et al., 2016; Camin et al., 2017).

1.2 Το Σύστημα ΠΟΠ – ΠΓΕ στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Το σύστημα Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ) και Προστατευόμενης Γεωγραφικής Ένδειξης (ΠΓΕ) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία της ποιότητας, της αυθεντικότητας και της γεωγραφικής ταυτότητας των αγροδιατροφικών προϊόντων. Η δημιουργία αυτού του συστήματος αντανακλά την ανάγκη διατήρησης της πολιτιστικής και γαστρονομικής κληρονομιάς της Ευρώπης, ενώ παράλληλα ενισχύει την οικονομική βιωσιμότητα των αγροτικών περιοχών και προστατεύει τους καταναλωτές από παραπλανητικές πρακτικές στην αγορά τροφίμων. Η σημασία των γεωγραφικών ενδείξεων είναι ιδιαίτερα μεγάλη για προϊόντα που συνδέονται στενά με συγκεκριμένες περιοχές παραγωγής, καθώς τα φυσικά και ανθρώπινα χαρακτηριστικά μιας περιοχής επηρεάζουν καθοριστικά την ποιότητα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προϊόντων (Katerinopoulou et al., 2020).



Εικόνα 1-1 *European Commission PDO – PGI Labels.*

Το θεσμικό πλαίσιο των γεωγραφικών ενδείξεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει διαμορφωθεί μέσα από μια σειρά κανονισμών που καθορίζουν τους όρους πιστοποίησης και προστασίας των προϊόντων. Σήμερα, το βασικό νομικό πλαίσιο καθορίζεται από τον Κανονισμό (ΕΕ) 1151/2012, ο οποίος αφορά τα συστήματα ποιότητας για γεωργικά προϊόντα και τρόφιμα. Ο κανονισμός αυτός θεσπίζει τα κριτήρια για την καταχώριση προϊόντων ως ΠΟΠ ή ΠΓΕ και καθορίζει τις διαδικασίες ελέγχου και πιστοποίησης. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό δίκαιο, οι γεωγραφικές ενδείξεις αποτελούν δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας που προστατεύουν τα προϊόντα από απομιμήσεις ή αθέμιτη χρήση της ονομασίας τους στην αγορά. Παράλληλα, η εφαρμογή επίσημων ελέγχων για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τις προδιαγραφές παραγωγής προβλέπεται από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2017/625, ο οποίος ρυθμίζει το σύστημα επίσημων ελέγχων στην αλυσίδα τροφίμων (European Union, 2017).

Η Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης (ΠΟΠ) αποτελεί το αυστηρότερο από τα δύο συστήματα πιστοποίησης. Ένα προϊόν που φέρει την ένδειξη ΠΟΠ πρέπει να παράγεται, να μεταποιείται και να επεξεργάζεται αποκλειστικά σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, ενώ τα χαρακτηριστικά του πρέπει να οφείλονται ουσιαστικά ή αποκλειστικά στο συγκεκριμένο φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον της περιοχής αυτής. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας πρέπει να πραγματοποιούνται εντός της καθορισμένης περιοχής, σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές που έχουν εγκριθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Η ένδειξη αυτή διασφαλίζει την ισχυρή σύνδεση μεταξύ προϊόντος και τόπου προέλευσης, γεγονός που προσδίδει ιδιαίτερη αξία στο προϊόν και ενισχύει την ανταγωνιστικότητά του στη διεθνή αγορά (Gonzalvez et al., 2009).

Αντίθετα, η Προστατευόμενη Γεωγραφική Ένδειξη (ΠΓΕ) χαρακτηρίζει προϊόντα των οποίων τουλάχιστον ένα από τα στάδια παραγωγής, μεταποίησης ή επεξεργασίας

πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, η σύνδεση με την περιοχή παραγωγής είναι σημαντική, αλλά όχι τόσο αυστηρή όσο στην ΠΟΠ. Ένα προϊόν ΠΓΕ μπορεί, για παράδειγμα, να παρασκευάζεται σε συγκεκριμένη περιοχή χρησιμοποιώντας πρώτες ύλες που προέρχονται από άλλες περιοχές, εφόσον η ποιότητα, η φήμη ή άλλα χαρακτηριστικά του προϊόντος συνδέονται με τον συγκεκριμένο τόπο. Το σύστημα ΠΓΕ επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην παραγωγική διαδικασία, διατηρώντας παράλληλα τη σύνδεση του προϊόντος με την τοπική παράδοση και την ιστορία της περιοχής (Katerinopoulou et al., 2020).

Τα συστήματα ΠΟΠ και ΠΓΕ έχουν σημαντικό ρόλο στην προστασία των καταναλωτών, καθώς παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και την ποιότητα των προϊόντων. Η ύπαρξη ενός πιστοποιημένου σήματος γεωγραφικής ένδειξης λειτουργεί ως εγγύηση ότι το προϊόν πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές παραγωγής και έχει υποβληθεί σε επίσημους ελέγχους. Παράλληλα, τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στην καταπολέμηση της απάτης τροφίμων, ιδιαίτερα σε προϊόντα υψηλής εμπορικής αξίας που συχνά αποτελούν στόχο παραποίησης ή ψευδούς επισήμανσης (Danezis et al., 2016).

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος των γεωγραφικών ενδείξεων στον τομέα των γαλακτοκομικών προϊόντων, όπου η ποιότητα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προϊόντων επηρεάζονται έντονα από το περιβάλλον παραγωγής. Παράγοντες όπως η φυλή των ζώων, η διατροφή τους, το κλίμα, το έδαφος και οι παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας συμβάλλουν στη δημιουργία μοναδικών οργανοληπτικών και χημικών χαρακτηριστικών. Για τον λόγο αυτό, πολλά γαλακτοκομικά προϊόντα έχουν κατοχυρωθεί ως ΠΟΠ ή ΠΓΕ, προκειμένου να προστατευθεί η αυθεντικότητά τους και να διασφαλιστεί η σύνδεσή τους με τον τόπο παραγωγής (Camin et al., 2016).

Προϊόν	Χώρα προέλευσης	Κατηγορία προϊόντος	Βασικές πρώτες ύλες	Χαρακτηριστικά σύνδεσης με την περιοχή παραγωγής
Φέτα	Ελλάδα	Τυρί ΠΟΠ	Πρόβειο γάλα ή μίγμα πρόβειου και κατσικίσιου γάλακτος	Παραδοσιακή μέθοδος παραγωγής, τοπικές φυλές ζώων και ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες
Parmigiano Reggiano	Ιταλία	Σκληρό τυρί ΠΟΠ	Αγελαδινό γάλα	Παραδοσιακή τεχνογνωσία, ειδικές συνθήκες ωρίμανσης και

				τοπική παραγωγική παράδοση
Roquefort	Γαλλία	Μπλε τυρί ΠΟΠ	Πρόβειο γάλα	Ωρίμανση σε φυσικά σπήλαια της περιοχής Roquefort-sur-Soulzon και χρήση τοπικών μικροοργανισμών
Manchego	Ισπανία	Σκληρό τυρί ΠΟΠ	Γάλα προβάτων φυλής Manchega	Σύνδεση με την περιοχή La Mancha, τοπικές φυλές και παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής

Πηγή: Danezis et al., 2016

Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα γαλακτοκομικών προϊόντων με Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης είναι η Φέτα, η οποία παράγεται αποκλειστικά στην Ελλάδα από πρόβειο γάλα ή μείγμα πρόβειου και κατσικίσιου γάλακτος, σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές παραγωγής. Η κατοχύρωση της φέτας ως ΠΟΠ από την Ευρωπαϊκή Ένωση αποτέλεσε σημαντικό βήμα για την προστασία του προϊόντος από απομιμήσεις και για τη διατήρηση της παραδοσιακής μεθόδου παραγωγής του. Άλλα παραδείγματα γαλακτοκομικών προϊόντων ΠΟΠ είναι το Parmigiano Reggiano από την Ιταλία, το Roquefort από τη Γαλλία και το Manchego από την Ισπανία, τα οποία συνδέονται στενά με τις περιοχές παραγωγής τους και έχουν αποκτήσει διεθνή φήμη για την ποιότητα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (Danezis et al., 2016).

Παράλληλα, υπάρχουν και αρκετά γαλακτοκομικά προϊόντα που έχουν καταχωριστεί ως Προστατευόμενη Γεωγραφική Ένδειξη, όπου η σύνδεση με την περιοχή παραγωγής βασίζεται κυρίως στη φήμη ή στην παραδοσιακή τεχνογνωσία της περιοχής. Η αναγνώριση αυτών των προϊόντων συμβάλλει στην ενίσχυση της τοπικής οικονομίας και στην προώθηση των παραδοσιακών μεθόδων παραγωγής.

1.3 Νομοθεσία για την Επισήμανση Γεωγραφικής Προέλευσης

Η επισήμανση της γεωγραφικής προέλευσης των τροφίμων αποτελεί βασικό στοιχείο της πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διασφάλιση της διαφάνειας στην αγορά τροφίμων

και την προστασία των καταναλωτών από παραπλανητικές πρακτικές. Η πληροφόρηση σχετικά με την προέλευση ενός προϊόντος επιτρέπει στους καταναλωτές να λαμβάνουν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις αγοράς, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διατήρηση της εμπιστοσύνης στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξετάζει τα τελευταία έτη περαιτέρω μεταρρυθμίσεις στο πλαίσιο της στρατηγικής «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork Strategy), συμπεριλαμβανομένης της εναρμόνισης συστημάτων επισήμανσης στο εμπρόσθιο μέρος της συσκευασίας (front-of-pack nutrition labelling) και της ενίσχυσης της πληροφόρησης σχετικά με τη βιωσιμότητα και την προέλευση των τροφίμων. Ωστόσο, ο Κανονισμός (ΕΕ) 1169/2011 εξακολουθεί να αποτελεί τη θεμελιώδη νομική βάση για τις υποχρεωτικές πληροφορίες που παρέχονται στους καταναλωτές στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Ο Κανονισμός (ΕΕ) 1169/2011 αποτελεί τη βασική νομοθετική πράξη που ρυθμίζει την επισήμανση των τροφίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και καθορίζει τις πληροφορίες που πρέπει να παρέχονται στους καταναλωτές. Ο κανονισμός αυτός εισήχθη με στόχο την εναρμόνιση των κανόνων επισήμανσης μεταξύ των κρατών-μελών και την ενίσχυση της προστασίας των καταναλωτών μέσω της παροχής σαφών, κατανοητών και αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με τα τρόφιμα. Σύμφωνα με το άρθρο 7 του κανονισμού, οι πληροφορίες που αναγράφονται στην επισήμανση δεν πρέπει να είναι παραπλανητικές ως προς τα χαρακτηριστικά του τροφίμου, όπως η φύση, η ταυτότητα, η σύνθεση, η ποσότητα, η διάρκεια ζωής ή η γεωγραφική του προέλευση. Η διάταξη αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για προϊόντα που συνδέονται με συγκεκριμένες περιοχές παραγωγής, καθώς η λανθασμένη ή παραπλανητική δήλωση προέλευσης μπορεί να οδηγήσει σε παραπλάνηση των καταναλωτών και σε στρέβλωση του ανταγωνισμού στην αγορά (European Parliament and Council, 2011).

Στο ίδιο πλαίσιο, ο κανονισμός καθορίζει ότι η ένδειξη της χώρας καταγωγής ή του τόπου προέλευσης ενός τροφίμου είναι υποχρεωτική όταν η απουσία της θα μπορούσε να παραπλανήσει τον καταναλωτή σχετικά με την πραγματική προέλευση του προϊόντος. Επιπλέον, η υποχρεωτική επισήμανση προέλευσης προβλέπεται για συγκεκριμένες κατηγορίες τροφίμων, όπως το νωπό κρέας ορισμένων ζώων, το ελαιόλαδο, το μέλι και τα φρούτα και λαχανικά. Η ρύθμιση αυτή αντανάκλα την αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για πληροφορίες σχετικά με την προέλευση των τροφίμων και την ανάγκη για μεγαλύτερη διαφάνεια στην αγορά τροφίμων (Dimitrakopoulou & Vantarakis, 2021).

Παρά τη σημασία του Κανονισμού (ΕΕ) 1169/2011, η εφαρμογή του ανέδειξε ορισμένα πρακτικά ζητήματα που σχετίζονται με τη δήλωση της προέλευσης όταν το τρόφιμο περιέχει συστατικά από διαφορετικές περιοχές. Σε πολλές περιπτώσεις, η επισήμανση ενός προϊόντος μπορεί να δημιουργεί την εντύπωση ότι το τρόφιμο προέρχεται από συγκεκριμένη χώρα ή περιοχή, ενώ το βασικό συστατικό του προέρχεται από άλλη περιοχή. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος εκδόθηκε ο Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2018/775, ο οποίος θεσπίζει ειδικούς κανόνες για την ένδειξη της προέλευσης του κύριου συστατικού ενός τροφίμου.

Ο Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2018/775 εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η επισήμανση ενός τροφίμου υποδηλώνει συγκεκριμένη γεωγραφική προέλευση – για παράδειγμα μέσω λέξεων, εικόνων, συμβόλων ή αναφορών σε συγκεκριμένη περιοχή – ενώ το κύριο συστατικό του προϊόντος προέρχεται από διαφορετική χώρα ή περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, ο παραγωγός υποχρεούται είτε να δηλώσει τη γεωγραφική προέλευση του κύριου συστατικού είτε να αναφέρει ότι η προέλευση του κύριου συστατικού είναι διαφορετική από εκείνη που υποδηλώνεται για το τελικό προϊόν. Με τον τρόπο αυτό, ο κανονισμός επιδιώκει να αποτρέψει την παραπλάνηση των καταναλωτών και να ενισχύσει τη διαφάνεια στην επισήμανση των τροφίμων.

Ο όρος «κύριο συστατικό» ορίζεται ως το συστατικό ή τα συστατικά ενός τροφίμου που αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 50 % του προϊόντος ή τα οποία συνδέονται συνήθως με την ονομασία του τροφίμου από τους καταναλωτές. Για παράδειγμα, σε ένα γαλακτοκομικό προϊόν όπως το γιαούρτι, το γάλα αποτελεί το κύριο συστατικό και συνεπώς η προέλευσή του μπορεί να είναι κρίσιμη για την ορθή ενημέρωση των καταναλωτών. Η εφαρμογή αυτής της διάταξης έχει ιδιαίτερη σημασία για προϊόντα που προβάλλονται ως τοπικά ή παραδοσιακά, αλλά ενδέχεται να παρασκευάζονται με πρώτες ύλες που προέρχονται από άλλες χώρες.

Παρά τη σαφήνεια των νομοθετικών διατάξεων, η πρακτική εφαρμογή των κανόνων επισήμανσης γεωγραφικής προέλευσης παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις. Ένα από τα βασικά ζητήματα αφορά την πολυπλοκότητα των σύγχρονων εφοδιαστικών αλυσίδων τροφίμων, στις οποίες οι πρώτες ύλες μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές χώρες και να μεταποιούνται σε άλλες περιοχές πριν φτάσουν στον τελικό καταναλωτή. Η κατάσταση αυτή καθιστά δύσκολη την ακριβή και σαφή δήλωση της προέλευσης όλων των συστατικών ενός προϊόντος, ιδιαίτερα σε προϊόντα που περιέχουν πολλαπλά συστατικά (Danezis et al., 2016).

Επιπλέον, η εφαρμογή των κανόνων επισήμανσης μπορεί να δημιουργήσει διοικητικό και οικονομικό κόστος για τις επιχειρήσεις τροφίμων, καθώς απαιτεί την προσαρμογή των

συστημάτων ιχνηλασιμότητας και την τροποποίηση των ετικετών των προϊόντων. Παράλληλα, η σωστή εφαρμογή της νομοθεσίας προϋποθέτει αποτελεσματικούς ελέγχους από τις αρμόδιες αρχές, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι πληροφορίες που παρέχονται στους καταναλωτές είναι ακριβείς και αξιόπιστες.

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί επίσης η πιθανότητα παραπλανητικής χρήσης συμβολικών στοιχείων, όπως σημαίες, γεωγραφικά τοπωνύμια ή εικόνες που υποδηλώνουν συγκεκριμένη περιοχή παραγωγής. Ακόμη και όταν η προέλευση του προϊόντος δηλώνεται σωστά στην ετικέτα, τέτοια στοιχεία μπορεί να δημιουργούν στους καταναλωτές την εντύπωση ότι το προϊόν έχει διαφορετική προέλευση από την πραγματική. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματική εφαρμογή της νομοθεσίας απαιτεί όχι μόνο σαφείς κανόνες επισήμανσης αλλά και την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων ελέγχου της αυθεντικότητας των τροφίμων.

1.4 Σκοπός και Ερευνητικοί Στόχοι της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και η συστηματική παρουσίαση των σύγχρονων ενόργανων αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων. Η ανάγκη ανάπτυξης αξιόπιστων επιστημονικών τεχνικών για την ταυτοποίηση της προέλευσης των τροφίμων έχει ενισχυθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξανόμενης εμφάνισης περιστατικών νοθείας και παραπλανητικής επισήμανσης στον αγροδιατροφικό τομέα. Οι ενόργανες αναλυτικές τεχνικές, όπως η στοιχειακή ανάλυση, η ανάλυση σταθερών ισοτόπων, οι φασματοσκοπικές και οι χρωματογραφικές μέθοδοι, παρέχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού χαρακτηριστικών χημικών και ισοτοπικών «αποτυπωμάτων» που συνδέονται με το γεωγραφικό περιβάλλον παραγωγής των τροφίμων. Μέσω της αξιοποίησης αυτών των τεχνικών καθίσταται δυνατή η επιστημονικά τεκμηριωμένη επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης και η προστασία της αυθεντικότητας προϊόντων υψηλής αξίας, συμβάλλοντας παράλληλα στην ενίσχυση της διαφάνειας και της αξιοπιστίας στην αλυσίδα τροφίμων (Camin et al., 2016; Danezis et al., 2016).

Οι βασικοί στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

- Η καταγραφή και ταξινόμηση των κυριότερων ενόργανων αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της γεωγραφικής προέλευσης τροφίμων.

- Η παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των τεχνικών αυτών και των πληροφοριών που μπορούν να παρέχουν σχετικά με το χημικό και ισοτοπικό αποτύπωμα των τροφίμων.
- Η αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των διαφορετικών μεθόδων ως προς την ακρίβεια, την αξιοπιστία, το κόστος και τη δυνατότητα εφαρμογής τους στον έλεγχο αυθεντικότητας.
- Η παρουσίαση εφαρμογών των ενόργανων τεχνικών σε γάλα και γαλακτοκομικά προϊόντα, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι αναλυτικές μέθοδοι συμβάλλουν στην ταυτοποίηση της γεωγραφικής προέλευσης και στην ανίχνευση πιθανών περιπτώσεων νοθείας.
- Η ανάδειξη της σημασίας της συνδυαστικής χρήσης αναλυτικών τεχνικών και χημειομετρικών προσεγγίσεων για την ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων ελέγχου της αυθεντικότητας των τροφίμων.

2. Νομοθετικό και Θεσμικό Πλαίσιο για την Προστασία της Γεωγραφικής Προέλευσης Τροφίμων

2.1 Ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας τροφίμων

Η ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας τροφίμων συγκροτεί ένα σύνθετο θεσμικό και διοικητικό σύστημα που αποσκοπεί ταυτόχρονα στην προστασία ονομασιών με ιδιαίτερη γεωγραφική και παραγωγική ταυτότητα, στη διασφάλιση διαφανούς πληροφόρησης προς τον καταναλωτή και στη θωράκιση της εσωτερικής αγοράς απέναντι σε πρακτικές παραπλάνησης και εμπορικής εκμετάλλευσης της φήμης τοπικών προϊόντων. Η λογική αυτού του συστήματος δεν εξαντλείται στην απλή καταχώριση διακριτικών ονομασιών, αλλά εδράζεται στη νομική αναγνώριση ενός δεσμού ανάμεσα στο προϊόν, στον τόπο παραγωγής, στις μεθόδους επεξεργασίας και, σε ορισμένες περιπτώσεις, στη συλλογική τεχνογνωσία που έχει παγιωθεί ιστορικά σε μια ορισμένη γεωγραφική ενότητα. Η πρόσφατη αναθεώρηση του ενωσιακού πλαισίου με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2024/1143 αποτυπώνει ακριβώς αυτή τη μετατόπιση προς ένα ενιαίο και περισσότερο συνεκτικό κανονιστικό σχήμα για τις γεωγραφικές ενδείξεις οίνων, αλκοολούχων ποτών και αγροτικών προϊόντων, επιδιώκοντας αφενός ενοποίηση διασπαρμένων ρυθμίσεων και αφετέρου ενίσχυση της προστασίας τόσο εντός όσο και εκτός διαδικτυακών αγορών (European Parliament and the Council of the European Union, 2024).

Η αξιολόγηση του συστήματος προστατευόμενων ονομασιών προέλευσης, προστατευόμενων γεωγραφικών ενδείξεων και εγγυημένων παραδοσιακών ιδιότυπων προϊόντων που δημοσίευσε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανέδειξε ότι το καθεστώς ποιότητας διαθέτει μεν σαφή προστιθέμενη αξία, όμως η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από την ποιότητα της διακυβέρνησης, από τη σαφήνεια των προδιαγραφών προϊόντος και από τη δυνατότητα των αρμόδιων αρχών να ελέγχουν ουσιαστικά τη χρήση των προστατευόμενων ονομασιών (European Commission, 2021a). Η ίδια αξιολόγηση έδειξε ότι οι γεωγραφικές ενδείξεις δεν λειτουργούν μόνο ως νομικοί τίτλοι προστασίας, αλλά ως μηχανισμοί οργάνωσης αγορών, εφόσον συμβάλλουν στη διατήρηση της αξίας προϊόντων που συνδέονται με συγκεκριμένο τόπο και δημιουργούν προστιθέμενο οικονομικό όφελος για τους παραγωγούς. Η σύνδεση μεταξύ ποιότητας και γεωγραφικής προέλευσης δεν αποτελεί απλώς ένα επικοινωνιακό ή εμπορικό επιχείρημα, αλλά αποτυπώνεται θεσμικά στο ευρωπαϊκό σύστημα

προστασίας των γεωγραφικών ενδείξεων. Μέσω των σχετικών καθεστώτων πιστοποίησης, η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζει ότι ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων συνδέονται άμεσα με τον τόπο παραγωγής, τις τοπικές γνώσεις και τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Η οικονομική σημασία αυτής της σύνδεσης επιβεβαιώνεται και από την έκθεση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τα καθεστάτα γεωγραφικών ενδείξεων και εγγυημένων παραδοσιακών ιδιότυπων προϊόντων, η οποία αναδεικνύει την αυξημένη εμπορική αξία των προστατευόμενων προϊόντων και υπογραμμίζει την ανάγκη ενίσχυσης της προστασίας τους έναντι της απομίμησης και της καταχρηστικής χρήσης των ονομασιών τους (European Commission, 2021b).

Η ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας, ωστόσο, δεν περιορίζεται σε μια συμβολική αναγνώριση τοπικότητας. Απαιτεί από τους αιτούντες τη διατύπωση ακριβών τεχνικών και νομικών τεκμηρίων για τον δεσμό προϊόντος και περιοχής. Ο οδηγός της Γενικής Διεύθυνσης Γεωργίας και Αγροτικής Ανάπτυξης για τη σύνταξη του ενιαίου εγγράφου καταδεικνύει ότι ο φάκελος υποψηφιότητας πρέπει να αποσαφηνίζει, με τρόπο ελέγξιμο, ποια ποιοτικά γνωρίσματα, ποια στάδια παραγωγής και ποια φυσικά ή ανθρώπινα χαρακτηριστικά της περιοχής θεμελιώνουν την προστασία της ονομασίας (European Commission, Directorate-General for Agriculture and Rural Development, 2023). Από αυτή την άποψη, η πολιτική ποιότητας δεν είναι μια αφηρημένη πολιτική προβολής περιφερειακών προϊόντων, αλλά ένα καθεστώς στο οποίο η έννοια της ποιότητας μεταφράζεται σε προδιαγραφή, έλεγχο και τεκμήριο συμμόρφωσης. Το γεγονός αυτό αποκτά ξεχωριστό βάρος στα γαλακτοκομικά, όπου παράμετροι όπως η ζωοτροφή, οι μικροκλιματικές συνθήκες, η τοπική χλωρίδα και οι παραδοσιακές τεχνικές ωρίμανσης μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τη χημική και οργανοληπτική ταυτότητα του προϊόντος.

Η ανάγκη αυτής της αυστηρής τεκμηρίωσης συνδέεται με τον κίνδυνο απάτης στην αγροδιατροφική αλυσίδα. Οι ετήσιες εκθέσεις του EU Agri-Food Fraud Network και του Alert and Cooperation Network δείχνουν ότι η παραπλανητική δήλωση προέλευσης, η κατάχρηση προστατευόμενων ονομασιών και οι πρακτικές υποκατάστασης πρώτων υλών δεν συνιστούν μεμονωμένα περιστατικά αλλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα μη συμμόρφωσης που κινητοποιούν διοικητικούς και ελεγκτικούς μηχανισμούς σε επίπεδο κρατών μελών και Επιτροπής (European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety, 2020, 2021, European Commission, 2022, 2023). Η ύπαρξη αυτού του δικτύου συνεργασίας

επιβεβαιώνει ότι η πολιτική ποιότητας δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς ένα παράλληλο καθεστώς εποπτείας και ανταλλαγής πληροφοριών. Η ποιότητα, υπό την έννοια της ενωσιακής προστασίας, αποκτά έτσι διττό χαρακτήρα. Από τη μία πλευρά αποτελεί εργαλείο διαφοροποίησης προϊόντων στην αγορά και, από την άλλη, προϋποθέτει ελεγκτική υποδομή ικανή να επαληθεύσει ότι το προϊόν που φέρει μια προστατευόμενη ένδειξη ανταποκρίνεται πράγματι στις εγκεκριμένες προδιαγραφές.

Κανονιστικό/Τεχνικό εργαλείο	Φορέας	Βασικός σκοπός	Συμβολή στη διασφάλιση της γεωγραφικής προέλευσης
Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1143	Ευρωπαϊκή Ένωση	Αναμόρφωση του συστήματος γεωγραφικών ενδείξεων	Ενίσχυση της προστασίας ΠΟΠ και ΠΓΕ, εναρμόνιση διαδικασιών και ενίσχυση ελέγχων
Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2024/2793	Ευρωπαϊκή Επιτροπή	Εξειδίκευση εφαρμογής του Κανονισμού 2024/1143	Καθορισμός πρακτικών υποχρεώσεων και διαδικασιών εφαρμογής
Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2025/26	Ευρωπαϊκή Επιτροπή	Διαδικαστικές και τεχνικές λεπτομέρειες	Ρύθμιση καταχώρισης, τροποποίησης και διαχείρισης γεωγραφικών ενδείξεων
Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμός (ΕΕ) 2025/27	Ευρωπαϊκή Επιτροπή	Συμπλήρωση του κανονιστικού πλαισίου	Αποσαφήνιση απαιτήσεων επισημάνσεως και διοικητικής διαχείρισης
Έκθεση JRC (2022)	Joint Research Centre	Επιστημονική επαλήθευση γεωγραφικής προέλευσης	Αξιοποίηση στοιχειακών και αναλυτικών αποτυπωμάτων για την πιστοποίηση προέλευσης
ISO 22095:2020	International Organization for Standardization	Διαχείριση αλυσίδας επιμέλειας (Chain of Custody)	Διασφάλιση ιχνηλασιμότητας και ακεραιότητας πληροφοριών προέλευσης

UK Food Standards Agency (2024)	UK Food Standards Agency	Αξιολόγηση μεθόδων επαλήθευσης προέλευσης	Προσδιορισμός δυνατοτήτων και περιορισμών των αναλυτικών τεχνικών
---------------------------------	--------------------------	---	---

Πηγή: Προσαρμογή από AND International et al. (2020), European Commission (2024, 2025a, 2025b), European Commission Joint Research Centre (2022), ISO (2020) και UK Food Standards Agency (2024).

Η πρόσφατη κανονιστική αναμόρφωση επιχειρεί να απαντήσει σε αδυναμίες που είχαν ήδη διαγνωσθεί. Το τελικό υποστηρικτικό μελετητικό έργο των AND International, ECORYS και COGEA κατέγραψε δυσχέρειες σχετικές με την πολυπλοκότητα των διαδικασιών, τη διαφοροποίηση των εθνικών πρακτικών ελέγχου και την άνιση ικανότητα των φορέων να υπερασπίζονται αποτελεσματικά τις προστατευόμενες ονομασίες στην αγορά (AND International et al., 2020). Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1143 αντιμετωπίζει αυτά τα ζητήματα μέσα από μια περισσότερο ομοιογενή αρχιτεκτονική, ενώ οι πράξεις εφαρμογής και κατ' εξουσιοδότηση συμπλήρωσης, δηλαδή ο Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2025/26 και ο Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμός (ΕΕ) 2025/27, αποφασηνίζουν τα διαδικαστικά και τεχνικά ζητήματα που συνδέονται με την καταχώριση, την τροποποίηση προδιαγραφών, την επισήμανση και τις μορφές διοικητικής διαχείρισης των γεωγραφικών ενδείξεων (European Commission, 2025a, 2025b). Αντίστοιχα, ο Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2024/2793 παρέχει λεπτομέρειες εφαρμογής που μετατρέπουν τις γενικές αρχές του βασικού κανονισμού σε πρακτικές υποχρεώσεις για τα εμπλεκόμενα μέρη (European Commission, 2024). Η ποιότητα, συνεπώς, δεν νοείται μόνον ως αποτέλεσμα παραγωγικών πρακτικών αλλά ως κανονιστικά δομημένη σχέση ανάμεσα σε προδιαγραφή, έλεγχο, επισήμανση και διοικητική επαλήθευση.

Αυτή η κανονιστική λογική έχει άμεση σημασία για την επιστημονική τεκμηρίωση της προέλευσης. Η έκθεση του Joint Research Centre για την αυθεντικοποίηση γεωγραφικής προέλευσης μέσω στοιχειακού αποτυπώματος επισημαίνει ότι οι τεχνικές επαλήθευσης είναι δυνατόν να λειτουργήσουν ως υποστηρικτικά μέσα σε ρυθμιστικά και ελεγκτικά συμφραζόμενα, εφόσον υπάρχουν επαρκή πρωτόκολλα συγκρισιμότητας, κατάλληλη δειγματοληψία και σαφής σύνδεση ανάμεσα στο αναλυτικό εύρημα και στην προδιαγραφή του προϊόντος (European Commission, Joint Research Centre, 2022). Η παρατήρηση αυτή έχει βαρύνουσα σημασία για την ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας, επειδή φανερώνει ότι η προστασία μιας ονομασίας δεν εξαρτάται μόνο από την ύπαρξη νομικού τίτλου, αλλά από την

ικανότητα του συστήματος να μετατρέπει τον «δεσμό με τον τόπο» σε ελέγξιμη πραγματικότητα. Για τον λόγο αυτό, η πολιτική ποιότητας τείνει πλέον να συνομιλεί όλο και περισσότερο με πεδία όπως η ιχνηλασιμότητα, η αλυσίδα επιμέλειας και οι αναλυτικές μέθοδοι πιστοποίησης.

Στην ίδια κατεύθυνση, το πρότυπο ISO 22095 για την αλυσίδα προσφέρει ένα γενικό εννοιολογικό και οργανωσιακό υπόβαθρο για τη διαχείριση ισχυρισμών που σχετίζονται με ταυτότητα και προέλευση προϊόντων, διευκολύνοντας τη σύνδεση ανάμεσα σε τεκμήρια που παράγονται διοικητικά και σε εκείνα που προκύπτουν από εργαστηριακό έλεγχο (International Organization for Standardization, 2020). Η αναφορά σε ένα τέτοιο πρότυπο έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα στην κατανόηση της ευρωπαϊκής πολιτικής ποιότητας, διότι καθιστά σαφές ότι η προστασία των γεωγραφικών ενδείξεων δεν αφορά αποκλειστικά το στάδιο της καταχώρισης, αλλά επεκτείνεται στη διατήρηση της ακεραιότητας των πληροφοριών καθ' όλη τη διαδρομή του προϊόντος στην αλυσίδα αξίας. Η σχετική έκθεση της UK Food Standards Agency για τις δυνατότητες των μεθόδων επαλήθευσης χώρας προέλευσης συμπληρώνει αυτή την εικόνα, επισημαίνοντας ότι η επιστημονική τεκμηρίωση προέλευσης είναι εφικτή με διαφορετικούς βαθμούς ισχύος ανάλογα με το τρόφιμο, τον σκοπό του ελέγχου και τη διαθεσιμότητα κατάλληλων βάσεων αναφοράς (UK Food Standards Agency, 2024). Έτσι, η ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας οδηγείται αναγκαστικά σε μια περισσότερο ολοκληρωμένη αντίληψη της ποιότητας, όπου η νομική προστασία, η διοικητική διαδικασία, η αγορά και η αναλυτική επιβεβαίωση δεν συγκροτούν χωριστά πεδία, αλλά αλληλοεξαρτώμενα στοιχεία ενός ενιαίου καθεστώτος προστασίας των αγροδιατροφικών προϊόντων.

2.2 Κανονισμοί ΠΟΠ και ΠΓΕ

Οι κανονισμοί που διέπουν τις Προστατευόμενες Ονομασίες Προέλευσης και τις Προστατευόμενες Γεωγραφικές Ενδείξεις συνιστούν τον πυρήνα του ενωσιακού μηχανισμού προστασίας της ονομαστικής, ποιοτικής και εμπορικής ταυτότητας των αγροδιατροφικών προϊόντων. Η διάκριση ανάμεσα στα δύο σχήματα δεν είναι ορολογική λεπτομέρεια, αλλά αποτυπώνει διαφορετικό βαθμό σύνδεσης ανάμεσα στο προϊόν και τη γεωγραφική του μήτρα. Στην περίπτωση της ΠΟΠ, ο δεσμός είναι εντονότερος, αφού η παραγωγή, η μεταποίηση και η επεξεργασία οφείλουν να λαμβάνουν χώρα στην οριοθετημένη περιοχή και τα

χαρακτηριστικά του προϊόντος να αποδίδονται ουσιωδώς ή αποκλειστικώς στο φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον της. Αντιθέτως, στο καθεστώς ΠΓΕ αρκεί μία από τις φάσεις αυτές να τελεί σε συνάφεια με τη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, ενώ ο δεσμός μπορεί να εδράζεται περισσότερο στη φήμη ή σε ειδικό γνώρισμα του προϊόντος παρά σε πλήρη τοπική ενσωμάτωση της παραγωγικής διαδικασίας (European Parliament and the Council of the European Union, 2024). Η διάκριση αυτή έχει ουσιαστικές επιπτώσεις για τη νομική προστασία, τον έλεγχο συμμόρφωσης και τον τρόπο με τον οποίο τεκμηριώνεται η αυθεντικότητα.

Η πρόσφατη κανονιστική ανασυγκρότηση με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2024/1143 επαναδιατύπωσε το πλαίσιο λειτουργίας των γεωγραφικών ενδείξεων, επιχειρώντας μεγαλύτερη κανονιστική συνοχή και σαφέστερη κατανομή ρόλων μεταξύ Επιτροπής, κρατών μελών και ομάδων παραγωγών. Το νέο καθεστώς δεν περιορίζεται στην τυπική κατοχύρωση ονομασιών, αλλά αντιμετωπίζει με συστηματικότερο τρόπο την προστασία στην ψηφιακή αγορά, τη διαχείριση τροποποιήσεων προδιαγραφών, τη θέση των αναγνωρισμένων ομάδων παραγωγών και την ενίσχυση της επιβολής κατά της καταχρηστικής χρήσης προστατευόμενων όρων (European Parliament and the Council of the European Union, 2024). Η κανονιστική αυτή μεταβολή αντανakλά τη διαπίστωση ότι η αξία των ΠΟΠ και ΠΓΕ αυξάνει την ελκυστικότητά τους για απομιμήσεις, υποκαταστάσεις και πρακτικές παραπλανητικής επισήμανσης. Η προστασία, επομένως, δεν εξαντλείται σε ένα μητρώο καταχωρισμένων ονομασιών, αλλά προϋποθέτει ενεργή εποπτεία και ανανέωση των εργαλείων εφαρμογής.

Το υπόστρωμα αυτής της μεταρρύθμισης είχε ήδη διατυπωθεί στις αξιολογήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η έκθεση αξιολόγησης των συστημάτων γεωγραφικών ενδείξεων και εγγυημένων παραδοσιακών ιδιότυπων προϊόντων ανέδειξε ότι τα καθεστώτα ΠΟΠ και ΠΓΕ παράγουν θετικά αποτελέσματα ως προς την προστιθέμενη αξία, την προβολή τοπικών προϊόντων και την ενίσχυση παραγωγικών κοινοτήτων, ενώ παράλληλα εντοπίστηκαν δυσχέρειες που σχετίζονται με τη διάρκεια των διαδικασιών, τη διοικητική πολυπλοκότητα και την ανομοιομορφία εφαρμογής μεταξύ κρατών μελών (European Commission, 2021a). Η συνοδευτική αναφορά της Επιτροπής προς τα θεσμικά όργανα της Ένωσης κατέδειξε ότι τα σχήματα αυτά δεν αποτελούν απλώς πολιτική προστασίας παραδοσιακών τροφίμων, αλλά εργαλείο αγροτικής ανάπτυξης και εμπορικής διαφοροποίησης, με μετρήσιμη οικονομική απόδοση για τους κατόχους των προστατευόμενων ονομασιών (European Commission,

2021b). Υπό αυτή την έννοια, οι κανονισμοί ΠΟΠ και ΠΓΕ λειτουργούν ως κανονισμοί αγοράς, εφόσον δημιουργούν συνθήκες νομικά κατοχυρωμένης αποκλειστικότητας γύρω από μια ονομασία που συνδέεται με συγκεκριμένη ποιοτική υπόσχεση.

Η ποιοτική αυτή υπόσχεση αποκτά συγκεκριμένο περιεχόμενο μέσω των προδιαγραφών προϊόντος. Ο οδηγός της Γενικής Διεύθυνσης Γεωργίας και Αγροτικής Ανάπτυξης για τη σύνταξη του ενιαίου εγγράφου δείχνει ότι η τεκμηρίωση που απαιτείται για μια αίτηση καταχώρισης δεν είναι περιγραφική αλλά αποδεικτική. Οι αιτούντες οφείλουν να προσδιορίσουν τη γεωγραφική περιοχή, να ορίσουν με σαφήνεια τη μέθοδο παραγωγής, να περιγράψουν τα φυσικά, χημικά, μικροβιολογικά ή οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος και να αιτιολογήσουν τον δεσμό μεταξύ των γνωρισμάτων αυτών και του τόπου προέλευσης (European Commission, Directorate-General for Agriculture and Rural Development, 2023). Στο πεδίο των γαλακτοκομικών προϊόντων αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα, επειδή ο δεσμός με την περιοχή μπορεί να συνδέεται με τη βοτανική σύνθεση των βοσκοτόπων, την παραδοσιακή εκτροφή, τις συνθήκες ωρίμανσης, τη χρήση τοπικών στελεχών μικροχλωρίδας και τις ειδικές τεχνικές μεταποίησης. Για τα προϊόντα ΠΟΠ, αυτά τα στοιχεία πρέπει να ενσωματώνονται σε ένα συνεκτικό κανονιστικό αφήγημα που να καθιστά τον τοπικό χαρακτήρα όχι απλώς πιθανό αλλά αποδείξιμο.

Η αυστηρότητα αυτή διαμορφώνει και το περιεχόμενο της προστασίας. Η ΠΟΠ δεν προστατεύει απλώς μια ονομασία από κατά λέξη αντιγραφή, αλλά από κάθε πρακτική που επιχειρεί να εκμεταλλευθεί τη φήμη ή να υπονοήσει ψευδώς γεωγραφική και ποιοτική αντιστοιχία. Το ίδιο ισχύει για την ΠΓΕ, μολονότι η ένταση του δεσμού με τον τόπο είναι μικρότερη. Οι νέοι κανόνες, όπως εξειδικεύονται από τον Εκτελεστικό Κανονισμό (ΕΕ) 2025/26 και τον Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμό (ΕΕ) 2025/27, ενδυναμώνουν τη λειτουργική διάσταση της προστασίας, ρυθμίζοντας ζητήματα που αφορούν διαδικασίες τροποποίησης, παρουσίασης, διοικητικής διαχείρισης και επικοινωνίας στοιχείων προς τις αρμόδιες αρχές (European Commission, 2025a, 2025b). Ο Εκτελεστικός Κανονισμός (ΕΕ) 2024/2793 συμβάλλει στην επιχειρησιακή εξειδίκευση του νέου συστήματος, καθιστώντας σαφέστερο το πλέγμα υποχρεώσεων που συνδέεται με την εφαρμογή του βασικού κανονισμού (European Commission, 2024). Η εξέλιξη αυτή ενισχύει την κατανόηση των ΠΟΠ και ΠΓΕ ως ζωντανών κανονιστικών καθεστώτων που απαιτούν συνεχή διοικητική επιμέλεια.

Η αποτελεσματικότητα των κανονισμών εξαρτάται, ωστόσο, από την ύπαρξη αξιόπιστων μηχανισμών ελέγχου. Το τελικό υπόβαθρο αξιολόγησης που εκπονήθηκε από τις AND International, ECORYS και COGEA κατέγραψε ετερογένεια ως προς την οργάνωση των συστημάτων επαλήθευσης, την ένταση των ελέγχων και την επιχειρησιακή ικανότητα των κρατών μελών να αντιμετωπίζουν παραβιάσεις των προδιαγραφών και καταχρήσεις προστατευόμενων ονομασιών (AND International et al., 2020). Το εύρημα αυτό έχει άμεση κανονιστική σημασία. Ένα σχήμα προστασίας που βασίζεται στη μοναδικότητα του τόπου και στη συμμόρφωση με εγκεκριμένες προδιαγραφές δεν μπορεί να λειτουργήσει επαρκώς όταν οι διαδικασίες ελέγχου είναι ασταθείς ή ασυνεπείς. Η κανονιστική αναγνώριση, κατά συνέπεια, πρέπει να συνοδεύεται από υποδομές επιθεώρησης, εργαστηριακής επαλήθευσης και διοικητικής συνεργασίας.

Αυτή η ανάγκη καταγράφεται έμπρακτα στις ετήσιες εκθέσεις του EU Agri-Food Fraud Network και του Alert and Cooperation Network. Τα έγγραφα αυτά δείχνουν ότι η απάτη γύρω από την προέλευση, την επισήμανση και την ταυτότητα τροφίμων αποτελεί σταθερό αντικείμενο διασυννοριακής συνεργασίας, ενώ τα σχήματα ΠΟΠ και ΠΓΕ ανήκουν σε εκείνες τις κατηγορίες προϊόντων όπου η παραπλανητική εμπορική αξιοποίηση εμφανίζει υψηλό κίνητρο λόγω της προστιθέμενης αγοραίας αξίας τους (European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety, 2020, 2021, European Commission, 2022, 2023). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι οι κανονισμοί ΠΟΠ και ΠΓΕ δεν πρέπει να διαβάζονται αποκλειστικά ως εργαλεία ποιοτικής πολιτικής, αλλά και ως ρυθμίσεις πρόληψης οικονομικής απάτης. Η προστασία της ονομασίας, της προέλευσης και της μεθόδου παραγωγής αποκτά νόημα ακριβώς επειδή η μη εξουσιοδοτημένη χρήση τους μπορεί να παραγάγει αθέμιτο οικονομικό όφελος εις βάρος των νόμιμων παραγωγών και των καταναλωτών.

Η σύνδεση των κανονισμών με την αναλυτική επαλήθευση ενισχύεται από τις τεχνικές παρεμβάσεις του Joint Research Centre και από σύγχρονες προσεγγίσεις αλυσίδας επιμέλειας. Η τεχνική έκθεση του JRC για την αυθεντικοποίηση γεωγραφικής προέλευσης μέσω στοιχειακού αποτυπώματος υπογραμμίζει ότι οι ρυθμιστικές αξιώσεις των ΠΟΠ και ΠΓΕ μπορούν να υποστηριχθούν αποτελεσματικότερα όταν η τεκμηρίωση της γεωγραφικής σύνδεσης δεν παραμένει μόνο στον φάκελο προδιαγραφών αλλά συνοδεύεται από αναλυτικά δεδομένα που ενισχύουν τη διακριτική ικανότητα μεταξύ περιοχών παραγωγής (European Commission, Joint Research Centre, 2022). Παράλληλα, το πρότυπο ISO 22095 για την

αλυσίδα επιμέλειας προσφέρει ένα γενικό σχήμα κατανόησης του τρόπου με τον οποίο οι ισχυρισμοί προέλευσης μπορούν να διατηρούν την ακεραιότητά τους κατά τη μετακίνηση του προϊόντος στην εφοδιαστική αλυσίδα (International Organization for Standardization, 2020). Έτσι, οι κανονισμοί ΠΟΠ και ΠΓΕ δεν παραμένουν αποκομμένοι από την τεχνική και επιχειρησιακή διάσταση της συμμόρφωσης, αλλά συνδέονται με πρότυπα ιχνηλασιμότητας και μεθόδους επιβεβαίωσης που ενισχύουν την πρακτική εφαρμογή τους.

Η θεσμική συζήτηση γύρω από την αναθεώρηση της νομοθεσίας, όπως αποτυπώθηκε στο σχετικό ενημερωτικό σημείωμα της European Parliamentary Research Service, κατέδειξε ότι τα προηγούμενα νομοθετικά σχήματα, παρά την επιτυχία τους, παρουσίαζαν περιθώρια βελτίωσης ως προς την απλούστευση, την ταχύτητα διαδικασιών και τη θωράκιση έναντι καταχρήσεων, ιδίως στο ψηφιακό περιβάλλον και στο πεδίο της διασυνοριακής επιβολής (European Parliamentary Research Service, 2021). Υπό το πρίσμα αυτό, οι κανονισμοί ΠΟΠ και ΠΓΕ δεν συνιστούν στατικό δίκαιο, αλλά ένα πεδίο όπου η έννοια της ποιότητας επανακαθορίζεται διαρκώς μέσω της αλληλεπίδρασης αγοράς, διοίκησης, τεχνικής τεκμηρίωσης και προστασίας του ονόματος ως φορέα συλλογικής παραγωγικής φήμης. Για τα γαλακτοκομικά προϊόντα, όπου η σχέση μεταξύ τόπου, πρώτης ύλης, μεταποίησης και φήμης είναι συχνά εξαιρετικά πυκνή, η κατανόηση αυτών των κανονισμών δεν αφορά μόνον τη νομική ταξινόμηση προϊόντων αλλά την ίδια τη συγκρότηση της αυθεντικότητας ως ελέγξιμης, προστατεύσιμης και οικονομικά αξιοποιήσιμης ιδιότητας.

2.3 Έλεγχος και πιστοποίηση αυθεντικότητας

Ο έλεγχος και η πιστοποίηση της αυθεντικότητας τροφίμων συνιστούν διαδικασίες που υπερβαίνουν τη συμβατική διοικητική επιβεβαίωση συμμόρφωσης με προδιαγραφές και ενσωματώνουν ένα σύνολο επιστημονικών, τεχνικών και οργανωτικών πρακτικών, οι οποίες αποσκοπούν στη διασφάλιση της ταυτότητας, της προέλευσης και της ακεραιότητας των προϊόντων κατά μήκος της αγροδιατροφικής αλυσίδας. Η αυθεντικότητα, ως έννοια, δεν περιορίζεται σε μία μοναδική διάσταση, αλλά περιλαμβάνει την αντιστοιχία ανάμεσα στη δηλωμένη και στην πραγματική σύνθεση, την ακρίβεια της γεωγραφικής ένδειξης, τη συμμόρφωση με καθορισμένες μεθόδους παραγωγής και την απουσία παραπλανητικών

πρακτικών. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη πολυεπίπεδων συστημάτων ελέγχου, τα οποία συνδυάζουν διοικητικούς μηχανισμούς, πρότυπα ιχνηλασιμότητας και προηγμένες αναλυτικές τεχνικές.

Η ευρωπαϊκή προσέγγιση στηρίζεται σε ένα πλέγμα θεσμικών δομών και συνεργατικών μηχανισμών, όπως αποτυπώνεται στη λειτουργία του EU Agri-Food Fraud Network και του Alert and Cooperation Network. Οι ετήσιες εκθέσεις αυτών των δομών αναδεικνύουν ότι η απάτη που σχετίζεται με την προέλευση και την ταυτότητα τροφίμων δεν αποτελεί περιθωριακό φαινόμενο, αλλά συστηματική πρόκληση που απαιτεί συντονισμένη ανταπόκριση μεταξύ κρατών μελών, αρμόδιων αρχών και ευρωπαϊκών οργανισμών (European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety, 2020, 2021, European Commission, 2022, 2023). Η διακίνηση προϊόντων με ψευδείς ή παραπλανητικές ενδείξεις προέλευσης δημιουργεί όχι μόνο οικονομικές στρεβλώσεις αλλά και προβλήματα εμπιστοσύνης των καταναλωτών, γεγονός που καθιστά τον έλεγχο αυθεντικότητας κρίσιμο στοιχείο της πολιτικής ποιότητας.

Η παραδοσιακή διοικητική επιτήρηση, βασισμένη σε έγγραφα, δηλώσεις παραγωγών και επιτόπιους ελέγχους, αποδεικνύεται συχνά ανεπαρκής για την αντιμετώπιση σύνθετων μορφών απάτης. Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη πρακτική ελέγχου αυθεντικότητας ενσωματώνει αναλυτικές μεθόδους που επιτρέπουν την επιστημονική τεκμηρίωση της ταυτότητας ενός προϊόντος. Οι ανασκοπήσεις για τις μεθόδους αυθεντικοποίησης τροφίμων ζωικής προέλευσης καταδεικνύουν ότι η αξιοποίηση τεχνικών όπως η φασματοσκοπία, η χρωματογραφία και η φασματομετρία μάζας προσφέρει τη δυνατότητα ανίχνευσης διαφορών στη σύσταση που συνδέονται με την προέλευση ή με πιθανές νοθείες (Abbas et al., 2018). Η μετάβαση από τον διοικητικό στον επιστημονικά τεκμηριωμένο έλεγχο αντανάκλα μια ευρύτερη μεταβολή στην αντίληψη της αυθεντικότητας, η οποία δεν θεωρείται πλέον ζήτημα δήλωσης αλλά αποτέλεσμα μετρήσιμων ιδιοτήτων.

Στο ίδιο πνεύμα, οι σύγχρονες ανασκοπήσεις στον τομέα της αυθεντικοποίησης τροφίμων επισημαίνουν ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τη συνδυαστική χρήση διαφορετικών τεχνικών και από την εφαρμογή πολυμεταβλητών στατιστικών προσεγγίσεων. Η ολοκληρωμένη ανάλυση δεδομένων επιτρέπει τη δημιουργία προτύπων ταξινόμησης που διακρίνουν προϊόντα με βάση τη γεωγραφική τους προέλευση ή τη σύστασή τους, προσφέροντας ένα ισχυρό εργαλείο για την ανίχνευση αποκλίσεων από τις προδιαγραφές

(Haider et al., 2024). Η εξέλιξη αυτή συνδέεται με τη μετάβαση από στοχευμένες αναλύσεις σε μη στοχευμένες προσεγγίσεις, όπου το συνολικό «χημικό αποτύπωμα» ενός προϊόντος χρησιμοποιείται ως βάση για την ταυτοποίησή του.

Η ενσωμάτωση φασματοσκοπικών τεχνικών, όπως η υπέρυθρη και η Raman φασματοσκοπία, έχει ενισχύσει περαιτέρω τις δυνατότητες ταχείας και μη καταστροφικής ανάλυσης. Μελέτες που αξιοποιούν αυτές τις τεχνικές σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης δείχνουν ότι μπορούν να παραχθούν χαρακτηριστικά πρότυπα που διαφοροποιούν προϊόντα ως προς τη σύσταση και την προέλευσή τους, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με χημειομετρικές μεθόδους (Cebi et al., 2023, Xu et al., 2020). Η προσέγγιση αυτή αποκτά πρακτική αξία σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται ταχεία λήψη αποφάσεων, όπως οι έλεγχοι στην αγορά ή στις γραμμές παραγωγής.

Η αξιοποίηση ισοτοπικών τεχνικών αποτελεί ένα ακόμη πεδίο με ιδιαίτερη εφαρμογή στην πιστοποίηση προέλευσης. Οι αναλογίες σταθερών ισοτόπων μπορούν να αποτυπώσουν περιβαλλοντικές και γεωγραφικές συνθήκες, επιτρέποντας τη διάκριση προϊόντων που παράγονται σε διαφορετικές περιοχές. Εφαρμογές σε γαλακτοκομικά προϊόντα δείχνουν ότι η ισοτοπική σύσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση ισχυρισμών προέλευσης, ιδίως όταν συνδυάζεται με πολυμεταβλητές μεθόδους ταξινόμησης (O'Sullivan et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την επιστημονική βάση των ελέγχων και παρέχει αποδεικτικά στοιχεία που μπορούν να αξιοποιηθούν σε διοικητικές ή δικαστικές διαδικασίες.

Η τεχνική διάσταση του ελέγχου αυθεντικότητας συνδέεται στενά με ζητήματα ιχνηλασιμότητας και διαχείρισης πληροφοριών. Το πρότυπο ISO 22095 προτείνει ένα ενιαίο λεξιλόγιο και μοντέλα για την αλυσίδα επιμέλειας, τα οποία διευκολύνουν τη διατήρηση της ακεραιότητας των πληροφοριών που σχετίζονται με την ταυτότητα και την προέλευση ενός προϊόντος (International Organization for Standardization, 2020). Η σύνδεση αυτή είναι κρίσιμη, διότι τα αναλυτικά αποτελέσματα αποκτούν νόημα μόνο όταν μπορούν να ενταχθούν σε ένα ευρύτερο σύστημα τεκμηρίωσης που περιλαμβάνει δεδομένα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής.

Η ανάγκη για ολοκληρωμένα συστήματα ελέγχου αποτυπώνεται και σε τεχνικές εκθέσεις που εξετάζουν τις δυνατότητες των μεθόδων επαλήθευσης προέλευσης. Η σχετική μελέτη της UK Food Standards Agency επισημαίνει ότι καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν μπορεί να προσφέρει καθολική λύση και ότι η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από

το είδος του προϊόντος, το ερώτημα που τίθεται και το επίπεδο βεβαιότητας που απαιτείται (UK Food Standards Agency, 2024). Η διαπίστωση αυτή οδηγεί σε μια περισσότερο σύνθετη αντίληψη της πιστοποίησης αυθεντικότητας, όπου η αξιοπιστία προκύπτει από τη σύγκλιση διαφορετικών πηγών τεκμηρίωσης.

Η τεχνολογική πρόοδος ενισχύει περαιτέρω αυτή τη δυναμική μέσω της ανάπτυξης μεθόδων συγχώνευσης δεδομένων (data fusion), οι οποίες συνδυάζουν πληροφορίες από διαφορετικές αναλυτικές τεχνικές και τις επεξεργάζονται με προηγμένα υπολογιστικά εργαλεία. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ελαιολάδου, η ταυτόχρονη αξιοποίηση χημικών, φασματοσκοπικών και ισοτοπικών δεδομένων επιτρέπει τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου «δακτυλικού αποτυπώματος» του προϊόντος, βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβεια της ταυτοποίησης της γεωγραφικής του προέλευσης και τον εντοπισμό πιθανών περιπτώσεων νοθείας. Με τον τρόπο αυτό, η πιστοποίηση αυθεντικότητας μετατρέπεται ολοένα και περισσότερο σε πεδίο εφαρμογής προηγμένων αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων (Schwolow et al., 2019; Hong et al., 2023).

Η εφαρμογή αυτών των τεχνικών σε γαλακτοκομικά προϊόντα προσφέρει χαρακτηριστικά παραδείγματα. Μελέτες που χρησιμοποιούν φασματοσκοπία και πολυμεταβλητή ανάλυση έχουν δείξει ότι είναι δυνατή η ανίχνευση διαφορών που σχετίζονται με τη σύσταση του λίπους ή με τις διαδικασίες παραγωγής, επιτρέποντας την αναγνώριση αποκλίσεων από τα αναμενόμενα πρότυπα (Genis et al., 2020). Αντίστοιχα, εφαρμογές μεταβολομικής και μη στοχευμένων αναλύσεων έχουν καταδείξει ότι τα χημικά αποτυπώματα μπορούν να διαφοροποιήσουν προϊόντα που φέρουν διαφορετικό καθεστώς προστασίας ή προέλευσης (Rocchetti et al., 2018). Οι προσεγγίσεις αυτές ενισχύουν την ικανότητα των ελεγκτικών μηχανισμών να ανιχνεύουν περιπτώσεις μη συμμόρφωσης που δεν είναι εύκολα ορατές μέσω συμβατικών ελέγχων.

Η προστασία της αυθεντικότητας των τροφίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση στηρίζεται τόσο σε θεσμικούς μηχανισμούς πιστοποίησης όσο και σε επιστημονικά τεκμηριωμένες διαδικασίες ελέγχου. Η νομοθετική κατοχύρωση των συστημάτων ποιότητας, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη προηγμένων αναλυτικών τεχνικών και εργαλείων επεξεργασίας δεδομένων, επιτρέπει την αποτελεσματικότερη επαλήθευση της προέλευσης και των χαρακτηριστικών των τροφίμων. Η σύζευξη αυτή συμβάλλει όχι μόνο στην προστασία των παραγωγών και των καταναλωτών από φαινόμενα απάτης και παραπλάνησης, αλλά και στην ενίσχυση της

αξιοπιστίας των συστημάτων ποιότητας και της ανταγωνιστικότητας των ευρωπαϊκών αγροδιατροφικών προϊόντων (European Commission, 2021b; Schwolow et al., 2019).

2.4 Προβλήματα εφαρμογής και προκλήσεις

Παρά την ύπαρξη ενός εκτεταμένου και συνεκτικού κανονιστικού πλαισίου για την προστασία της γεωγραφικής προέλευσης και της αυθεντικότητας των τροφίμων, η αποτελεσματική εφαρμογή του εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Η λειτουργία των συστημάτων γεωγραφικών ενδείξεων εξαρτάται όχι μόνο από τις νομικές διατάξεις, αλλά και από τη διοικητική ικανότητα των αρμόδιων αρχών, τη διαθεσιμότητα κατάλληλων επιστημονικών εργαλείων και τον αποτελεσματικό συντονισμό μεταξύ των κρατών μελών. Σύμφωνα με αξιολογήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η διαφοροποίηση των διοικητικών πρακτικών και η πολυπλοκότητα των διαδικασιών εξακολουθούν να επηρεάζουν την ομοιόμορφη εφαρμογή των κανόνων και το επίπεδο προστασίας των προϊόντων (European Commission, 2021a). Επιπλέον, οι απαιτητικές διαδικασίες καταχώρισης και τεκμηρίωσης του δεσμού μεταξύ προϊόντος και γεωγραφικής περιοχής δημιουργούν σημαντικό διοικητικό φόρτο, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά ιδίως για μικρότερους παραγωγούς, περιορίζοντας τη συμμετοχή τους στα καθεστώτα προστασίας (AND International et al., 2020). Ως εκ τούτου, βασική πρόκληση παραμένει η διατήρηση μιας ισορροπίας μεταξύ της αυστηρότητας των ελέγχων και της λειτουργικότητας του συστήματος.

Η επιβολή των κανονισμών συνιστά ένα δεύτερο πεδίο δυσκολιών. Τα δεδομένα από τα δίκτυα συνεργασίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης καταδεικνύουν ότι η παραπλανητική χρήση γεωγραφικών ενδείξεων και οι πρακτικές απάτης εμφανίζονται με συνέπεια σε διάφορες κατηγορίες τροφίμων, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μηχανισμοί ελέγχου δεν λειτουργούν πάντα αποτρεπτικά (European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety, 2020, 2021). Η επανάληψη παρόμοιων περιστατικών σε διαδοχικά έτη, όπως αποτυπώνεται στις εκθέσεις του Alert and Cooperation Network, φανερώνει ότι οι ελεγκτικοί μηχανισμοί καλούνται να αντιμετωπίσουν ένα δυναμικό και εξελισσόμενο πεδίο παραβάσεων, όπου οι εμπλεκόμενοι φορείς προσαρμόζουν συνεχώς τις πρακτικές τους (European Commission,

2022, 2023). Η δυσκολία αυτή εντείνεται από τη διεθνοποίηση της αγοράς και την αύξηση των διασυνοριακών ροών προϊόντων, που καθιστούν αναγκαίο τον συντονισμό πολλαπλών αρχών.

Η τεχνική διάσταση του ελέγχου αυθεντικότητας εισάγει ένα διαφορετικό σύνολο προκλήσεων. Παρότι οι αναλυτικές μέθοδοι έχουν εξελιχθεί σημαντικά, η εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες δεν είναι πάντοτε απλή. Η ανασκόπηση των διαθέσιμων τεχνικών δείχνει ότι κάθε μέθοδος διαθέτει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ενώ η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από το είδος του προϊόντος, το ερώτημα ελέγχου και τη διαθεσιμότητα κατάλληλων βάσεων δεδομένων (Abbas et al., 2018). Ένας επιπλέον περιορισμός αφορά την απουσία καθολικά αποδεκτών προτύπων αναφοράς και εναρμονισμένων βάσεων δεδομένων για όλες τις κατηγορίες τροφίμων. Ως αποτέλεσμα, τα μοντέλα αυθεντικοποίησης που αναπτύσσονται για συγκεκριμένα προϊόντα ή γεωγραφικές περιοχές δεν είναι πάντοτε δυνατό να εφαρμοστούν με την ίδια αξιοπιστία σε διαφορετικά περιβάλλοντα παραγωγής. Η ανάγκη δημιουργίας τοπικών ή περιφερειακών βάσεων δεδομένων αναφοράς παραμένει επομένως κρίσιμη για την αποτελεσματική επαλήθευση της προέλευσης και της αυθεντικότητας των τροφίμων (Hong et al., 2023; Schwolow et al., 2019).

Η ανάγκη για συγκρισιμότητα και τυποποίηση αναδεικνύεται και στις τεχνικές εκθέσεις που εξετάζουν τη χρήση στοιχειακών και ισοτοπικών αποτυπωμάτων. Η δυνατότητα διάκρισης προϊόντων βάσει γεωγραφικής προέλευσης εξαρτάται από την ύπαρξη επαρκών δεδομένων αναφοράς και από τη σταθερότητα των μετρήσεων, στοιχεία που δεν είναι πάντοτε δεδομένα σε όλα τα περιβάλλοντα (European Commission, Joint Research Centre, 2022). Η πρόκληση αυτή δεν αφορά μόνο την ανάπτυξη τεχνικών, αλλά και τη διαχείριση δεδομένων σε μακροχρόνια βάση, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των συγκρίσεων.

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των αναλυτικών δεδομένων καθιστά αναγκαία τη χρήση προηγμένων μεθόδων στατιστικής ανάλυσης και μηχανικής μάθησης για την αυθεντικοποίηση των τροφίμων. Οι προσεγγίσεις αυτές επιτρέπουν την επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών και βελτιώνουν την ακρίβεια της ταξινόμησης, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται δεδομένα από διαφορετικές αναλυτικές τεχνικές μέσω μεθόδων συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) (Schwolow et al., 2019; Hong et al., 2023). Ωστόσο, η εφαρμογή τους συνοδεύεται από προκλήσεις που σχετίζονται με την ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων, καθώς και με την ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού, κατάλληλων υποδομών και εναρμονισμένων πρωτοκόλλων ανάλυσης.

Η εφαρμογή των τεχνικών αυτών σε συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων, όπως τα γαλακτοκομικά, αναδεικνύει επιπλέον δυσκολίες. Παράγοντες όπως η εποχικότητα, η διατροφή των ζώων και οι τοπικές συνθήκες παραγωγής μπορούν να επηρεάσουν τη σύσταση των προϊόντων, δημιουργώντας μεταβλητότητα που δυσχεραίνει την ταξινόμηση (Guo et al., 2021). Η διαφοροποίηση αυτή δεν συνιστά απαραίτητα ένδειξη μη συμμόρφωσης, αλλά φυσική συνέπεια της παραγωγικής διαδικασίας, γεγονός που απαιτεί προσεκτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η διάκριση μεταξύ φυσικής μεταβλητότητας και τεχνητής αλλοίωσης αποτελεί μια από τις πιο απαιτητικές πτυχές της πιστοποίησης αυθεντικότητας.

Η επιστημονική τεκμηρίωση αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν ενσωματώνεται στις διαδικασίες επίσημου ελέγχου και εφαρμογής της νομοθεσίας. Για να είναι αξιοποιήσιμα σε διοικητικό επίπεδο, τα αποτελέσματα των αναλύσεων πρέπει να προκύπτουν από επικυρωμένες και αναπαραγώγιμες μεθόδους, οι οποίες διασφαλίζουν την αξιοπιστία των συμπερασμάτων και επιτρέπουν τη χρήση τους ως αποδεικτικών στοιχείων. Όπως επισημαίνει η UK Food Standards Agency (2024), η αξιολόγηση των μεθόδων αυθεντικοποίησης δεν περιορίζεται στην επιστημονική τους ακρίβεια αλλά επεκτείνεται και στην καταλληλότητα τους για κανονιστική και ελεγκτική χρήση. Η απαίτηση αυτή αναδεικνύει τη στενή διασύνδεση μεταξύ επιστημονικής γνώσης και διοικητικής πρακτικής στο πεδίο της προστασίας της αυθεντικότητας των τροφίμων.

Η ιχνηλασιμότητα αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο άξονα προκλήσεων. Η διατήρηση της ακεραιότητας των πληροφοριών κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας απαιτεί συστήματα που να συνδέουν τα δεδομένα παραγωγής με τα αποτελέσματα των ελέγχων. Το πρότυπο ISO 22095 προτείνει ένα πλαίσιο για τη διαχείριση αυτής της πληροφορίας, όμως η εφαρμογή του προϋποθέτει τεχνικές υποδομές και οργανωτική ετοιμότητα που δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες (International Organization for Standardization, 2020). Η ασυνέχεια στην καταγραφή ή στη μεταφορά δεδομένων μπορεί να υπονομεύσει την αξιοπιστία των ελέγχων, ακόμη και όταν οι αναλυτικές μέθοδοι είναι ακριβείς.

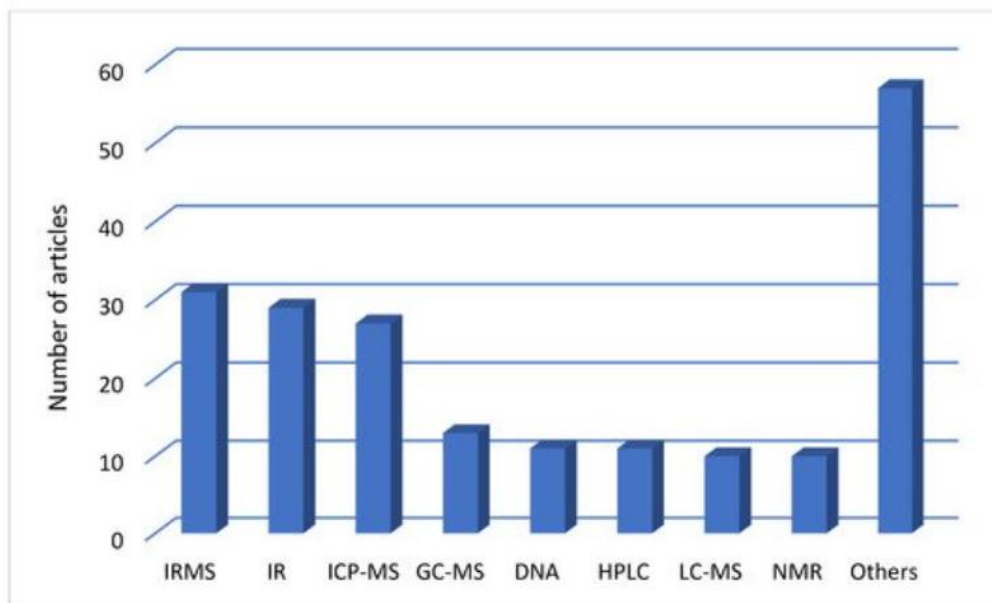
Η ψηφιοποίηση της αγοράς και η ανάπτυξη ηλεκτρονικού εμπορίου εισάγουν νέα πεδία αβεβαιότητας. Η διακίνηση προϊόντων μέσω διαδικτυακών πλατφορμών καθιστά δυσκολότερη την επιτήρηση και δημιουργεί περιβάλλοντα όπου οι παραπλανητικές πρακτικές μπορούν να εμφανιστούν με μεγαλύτερη ευκολία. Οι κανονιστικές παρεμβάσεις επιχειρούν να αντιμετωπίσουν αυτές τις εξελίξεις, ωστόσο η ταχύτητα μεταβολής της αγοράς συχνά

υπερβαίνει την ικανότητα προσαρμογής των μηχανισμών ελέγχου (European Parliament and the Council of the European Union, 2024).

Οι προκλήσεις αυτές αποτυπώνουν ότι η εφαρμογή των κανονισμών για την αυθεντικότητα δεν αποτελεί στατική διαδικασία αλλά ένα δυναμικό πεδίο όπου η θεσμική ρύθμιση, η επιστημονική γνώση και η πρακτική επιτήρηση αλληλεπιδρούν συνεχώς. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται από την ικανότητα ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών, τη βελτίωση των διαδικασιών και τη διατήρηση υψηλού επιπέδου συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων.

3. Ενόργανες Αναλυτικές Τεχνικές για τον Προσδιορισμό Γεωγραφικής Προέλευσης

Η αυθεντικοποίηση της γεωγραφικής προέλευσης των γαλακτοκομικών προϊόντων βασίζεται στην εφαρμογή σύγχρονων ενόργανων αναλυτικών τεχνικών, οι οποίες επιτρέπουν τη διερεύνηση της χημικής σύστασης και των χαρακτηριστικών του προϊόντος. Κάθε αναλυτική προσέγγιση παρέχει διαφορετικού τύπου πληροφορίες, όπως χημικά, στοιχειακά ή ισοτοπικά δεδομένα, συμβάλλοντας στην αξιόπιστη επαλήθευση της αυθεντικότητας και της γεωγραφικής προέλευσης. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ένα ευρύ φάσμα αναλυτικών τεχνικών, με διαφορετική συχνότητα εφαρμογής, ανάλογα με τον στόχο της εκάστοτε μελέτης και το είδος των πληροφοριών που επιδιώκεται να εξαχθούν.



Σχήμα 1-1 Συχνότητα εμφάνισης των κυριότερων αναλυτικών τεχνικών στη βιβλιογραφία για την αυθεντικοποίηση τροφίμων. Katerinopoulou et al., Foods, 2020.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1, οι ισοτοπικές τεχνικές (IRMS), η υπέρυθρη φασματοσκοπία (IR) και η ICP-MS συγκαταλέγονται στις συχνότερα χρησιμοποιούμενες αναλυτικές προσεγγίσεις στη σχετική βιβλιογραφία, γεγονός που αναδεικνύει τον σημαντικό τους ρόλο στην αυθεντικοποίηση τροφίμων. Παράλληλα, τεχνικές όπως η αέρια και η υγρή χρωματογραφία, η φασματομετρία μάζας και η πυρηνική μαγνητική αντήχηση αξιοποιούνται συμπληρωματικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

3.1 Φασματοσκοπικές Τεχνικές

Οι φασματοσκοπικές τεχνικές έχουν καθιερωθεί ως κεντρικό εργαλείο στην ανάλυση τροφίμων, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται ταχεία, μη καταστροφική και αξιόπιστη εκτίμηση της σύστασης και της ταυτότητας προϊόντων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία χαρακτηριστικών φασματικών αποτυπωμάτων που αντανακλούν τη χημική δομή και τη σύσταση των εξεταζόμενων δειγμάτων. Η εφαρμογή αυτών των τεχνικών στην αυθεντικοποίηση τροφίμων έχει αναπτυχθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα ανίχνευσης λεπτών διαφορών μεταξύ προϊόντων που προέρχονται

από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές ή έχουν υποστεί διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής.

Τεχνική	Αρχή λειτουργίας	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Εφαρμογές στην
---------	---------------------	---------------	-------------	-------------------

				αυθεντικοποίηση τροφίμων
FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	Απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από μοριακούς δεσμούς (C–H, O–H, N–H)	Ταχεία ανάλυση, μη καταστροφική μέθοδος, χαμηλό κόστος	Απαιτεί χημειομετρική επεξεργασία και κατάλληλες βάσεις αναφοράς	Ανίχνευση νοθείας και ταυτοποίηση γεωγραφικής προέλευσης γαλακτοκομικών, ελαίων και μελιού
NIR (Near Infrared Spectroscopy)	Απορρόφηση ακτινοβολίας στην περιοχή κοντινού υπέρυθρου	Ελάχιστη προετοιμασία δείγματος, γρήγορη ανάλυση, δυνατότητα επιτόπιων μετρήσεων	Μικρότερη ειδικότητα σε σχέση με άλλες τεχνικές	Ταξινόμηση προϊόντων και έλεγχος αυθεντικότητας τροφίμων
Raman Spectroscopy	Σκέδαση Raman από μοριακές δονήσεις	Συμπληρωματική πληροφορία προς FTIR, μη καταστροφική	Ευαισθησία σε φθορισμό και παρεμβολές	Διαχωρισμός γεωγραφικής προέλευσης και ανίχνευση νοθείας σε γαλακτοκομικά προϊόντα
PCA (Principal Component Analysis)	Πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση δεδομένων	Μείωση διαστάσεων και αναγνώριση προτύπων	Περιγραφική μέθοδος, όχι πάντα επαρκής για ταξινόμηση	Οπτικοποίηση διαφορών μεταξύ δειγμάτων
LDA (Linear Discriminant Analysis)	Γραμμική διακριτική ανάλυση ομάδων	Υψηλή αποτελεσματικότητα σε προβλήματα ταξινόμησης	Απαιτεί προκαθορισμένες ομάδες	Διαχωρισμός δειγμάτων διαφορετικής προέλευσης
PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis)	Επιβλεπόμενη πολυμεταβλητή ανάλυση	Υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης και πρόβλεψης	Κίνδυνος υπερπροσαρμογής (overfitting)	Ταυτοποίηση αυθεντικών και νοθευμένων τροφίμων

Πηγή: Προσαρμογή από Biancolillo (2020), Xu et al. (2020), Cebi et al. (2023) και Hong et al. (2023).

Η φασματοσκοπία υπερύθρου (Infrared Spectroscopy, IR) και κοντινού υπερύθρου (Near Infrared Spectroscopy, NIR) συγκαταλέγονται μεταξύ των πλέον διαδεδομένων τεχνικών για την αξιολόγηση της αυθεντικότητας των τροφίμων, καθώς προσφέρουν ταχεία, μη καταστροφική και σχετικά χαμηλού κόστους ανάλυση. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται στην αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη χημική σύσταση του δείγματος και ειδικότερα με τους μοριακούς δεσμούς C–H, O–H και N–H που απαντώνται σε βασικά συστατικά των τροφίμων, όπως τα λιπίδια, οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες. Ως αποτέλεσμα, κάθε δείγμα παράγει ένα χαρακτηριστικό φασματικό προφίλ, το οποίο αντανακλά τη συνολική χημική του σύσταση (Cebi et al., 2023).

Σε αντίθεση με τις κλασικές αναλυτικές προσεγγίσεις που στοχεύουν στην ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση συγκεκριμένων ενώσεων, η φασματοσκοπία υπερύθρου αξιοποιεί το σύνολο του φάσματος ως ένα μοναδικό «δακτυλικό αποτύπωμα» (fingerprint) του προϊόντος. Ακόμη και μικρές διαφορές στη χημική σύνθεση που σχετίζονται με τη γεωγραφική προέλευση, την ποικιλία, τις συνθήκες παραγωγής ή πιθανές πρακτικές νοθείας μπορούν να αποτυπωθούν στο φασματικό αυτό προφίλ. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου όγκου και της πολυπλοκότητας των δεδομένων που παράγονται, η ερμηνεία τους απαιτεί τη χρήση χημειομετρικών εργαλείων, όπως η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA), η γραμμική διακριτική ανάλυση (Linear Discriminant Analysis – LDA) και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (Cebi et al., 2023; Hong et al., 2023).

Ο συνδυασμός φασματοσκοπικών δεδομένων και χημειομετρικής επεξεργασίας επιτρέπει την ανάπτυξη μοντέλων ταξινόμησης με υψηλή ακρίβεια, τα οποία μπορούν να διακρίνουν αυθεντικά προϊόντα από νοθευμένα ή να διαφοροποιούν προϊόντα διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης. Για παράδειγμα, η τεχνολογία έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην επαλήθευση της αυθεντικότητας ελαιολάδου, μελιού, γαλακτοκομικών προϊόντων και οίνων, όπου η αναγνώριση προτύπων στο συνολικό φάσμα αποδεικνύεται συχνά πιο αποτελεσματική από την ανάλυση μεμονωμένων χημικών δεικτών. Για τον λόγο αυτό, η φασματοσκοπία υπερύθρου θεωρείται σήμερα μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες ταχείας διαλογής (screening technologies) για την ανίχνευση απάτης και την επαλήθευση της αυθεντικότητας τροφίμων στο πλαίσιο των συστημάτων ελέγχου ποιότητας και ασφάλειας (Cebi et al., 2023; Hong et al., 2023).

Η Raman φασματοσκοπία προσφέρει ένα συμπληρωματικό σύνολο πληροφοριών, καθώς βασίζεται σε διαφορετικό φυσικό μηχανισμό και επιτρέπει την ανάλυση δονήσεων μορίων που δεν είναι πάντοτε ορατές στο υπέρυθρο φάσμα. Η συνδυαστική χρήση των δύο τεχνικών ενισχύει την ικανότητα διάκρισης μεταξύ δειγμάτων, ιδίως όταν πρόκειται για σύνθετες μήτρες όπως τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Η εφαρμογή Raman σε συνδυασμό με πολυμεταβλητή ανάλυση έχει αποδείξει ότι μπορεί να εντοπίσει διαφορές στη σύσταση λιπαρών ή σε άλλες χημικές παραμέτρους, επιτρέποντας την ανίχνευση αποκλίσεων από τα αναμενόμενα πρότυπα (Xu et al., 2020). Η προσέγγιση αυτή δεν απαιτεί εκτεταμένη προετοιμασία δειγμάτων, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε συνθήκες όπου η ταχύτητα είναι κρίσιμη.

Η αξία των φασματοσκοπικών τεχνικών στην αυθεντικοποίηση τροφίμων δεν προκύπτει μόνο από την ικανότητά τους να παράγουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων, αλλά κυρίως από τη δυνατότητα επεξεργασίας και ερμηνείας των δεδομένων αυτών μέσω χημειομετρικών μεθόδων. Τα φάσματα που προκύπτουν από τεχνικές όπως η FTIR και η NIR περιλαμβάνουν εκατοντάδες ή και χιλιάδες μεταβλητές, οι οποίες είναι δύσκολο να αξιολογηθούν με συμβατικές στατιστικές προσεγγίσεις. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται πολυμεταβλητές τεχνικές, όπως η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA), η Μερική Ελαχίστων Τετραγώνων Διακριτική Ανάλυση (PLS-DA) και άλλοι αλγόριθμοι ταξινόμησης, οι οποίοι επιτρέπουν την αναγνώριση προτύπων και τη διαφοροποίηση ομάδων δειγμάτων (Biancolillo, 2020).

Η προσέγγιση αυτή μεταβάλλει ουσιαστικά τη φιλοσοφία της ανάλυσης. Αντί να αναζητείται η παρουσία μίας συγκεκριμένης ένωσης ως δείκτη αυθεντικότητας, εξετάζεται η συνολική δομή των δεδομένων και οι σχέσεις μεταξύ πολλών μεταβλητών ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ελαιολάδου, ένα μοντέλο PCA μπορεί να ομαδοποιήσει δείγματα ανάλογα με τη γεωγραφική τους προέλευση, ακόμη και όταν οι διαφορές στις επιμέρους χημικές παραμέτρους είναι μικρές. Αντίστοιχα, σε μελέτες για το μέλι ή το κρασί, η χημειομετρική ανάλυση έχει επιτρέψει τη διάκριση προϊόντων διαφορετικής προέλευσης μέσω της συνολικής φασματικής τους υπογραφής και όχι μέσω μεμονωμένων δεικτών (Biancolillo, 2020).

Η περαιτέρω εξέλιξη των φασματοσκοπικών εφαρμογών εκφράζεται μέσω της υπερφασματικής απεικόνισης (Hyperspectral Imaging – HSI), η οποία συνδυάζει τη

φασματική πληροφορία με τη χωρική απεικόνιση του δείγματος. Σε αντίθεση με τις συμβατικές φασματοσκοπικές τεχνικές, οι οποίες παρέχουν ένα μέσο φάσμα για το σύνολο του δείγματος, η υπερφασματική απεικόνιση επιτρέπει την απόκτηση φάσματος για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός ανομοιογενειών ή τοπικών διαφοροποιήσεων στη σύσταση του τροφίμου. Για παράδειγμα, σε προϊόντα κρέατος μπορεί να αποκαλυφθεί η παρουσία διαφορετικών πρώτων υλών σε συγκεκριμένες περιοχές του δείγματος, ενώ σε φρούτα και λαχανικά μπορούν να εντοπιστούν αλλοιώσεις ή ποιοτικές αποκλίσεις που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι (Roberts et al., 2018).

Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων από διαφορετικές αναλυτικές πλατφόρμες οδήγησε επίσης στην ανάπτυξη της συγχώνευσης δεδομένων (data fusion). Η λογική της προσέγγισης αυτής βασίζεται στην παραδοχή ότι καμία μεμονωμένη τεχνική δεν μπορεί να αποτυπώσει πλήρως όλα τα χαρακτηριστικά ενός προϊόντος. Έτσι, δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές αναλυτικές μεθόδους συνδυάζονται σε ένα ενιαίο μοντέλο, ώστε να αξιοποιούνται οι συμπληρωματικές πληροφορίες που παρέχει κάθε τεχνική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο συνδυασμός αέριας χρωματογραφίας–φασματομετρίας κινητικότητας ιόντων (GC-IMS) με φασματοσκοπία μέσου υπερύθρου (FT-MIR), ο οποίος έχει αποδειχθεί αποτελεσματικότερος στη διάκριση παρόμοιων δειγμάτων σε σύγκριση με τη χρήση κάθε τεχνικής ξεχωριστά (Schwelow et al., 2019).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι προσεγγίσεις αυτές συνοδεύονται από σημαντικές μεθοδολογικές απαιτήσεις. Η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων προϋποθέτει μεγάλα και αντιπροσωπευτικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης, κατάλληλη επικύρωση των αποτελεσμάτων και προσεκτική επιλογή αλγορίθμων, ώστε να αποφεύγεται η υπερπροσαρμογή (overfitting). Επομένως, η επιτυχής εφαρμογή της χημειομετρίας, της υπερφασματικής απεικόνισης και της συγχώνευσης δεδομένων εξαρτάται όχι μόνο από τις αναλυτικές τεχνικές καθαυτές, αλλά και από την ποιότητα των δεδομένων και τη σωστή σχεδίαση των υπολογιστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία τους (Biancolillo, 2020; Schwelow et al., 2019).

Η εφαρμογή φασματοσκοπικών τεχνικών σε γαλακτοκομικά προϊόντα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της πολυπλοκότητας της σύστασής τους. Η παρουσία λιπαρών, πρωτεϊνών και υδατανθράκων δημιουργεί φάσματα με πλούσια πληροφορία, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διαφοροποίηση προϊόντων ως προς την προέλευση ή τη

μέθοδο παραγωγής. Μελέτες που χρησιμοποιούν φασματοσκοπικές τεχνικές σε τυριά έχουν δείξει ότι είναι δυνατή η ανίχνευση διαφορών που σχετίζονται τόσο με τη διαδικασία παραγωγής όσο και με τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, παρέχοντας αποτελεσματικά εργαλεία για τον έλεγχο συμμόρφωσης και την επαλήθευση της αυθεντικότητας (Genis et al., 2020). Για παράδειγμα, διαφοροποιήσεις στη σύσταση του γάλακτος, οι οποίες οφείλονται στο ζωικό είδος προέλευσης (πρόβειο, κατσικίσιο ή αγελαδινό γάλα), στις ζωοτροφές ή στις συνθήκες εκτροφής, αποτυπώνονται στα φασματικά προφίλ των τελικών προϊόντων. Αντίστοιχα, διαφορές που σχετίζονται με τη διάρκεια ωρίμανσης ή με την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνολογικών διαδικασιών κατά την παραγωγή μπορούν επίσης να ανιχνευθούν μέσω της ανάλυσης των φασματικών δεδομένων. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για προϊόντα που προστατεύονται από καθεστώτα ποιότητας, όπως τα τυριά ΠΟΠ, όπου η χρήση μη εγκεκριμένων πρώτων υλών ή η απόκλιση από τις προβλεπόμενες προδιαγραφές μπορεί να επηρεάσει τόσο την αυθεντικότητα όσο και την εμπορική αξία του προϊόντος (Genis et al., 2020).

Η αξιοπιστία των φασματοσκοπικών μεθόδων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων και από την ορθή εφαρμογή των στατιστικών τεχνικών. Η ύπαρξη θορύβου, η μεταβλητότητα των δειγμάτων και οι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση διαδικασιών προεπεξεργασίας και επικύρωσης των μοντέλων. Η ανάγκη αυτή αναδεικνύεται σε σύγχρονες ανασκοπήσεις, όπου επισημαίνεται ότι η επιτυχία των εφαρμογών εξαρτάται όχι μόνο από την επιλογή της τεχνικής αλλά και από τη συνολική στρατηγική ανάλυσης (Haider et al., 2024).

Η εξέλιξη των φασματοσκοπικών τεχνικών συνδέεται στενά με την πρόοδο στην υπολογιστική επεξεργασία δεδομένων. Η χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης (machine learning) επιτρέπει την ανάπτυξη σύνθετων μοντέλων ανάλυσης, ικανών να επεξεργάζονται μεγάλο αριθμό μεταβλητών και να αναγνωρίζουν πρότυπα που δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμα με τις συμβατικές στατιστικές τεχνικές. Σε αντίθεση με τις κλασικές γραμμικές προσεγγίσεις, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να εντοπίζουν μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών ενός δείγματος, δηλαδή αλληλεπιδράσεις που δεν ακολουθούν απλές αναλογικές μεταβολές. Στο πεδίο της αυθεντικοποίησης τροφίμων, η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα χαρακτηριστικά που συνδέονται με τη γεωγραφική προέλευση, τη μέθοδο παραγωγής ή τη νοθεία συχνά προκύπτουν από πολύπλοκους συνδυασμούς χημικών

και φυσικών παραμέτρων και όχι από μία μεμονωμένη μεταβλητή (Biancolillo, 2020; Hong et al., 2023).

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του μελιού ή του ελαιολάδου, η αυθεντικότητα δεν καθορίζεται από μία συγκεκριμένη ένωση αλλά από το συνολικό πρότυπο που σχηματίζεται από εκατοντάδες χημικούς δείκτες. Ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης μπορεί να εκπαιδευτεί σε δείγματα γνωστής προέλευσης και να αναγνωρίζει συνδυασμούς χαρακτηριστικών που διαφοροποιούν τα αυθεντικά προϊόντα από τα νοθευμένα με μεγαλύτερη ακρίβεια από ό,τι οι παραδοσιακές στατιστικές μέθοδοι. Με τον τρόπο αυτό, η μηχανική μάθηση συμβάλλει στη βελτίωση της ταξινόμησης και της πρόβλεψης, ιδιαίτερα όταν τα διαθέσιμα δεδομένα προέρχονται από πολλαπλές αναλυτικές τεχνικές και παρουσιάζουν υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας (Hong et al., 2023).

. Η κατεύθυνση αυτή ενισχύει την ικανότητα των φασματοσκοπικών τεχνικών να ανταποκρίνονται σε απαιτητικές εφαρμογές, όπως η ανίχνευση νοθείας ή η επαλήθευση γεωγραφικής προέλευσης. Παράλληλα, δημιουργεί ανάγκη για διαφάνεια και ερμηνευσιμότητα, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κανονιστικά περιβάλλοντα.

Η σύγχρονη προσέγγιση στην αυθεντικοποίηση τροφίμων αντιμετωπίζει τις φασματοσκοπικές τεχνικές ως τμήματα ολοκληρωμένων συστημάτων ανάλυσης και όχι ως αυτόνομα εργαλεία ελέγχου. Τα φασματικά δεδομένα συνδυάζονται συχνά με πληροφορίες που προέρχονται από άλλες αναλυτικές τεχνικές, όπως η χρωματογραφία, η ισοτοπική ανάλυση ή η υπερφασματική απεικόνιση, και υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω χημειομετρικών και υπολογιστικών μεθόδων. Η ολοκληρωμένη αυτή προσέγγιση επιτρέπει την αξιοποίηση συμπληρωματικών πληροφοριών και τη δημιουργία πιο αξιόπιστων μοντέλων ταξινόμησης, βελτιώνοντας την ικανότητα διάκρισης αυθεντικών και μη αυθεντικών προϊόντων σε σύγκριση με τη χρήση μιας μόνο αναλυτικής τεχνικής (Biancolillo, 2020; Schwolow et al., 2019; Hong et al., 2023). Η ενσωμάτωσή τους με άλλες αναλυτικές μεθόδους και με συστήματα ιχνηλασιμότητας δημιουργεί ένα πολυδιάστατο πλαίσιο, στο οποίο η πληροφορία προκύπτει από τη σύγκλιση διαφορετικών πηγών. Η κατεύθυνση αυτή αντανάκλα την ανάγκη για ολοκληρωμένες λύσεις που να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της σύγχρονης αγροδιατροφικής αλυσίδας, όπου η αυθεντικότητα και η ποιότητα αποτελούν διαρκώς επαναπροσδιοριζόμενες έννοιες.

3.2 Χρωματογραφικές Μέθοδοι

Οι χρωματογραφικές μέθοδοι αποτελούν έναν από τους πλέον καθιερωμένους πυλώνες στην ανάλυση τροφίμων, ιδίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή διακριτική ικανότητα ως προς τον διαχωρισμό και την ταυτοποίηση επιμέρους χημικών ενώσεων. Σε αντίθεση με τις φασματοσκοπικές τεχνικές που βασίζονται σε ολιστικά αποτυπώματα, η χρωματογραφία επιτρέπει την απομόνωση και την ποσοτικοποίηση συγκεκριμένων συστατικών, προσφέροντας έτσι μια πιο στοχευμένη προσέγγιση στην αξιολόγηση της σύστασης. Η αξιοποίησή της στην αυθεντικοποίηση τροφίμων στηρίζεται στην αρχή ότι η χημική σύσταση ενός προϊόντος αντανακλά το περιβάλλον παραγωγής, τις πρώτες ύλες και τις τεχνολογικές διαδικασίες που έχουν εφαρμοστεί.

Η αέρια χρωματογραφία και η υγρή χρωματογραφία αποτελούν τις δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων που χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα αυτό. Η πρώτη είναι κατάλληλη για πτητικές και ημιπτητικές ενώσεις, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται για την ανάλυση μη πτητικών ή θερμοευαίσθητων συστατικών. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από τη φύση των αναλυόμενων ενώσεων και από το ερώτημα που τίθεται. Η δυνατότητα λεπτομερούς διαχωρισμού που προσφέρουν αυτές οι μέθοδοι επιτρέπει την αναγνώριση προτύπων που σχετίζονται με τη γεωγραφική προέλευση ή με πιθανές μορφές νοθείας, ιδίως όταν τα δεδομένα ενσωματώνονται σε πολυμεταβλητά μοντέλα (Abbas et al., 2018).

Η σύνδεση της χρωματογραφίας με τη φασματομετρία μάζας έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες ταυτοποίησης. Η συνδυασμένη χρήση των τεχνικών αυτών επιτρέπει όχι μόνο τον διαχωρισμό αλλά και τον προσδιορισμό της μοριακής δομής των ενώσεων, παρέχοντας ένα υψηλό επίπεδο αναλυτικής ακρίβειας. Οι εφαρμογές σε τρόφιμα δείχνουν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποκαλύψει λεπτές διαφοροποιήσεις στη σύσταση, οι οποίες δεν είναι ανιχνεύσιμες με λιγότερο ευαίσθητες μεθόδους. Σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται τεκμηρίωση της αυθεντικότητας με επιστημονικά αποδεικτικά στοιχεία, η συνδυασμένη χρήση χρωματογραφίας και φασματομετρίας μάζας προσφέρει ένα ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο (Souza & Catharino, 2018).

Η εφαρμογή των χρωματογραφικών μεθόδων στην ανάλυση λιπαρών οξέων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αυθεντικοποίηση γαλακτοκομικών προϊόντων, καθώς το προφίλ των λιπιδίων επηρεάζεται άμεσα από παράγοντες που σχετίζονται με την προέλευση και τον τρόπο παραγωγής. Η διατροφή των ζώων, οι συνθήκες εκτροφής, η εποχικότητα και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής διαμορφώνουν διαφορετικά πρότυπα λιπαρών οξέων στο γάλα, τα οποία μεταφέρονται στα τελικά προϊόντα. Ως αποτέλεσμα, η χρωματογραφική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαφοροποίηση προϊόντων ανάλογα με τη γεωγραφική τους προέλευση ή το είδος των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση τυριών ΠΟΠ, η ανάλυση των λιπαρών οξέων μπορεί να συμβάλει στην ανίχνευση της χρήσης μη επιτρεπόμενων τύπων γάλακτος ή στην επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις προβλεπόμενες προδιαγραφές παραγωγής. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία για προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπου η αυθεντικότητα συνδέεται άμεσα με τη διατήρηση της εμπορικής αξίας και της εμπιστοσύνης των καταναλωτών (Genis et al., 2020; Danezis et al., 2016). Η ανάλυση αυτών των προτύπων επιτρέπει τη διαφοροποίηση προϊόντων και την ανίχνευση αποκλίσεων από τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά (Gómez-Cortés et al., 2018). Η προσέγγιση αυτή αποκτά ιδιαίτερη αξία σε προϊόντα με προστατευόμενη ονομασία, όπου η σύνδεση με τον τόπο αποτελεί στοιχείο της ταυτότητας.

Η αξιοποίηση μη στοχευμένων χρωματογραφικών προσεγγίσεων ενισχύει περαιτέρω τις δυνατότητες ανάλυσης. Αντί να εστιάζουν σε συγκεκριμένες ενώσεις, οι προσεγγίσεις αυτές εξετάζουν το συνολικό χημικό προφίλ ενός προϊόντος, επιτρέποντας την ανίχνευση μοτίβων που σχετίζονται με την προέλευση ή με την τεχνολογική επεξεργασία. Μελέτες που εφαρμόζουν μη στοχευμένη φασματομετρία σε συνδυασμό με χρωματογραφία έχουν δείξει ότι είναι δυνατή η διάκριση προϊόντων διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης με υψηλό βαθμό ακρίβειας (Popping et al., 2017). Η προσέγγιση αυτή μετατοπίζει το ενδιαφέρον από την ανάλυση μεμονωμένων συστατικών προς τη συνολική χημική υπογραφή του προϊόντος.

Η ενσωμάτωση των δεδομένων αυτών σε πολυμεταβλητά μοντέλα αποτελεί κρίσιμο στάδιο της ανάλυσης. Η χρήση στατιστικών και υπολογιστικών μεθόδων επιτρέπει την ανάδειξη υποκείμενων δομών και τη δημιουργία ταξινομητικών μοντέλων που διαχωρίζουν ομάδες δειγμάτων. Η εφαρμογή τέτοιων προσεγγίσεων σε συνδυασμό με χρωματογραφικά δεδομένα έχει αποδείξει ότι μπορεί να ενισχύσει τη διακριτική ικανότητα, ιδίως όταν οι

διαφορές μεταξύ προϊόντων είναι λεπτές (Biancolillo, 2020). Η επιτυχία αυτών των μοντέλων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων και από την επάρκεια των συνόλων εκπαίδευσης.

Η χρήση χρωματογραφικών μεθόδων δεν περιορίζεται στην ανάλυση σύστασης, αλλά επεκτείνεται και στην ανίχνευση νοθείας. Η δυνατότητα ταυτοποίησης ξένων ή μη αναμενόμενων ενώσεων καθιστά τις τεχνικές αυτές ιδιαίτερα χρήσιμες για τον εντοπισμό προσμίξεων ή υποκαταστάσεων. Σε περιπτώσεις όπου τα προϊόντα έχουν υποστεί επεξεργασία που μεταβάλλει τη σύστασή τους, η χρωματογραφία μπορεί να αποκαλύψει ίχνη που υποδηλώνουν μη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές. Η εφαρμογή αυτή συνδέεται άμεσα με την ανάγκη προστασίας της αγοράς από παραπλανητικές πρακτικές.

⁷Η ανάπτυξη τεχνικών που συνδυάζουν χρωματογραφία με ισοτοπική ανάλυση προσφέρει νέες δυνατότητες στην επαλήθευση προέλευσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μελέτη της ισοτοπικής σύστασης συγκεκριμένων ενώσεων, παρέχοντας πληροφορίες που συνδέονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες παραγωγής. Η χρήση τέτοιων τεχνικών σε τρόφιμα έχει δείξει ότι μπορεί να ενισχύσει την ακρίβεια της ταξινόμησης και να προσφέρει επιπλέον επίπεδα τεκμηρίωσης (Perini & Bontempo, 2022). Η συνδυαστική ανάλυση διαφορετικών τύπων δεδομένων δημιουργεί ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αυθεντικοποίηση.

Η εφαρμογή των χρωματογραφικών μεθόδων σε πραγματικές συνθήκες συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Η ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό, η απαιτούμενη προετοιμασία δειγμάτων και ο χρόνος ανάλυσης περιορίζουν τη δυνατότητα χρήσης τους σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται άμεση απόκριση. Παράλληλα, η ερμηνεία των δεδομένων απαιτεί υψηλό επίπεδο εξειδίκευσης, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εκπαίδευση προσωπικού και την ανάπτυξη τυποποιημένων πρωτοκόλλων. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την ευρεία εφαρμογή των μεθόδων, ιδίως σε μικρότερες μονάδες ή σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους.

Η σύγχρονη τάση στον τομέα της αυθεντικοποίησης τροφίμων προσανατολίζεται προς την ολοκληρωμένη αξιοποίηση διαφορετικών τεχνικών. Η συνδυαστική χρήση χρωματογραφίας, φασματοσκοπίας και υπολογιστικών μεθόδων επιτρέπει την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων συστημάτων ελέγχου, τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της αγοράς και της κανονιστικής εποπτείας. Η κατεύθυνση αυτή αντανακλά την ανάγκη για

πολυδιάστατες προσεγγίσεις που να λαμβάνουν υπόψη τη σύνθετη φύση των τροφίμων και τις πολλαπλές παραμέτρους που επηρεάζουν την αυθεντικότητά τους.

3.3 Φασματομετρία Μάζας και Ισοτοπική Ανάλυση

Η φασματομετρία μάζας και η ισοτοπική ανάλυση συνιστούν ένα ιδιαίτερα εξελιγμένο πεδίο αναλυτικών τεχνικών, το οποίο έχει αποκτήσει αυξανόμενη βαρύτητα στην αυθεντικοποίηση τροφίμων και στην επαλήθευση γεωγραφικής προέλευσης. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που βασίζονται σε συνολικά χημικά αποτυπώματα, οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν την ανίχνευση και τον προσδιορισμό μοριακών και ισοτοπικών χαρακτηριστικών με υψηλή ακρίβεια, προσφέροντας ένα επίπεδο ανάλυσης που συνδέεται άμεσα με φυσικές και βιογεωχημικές διεργασίες. Η αξία τους έγκειται στο γεγονός ότι οι ισοτοπικές αναλογίες και τα μοριακά προφίλ δεν επηρεάζονται εύκολα από επιφανειακές παρεμβάσεις, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για τη διερεύνηση της αυθεντικότητας σε βάθος.

Η φασματομετρία μάζας βασίζεται στη μέτρηση της μάζας και της σχετικής αφθονίας ιόντων, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τη μοριακή σύσταση ενός δείγματος. Όταν συνδυάζεται με χρωματογραφικές τεχνικές, όπως η αέρια χρωματογραφία (GC-MS) ή η υγρή χρωματογραφία (LC-MS), καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός και η ταυτοποίηση μεγάλου αριθμού ενώσεων με υψηλή ευαισθησία και εκλεκτικότητα. Στο πεδίο της αυθεντικοποίησης τροφίμων, η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ανίχνευση μοριακών δεικτών που σχετίζονται με τη γεωγραφική προέλευση, τις πρώτες ύλες και τις συνθήκες παραγωγής. Για παράδειγμα, στο ελαιόλαδο μπορούν να αναγνωριστούν χαρακτηριστικά προφίλ πολυφαινόλων και πτητικών ενώσεων που συνδέονται με συγκεκριμένες ποικιλίες και περιοχές παραγωγής, ενώ στο κρασί και στο μέλι η ανάλυση μεταβολιτών και αρωματικών συστατικών συμβάλλει στην επαλήθευση της προέλευσης και στην ανίχνευση πιθανών περιπτώσεων νοθείας. Με τον τρόπο αυτό, η φασματομετρία μάζας παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την αποκάλυψη λεπτών διαφοροποιήσεων στη σύσταση των τροφίμων, οι οποίες αντανakλούν το περιβάλλον παραγωγής και τις τεχνολογικές διαδικασίες που έχουν εφαρμοστεί (Souza & Catharino, 2018; Danezis et al., 2016).

Η ισοτοπική ανάλυση, ιδίως μέσω της φασματομετρίας λόγου ισοτόπων (Isotope Ratio Mass Spectrometry – IRMS), προσφέρει μια συμπληρωματική διάσταση στην αυθεντικοποίηση τροφίμων. Η μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση των αναλογιών μεταξύ

σταθερών ισοτόπων στοιχείων όπως ο άνθρακας ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), το άζωτο ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), το οξυγόνο ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) και το υδρογόνο ($^2\text{H}/^1\text{H}$). Επειδή οι αναλογίες αυτές επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς και γεωγραφικούς παράγοντες, κάθε προϊόν αποκτά ένα χαρακτηριστικό ισοτοπικό αποτύπωμα που αντανακλά τις συνθήκες παραγωγής του. Για παράδειγμα, οι διαφορές στο κλίμα, στις βροχοπτώσεις και στις γεωργικές πρακτικές μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές ισοτοπικές υπογραφές μεταξύ προϊόντων που προέρχονται από διαφορετικές περιοχές. Ως αποτέλεσμα, η ισοτοπική ανάλυση χρησιμοποιείται ευρέως για την επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης και την ανίχνευση νοθείας σε προϊόντα όπως το κρασί, το μέλι, το ελαιόλαδο και τα γαλακτοκομικά προϊόντα (Danezis et al., 2016; Camin et al., 2017). Οι αναλογίες σταθερών ισοτόπων, όπως του άνθρακα, του οξυγόνου και του υδρογόνου, αντανακλούν περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως το κλίμα, το υψόμετρο και η γεωγραφική θέση. Η καταγραφή αυτών των αναλογιών επιτρέπει τη δημιουργία προτύπων που συνδέονται με συγκεκριμένες περιοχές, καθιστώντας δυνατή τη διάκριση προϊόντων διαφορετικής προέλευσης (Liu et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή έχει ιδιαίτερη αξία σε περιπτώσεις όπου οι διαφορές στη χημική σύσταση είναι περιορισμένες και απαιτείται ένα πιο ευαίσθητο εργαλείο ανίχνευσης.

Η εφαρμογή ισοτοπικών τεχνικών στα γαλακτοκομικά προϊόντα βασίζεται στην παραδοχή ότι οι περιβαλλοντικές και παραγωγικές συνθήκες επηρεάζουν τις αναλογίες των σταθερών ισοτόπων που ενσωματώνονται στους βιολογικούς ιστούς των ζώων. Παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση, το κλίμα, το υψόμετρο και κυρίως η διατροφή των ζώων διαμορφώνουν χαρακτηριστικές ισοτοπικές υπογραφές στο γάλα, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες προέλευσης. Για παράδειγμα, η κατανάλωση διαφορετικών τύπων βλάστησης ή ζωοτροφών οδηγεί σε διαφοροποιήσεις στις αναλογίες ισοτόπων άνθρακα και αζώτου, ενώ οι τοπικές κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν τις αναλογίες ισοτόπων υδρογόνου και οξυγόνου. Ως αποτέλεσμα, γάλα που παράγεται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές εμφανίζει διακριτά ισοτοπικά πρότυπα, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την επαλήθευση της προέλευσης (Liu et al., 2019).

Η χρησιμότητα της μεθόδου δεν περιορίζεται στο νωπό γάλα. Οι ισοτοπικές υπογραφές διατηρούνται σε σημαντικό βαθμό κατά τη μεταποίηση και είναι δυνατό να ανιχνευθούν σε προϊόντα όπως το τυρί και το βούτυρο. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή της ισοτοπικής ανάλυσης σε προϊόντα προστατευόμενης ονομασίας προέλευσης, όπου η γεωγραφική προέλευση

συνδέεται άμεσα με την ποιότητα και την οικονομική αξία. Στην περίπτωση τυριών ΠΟΠ, η μέθοδος μπορεί να συμβάλει στην επαλήθευση ότι οι πρώτες ύλες προέρχονται από τις προβλεπόμενες περιοχές παραγωγής και ότι τηρούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές, ενισχύοντας έτσι τους μηχανισμούς προστασίας της αυθεντικότητας και της ιχνηλασιμότητας (Liu et al., 2019; Danezis et al., 2016).

Η συνδυαστική χρήση ισοτοπικής ανάλυσης και πολυμεταβλητών μεθόδων ταξινόμησης ενισχύει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Μελέτες που εφαρμόζουν αλγορίθμους μηχανικής μάθησης σε ισοτοπικά δεδομένα δείχνουν ότι είναι δυνατή η ανάπτυξη μοντέλων που διακρίνουν προϊόντα με βάση την προέλευσή τους με υψηλό ποσοστό επιτυχίας (O'Sullivan et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση μεγάλων συνόλων δεδομένων και την ανίχνευση σύνθετων σχέσεων, οι οποίες δεν είναι εύκολα αντιληπτές μέσω παραδοσιακών στατιστικών μεθόδων.

Η εξέλιξη των ισοτοπικών τεχνικών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο εξειδικευμένων προσεγγίσεων, όπως η ανάλυση ισοτόπων συγκεκριμένων ενώσεων (Compound-Specific Isotope Analysis – CSIA). Σε αντίθεση με τη συμβατική ισοτοπική ανάλυση, η οποία εξετάζει τη μέση ισοτοπική σύσταση του συνόλου του δείγματος, η CSIA επιτρέπει τη μέτρηση των ισοτοπικών αναλογιών σε επιμέρους μόρια, όπως λιπαρά οξέα, αμινοξέα ή σάκχαρα. Η προσέγγιση αυτή παρέχει λεπτομερέστερες πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και τις συνθήκες παραγωγής των τροφίμων, καθώς διαφορετικές ενώσεις μπορεί να επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο από περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες (Perini & Bontempo, 2022).

Η αυξημένη αναλυτική ανάλυση που προσφέρει η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου οι διαφορές μεταξύ γεωγραφικών περιοχών ή συστημάτων παραγωγής είναι περιορισμένες. Για παράδειγμα, η εξέταση συγκεκριμένων λιπαρών οξέων σε ελαιόλαδα ή γαλακτοκομικά προϊόντα μπορεί να αποκαλύψει διαφοροποιήσεις που δεν είναι εμφανείς μέσω της συνολικής ισοτοπικής ανάλυσης. Αντίστοιχα, η ανάλυση επιμέρους σακχάρων στο μέλι ή στο κρασί μπορεί να συμβάλει στην ανίχνευση νοθείας και στην ακριβέστερη επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης. Ως εκ τούτου, η ανάλυση ισοτόπων συγκεκριμένων ενώσεων θεωρείται μία από τις πλέον υποσχόμενες κατευθύνσεις για τη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας των συστημάτων αυθεντικοποίησης τροφίμων (Perini & Bontempo, 2022).

Η ενσωμάτωση ισοτοπικών δεδομένων με άλλες αναλυτικές πληροφορίες αποτελεί μια ακόμη κατεύθυνση ανάπτυξης. Η συνδυαστική ανάλυση στοιχειακών και ισοτοπικών αποτυπωμάτων επιτρέπει τη δημιουργία πιο ολοκληρωμένων μοντέλων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη πολλαπλές παραμέτρους. Μελέτες που εφαρμόζουν τέτοιες προσεγγίσεις δείχνουν ότι η συνδυαστική χρήση δεδομένων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια της ταξινόμησης και να ενισχύσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Potočnik et al., 2020). Η προσέγγιση αυτή αντανakλά μια ευρύτερη τάση προς την ολοκληρωμένη ανάλυση, όπου διαφορετικές πηγές πληροφορίας συνδυάζονται για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, οι ισοτοπικές τεχνικές συνοδεύονται από ορισμένους πρακτικούς και μεθοδολογικούς περιορισμούς. Η εφαρμογή τους απαιτεί εξειδικευμένο αναλυτικό εξοπλισμό, όπως συστήματα φασματομετρίας μάζας λόγου ισοτόπων (IRMS), καθώς και προσωπικό με υψηλό επίπεδο τεχνικής κατάρτισης, γεγονός που περιορίζει τη διαθεσιμότητά τους εκτός εξειδικευμένων εργαστηρίων (Perini & Bontempo, 2022). Επιπλέον, η ερμηνεία των ισοτοπικών δεδομένων προϋποθέτει κατανόηση των περιβαλλοντικών και βιογεωχημικών παραγόντων που επηρεάζουν τις ισοτοπικές αναλογίες, όπως οι κλιματικές συνθήκες, το υψόμετρο, οι βροχοπτώσεις και η διατροφή των ζώων. Για παράδειγμα, παρόμοιες ισοτοπικές τιμές μπορεί να προκύπτουν από διαφορετικούς συνδυασμούς περιβαλλοντικών παραμέτρων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη διεπιστημονική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Danezis et al., 2016). Παράλληλα, η αξιοπιστία των αναλύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα εκτεταμένων βάσεων δεδομένων αναφοράς που περιλαμβάνουν αντιπροσωπευτικά δείγματα από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Η απουσία τέτοιων βάσεων περιορίζει τη δυνατότητα ασφαλούς σύγκρισης και μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της επαλήθευσης της προέλευσης των τροφίμων (Perini & Bontempo, 2022; Liu et al., 2019).

Η ανάγκη για τυποποίηση και συγκρισιμότητα αποτελεί ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα. Η χρήση διαφορετικών μεθόδων και πρωτοκόλλων μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις μεταξύ εργαστηρίων, γεγονός που επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι τεχνικές εκθέσεις που εξετάζουν την εφαρμογή των μεθόδων αυτών υπογραμμίζουν την ανάγκη για ανάπτυξη κοινών προτύπων και για διασφάλιση της ποιότητας των αναλύσεων (European Commission, Joint Research Centre, 2022). Η επίλυση αυτού του ζητήματος είναι απαραίτητη για την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων σε κανονιστικά πλαίσια.

Η σύγχρονη κατεύθυνση στον τομέα της αυθεντικοποίησης τροφίμων τείνει προς την ολοκληρωμένη αξιοποίηση των τεχνικών φασματομετρίας μάζας και ισοτοπικής ανάλυσης σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους. Η προσέγγιση αυτή επιδιώκει τη δημιουργία συστημάτων που να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της αγοράς και της κανονιστικής εποπτείας, προσφέροντας αξιόπιστα και επαληθεύσιμα αποτελέσματα. Η εξέλιξη αυτή αντανακλά την ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ σύστασης και προέλευσης, καθώς και για την ανάπτυξη εργαλείων που να μπορούν να υποστηρίξουν την προστασία της αυθεντικότητας σε ένα ολοένα πιο σύνθετο περιβάλλον.

4. Εφαρμογές των Αναλυτικών Τεχνικών στα Γαλακτοκομικά Προϊόντα

4.1 Ανάλυση Σύστασης Γάλακτος και Τυριών

Η ανάλυση της σύστασης του γάλακτος και των τυριών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προσεγγίσεις για τη διερεύνηση της αυθεντικότητας και της γεωγραφικής προέλευσης των γαλακτοκομικών προϊόντων. Το γάλα είναι ένα πολύπλοκο βιολογικό σύστημα που αποτελείται κυρίως από νερό, λιπίδια, πρωτεΐνες, λακτόζη και ανόργανα στοιχεία. Η ποσοτική και ποιοτική κατανομή των συστατικών αυτών επηρεάζεται από το ζωικό είδος, τη φυλή, τη διατροφή, το στάδιο γαλακτοπαραγωγής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα, η χημική σύσταση του γάλακτος λειτουργεί ως φορέας πληροφοριών που μπορεί να αξιοποιηθεί για την αναγνώριση χαρακτηριστικών προέλευσης και παραγωγής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των λιπαρών οξέων, καθώς το λιπιδικό κλάσμα του γάλακτος ανταποκρίνεται άμεσα στις διατροφικές συνθήκες των ζώων. Το γάλα ζώων που βόσκουν σε φυσικούς βοσκότοπους εμφανίζει συνήθως υψηλότερες συγκεντρώσεις πολυακόρεστων λιπαρών οξέων, ω-3 λιπαρών οξέων και συζευγμένου λινελαϊκού οξέος (CLA), σε σύγκριση με το γάλα ζώων που τρέφονται κυρίως με συμπυκνωμένες ζωοτροφές. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μεταφέρονται στα τυριά και δημιουργούν χαρακτηριστικά λιπιδικά

προφίλ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση προϊόντων διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης ή διαφορετικών συστημάτων εκτροφής (Gómez-Cortés et al., 2018). Για παράδειγμα, τυριά που παράγονται από γάλα ζώων ελευθέρως βοσκής εμφανίζουν συχνά διαφορετικές αναλογίες λιπαρών οξέων σε σχέση με προϊόντα εντατικής κτηνοτροφίας, γεγονός που μπορεί να αξιοποιηθεί για την επαλήθευση ισχυρισμών σχετικά με την προέλευση ή τον τρόπο παραγωγής.

Οι πρωτεΐνες του γάλακτος αποτελούν επίσης σημαντική πηγή πληροφοριών. Η καζεΐνη, η οποία αντιπροσωπεύει περίπου το 80 % των πρωτεϊνών του αγελαδινού γάλακτος, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της σχετικής σταθερότητάς της κατά τη μεταποίηση. Η ισοτοπική ανάλυση της καζεΐνης έχει δείξει ότι οι αναλογίες σταθερών ισοτόπων άνθρακα και αζώτου αντανακλούν τη διατροφή των ζώων και τις γεωκλιματικές συνθήκες της περιοχής παραγωγής. Έτσι, η καζεΐνη μπορεί να λειτουργήσει ως βιοχημικός δείκτης γεωγραφικής προέλευσης, ιδίως όταν συνδυάζεται με άλλες αναλυτικές παραμέτρους (Wijenayake et al., 2020).

Σημαντική συμβολή στην αυθεντικοποίηση των γαλακτοκομικών προϊόντων προσφέρουν οι ισοτοπικές αναλύσεις. Οι αναλογίες των σταθερών ισοτόπων υδρογόνου ($^2\text{H}/^1\text{H}$) και οξυγόνου ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) επηρεάζονται από τη σύσταση του νερού που καταναλώνουν τα ζώα και από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Αντίστοιχα, οι αναλογίες ισοτόπων άνθρακα και αζώτου αντανακλούν τη φυτική προέλευση των ζωοτροφών. Για παράδειγμα, η κατανάλωση φυτών διαφορετικών φωτοσυνθετικών κύκλων (C3 ή C4) οδηγεί σε διαφορετικές ισοτοπικές υπογραφές στο γάλα. Οι υπογραφές αυτές διατηρούνται σε σημαντικό βαθμό κατά την παραγωγή τυριών και άλλων γαλακτοκομικών προϊόντων, καθιστώντας δυνατή την επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης ακόμη και μετά τη μεταποίηση (Hamzić Gregorič et al., 2020).

Εκτός από τα οργανικά συστατικά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η κατανομή των ανόργανων στοιχείων και των ιχνοστοιχείων. Στοιχεία όπως το στρόντιο (Sr), το βάριο (Ba), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu) και το μαγγάνιο (Mn) εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα μέσω του εδάφους, των φυτών και του νερού και τελικά ενσωματώνονται στο γάλα. Η σχετική συγκέντρωσή τους διαφέρει μεταξύ γεωγραφικών περιοχών και δημιουργεί χαρακτηριστικά στοιχειακά αποτυπώματα. Ο συνδυασμός στοιχειακών και ισοτοπικών δεδομένων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικός για τη διάκριση γαλακτοκομικών

προϊόντων διαφορετικής προέλευσης, καθώς παρέχει πληροφορίες τόσο για το γεωλογικό υπόβαθρο όσο και για τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής παραγωγής (Potočnik et al., 2020).

Τα τελευταία χρόνια, αυξανόμενο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της μικροβιακής κοινότητας των τυριών. Οι μικροοργανισμοί συμμετέχουν ενεργά στις διεργασίες ωρίμανσης, παράγοντας οργανικά οξέα, αλκοόλες, αλδεΐδες, κετόνες και άλλες πτητικές ενώσεις που καθορίζουν τη γεύση και το άρωμα των προϊόντων. Η σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας επηρεάζεται από το περιβάλλον παραγωγής, τις τοπικές τεχνολογικές πρακτικές και τις συνθήκες ωρίμανσης, δημιουργώντας ένα βιολογικό αποτύπωμα που μπορεί να συμβάλει στη διαφοροποίηση προϊόντων διαφορετικής προέλευσης (Guo et al., 2021).

Η ανάπτυξη των μεταβολομικών προσεγγίσεων έχει διευρύνει περαιτέρω τις δυνατότητες ανάλυσης. Μέσω τεχνικών όπως η φασματομετρία μάζας και η φασματοσκοπία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR), είναι δυνατή η ταυτόχρονη καταγραφή εκατοντάδων μεταβολιτών που σχετίζονται με τη μικροβιακή δραστηριότητα, την ωρίμανση και τις πρώτες ύλες. Μελέτες σε τυριά έχουν δείξει ότι συγκεκριμένα προφίλ αμινοξέων, οργανικών οξέων και πτητικών ενώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση προϊόντων διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης ή διαφορετικού καθεστώτος προστασίας (Rocchetti et al., 2018).

Παράλληλα, οι φασματοσκοπικές τεχνικές, όπως η FTIR και η NIR, επιτρέπουν την ταχεία καταγραφή του συνολικού χημικού αποτυπώματος ενός προϊόντος χωρίς εκτεταμένη προετοιμασία δείγματος. Σε συνδυασμό με χημειομετρικές μεθόδους, μπορούν να διαφοροποιήσουν τυριά ως προς τη σύσταση, το είδος γάλακτος, τον βαθμό ωρίμανσης ή τη διαδικασία παραγωγής. Για παράδειγμα, η παρουσία αγελαδινού γάλακτος σε προϊόντα που παράγονται αποκλειστικά από πρόβειο ή κατσικίσιο γάλα μπορεί να ανιχνευθεί μέσω διαφοροποιήσεων στο φασματικό προφίλ (Genis et al., 2020).

Η σύγχρονη τάση στην αυθεντικοποίηση γαλακτοκομικών προϊόντων βασίζεται στον συνδυασμό πολλαπλών τύπων δεδομένων, όπως λιπιδικών, πρωτεϊνικών, ισοτοπικών, στοιχειακών και μεταβολομικών πληροφοριών. Η ολοκληρωμένη αυτή προσέγγιση επιτρέπει τη δημιουργία πιο αξιόπιστων μοντέλων ταξινόμησης και ενισχύει την ικανότητα διάκρισης προϊόντων με παρόμοια χημική σύσταση. Η πολυδιάστατη ανάλυση αντανάκλα την

πολυπλοκότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων και παρέχει ένα ισχυρό επιστημονικό υπόβαθρο για την αυθεντικοποίηση, την ιχνηλασιμότητα και τη διασφάλιση της ποιότητας.

4.2 Διαφοροποίηση Προϊόντων ΠΟΠ

Η διαφοροποίηση προϊόντων με καθεστώς Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης βασίζεται στη θεμελιώδη παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά τους απορρέουν από έναν σύνθετο συνδυασμό γεωγραφικών, περιβαλλοντικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η έννοια αυτή δεν περιορίζεται σε μια απλή γεωγραφική ένδειξη, αλλά αποτυπώνει ένα πολυδιάστατο σύστημα σχέσεων μεταξύ πρώτων υλών, τοπικών πρακτικών και φυσικού περιβάλλοντος. Η επιστημονική προσέγγιση της διαφοροποίησης απαιτεί την ανάλυση αυτών των παραμέτρων μέσω αναλυτικών τεχνικών που μπορούν να καταγράψουν λεπτές διαφοροποιήσεις στη σύσταση και στα χαρακτηριστικά των προϊόντων.

Η αξιοποίηση χημικών αποτυπωμάτων αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διαφοροποίηση και την αυθεντικοποίηση προϊόντων ΠΟΠ. Τα προϊόντα αυτά φέρουν χαρακτηριστικά χημικά προφίλ που διαμορφώνονται από το σύνολο των τοπικών περιβαλλοντικών και παραγωγικών παραγόντων, όπως η διατροφή των ζώων, η σύνθεση του εδάφους, οι κλιματικές συνθήκες και οι τεχνολογικές πρακτικές παραγωγής. Για παράδειγμα, η βόσκηση σε φυσικούς βοσκότοπους μπορεί να επηρεάσει τη σύσταση των λιπαρών οξέων του γάλακτος, ενώ η τοπική μικροχλωρίδα συμβάλλει στη δημιουργία ιδιαίτερων προφίλ αμινοξέων, οργανικών οξέων και πτητικών αρωματικών ενώσεων κατά την ωρίμανση των τυριών. Παράλληλα, τα ισοτοπικά και στοιχειακά χαρακτηριστικά αντανakλούν τις γεωλογικές και περιβαλλοντικές ιδιαιτερότητες της περιοχής παραγωγής. Μεταβολομικές μελέτες έχουν δείξει ότι ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων δημιουργεί διακριτά χημικά αποτυπώματα, τα οποία επιτρέπουν τη διάκριση προϊόντων ΠΟΠ από μη πιστοποιημένα προϊόντα με υψηλό βαθμό ακρίβειας (Rocchetti et al., 2018). Η προσέγγιση αυτή δεν βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά στη συνολική χημική «υπογραφή» του προϊόντος, η οποία αντανakλά την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος και της παραγωγικής διαδικασίας.

Η χρήση μη στοχευμένων αναλυτικών τεχνικών ενισχύει την ικανότητα διαφοροποίησης, καθώς επιτρέπει την ανίχνευση μοτίβων που δεν είναι εμφανή μέσω στοχευμένων προσεγγίσεων. Η εφαρμογή φασματομετρίας μάζας σε συνδυασμό με

χημειομετρικές μεθόδους έχει δείξει ότι είναι δυνατή η διάκριση προϊόντων ΠΟΠ από αντίστοιχα μη πιστοποιημένα, ακόμη και όταν οι διαφορές στη σύσταση είναι περιορισμένες (Popping et al., 2017). Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί την πολυδιάστατη φύση των δεδομένων και επιτρέπει την ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να αναγνωρίσουν πρότυπα με υψηλή ακρίβεια.

Η συμβολή των ισοτοπικών τεχνικών στη διαφοροποίηση προϊόντων ΠΟΠ είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι αναλογίες των σταθερών ισοτόπων αντανακλούν άμεσα τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της περιοχής παραγωγής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ισότοπα του άνθρακα ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), του αζώτου ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), του οξυγόνου ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) και του υδρογόνου ($^2\text{H}/^1\text{H}$), των οποίων οι αναλογίες επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις, η θερμοκρασία, το υψόμετρο, η διαθεσιμότητα νερού και η διατροφή των ζώων. Ως αποτέλεσμα, τα γαλακτοκομικά προϊόντα αποκτούν χαρακτηριστικές ισοτοπικές υπογραφές που συνδέονται με τη γεωγραφική τους προέλευση (Liu et al., 2019).

Για παράδειγμα, γάλα που παράγεται σε ορεινές περιοχές όπου τα ζώα βόσκουν σε φυσικούς βοσκότοπους εμφανίζει διαφορετικές ισοτοπικές αναλογίες σε σχέση με γάλα που προέρχεται από εντατικά συστήματα εκτροφής ή από περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μεταφέρονται στα τυριά και σε άλλα γαλακτοκομικά προϊόντα και παραμένουν ανιχνεύσιμες ακόμη και μετά τη μεταποίηση. Στην περίπτωση προϊόντων ΠΟΠ, όπως τα παραδοσιακά πρόβεια τυριά, η ισοτοπική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση ότι οι πρώτες ύλες προέρχονται πράγματι από τη δηλωμένη γεωγραφική περιοχή και ότι δεν έχουν χρησιμοποιηθεί γάλα ή πρώτες ύλες διαφορετικής προέλευσης (Liu et al., 2019).

Το σημαντικό πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι βασίζεται σε φυσικές βιογεωχημικές διεργασίες που διαμορφώνονται από το περιβάλλον και είναι ιδιαίτερα δύσκολο να τροποποιηθούν τεχνητά. Για τον λόγο αυτό, οι ισοτοπικές υπογραφές θεωρούνται αξιόπιστοι δείκτες γεωγραφικής προέλευσης και χρησιμοποιούνται ολοένα συχνότερα σε συνδυασμό με χημικές και μεταβολομικές αναλύσεις για την προστασία προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας και πιστοποιημένης προέλευσης.

Η ενσωμάτωση στοιχειακών δεδομένων ενισχύει περαιτέρω τη διαφοροποίηση, καθώς η παρουσία ιχνοστοιχείων επηρεάζεται από το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής παραγωγής.

Μελέτες που συνδυάζουν ισοτοπικά και στοιχειακά αποτυπώματα δείχνουν ότι η πολυπαραμετρική προσέγγιση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια της ταξινόμησης, επιτρέποντας τη διάκριση προϊόντων ακόμη και από γειτονικές περιοχές (Potočnik et al., 2020). Η προσέγγιση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της συνδυαστικής ανάλυσης, όπου διαφορετικές πηγές πληροφορίας αξιοποιούνται για την επίτευξη πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Η διαφοροποίηση των προϊόντων ΠΟΠ μέσω φασματοσκοπικών τεχνικών βασίζεται στις διαφορές της χημικής τους σύστασης, οι οποίες αποτυπώνονται στο συνολικό φασματικό προφίλ. Παράγοντες όπως η διατροφή των ζώων, το είδος του γάλακτος, οι συνθήκες παραγωγής και η διάρκεια ωρίμανσης επηρεάζουν τη συγκέντρωση λιπαρών οξέων, πρωτεϊνών, υδατανθράκων και μεταβολιτών, δημιουργώντας χαρακτηριστικά φασματικά αποτυπώματα. Για παράδειγμα, διαφοροποιήσεις στις αναλογίες κορεσμένων και ακόρεστων λιπαρών οξέων, στην περιεκτικότητα σε καζεΐνη ή στα προϊόντα πρωτεόλυσης και λιπόλυσης κατά την ωρίμανση οδηγούν σε μεταβολές των φασματικών σημάτων που σχετίζονται με δεσμούς C–H, O–H και N–H. Ως αποτέλεσμα, τα φασματοσκοπικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση προϊόντων ΠΟΠ από μη πιστοποιημένα προϊόντα ή από προϊόντα διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης. Σε συνδυασμό με χημειομετρικές τεχνικές, οι διαφορές αυτές επιτρέπουν την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων ταξινόμησης που εφαρμόζονται σε ταχείς ελέγχους αυθεντικότητας και συμμόρφωσης (Cebi et al., 2023).

Η μικροβιακή σύνθεση των προϊόντων ΠΟΠ αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα διαφοροποίησης, καθώς οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στη ζύμωση και στην ωρίμανση επηρεάζουν άμεσα τη χημική και αισθητηριακή ταυτότητα των προϊόντων. Βακτήρια γαλακτικού οξέος, όπως είδη των γενών *Lactobacillus*, *Lactococcus* και *Streptococcus*, συμβάλλουν στη διάσπαση πρωτεϊνών και λιπιδίων, οδηγώντας στον σχηματισμό αμινοξέων, ελεύθερων λιπαρών οξέων και πτητικών αρωματικών ενώσεων που καθορίζουν τη γεύση και το άρωμα των τυριών. Η σύνθεση αυτών των μικροβιακών κοινοτήτων επηρεάζεται από το περιβάλλον παραγωγής, τις τοπικές τεχνολογικές πρακτικές και τις συνθήκες ωρίμανσης, δημιουργώντας χαρακτηριστικά μικροβιακά προφίλ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαφοροποίηση προϊόντων διαφορετικής προέλευσης (Guo et al., 2021).

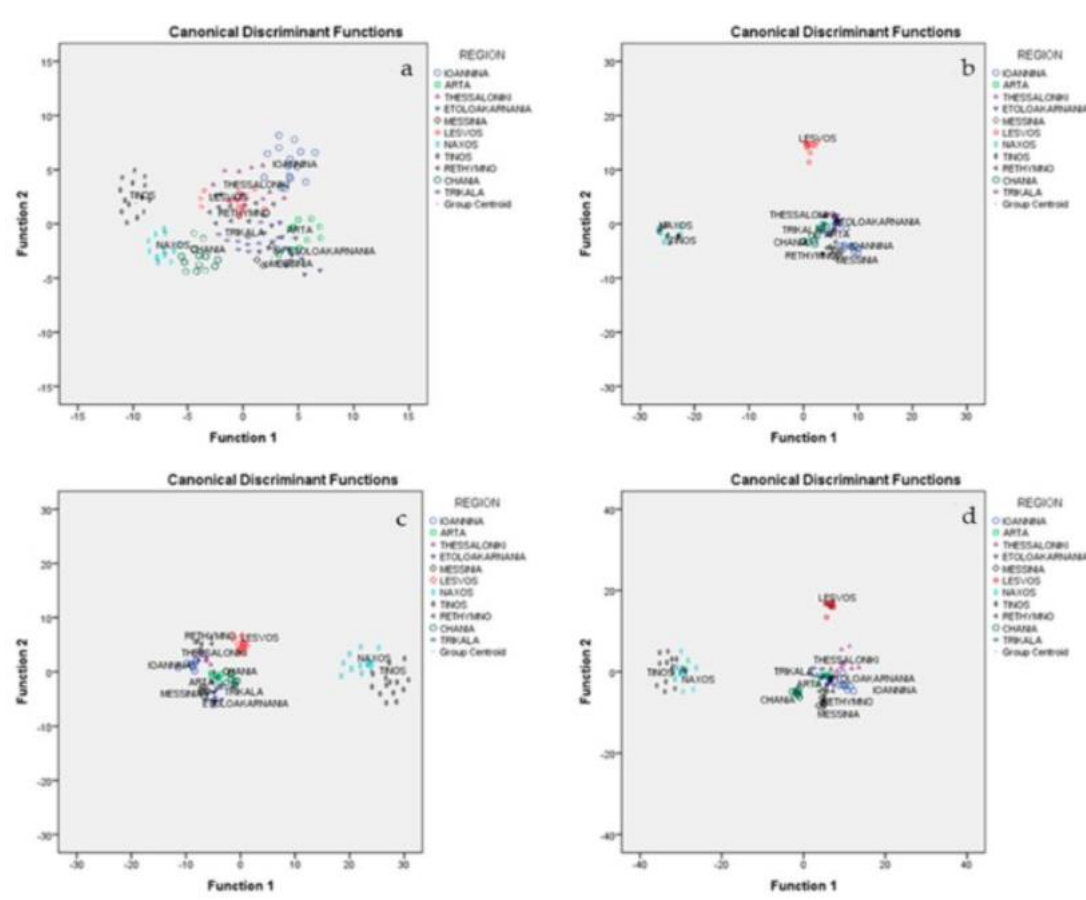
Για παράδειγμα, παραδοσιακά τυριά που παράγονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές μπορεί να εμφανίζουν διακριτές μικροβιακές κοινότητες, οι οποίες οδηγούν στην

παραγωγή διαφορετικών μεταβολιτών και αρωματικών ενώσεων κατά την ωρίμανση. Ωστόσο, η σύνθεση των μικροβιακών πληθυσμών επηρεάζεται επίσης σημαντικά από εποχικούς παράγοντες, όπως οι μεταβολές στη διατροφή των ζώων και στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, η μικροβιακή πληροφορία αποτελεί χρήσιμο αλλά όχι αυτάρκες εργαλείο αυθεντικοποίησης και είναι αποτελεσματικότερη όταν συνδυάζεται με χημικά, ισοτοπικά ή μεταβολομικά δεδομένα στο πλαίσιο πολυπαραμετρικών μοντέλων ταξινόμησης (Guo et al., 2021).

Η εφαρμογή πολυμεταβλητών μεθόδων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διαφοροποίησης προϊόντων ΠΟΠ. Η ανάλυση δεδομένων μέσω στατιστικών και υπολογιστικών τεχνικών επιτρέπει την ανάδειξη σχέσεων μεταξύ παραμέτρων και τη δημιουργία μοντέλων ταξινόμησης. Η χρήση τέτοιων μεθόδων σε συνδυασμό με αναλυτικά δεδομένα έχει δείξει ότι μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα διάκρισης και να προσφέρει αξιόπιστα εργαλεία για την επαλήθευση της προέλευσης (Biancolillo, 2020). Η επιτυχία των μοντέλων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων και από την επάρκεια των συνόλων εκπαίδευσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Gatzias et al. (2020), στην οποία διερευνήθηκε η δυνατότητα διαφοροποίησης δειγμάτων Φέτας ΠΟΠ από πέντε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας (Ιωάννινα, Άρτα, Θεσσαλονίκη, Λάρισα και Έβρος). Για τον σκοπό αυτό αναλύθηκαν φυσικοχημικές παράμετροι, το προφίλ των πτητικών ενώσεων και η σύσταση των λιπαρών οξέων, ενώ τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση (MANOVA/LDA). Τα λιπαρά οξέα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, επιτυγχάνοντας ποσοστό σωστής ταξινόμησης 88,2%, έναντι 61,8% για τις φυσικοχημικές παραμέτρους και 65,8% για τις πτητικές ενώσεις. Ο συνδυασμός όλων των αναλυτικών δεδομένων αύξησε περαιτέρω την ακρίβεια ταξινόμησης στο 89,5%, αποδεικνύοντας ότι η γεωγραφική προέλευση αποτυπώνεται στο χημικό προφίλ της Φέτας και ότι η πολυπαραμετρική προσέγγιση αποτελεί πιο αξιόπιστη στρατηγική για την αυθεντικοποίησή της.

Αντίστοιχα, η αποτελεσματικότητα της χημειομετρικής ανάλυσης αποδεικνύεται και στη μελέτη των Vatavali et al. (2020), όπου εφαρμόστηκε η Διακριτική Ανάλυση (LDA) για τη διαφοροποίηση δειγμάτων Γραβιέρας από έντεκα γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας.



Σχήμα 1-2 Διαχωρισμός δειγμάτων Γραβιέρας διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης με χρήση Διακριτικής Ανάλυσης (LDA). Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την ταξινόμηση των δειγμάτων με βάση διαφορετικούς συνδυασμούς αναλυτικών δεδομένων: (a) ορυκτά στοιχεία και συμβατικές παραμέτρους ποιότητας (CQPs), (b) λιπαρά οξέα και ορυκτά στοιχεία, (c) λιπαρά οξέα και CQPs και (d) λιπαρά οξέα, ορυκτά στοιχεία και CQPs. Vatavali et al. (2020).

Στην εικόνα παρουσιάζεται η μελέτη των Vatavali et al. (2020), στην οποία διερευνήθηκε η δυνατότητα διαφοροποίησης 168 δειγμάτων Γραβιέρας από 11 διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας με χρήση Γραμμικής Διακριτικής Ανάλυσης (LDA). Αρχικά, οι ερευνητές αξιολόγησαν ξεχωριστά διαφορετικούς συνδυασμούς αναλυτικών δεδομένων, προκειμένου να προσδιορίσουν ποιοι δείκτες συμβάλλουν αποτελεσματικότερα στη διάκριση της γεωγραφικής προέλευσης. Στο διάγραμμα (a), ο συνδυασμός μεταλλικών στοιχείων και συμβατικών παραμέτρων ποιότητας πέτυχε ποσοστό σωστής ταξινόμησης 89,3%, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένες παράμετροι μπορούν να διαφοροποιήσουν ικανοποιητικά τα δείγματα, αν και παρατηρείται αλληλοεπικάλυψη μεταξύ ορισμένων γεωγραφικών ομάδων.

Στο διάγραμμα (b), ο συνδυασμός λιπαρών οξέων και μεταλλικών στοιχείων αύξησε την ακρίβεια ταξινόμησης στο 94,0%, ενώ στο διάγραμμα (c), ο συνδυασμός λιπαρών οξέων και συμβατικών παραμέτρων ποιότητας πέτυχε παρόμοια απόδοση, με ποσοστό 94,1%, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντική συμβολή των λιπαρών οξέων στη γεωγραφική διαφοροποίηση της Γραβιέρας. Τέλος, στο διάγραμμα (d), όπου συνδυάστηκαν λιπαρά οξέα, μεταλλικά στοιχεία και συμβατικές παράμετροι ποιότητας, επιτεύχθηκε ο σαφέστερος διαχωρισμός των γεωγραφικών ομάδων και το υψηλότερο ποσοστό σωστής ταξινόμησης (95,2%). Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι κάθε κατηγορία αναλυτικών δεδομένων παρέχει συμπληρωματικές πληροφορίες για τη σύσταση του προϊόντος και ότι η συνδυαστική αξιοποίησή τους δημιουργεί ένα πληρέστερο χημικό αποτύπωμα, ενισχύοντας σημαντικά την αξιοπιστία της αυθεντικοποίησης της γεωγραφικής προέλευσης της Γραβιέρας.

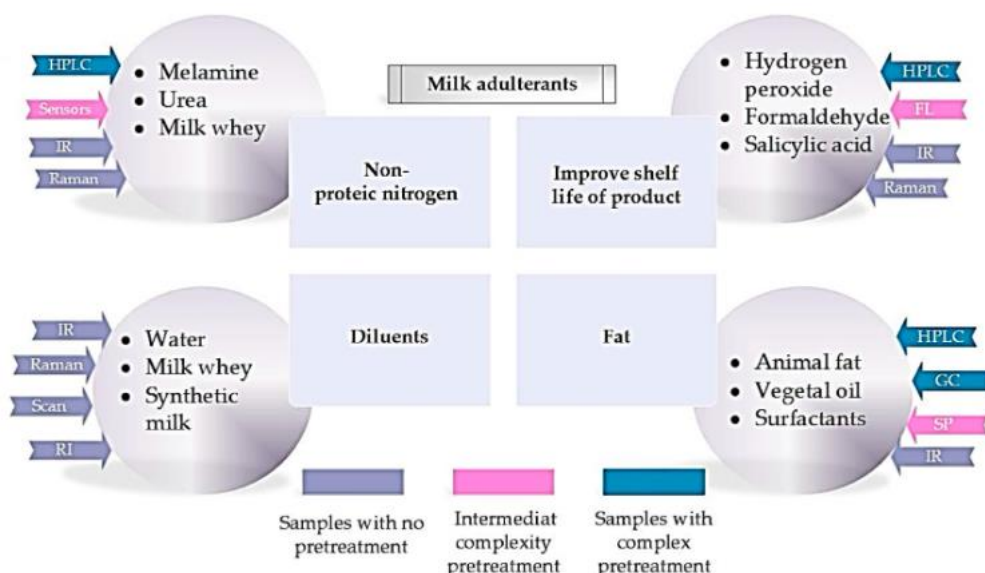
Η διαφοροποίηση προϊόντων ΠΟΠ δεν περιορίζεται στην επιστημονική ανάλυση, αλλά συνδέεται και με θεσμικά και οικονομικά ζητήματα. Η ανάγκη προστασίας της αυθεντικότητας και της φήμης των προϊόντων αυτών δημιουργεί ένα πλαίσιο στο οποίο η επιστημονική τεκμηρίωση αποκτά ιδιαίτερη αξία. Οι αναλυτικές τεχνικές λειτουργούν ως εργαλεία υποστήριξης των κανονιστικών μηχανισμών, παρέχοντας αποδεικτικά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες ελέγχου και πιστοποίησης.

Η σύγχρονη προσέγγιση στη διαφοροποίηση προϊόντων ΠΟΠ τείνει προς την ολοκληρωμένη αξιοποίηση διαφορετικών τεχνικών και δεδομένων. Η συνδυαστική χρήση χημικών, ισοτοπικών, φασματικών και μικροβιακών πληροφοριών επιτρέπει τη δημιουργία πολυδιάστατων προφίλ, τα οποία αντανακλούν τη σύνθετη φύση των προϊόντων. Η κατεύθυνση αυτή ανταποκρίνεται στην ανάγκη για ανάπτυξη αξιόπιστων και επαληθεύσιμων μεθόδων, ικανών να υποστηρίξουν την προστασία και την ανάδειξη της ταυτότητας των προϊόντων ΠΟΠ.

4.3 Ανίχνευση νοθείας και απάτης

Η ανίχνευση νοθείας και απάτης στα τρόφιμα συνιστά ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα που συνδέεται άμεσα με την οικονομική αξία των προϊόντων και με τη διασφάλιση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών. Στον τομέα των γαλακτοκομικών, όπου η διαφοροποίηση ως προς την προέλευση και τη μέθοδο παραγωγής προσδίδει προστιθέμενη αξία, η εμφάνιση

πρακτικών παραποίησης καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη αξιόπιστων αναλυτικών εργαλείων. Οι σύγχρονες επιστημονικές προσεγγίσεις επιδιώκουν να ανιχνεύσουν αποκλίσεις από τα αναμενόμενα πρότυπα σύστασης, αξιοποιώντας τόσο στοχευμένες όσο και μη στοχευμένες μεθόδους.



Εικόνα 1-2 Κύριες μορφές νοθείας στο γάλα και ενδεικτικές αναλυτικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευσή τους. Ionescu et al. (2023).

Η εικόνα παρουσιάζει χαρακτηριστικά παραδείγματα ουσιών που χρησιμοποιούνται για τη νοθεία του γάλακτος, όπως μελαμίνη, ουρία, φυτικά ή ζωικά λίπη, καθώς και συντηρητικές ουσίες, αλλά και τις αναλυτικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευσή τους, όπως η HPLC, η GC, η φασματοσκοπία υπερύθρου (IR), η Raman και η φασματοφωτομετρία UV-Vis. Παράλληλα, δείχνει ότι ανάλογα με το είδος της νοθείας απαιτείται διαφορετικός βαθμός επεξεργασίας του δείγματος πριν από την ανάλυση.

Η έννοια της νοθείας περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πρακτικών, από την προσθήκη φθηνότερων πρώτων υλών έως την ψευδή δήλωση γεωγραφικής προέλευσης. Στα γαλακτοκομικά προϊόντα, χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η προσθήκη αγελαδινού γάλακτος σε τυριά που παράγονται παραδοσιακά από πρόβειο ή κατσικίσιο γάλα, η χρήση

γάλακτος προερχόμενου από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές από αυτές που προβλέπονται στις προδιαγραφές ενός προϊόντος ΠΟΠ, καθώς και η εσφαλμένη επισήμανση προϊόντων ως παραδοσιακών ή τοπικής προέλευσης χωρίς να πληρούνται οι σχετικές απαιτήσεις. Αντίστοιχα, σε άλλα τρόφιμα συχνές μορφές νοθείας περιλαμβάνουν την ανάμιξη ελαιολάδου με φθηνότερα φυτικά έλαια, την προσθήκη σακχαρούχων σιροπιών στο μέλι και την παραπλανητική δήλωση της γεωγραφικής προέλευσης οίνων ή κρεάτων. Οι πρακτικές αυτές αποσκοπούν συνήθως στην οικονομική ωφέλεια μέσω της μείωσης του κόστους παραγωγής ή της εκμετάλλευσης της φήμης προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων αυθεντικοποίησης και ελέγχου. Η αντιμετώπιση αυτών των πρακτικών απαιτεί εργαλεία που να μπορούν να αποκαλύψουν μεταβολές στη χημική σύσταση ή στο συνολικό προφίλ του προϊόντος. Οι χρωματογραφικές μέθοδοι, σε συνδυασμό με φασματομετρία μάζας, έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές για την ανίχνευση ξένων ενώσεων ή μη αναμενόμενων προτύπων. Η δυνατότητα ταυτοποίησης συγκεκριμένων μορίων επιτρέπει την αναγνώριση προσμίξεων που δεν είναι εμφανείς με λιγότερο ευαίσθητες τεχνικές (Abbas et al., 2018).

Παράλληλα, οι μη στοχευμένες προσεγγίσεις προσφέρουν ένα διαφορετικό πλαίσιο ανάλυσης, εστιάζοντας στο συνολικό χημικό αποτύπωμα του προϊόντος. Η εφαρμογή φασματομετρίας μάζας σε μη στοχευμένη βάση επιτρέπει την ανίχνευση διαφορών που σχετίζονται με τη νοθεία, ακόμη και όταν δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων η φύση της παραποίησης. Μελέτες που εξετάζουν προϊόντα όπως το τυρί δείχνουν ότι είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ αυθεντικών και μη αυθεντικών δειγμάτων μέσω της ανάλυσης των συνολικών φασματικών προφίλ (Porping et al., 2017). Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ικανότητα εντοπισμού απρόβλεπτων μορφών απάτης.

Η φασματοσκοπία, ιδίως όταν συνδυάζεται με χημειομετρικές μεθόδους, αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο ταχείας ανίχνευσης πιθανών περιπτώσεων νοθείας. Οι τεχνικές FTIR και NIR καταγράφουν το συνολικό φασματικό αποτύπωμα ενός δείγματος, το οποίο αντανακλά τη χημική του σύσταση. Η σύγκριση των φασμάτων με πρότυπα αυθεντικών προϊόντων επιτρέπει τον εντοπισμό αποκλίσεων που σχετίζονται με αλλαγές στις πρώτες ύλες ή στη διαδικασία παραγωγής. Για παράδειγμα, η προσθήκη φυτικών λιπαρών σε γαλακτοκομικά προϊόντα μεταβάλλει την αναλογία κορεσμένων και ακόρεστων λιπαρών οξέων, δημιουργώντας διαφοροποιήσεις στο φασματικό προφίλ. Αντίστοιχα, η παρουσία

αγελαδινού γάλακτος σε τυριά που παράγονται αποκλειστικά από πρόβειο ή κατσικίσιο γάλα οδηγεί σε μεταβολές στο πρωτεϊνικό και λιπιδικό αποτύπωμα, οι οποίες μπορούν να ανιχνευθούν μέσω φασματοσκοπικών αναλύσεων και κατάλληλων μοντέλων ταξινόμησης (Cebi et al., 2023). Η ταχύτητα, το χαμηλό κόστος και η μη καταστροφική φύση των τεχνικών αυτών τις καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλες για προκαταρκτικούς ελέγχους σε βιομηχανικά και ελεγκτικά περιβάλλοντα.

Η ισοτοπική ανάλυση παρέχει συμπληρωματικές πληροφορίες, καθώς δεν εξετάζει άμεσα τη χημική σύσταση αλλά τις φυσικές υπογραφές που συνδέονται με το περιβάλλον παραγωγής. Οι αναλογίες των σταθερών ισοτόπων άνθρακα, αζώτου, υδρογόνου και οξυγόνου επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι κλιματικές συνθήκες, η γεωγραφική θέση και η διατροφή των ζώων, δημιουργώντας χαρακτηριστικά πρότυπα που είναι δύσκολο να αναπαραχθούν τεχνητά. Για παράδειγμα, ένα τυρί που δηλώνεται ως παραγόμενο σε συγκεκριμένη ορεινή περιοχή μπορεί να παρουσιάζει ισοτοπικές αναλογίες ασύμβατες με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής αυτής, υποδεικνύοντας πιθανή εσφαλμένη δήλωση προέλευσης. Αντίστοιχα, η χρήση γάλακτος από διαφορετικές χώρες ή γεωγραφικές ζώνες μπορεί να ανιχνευθεί μέσω διαφοροποιήσεων στις ισοτοπικές υπογραφές που μεταφέρονται από το γάλα στο τελικό προϊόν. Μελέτες σε γαλακτοκομικά προϊόντα έχουν δείξει ότι οι ισοτοπικές υπογραφές διατηρούνται σε σημαντικό βαθμό κατά τη μεταποίηση, γεγονός που επιτρέπει την επαλήθευση της γεωγραφικής προέλευσης ακόμη και σε ώριμα τυριά και άλλα επεξεργασμένα προϊόντα (Liu et al., 2019). Για τον λόγο αυτό, η ισοτοπική ανάλυση αποτελεί ένα από τα πλέον αξιόπιστα εργαλεία για την προστασία προϊόντων ΠΟΠ και ΠΓΕ από φαινόμενα παραπλανητικής επισήμανσης και εμπορικής απάτης.

Η συνδυαστική χρήση ισοτοπικών και στοιχειακών δεδομένων ενισχύει περαιτέρω την ικανότητα ανίχνευσης. Η ανάλυση πολλαπλών παραμέτρων επιτρέπει τη δημιουργία πιο σύνθετων μοντέλων, τα οποία μπορούν να εντοπίσουν ασυνέπειες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Μελέτες που εφαρμόζουν τέτοιες προσεγγίσεις δείχνουν ότι η πολυπαραμετρική ανάλυση μπορεί να αποκαλύψει περιπτώσεις νοθείας που δεν είναι ανιχνεύσιμες με μία μόνο τεχνική (Potočnik et al., 2020). Η αξιοποίηση διαφορετικών πηγών πληροφορίας ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η ανάπτυξη μεθόδων μηχανικής μάθησης έχει προσφέρει νέα εργαλεία για την ανίχνευση απάτης. Η χρήση αλγορίθμων ταξινόμησης επιτρέπει την ανάλυση μεγάλων

συνόλων δεδομένων και την αναγνώριση μοτίβων που συνδέονται με μη αυθεντικά προϊόντα. Μελέτες που εφαρμόζουν τέτοιες προσεγγίσεις σε ισοτοπικά δεδομένα δείχνουν ότι είναι δυνατή η ανάπτυξη μοντέλων που διακρίνουν αυθεντικά από νοθευμένα προϊόντα με υψηλή ακρίβεια (O'Sullivan et al., 2023). Η κατεύθυνση αυτή ενισχύει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης των διαδικασιών ελέγχου.

Η μικροβιακή ανάλυση αποτελεί ένα ακόμη εργαλείο για την ανίχνευση απάτης, καθώς οι μικροβιακές κοινότητες αντανakλούν τις συνθήκες παραγωγής. Η διαφοροποίηση της μικροβιακής σύνθεσης μπορεί να υποδηλώνει αλλαγές στις πρώτες ύλες ή στη διαδικασία παραγωγής, παρέχοντας ενδείξεις για πιθανή νοθεία. Ωστόσο, η ερμηνεία των δεδομένων αυτών απαιτεί προσοχή, καθώς παράγοντες όπως η εποχικότητα μπορούν να επηρεάσουν τη μικροβιακή κοινότητα (Guo et al., 2021).

Η επιχειρησιακή διάσταση της ανίχνευσης απάτης αποτυπώνεται σε δίκτυα συνεργασίας που συντονίζουν τις δράσεις ελέγχου. Οι ετήσιες εκθέσεις των ευρωπαϊκών δικτύων καταδεικνύουν την ποικιλία των μορφών απάτης και την ανάγκη για ανάπτυξη αξιόπιστων αναλυτικών εργαλείων που να μπορούν να υποστηρίξουν τις διαδικασίες ελέγχου (European Commission, 2023). Η σύνδεση μεταξύ επιστημονικής ανάλυσης και κανονιστικής εφαρμογής αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου.

Η ανίχνευση νοθείας δεν αποτελεί στατικό πεδίο, αλλά εξελίσσεται παράλληλα με τις πρακτικές απάτης. Η συνεχής ανάπτυξη νέων μεθόδων και η προσαρμογή των υπάρχουσών τεχνικών είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση νέων μορφών παραποίησης. Η κατεύθυνση αυτή απαιτεί διεπιστημονική συνεργασία και ενσωμάτωση διαφορετικών προσεγγίσεων, ώστε να δημιουργηθούν συστήματα που να μπορούν να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς και της κανονιστικής εποπτείας.

4.4 Συνδυασμός τεχνικών και πολυπαραμετρική ανάλυση

Η πολυπαραμετρική ανάλυση και ο συνδυασμός διαφορετικών αναλυτικών τεχνικών αποτελούν μια εξελισσόμενη κατεύθυνση στην αυθεντικοποίηση τροφίμων, η οποία ανταποκρίνεται στην πολυπλοκότητα των αγροδιατροφικών προϊόντων και στην ανάγκη για υψηλή ακρίβεια στην επαλήθευση της προέλευσης και της σύστασης. Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στην αρχή ότι καμία μεμονωμένη τεχνική δεν μπορεί να αποδώσει πλήρως την

πολυδιάστατη φύση των τροφίμων, καθώς κάθε μέθοδος αποκαλύπτει διαφορετικές πτυχές της χημικής ή βιολογικής τους ταυτότητας. Η ενσωμάτωση δεδομένων από πολλαπλές πηγές επιτρέπει τη δημιουργία πιο ολοκληρωμένων προφίλ, τα οποία ενισχύουν την ικανότητα διάκρισης μεταξύ δειγμάτων.

Η έννοια της συγχώνευσης δεδομένων αναφέρεται στη συνδυαστική αξιοποίηση πληροφοριών που προέρχονται από διαφορετικές τεχνικές, όπως φασματοσκοπία, χρωματογραφία και ισοτοπική ανάλυση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά επίπεδα, από την απλή συνένωση δεδομένων έως την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών και την ανάπτυξη σύνθετων μοντέλων. Μελέτες που εξετάζουν τη συγχώνευση δεδομένων από φασματοσκοπικές τεχνικές δείχνουν ότι η συνδυαστική ανάλυση μπορεί να αυξήσει τη διακριτική ικανότητα των μοντέλων, επιτρέποντας την καλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ προϊόντων με παρόμοια χαρακτηριστικά (Schwolow et al., 2019). Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί τη συμπληρωματικότητα των τεχνικών, ενισχύοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η πολυπαραμετρική ανάλυση βασίζεται στην επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων μέσω στατιστικών και υπολογιστικών μεθόδων. Η χρήση τεχνικών όπως η ανάλυση κύριων συνιστωσών και οι αλγόριθμοι ταξινόμησης επιτρέπει την ανάδειξη υποκείμενων δομών και τη δημιουργία μοντέλων που διαχωρίζουν ομάδες δειγμάτων. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων σε συνδυασμό με δεδομένα από διαφορετικές τεχνικές έχει δείξει ότι μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια της ταξινόμησης (Biancolillo, 2020). Η επιτυχία της προσέγγισης εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων και από την ορθή επιλογή των μεθόδων ανάλυσης.

Η συνδυαστική χρήση ισοτοπικών και στοιχειακών δεδομένων αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυπαραμετρικής προσέγγισης. Η ανάλυση πολλαπλών παραμέτρων επιτρέπει τη δημιουργία πιο σύνθετων προτύπων, τα οποία αντανακλούν τη γεωγραφική και περιβαλλοντική προέλευση των προϊόντων. Μελέτες που εφαρμόζουν τέτοιες προσεγγίσεις σε γαλακτοκομικά προϊόντα δείχνουν ότι η συνδυαστική ανάλυση μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της διαφοροποίησης μεταξύ περιοχών, παρέχοντας ένα πιο αξιόπιστο εργαλείο για την επαλήθευση της προέλευσης (Potočnik et al., 2020). Η πολυδιάστατη αυτή ανάλυση επιτρέπει την αξιοποίηση πληροφοριών που δεν είναι διαθέσιμες μέσω μιας μόνο τεχνικής.

Η ενσωμάτωση δεδομένων από φασματοσκοπικές τεχνικές με χρωματογραφικά και μεταβολομικά δεδομένα δημιουργεί ένα ακόμη επίπεδο ανάλυσης. Η συνδυαστική προσέγγιση επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών τύπων πληροφοριών, όπως φασματικά αποτυπώματα και μοριακά προφίλ, ενισχύοντας την ικανότητα εντοπισμού διαφορών μεταξύ δειγμάτων. Μελέτες που εξετάζουν τη χρήση πολλαπλών τεχνικών δείχνουν ότι η συνδυαστική ανάλυση μπορεί να αποκαλύψει μοτίβα που δεν είναι εμφανή όταν οι τεχνικές χρησιμοποιούνται μεμονωμένα (Haider et al., 2024). Η προσέγγιση αυτή αντανakλά την ανάγκη για ολοκληρωμένη κατανόηση της σύστασης των τροφίμων.

Η εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες της πολυπαραμετρικής ανάλυσης. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να διαχειριστούν μεγάλα και πολύπλοκα σύνολα δεδομένων, επιτρέποντας την ανίχνευση μη γραμμικών σχέσεων και την ανάπτυξη μοντέλων με υψηλή ακρίβεια. Μελέτες που εφαρμόζουν τέτοιες προσεγγίσεις σε δεδομένα αυθεντικοποίησης δείχνουν ότι η χρήση μηχανικής μάθησης μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα διάκρισης και να μειώσει τα σφάλματα ταξινόμησης (O'Sullivan et al., 2023). Η κατεύθυνση αυτή δημιουργεί νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου.

Η πολυπαραμετρική προσέγγιση δεν περιορίζεται στην επιστημονική ανάλυση, αλλά συνδέεται και με την επιχειρησιακή εφαρμογή των αποτελεσμάτων. Η ενσωμάτωση δεδομένων από διαφορετικές πηγές απαιτεί την ανάπτυξη προτύπων και πρωτοκόλλων που να διασφαλίζουν τη συγκρισιμότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι τεχνικές εκθέσεις που εξετάζουν την εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων υπογραμμίζουν την ανάγκη για τυποποίηση και για ανάπτυξη κοινών βάσεων δεδομένων, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ εργαστηρίων (European Commission, Joint Research Centre, 2022). Η επίτευξη αυτού του στόχου αποτελεί προϋπόθεση για την ευρεία εφαρμογή των μεθόδων.

Η χρήση φορητών και επιτόπιων τεχνικών σε συνδυασμό με πολυπαραμετρική ανάλυση αποτελεί μια ακόμη κατεύθυνση ανάπτυξης. Η δυνατότητα συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η άμεση επεξεργασία τους μέσω υπολογιστικών μοντέλων επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν σε περιβάλλοντα παραγωγής ή ελέγχου. Μελέτες που εξετάζουν τη χρήση φορητών φασματοσκοπικών συσκευών σε γαλακτοκομικά προϊόντα δείχνουν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να υποστηρίξει την ταχεία αξιολόγηση της αυθεντικότητας (Pu et al., 2021). Η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών με πολυπαραμετρικά

μοντέλα δημιουργεί νέες δυνατότητες για την εφαρμογή της επιστημονικής γνώσης στην πράξη.

Η συνδυαστική αξιοποίηση ισοτοπικών, στοιχειακών, μεταβολομικών, φασματοσκοπικών και μικροβιολογικών δεδομένων έχει βελτιώσει σημαντικά την ικανότητα αυθεντικοποίησης των τροφίμων, καθώς κάθε κατηγορία δεδομένων αποτυπώνει διαφορετικές πτυχές της προέλευσης και της παραγωγικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, τα ισοτοπικά δεδομένα παρέχουν πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τα στοιχειακά αποτυπώματα αντανakλούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ενώ οι μεταβολομικές και φασματοσκοπικές αναλύσεις καταγράφουν τη χημική σύσταση και τις μεταβολές που προκύπτουν κατά την επεξεργασία και την ωρίμανση των προϊόντων. Ο συνδυασμός αυτών των πληροφοριών μέσω μεθόδων συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια της ταξινόμησης και της ανίχνευσης απάτης (Schwolow et al., 2019; Hong et al., 2023).

Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των δεδομένων που παράγονται από τέτοιες προσεγγίσεις δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις ως προς την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η εφαρμογή προηγμένων χημειομετρικών τεχνικών και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης επιτρέπει την αναγνώριση σύνθετων προτύπων, αλλά συχνά καθιστά δυσκολότερη την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο προκύπτει η τελική απόφαση του μοντέλου. Το ζήτημα αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για κανονιστικούς ελέγχους ή για την τεκμηρίωση παραβάσεων που αφορούν προϊόντα ΠΟΠ και ΠΓΕ, όπου απαιτείται όχι μόνο υψηλή ακρίβεια αλλά και σαφής επιστημονική αιτιολόγηση των συμπερασμάτων (UK Food Standards Agency, 2024).

Η ανάπτυξη διαφανών και ερμηνεύσιμων μοντέλων αποτελεί συνεπώς βασική προϋπόθεση για την ευρύτερη αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών αυθεντικοποίησης. Η τρέχουσα ερευνητική τάση προσανατολίζεται προς πολυπαραμετρικά συστήματα που συνδυάζουν πολλαπλές πηγές πληροφορίας και αξιοποιούν υπολογιστικές μεθόδους για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της προέλευσης και της αυθεντικότητας των τροφίμων. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και επιτρέπει την αποτελεσματικότερη προστασία προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, ανταποκρινόμενη στις αυξανόμενες απαιτήσεις ενός σύνθετου και διεθνοποιημένου αγροδιατροφικού συστήματος (Schwolow et al., 2019; Hong et al., 2023).

5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Η εξέλιξη των αναλυτικών τεχνικών για την αυθεντικοποίηση γαλακτοκομικών προϊόντων καταδεικνύει μια σαφή μετατόπιση από μονοδιάστατες προσεγγίσεις προς πολυπαραμετρικά σχήματα ανάλυσης, στα οποία η πληροφορία προκύπτει από τη συνδυαστική αξιοποίηση διαφορετικών δεδομένων. Η φασματοσκοπία, η χρωματογραφία και η φασματομετρία μάζας δεν λειτουργούν πλέον ως ανεξάρτητα εργαλεία, αλλά ως αλληλοσυμπληρούμενα μέσα που επιτρέπουν την κατανόηση της σύστασης και της προέλευσης σε μεγαλύτερο βάθος. Η χρήση μη στοχευμένων προσεγγίσεων έχει ενισχύσει την ικανότητα ανίχνευσης αποκλίσεων, καθώς η ανάλυση του συνολικού χημικού αποτυπώματος επιτρέπει την αναγνώριση διαφορών που δεν είναι εμφανείς μέσω στοχευμένων μεθόδων (Haider et al., 2024).

Η συμβολή της φασματομετρίας μάζας και της ισοτοπικής ανάλυσης αναδεικνύεται ιδιαίτερα έντονη, καθώς προσφέρουν πρόσβαση σε πληροφορίες που συνδέονται με φυσικές και περιβαλλοντικές διεργασίες. Η ανάλυση ισοτοπικών αναλογιών επιτρέπει τη διάκριση προϊόντων βάσει γεωγραφικής προέλευσης, ενώ η εφαρμογή τεχνικών όπως η ανάλυση ισοτόπων συγκεκριμένων ενώσεων διευρύνει το φάσμα των διαθέσιμων δεικτών (Perini & Bontempo, 2022). Η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων σε συνδυασμό με υπολογιστικά μοντέλα ενισχύει την ακρίβεια της ταξινόμησης, προσφέροντας ένα πλαίσιο που μπορεί να υποστηρίξει την επαλήθευση της αυθεντικότητας σε απαιτητικά περιβάλλοντα (O'Sullivan et al., 2023).

Η εφαρμογή φασματοσκοπικών τεχνικών έχει καταδείξει τη σημασία των φασματικών αποτυπωμάτων ως εργαλείων ταχείας αξιολόγησης της αυθεντικότητας γαλακτοκομικών προϊόντων. Τεχνικές όπως η φασματοσκοπία υπερύθρου (FTIR) και κοντινού υπερύθρου (NIR) καταγράφουν πληροφορίες που σχετίζονται με τους δεσμούς C–H, O–H και N–H των λιπιδίων, των πρωτεϊνών και της υγρασίας του προϊόντος, δημιουργώντας ένα χαρακτηριστικό φασματικό προφίλ. Στα τυριά, διαφοροποιήσεις στη σύσταση των λιπαρών οξέων, στην περιεκτικότητα καζεΐνης ή στον βαθμό πρωτεόλυσης κατά την ωρίμανση οδηγούν σε μεταβολές του φάσματος που μπορούν να αξιοποιηθούν για σκοπούς ταξινόμησης και ελέγχου (Cebi et al., 2023).

Η συνδυασμένη χρήση φασματοσκοπίας και χημειομετρικών μοντέλων επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων ταχείας ανίχνευσης νοθείας και επαλήθευσης της προέλευσης. Για παράδειγμα, η παρουσία αγελαδινού γάλακτος σε τυριά που παράγονται αποκλειστικά από πρόβριο ή κατσικίσιο γάλα προκαλεί μεταβολές στο πρωτεϊνικό και λιπιδικό προφίλ, οι οποίες αποτυπώνονται στα φασματικά δεδομένα. Αντίστοιχα, διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τη γεωγραφική προέλευση, τη διατροφή των ζώων ή τις συνθήκες ωρίμανσης μπορούν να αναγνωριστούν μέσω της σύγκρισης των φασματικών αποτυπωμάτων με πρότυπα αυθεντικών προϊόντων. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την προκαταρκτική αξιολόγηση μεγάλου αριθμού δειγμάτων χωρίς χρονοβόρα προετοιμασία ή καταστροφή του προϊόντος (Cebi et al., 2023).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα εφαρμογής φορητών φασματοσκοπικών συστημάτων σε επιτόπιους ελέγχους. Σε εγκαταστάσεις παραγωγής, κέντρα συλλογής γάλακτος ή σημεία εμπορίας, η ταχεία λήψη και επεξεργασία φασματικών δεδομένων μπορεί να συμβάλει στον άμεσο εντοπισμό ύποπτων δειγμάτων που απαιτούν περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση. Ως εκ τούτου, η φασματοσκοπία δεν λειτουργεί μόνο ως αναλυτική τεχνική εργαστηρίου, αλλά εξελίσσεται σε εργαλείο υποστήριξης συστημάτων ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών διασφάλισης ποιότητας και αυθεντικότητας των γαλακτοκομικών προϊόντων (Cebi et al., 2023).

Η ενσωμάτωση δεδομένων από διαφορετικές τεχνικές έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προσεγγίσεων συγχώνευσης δεδομένων, οι οποίες επιδιώκουν τη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας μέσω της αξιοποίησης συμπληρωματικών πληροφοριών. Μελέτες που εξετάζουν τη συνδυαστική ανάλυση δεδομένων δείχνουν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποκαλύψει μοτίβα που δεν είναι ανιχνεύσιμα όταν οι τεχνικές χρησιμοποιούνται μεμονωμένα (Schwallow et al., 2019). Η πολυπαραμετρική αυτή θεώρηση αντανακλά την ανάγκη για ολοκληρωμένα συστήματα ανάλυσης που να λαμβάνουν υπόψη τη σύνθετη φύση των τροφίμων.

Η εφαρμογή σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών στα γαλακτοκομικά προϊόντα έχει δείξει ότι η γεωγραφική προέλευση και η μέθοδος παραγωγής αποτυπώνονται σε ένα σύνολο χημικών χαρακτηριστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς αυθεντικοποίησης. Η ανάλυση λιπαρών οξέων παρέχει πληροφορίες για τη διατροφή των ζώων και το σύστημα

εκτροφής, ενώ οι ισοτοπικές αναλογίες αντανακλούν περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το κλίμα, το υψόμετρο και η προέλευση των ζωοτροφών. Παράλληλα, οι μεταβολομικές αναλύσεις καταγράφουν αμινοξέα, οργανικά οξέα, πτητικές ενώσεις και άλλους μεταβολίτες που επηρεάζονται από τη μικροβιακή δραστηριότητα και τις συνθήκες ωρίμανσης. Ο συνδυασμός των πληροφοριών αυτών δημιουργεί ένα πολυδιάστατο χημικό αποτύπωμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση προϊόντων διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης ή διαφορετικών συστημάτων παραγωγής (Gómez-Cortés et al., 2018). Για παράδειγμα, τυριά που παράγονται από γάλα ζώων ελευθέρως βοσκής παρουσιάζουν συχνά διαφορετικό προφίλ λιπαρών οξέων και μεταβολιτών σε σχέση με προϊόντα εντατικής κτηνοτροφίας, γεγονός που επιτρέπει την ταξινόμησή τους σε διαφορετικές κατηγορίες προέλευσης.

Η ανίχνευση νοθείας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των αναλυτικών προσεγγίσεων. Στα γαλακτοκομικά προϊόντα, συχνές μορφές απάτης περιλαμβάνουν την προσθήκη αγελαδινού γάλακτος σε προϊόντα που παράγονται αποκλειστικά από πρόβειο ή κατσικίσιο γάλα, τη χρήση φθηνότερων λιπαρών υλών ή την ψευδή δήλωση γεωγραφικής προέλευσης. Οι μη στοχευμένες αναλυτικές μέθοδοι δεν αναζητούν έναν συγκεκριμένο δείκτη νοθείας, αλλά εξετάζουν το συνολικό χημικό προφίλ του προϊόντος και εντοπίζουν αποκλίσεις από τα πρότυπα των αυθεντικών δειγμάτων. Έτσι, ακόμη και όταν ο τρόπος νοθείας δεν είναι γνωστός εκ των προτέρων, είναι δυνατό να αναγνωριστούν ασυνήθιστα πρότυπα που υποδηλώνουν πιθανή παραποίηση ή μη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές παραγωγής (Popping et al., 2017).

Η πρόοδος της μηχανικής μάθησης έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες αξιοποίησης των δεδομένων αυτών. Αλγόριθμοι όπως τα Random Forests, τα Support Vector Machines (SVM) και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να επεξεργάζονται ταυτόχρονα εκατοντάδες ή χιλιάδες μεταβλητές που προέρχονται από φασματοσκοπικές, ισοτοπικές και μεταβολομικές αναλύσεις. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο μπορεί να εκπαιδευτεί με δείγματα αυθεντικής Φέτας ΠΟΠ και στη συνέχεια να αξιολογεί νέα δείγματα, εντοπίζοντας αποκλίσεις που σχετίζονται με τη χρήση διαφορετικού τύπου γάλακτος ή με διαφορετική γεωγραφική προέλευση. Η δυνατότητα αναγνώρισης σύνθετων προτύπων που δεν είναι εύκολα αντιληπτά με συμβατικές στατιστικές μεθόδους οδηγεί σε υψηλότερη ακρίβεια ταξινόμησης και

δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου και έγκαιρης ανίχνευσης απάτης στον αγροδιατροφικό τομέα (Das et al., 2025).

Η μελλοντική πορεία του πεδίου φαίνεται να προσανατολίζεται προς την περαιτέρω ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών και τη δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων ανάλυσης. Η ανάπτυξη φορητών συσκευών και η δυνατότητα συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο αναμένεται να μετασχηματίσει τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι έλεγχοι, επιτρέποντας την άμεση αξιολόγηση της αυθεντικότητας σε περιβάλλοντα παραγωγής και διανομής (Pu et al., 2021). Η εξέλιξη αυτή συνδέεται με την ανάγκη για ταχύτερες και πιο ευέλικτες διαδικασίες ελέγχου.

Η πρόκληση της τυποποίησης παραμένει κεντρική, καθώς η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων αποτελεί προϋπόθεση για την ευρεία εφαρμογή των μεθόδων. Οι τεχνικές εκθέσεις που εξετάζουν την εφαρμογή αναλυτικών προσεγγίσεων υπογραμμίζουν την ανάγκη για ανάπτυξη κοινών προτύπων και για δημιουργία βάσεων δεδομένων που να καλύπτουν επαρκώς τις περιοχές ενδιαφέροντος (European Commission, Joint Research Centre, 2022). Η αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την ενσωμάτωση των τεχνικών σε κανονιστικά πλαίσια.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από την εξέταση των σύγχρονων ερευνητικών προσεγγίσεων δείχνει ότι η αυθεντικοποίηση γαλακτοκομικών προϊόντων αποτελεί ένα δυναμικό πεδίο, στο οποίο η επιστημονική πρόοδος συνδέεται άμεσα με τις ανάγκες της αγοράς και της κανονιστικής εποπτείας. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων, αξιόπιστων και εφαρμόσιμων μεθόδων αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την προστασία της αυθεντικότητας και για τη διατήρηση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών.

Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

- Abbas, O., Zadavec, M., Baeten, V., Mikuš, T., Lešić, T., Vulić, A., Prpić, J., Jemeršić, L., & Pleadin, J. (2018). Analytical methods used for the authentication of food of animal origin. *Food Chemistry*, 246, 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.007>
- AND International, ECORYS, & COGEA. (2020). Evaluation support study on geographical indications and traditional specialties guaranteed protected in the EU (Final report). <https://www.qualivita.it/wp-content/uploads/2021/03/STUDIO-UE-IGSTG.pdf>
- Biancolillo, A. (2020). Chemometric strategies for spectroscopy-based food authentication. *Applied Sciences*, 10(18), 6544. <https://doi.org/10.3390/app10186544>
- Camin, F., Boner, M., Bontempo, L., Fauhl-Hassek, C., Kelly, S. D., Riedl, J., & Rossmann, A. (2017). Stable isotope techniques for verifying the declared geographical origin of food in legal cases. *Trends in Food Science & Technology*, 61, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.003>
- Camin, F., Bontempo, L., Perini, M., & Piasentier, E. (2016). Stable isotope ratio analysis for assessing the authenticity of food of animal origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 868–877. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12219>
- Cebi, N., Bekiroglu, H., & Erarslan, A. (2023). Nondestructive metabolomic fingerprinting: FTIR, NIR and Raman spectroscopy in food screening. *Molecules*, 28(23), 7933. <https://doi.org/10.3390/molecules28237933>
- Chaudhary, V., et al. (2022). Spectroscopic techniques for authentication of animal origin foods. *Frontiers in Nutrition*, 9, 979205. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.979205>
- Consonni, R., & Cagliani, L. R. (2019). The potentiality of NMR-based metabolomics in food science and food authentication assessment. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 57(9), 558–578. <https://doi.org/10.1002/mrc.4807>
- Danezis, G. P., Tsagkaris, A. S., Camin, F., Brusica, V., & Georgiou, C. A. (2016). Food authentication: Techniques, trends and emerging approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 85, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.026>
- Das, M., Yeo, W. S., & Saptoro, A. (2025). A review of machine learning in hyperspectral imaging for food safety. *Vibrational Spectroscopy*, 127, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2025.103828>

- Dimitrakopoulou, M. E., & Vantarakis, A. (2021). Does traceability lead to food authentication? A systematic review from a European perspective. *Food Reviews International*, 39(1), 537–559. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1876972>
- Dimitriou, L., et al. (2025). Chemometric classification of Feta cheese authenticity via ATR-FTIR spectroscopy. *Applied Sciences*, 15(15), 8272. <https://doi.org/10.3390/app15158272>
- European Commission. (2018). Commission Implementing Regulation (EU) 2018/775 laying down rules for the application of Article 26(3) of Regulation (EU) No 1169/2011 as regards the indication of the country of origin or place of provenance of the primary ingredient of a food.
- European Commission. (2018). The EU Food Fraud Network and the system for administrative assistance: Food fraud annual report 2018.
- European Commission. (2021a). Commission staff working document: Evaluation of geographical indications and traditional specialities guaranteed protected in the EU (SWD/2021/0427 final).
- European Commission. (2021b). Report on geographical indications and traditional specialities guaranteed schemes (COM/2021/815 final).
- European Commission. (2022). Alert and Cooperation Network: 2021 annual report.
- European Commission. (2023). Alert and Cooperation Network: 2022 annual report.
- European Commission. (2024). Commission Implementing Regulation (EU) 2024/2793.
- European Commission. (2025a). Commission Delegated Regulation (EU) 2025/27 supplementing Regulation (EU) 2024/1143.
- European Commission. (2025b). Commission Implementing Regulation (EU) 2025/26 laying down rules for the application of Regulation (EU) 2024/1143.
- European Commission, Directorate-General for Agriculture and Rural Development. (2023). Guide to applicants: How to compile the single document.

- European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety. (2020). The EU Agri-Food Fraud Network and the Administrative Assistance and Cooperation System: 2019 annual report.
- European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety. (2021). The EU Agri-Food Fraud Network and the Administrative Assistance and Cooperation System: 2020 annual report.
- European Commission, Joint Research Centre. (2022). Geographical origin authentication via elemental fingerprint of food.
- European Parliament and the Council of the European Union. (2011). Regulation (EU) No 1169/2011 on the provision of food information to consumers.
- European Parliament and the Council of the European Union. (2017). Regulation (EU) 2017/625 on official controls and other official activities performed to ensure the application of food and feed law.
- European Parliament and the Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1143 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 on geographical indications for wine, spirit drinks and agricultural products.
- European Parliamentary Research Service. (2021). Revision of the EU legislation on geographical indications of agricultural products and foodstuffs.
- Everstine, K., Spink, J., & Kennedy, S. (2013). Economically motivated adulteration (EMA) of food: Common characteristics of EMA incidents. *Journal of Food Protection*, 76(4), 723–735. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-399>
- Genis, D. O., Sezer, B., Durna, S., & Boyacı, I. H. (2020). Determination of milk fat authenticity in ultra-filtered white cheese by using Raman spectroscopy with multivariate data analysis. *Food Chemistry*, 336, 127699. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127699>
- Gonzalez, A., Armenta, S., & De La Guardia, M. (2009). Trace-element composition and stable-isotope ratio for discrimination of foods with protected designation of origin. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28(11), 1295–1311. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.001>

- Guo, X., Yu, Z., Zhao, F., Sun, Z., Kwok, L.-Y., & Li, S. (2021). Both sampling seasonality and geographic origin contribute significantly to variations in raw milk microbiota, but sampling seasonality is the more determining factor. *Journal of Dairy Science*, 104(10), 10609–10627. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20480>
- Haider, A., Iqbal, S. Z., Bhatti, I. A., Alim, M. B., Waseem, M., Iqbal, M., & Khaneghah, A. M. (2024). Food authentication, current issues, analytical techniques, and future challenges: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), e13360. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13360>
- Hamzić Gregorčič, S., Potočnik, D., Camin, F., & Ogrinc, N. (2020). Milk authentication: Stable isotope composition of hydrogen and oxygen in milks and their constituents. *Molecules*, 25(17), 4000. <https://doi.org/10.3390/molecules25174000>
- Hayes, E., Greene, D., O'Donnell, C., O'Shea, N., & Fenelon, M. A. (2023). Spectroscopic technologies and data fusion: Applications for the dairy industry. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1074688. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1074688>
- Hong, Y., et al. (2023). Data fusion and multivariate analysis for food authenticity analysis. *Nature Communications*, 14, 3309. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38382-z>
- International Organization for Standardization. (2020). ISO 22095:2020—Chain of custody: General terminology and models.
- Li, F., Zhang, J., & Wang, Y. (2024). Vibrational spectroscopy combined with chemometrics in authentication of functional foods. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(2), 333–354. <https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2073433>
- Liu, H., Nie, J., Liu, Y., Wadood, S. A., Rogers, K. M., Yuan, Y., & Gan, R.-Y. (2023). A review of recent compound-specific isotope analysis studies applied to food authentication. *Food Chemistry*, 415, 135791. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135791>
- Liu, H., Zhao, Q., Guo, X., Tang, C., Yu, X., Zhan, T., Qin, Y., & Zhang, J. (2019). Application of isotopic and elemental fingerprints in identifying the geographical origin of goat milk in China. *Food Chemistry*, 277, 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.144>

- Mendez, J., Mendoza, L., Cruz-Tirado, J. P., Quevedo, R., & Siche, R. (2019). Trends in application of NIR and hyperspectral imaging for food authentication. *Scientia Agropecuaria*, 10(1), 143–161. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.01.16>
- Montgomery, H., Haughey, S. A., & Elliott, C. T. (2020). Recent food safety and fraud issues within the dairy supply chain (2015–2019). *Global Food Security*, 26, 100447. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100447>
- Moore, J. C., Spink, J., & Lipp, M. (2012). Development and application of a database of food ingredient fraud and economically motivated adulteration from 1980 to 2010. *Journal of Food Science*, 77(4), R118–R126. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02657.x>
- Nedeljkovic, A., et al. (2025). The feasibility of artificial intelligence and Raman spectroscopy for rapid authenticity screening. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12428073/>
- O’Sullivan, R., Cama-Moncunill, R., Salter-Townshend, M., Schmidt, O., & Monahan, F. J. (2023). Verifying origin claims on dairy products using stable isotope ratio analysis and random forest classification. *Food Chemistry: X*, 18, 100858. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100858>
- Ozturk, M., Dogan, M. A., Menevseoglu, A., & Ayvaz, H. (2022). Infrared spectroscopy combined with chemometrics as a convenient method to detect adulterations in cooking/stretching process in commercial cheese. *International Dairy Journal*, 128, 105312. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105312>
- Perini, M., & Bontempo, L. (2022). Liquid chromatography coupled to isotope ratio mass spectrometry (LC-IRMS): A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 147, 116515. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116515>
- Perini, M., Thomas, F., Ortiz, A. I. C., Simoni, M., & Camin, F. (2022). Stable isotope ratio analysis of lactose as a possible potential geographical tracer of milk. *Food Control*, 139, 109051. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109051>
- Pianezze, S., Bontempo, L., Perini, M., Tonon, A., Ziller, L., Franceschi, P., & Camin, F. (2020). $\delta^{34}\text{S}$ for tracing the origin of cheese and detecting its authenticity. *Journal of Mass Spectrometry*, 55(7), e4451. <https://doi.org/10.1002/jms.4451>

- Popping, B., De Dominicis, E., Dante, M., & Nocetti, M. (2017). Identification of the geographic origin of Parmigiano Reggiano (P.D.O.) cheeses deploying non-targeted mass spectrometry and chemometrics. *Foods*, 6(2), 13. <https://doi.org/10.3390/foods6020013>
- Potočnik, D., Nečemer, M., Perišić, I., Jagodič, M., Mazej, D., Camin, F., Eftimov, T., Strojnik, L., & Ogrinc, N. (2020). Geographical verification of Slovenian milk using stable isotope ratio, multi-element and multivariate modelling approaches. *Food Chemistry*, 326, 126958. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126958>
- Pu, Y., Pérez-Marín, D., O'Shea, N., & Garrido-Varo, A. (2021). Recent advances in portable and handheld NIR spectrometers and applications in milk, cheese and dairy powders. *Foods*, 10(10), 2377. <https://doi.org/10.3390/foods10102377>
- Roberts, J., Power, A., Chapman, J., Chandra, S., & Cozzolino, D. (2018). A short update on the advantages, applications and limitations of hyperspectral and chemical imaging in food authentication. *Applied Sciences*, 8(4), 505. <https://doi.org/10.3390/app8040505>
- Robson, K., Dean, M., Haughey, S., & Elliott, C. (2021). A comprehensive review of food fraud terminologies and food fraud mitigation guides. *Food Control*, 120, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107516>
- Rocchetti, G., Lucini, L., Gallo, A., Masoero, F., Trevisan, M., & Giuberti, G. (2018). Untargeted metabolomics reveals differences in chemical fingerprints between PDO and non-PDO Grana Padano cheeses. *Food Research International*, 113, 407–413. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.029>
- Schwolow, S., Gerhardt, N., Rohn, S., & Weller, P. (2019). Data fusion of GC-IMS data and FT-MIR spectra for the authentication of olive oils and honeys. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411(23), 6005–6019. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01978-w>
- UK Food Standards Agency. (2024). Review of capability of methods for the verification of country of origin for food and feed. <https://science.food.gov.uk/article/122061-review-of-capability-of-methods-for-the-verification-of-country-of-origin-for-food-and-feed>

- Valletta, M., Ragucci, S., Landi, N., Di Maro, A., Pedone, P. V., Russo, R., & Chambery, A. (2021). Mass spectrometry-based protein and peptide profiling for food fraud, traceability and authenticity assessment. *Food Chemistry*, 365, 130456. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130456>
- Wijenayake, K., Frew, R., McComb, K., Van Hale, R., & Clarke, D. (2020). Feasibility of casein to record stable isotopic variation of cow milk in New Zealand. *Molecules*, 25(16), 3658. <https://doi.org/10.3390/molecules25163658>
- Xu, Y., Zhong, P., Jiang, A., Shen, X., Li, X., Xu, Z., Shen, Y., Sun, Y., & Lei, H. (2020). Raman spectroscopy coupled with chemometrics for food authentication: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 131, 116017. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116017>
- Zhang, S., et al. (2024). Foodomics as a tool for evaluating food authenticity and safety. *Foods*, 14(1), 15. <https://doi.org/10.3390/foods14010015>
- Gatzias, I. S., Karabagias, I. K., Kontominas, M. G., & Badeka, A. V. (2020). Geographical differentiation of feta cheese from northern Greece based on physicochemical parameters, volatile compounds and fatty acids. *LWT*, 131, 109615. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109615>
- Vatavali, K., Kosma, I., Louppis, A., Gatzias, I., Badeka, A. V., & Kontominas, M. G. (2020). Characterisation and differentiation of geographical origin of Graviera cheeses produced in Greece based on physico-chemical, chromatographic and spectroscopic analyses, in combination with chemometrics. *International Dairy Journal*, 110, 104799. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104799>
- Ionescu, A.-D., Cîrîc, A. I., & Begea, M. (2023). A review of milk frauds and adulterations from a technological perspective. *Applied Sciences*, 13(17), 9821. <https://doi.org/10.3390/app13179821>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.