



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Επιστημών Τροφίμων
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική μελέτη διαφορετικών ειδών γάλακτος με χρήση
φασματοσκοπίας υπερύθρου και χημειομετρίας**

MSc Thesis

Comparative study of different milk types using infrared spectroscopy and
chemometrics



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ / NAME OF STUDENT

Κυριακή Χατζημιχαήλ / Kyriaki Chatzimichail

ΟΝΟΜΑΤΑ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ / NAMES OF THE SUPERVISORS

Βασιλεία Σινάνογλου / Vassilia Sinanoglou

Ανδριάννα Λάζου / Andriana Lazou

ΑΙΓΑΛΕΩ/AIGALEO 2024



Faculty of Food Sciences
Department of Food Science and Technology

Master of Science
FOOD INNOVATION, QUALITY AND SAFETY

MSc THESIS

**Comparative study of different milk types using infrared
spectroscopy and chemometrics**

NAME OF STUDENT

Kyriaki Chatzimichail

fiqs22029@uniwa.gr

SUPERVISORS

Vassilia Sinanoglou

Andriana Lazou

AIGALEO 2024

Επιτροπή Αξιολόγησης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Οι υπογράφωντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (master thesis) με τίτλο «**Συγκριτική μελέτη διαφορετικών ειδών γάλακτος με χρήση φασματοσκοπίας υπερύθρου και χημειομετρίας**» που παρουσιάστηκε από την **Χατζημιχαήλ Κυριακή**, υποψηφίας για τον μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών στην **ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ** και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

	Όνοματεπώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Ψηφιακή Υπογραφή
Όνομα επιβλέπουσας	Βασιλεία Σινάνογλου	Καθηγήτρια, Κοσμήτορας της Σχολής Επιστημών Τροφίμων	
Όνομα επιβλέπουσας	Ανδριάννα Λάζου	Επίκουρος Καθηγήτρια	
Όνομα μέλους επιτροπής	Διονύσης Κάβουρας	Ομότιμος Καθηγητής	

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright

Έχοντας πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικής ιδιοκτησίας, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστική συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλώνω, επίσης, ότι αναλαμβάνω όλες τις συνέπειες, όπως αυτές νομίμως ορίζονται, στην περίπτωση που διαπιστωθεί διαχρονικά ότι η εργασία μου αυτή ή τμήμα αυτής αποτελεί προϊόν λογοκλοπής.

Χατζημιχαήλ Κυριακή



Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω την κυρία Βασιλεία Σινάνογλου για την πολύτιμη καθοδήγηση της και την στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η υπομονή και η βοήθεια της ήταν πολύτιμα εφόδια για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω την κυρία Ανδριάννα Λάζου για το χρόνο και τη βοήθεια της, καθώς και για τη συνολική μας συνεργασία. Την ευχαριστώ θερμά για το ενδιαφέρον της τόσο για την ακαδημαϊκή μου πορεία, όσο και για την προσωπική.

Θα ήθελα, επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Κάβουρα Διονύση, για την καθοδήγηση του, την ευχάριστη διάθεση και την αισιόδοξη ενέργεια που πρόσφερε.

Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Κοντελέ Σπυρίδωνα, για το χρόνο και τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε, καθώς και την παραχώρηση του χώρου του εργαστηρίου της Μικροβιολογίας Τροφίμων, με σκοπό τη μελέτη των εικόνων των δειγμάτων γάλακτος στο μικροσκόπιο.

Θέλω, τέλος, να ευχαριστήσω τη κα Γεωργία Λαδίκη και τη κα Ναταλία Σταυροπούλου για την πολύτιμη βοήθεια τους, την στήριξη και την παρέα, στα πλαίσια εκπόνησης του πειράματος για τη διπλωματική μου εργασία.

Στην οικογένεια μου

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική μελέτη αποσκοπεί στη συγκριτική μελέτη μεταξύ διαφορετικών ειδών γάλακτος, συγκεκριμένα αγελαδινού και κατσικίσιου γάλακτος, υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε λίπος, χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία υπερύθρου (ATR-FTIR) και χρωματομετρία σε συνδυασμό με χημειομετρία. Παράλληλα, τα δείγματα μελετήθηκαν με χρήση μικροσκόπησης. Η αποτίμηση των φασμάτων υπερύθρου των δειγμάτων γάλακτος μετά από λυοφιλίωση, ανέδειξε ως κύρια συστατικά για όλα τα μελετούμενα είδη, λιπίδια, πρωτεΐνες και υδατάνθρακες. Παράλληλα μελετήθηκαν και οι δευτεροταγείς δομές των πρωτεϊνών μετά από κατάλληλη επεξεργασία των φασμάτων υπερύθρου. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψαν σημαντικά ευρήματα. Συγκεκριμένα, το κατσικίσιο γάλα, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητά του σε λίπος, παρουσίασε υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες σε σχέση με το αγελαδινό, ενώ το τελευταίο παρουσίασε υψηλότερες συγκεντρώσεις σε αλάτι. Επίσης, τα γάλατα υψηλής περιεκτικότητας σε λίπος έδωσαν σημαντικά αυξημένες τις απορροφήσεις των δονήσεων τάσεων μεθυλιών-μεθυλενίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα γάλατα χωρίς λακτόζη παρουσίασαν μία επιπλέον απορρόφηση στα 918 cm^{-1} η οποία αποδίδεται σε β-ανωμερείς δομές σακχάρων και η οποία πιθανόν επικαλύπτεται για υψηλές περιεκτικότητες λακτόζης. Επίσης, βρέθηκε σημαντική διαφορά στην κίτρινη απόχρωση των διαφόρων ειδών γάλακτος, με τα πλήρη αγελαδινά να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή και τα αγελαδινά χαμηλών λιπαρών ουσιών τη μικρότερη. Εξαιρετικά ενδιαφέροντα είναι η διαφοροποίηση των δειγμάτων γάλακτος χαμηλής και υψηλής περιεκτικότητας σε λίπος ως προς την χροιά, με τα πρώτα να διαθέτουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές. Η ανάλυση της δευτεροταγούς δομής των πρωτεϊνών έδειξε διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφορετικών ειδών γάλακτος, με σημαντικότερη την αυξημένη περιεκτικότητα της δομής β-παράλληλο φύλλο στα γάλατα χαμηλής περιεκτικότητας λίπους. Επίσης, η μικροσκοπική ανάλυση έδειξε διαφοροποιήσεις στη δομή των ειδών γάλακτος, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με την περιεκτικότητά τους σε λιπαρές ουσίες. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της μελέτης αντικατοπτρίζουν τη σύσταση των ειδών γάλακτος και παρέχουν σημαντικές ποιοτικές παραμέτρους για τον χαρακτηρισμό τους.

Λέξεις κλειδιά: Φασματοσκοπία Υπερύθρου, Χημειομετρία, Αγελαδινό Γάλα, Κατσικίσιο Γάλα, Δευτεροταγής Δομή Πρωτεϊνών, Χρωματικές Παράμετροι Γάλακτος

Abstract

The present thesis aims at the comparative study between different kinds of milk, specifically cow's and goat's milk, whole and low fat, using infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and colorimetry combined with chemometry. At the same time, the milk samples were studied using microscopy. The evaluation of the infrared spectra of the milk samples after lyophilization showed lipids, proteins, and carbohydrates as the main components for all the species studied. The secondary structures of the proteins were also studied after appropriate treatment of the infrared spectra. Important findings emerged from the processing of the results. Specifically, low fat goat's milk showed a higher protein content than cow's milk, while the latter showed higher salt concentrations. Also, whole-fat milk gave significantly increased absorptions of methyl-methylene vibrations. It is worth noting that lactose-free milk showed an additional absorption at 918 cm^{-1} which is attributed to β -anomeric sugar structures and which probably overlaps for high lactose contents. A significant difference was also found in the yellow hue of the different types of milk, with whole cow's milk showing the highest value and low-fat cow's milk the lowest value. Extremely interesting is the differentiation of low and high-fat milk samples in terms of hue angle, with the former having significantly higher values. The analysis of the secondary structure of the proteins showed differences between the different types of milk, with the increased content of the β -parallel sheet structure being more significant in the low-fat milk. Also, the microscopic analysis showed differences in the structure of the milk types, which are mainly related to their fat content. In conclusion, the results of the study reflect the composition of milk species and provide important quality parameters for their characterization.

Keywords: Infrared Spectroscopy, Chemometrics, Cow's Milk, Goat's Milk, Secondary Structure of Proteins, Milk Color Parameters

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
1 Γάλα.....	4
1.1 Χημική Σύσταση Γάλακτος	4
1.1.1 Συνθήκες που επηρεάζουν τη σύσταση του γάλακτος	4
1.1.2 Νερό.....	5
1.1.3 Λιπίδια	5
1.1.4 Πρωτεΐνες.....	7
1.1.5 Λακτόζη	9
1.1.6 Άλατα.....	11
1.1.7 Βιταμίνες.....	11
1.2 Φυσικές και Φυσικοχημικές ιδιότητες γάλακτος.....	12
1.3 Επίδραση της επεξεργασίας στο γάλα.....	13
1.4 Συσκευασία γάλακτος	14
1.5 Αναλυτικές μέθοδοι για την ανάλυση γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων.....	16
Προηγμένες Αναλυτικές Τεχνικές	16
1.5.1 Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC)	16
1.5.2 Φασματομετρία Μάζας (MS)	17
1.5.3 Φασματοσκοπία Υπερύθρου (IR).....	18
1.5.4 Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR).....	19
1.6 Ανασκόπηση μελετών σε γάλατα.....	20
Σκοπός της εργασίας.....	27
2 Υλικά και Μέθοδοι	28
2.1 Δειγματοληψία και κωδικοποίηση	28
2.2 Πειραματική πορεία	31
2.3 Λυοφιλίωση.....	32

2.4	Μέτρηση Χρώματος.....	34
2.5	Φασματοσκοπία Μετασχηματισμού Fourier με Αποσβένουσα Ολική Ανάκλαση (ATR-FTIR).....	35
2.6	Προσδιορισμός Δευτεροταγούς δομής πρωτεϊνών από τα φάσματα υπερύθρου.....	36
2.7	Μικροσκοπία δειγμάτων γάλακτος.....	37
2.8	Στατιστική Ανάλυση.....	37
3	Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	38
3.1	Σύσταση διαφορετικών ειδών γάλακτος.....	38
3.2	Χρώμα γάλακτος.....	41
3.3	Αποτελέσματα απορροφήσεων των φασμάτων ATR-FTIR.....	43
3.4	Αποτελέσματα δευτεροταγούς δομής πρωτεϊνών.....	50
3.5	Αποτελέσματα Μικροσκόπησης.....	53
4	Συμπεράσματα.....	55
5	Βιβλιογραφία.....	61

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Μέση σύσταση βασικών θρεπτικών συστατικών στο αγελαδινό και κατσικίσιο γάλα.	5
Πίνακας 1.2 Ιδιότητες πρωτεϊνών γάλακτος.....	8
Πίνακας 1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες κατσικίσιου και αγελαδινού γάλακτος.....	12
Πίνακας 1.4 Ανασκόπηση μελετών που έχουν γίνει στο γάλα.....	25
Πίνακας 2.1 Επεξήγηση κωδικοποίησης δειγμάτων διαφορετικών ειδών γάλακτος....	29
Πίνακας 2.2 Σύνολο δειγμάτων που εξετάστηκαν.....	29
Πίνακας 3.1 Σύνολο δειγμάτων γάλακτος και η σύσταση τους.....	38
Πίνακας 3.2 Γενική χημική σύσταση δειγμάτων γάλακτος με βάση την επισήμανση των προϊόντων ως εκατοστιαία περιεκτικότητα (%w/v).....	40
Πίνακας 3.3 Χρωματικές παράμετροι δειγμάτων γάλακτος.....	42
Πίνακας 3.4 Σχετική ένταση ταινιών απορρόφησης των φασμάτων ATR-FTIR των δειγμάτων γάλακτος.....	43
Πίνακας 3.5 Εκατοστιαία σύσταση (%) των μοριακών ειδών των πρωτεϊνών με βάση τη δευτεροταγή τους δομή στα δείγματα γάλακτος.....	50

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Έκκριση μεμβράνης σφαιρικού λίπους γάλακτος και η κατανομή των κύριων πρωτεϊνών της (Πηγή: Y. Wang et al., 2024).....	7
Εικόνα 1.2 Ποσοστά καζεϊνών σε κατσικίσιο και αγελαδινό γάλα.....	9
Εικόνα 1.3 Κατώτατα και ανώτατα όρια φυσικών και χημικών σταθερών γάλακτος Πηγή: (Κώδικας Τροφίμων και Ποτών, 2016).....	13
Εικόνα 1.4 Συσκευασία γάλακτος σε διαφορετικούς περιέκτες.....	15
Εικόνα 2.1 Πειραματική πορεία μελέτης διαφόρων ειδών γάλακτος.....	31
Εικόνα 2.2 Δείγματα γάλακτος πριν τη λυοφιλίωση, τοποθέτηση σε φόρμες.....	32
Εικόνα 2.3 Τοποθέτηση δειγμάτων στον λυοφιλιωτή, σύνδεση θερμοστοιχείων.....	33
Εικόνα 2.4 Λυοφιλιωτής, GELLERT.....	33
Εικόνα 2.5 Τοποθέτηση δειγμάτων σε τριβλία Petri, μέτρηση παραμέτρων χρώματος.....	34
Εικόνα 2.6 Διάγραμμα χρωματικού χώρου CIELAB.....	35
Εικόνα 2.7 Φασματοόμετρο ATR-FTIR.....	36
Εικόνα 2.8 Μικροσκόπιο CX23, OLYMPUS.....	37
Εικόνα 3.1 Δείγματα γάλακτος - Χρωματικές διαφορές.....	42
Εικόνα 3.2 Περιοχές κυματαριθμών και αντίστοιχες λειτουργικές ομάδες στα φάσματα FT-MIR γαλακτοκομικών προϊόντων.....	49
Εικόνα 3.3 Εικόνες διαφορετικών ειδών γάλακτος στο μικροσκόπιο.....	53

Εισαγωγή

Η παγκόσμια παραγωγή γάλακτος αναμένεται να αυξηθεί κατά 1,7% ετησίως, έως το 2028, ταχύτερα από τα περισσότερα κύρια γεωργικά προϊόντα. Το μερίδιο των γαλακτοκομικών προϊόντων στην παγκόσμια κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί μέσα στην επόμενη δεκαετία καθώς υπάρχει έντονη αύξηση της ζήτησης του στις αναπτυσσόμενες χώρες, λόγω εισοδήματος και αύξησης του πληθυσμού (FAO, 2019).

Το γάλα και τα γαλακτοκομικά προϊόντα αποτελούν σημαντική πηγή θρεπτικών συστατικών για τον άνθρωπο, καθώς περιέχουν πρωτεΐνες, λιπίδια με κύριο συστατικό τα λιπαρά οξέα, υδατάνθρακες, μέταλλα (ασβέστιο, φωσφόρος, μαγνήσιο, κλπ.) και βιταμίνες (B2, B12, A, B6 και D) και η κατανάλωσή τους είναι σημαντική για την ανθρώπινη υγεία. Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλο επιστημονικό και οικονομικό ενδιαφέρον για τη μελέτη των ανωτέρω προϊόντων τόσο σε επίπεδο συστάσεως και διατροφικής αξίας, όσο και σε θέματα που σχετίζονται με την ασφάλεια και τη διατηρησιμότητά τους. Παράλληλα, υπάρχει ανάγκη για την παραγωγή μεγάλου όγκου δεδομένων και πληροφοριών, οπότε η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί προς την ανάπτυξη και εφαρμογή ταχέων, μη καταστρεπτικών και ευαίσθητων αναλυτικών μεθόδων.

Το γάλα με το μεγαλύτερο ποσοστό που παράγεται, πωλείται και καταναλώνεται είναι το αγελαδινό γάλα (Anusha Siddiqui et al., 2024). Σύμφωνα με τη Eurostat το 2022, παράχθηκαν 154,3 εκατομμύρια τόνοι αγελαδινού γάλακτος, 3,0 πρόβειου και 2,5 εκατομμύρια τόνοι κατσικίσιου γάλακτος, στην Ευρώπη. Από αυτά παραλήφθηκε προϊόν 22,5 εκατομμύρια τόνοι φρέσκου γάλακτος. Τη μεγαλύτερη παραγωγή σε ωμό αγελαδινό γάλα, στην Ευρώπη, παρέχουν η Γερμανία, η Γαλλία, η Ολλανδία, η Ιταλία και η Πολωνία καλύπτοντας τα δύο τρίτα (64,7%) της παραγωγής ωμού αγελαδινού γάλακτος στην Ευρώπη, επομένως και τα δύο τρίτα (66,0%) ωμού αγελαδινού γάλακτος που συλλέχθηκαν από τις γαλακτοβιομηχανίες. Παράλληλα, όμως, άλλες χώρες της Ευρώπης, κυρίως στην περιοχή της Μεσογείου συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική παραγωγή γάλακτος, πέραν του αγελαδινού. Το 2022, η Ισπανία παρήγαγε 1,1 εκατομμύρια τόνους πρόβειου και κατσικίσιου γάλακτος και η Ελλάδα 0,9 εκατομμύρια τόνους, αντίστοιχα. Παρόλο που το αγελαδινό γάλα αντιπροσωπεύει τη συντριπτική πλειονότητα του γάλακτος που παραδίδεται στα γαλακτοκομεία στα περισσότερα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η πλειοψηφία

(57,7%) του γάλακτος που παραδόθηκε στα γαλακτοκομεία στην Ελλάδα το 2022 προερχόταν από προβατίνες και κατσίκες. Για την παραγωγή τυριού και βουτύρου, στην Ευρώπη χρησιμοποιείται περίπου το 70,4% του πλήρους γάλακτος που διατίθεται στα γαλακτοκομεία. Το πόσιμο γάλα που διατίθεται για κατανάλωση αντιπροσωπεύει το 8,5% του συνόλου του πλήρους γάλακτος που χρησιμοποιείται από τα γαλακτοκομεία. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση παρήχθησαν 22,5 εκατομμύρια τόνοι γάλακτος, όπου 9,7 εκατομμύρια τόνοι ήταν αποβουτυρωμένο γάλα και 12,7 εκατομμύρια τόνοι πλήρες γάλα (Eurostat, 2022).

Η γαλακτοβιομηχανία της Ευρωπαϊκής Ένωσης θεωρείται σημαντικός παίκτης στην παγκόσμια αγορά γαλακτοκομικών προϊόντων και κορυφαίος εξαγωγέας πολλών γαλακτοκομικών προϊόντων, όπως τα τυριά, καθώς είναι γνωστή για την ποιότητα των προϊόντων της. Περίπου το 50% του γάλακτος, στην Ευρωπαϊκή Ένωση χρησιμοποιείται για την παραγωγή τυριού, αν και παράγεται επίσης μεγάλη ποικιλία άλλων προϊόντων, όπως βούτυρο, γιαούρτια και παγωτά. Εκτός από αυτά τα προϊόντα, ένα ευρύ φάσμα νέων προϊόντων που προσφέρουν στις μέρες μας οι βιομηχανίες γάλακτος είναι και προϊόντα που στοχεύουν σε ειδικές ομάδες καταναλωτών, όπως προϊόντα με χαμηλή περιεκτικότητα σε λακτόζη ή χωρίς λακτόζη (Amaral et al., 2018).

Το γάλα και τα γαλακτοκομικά προϊόντα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα προϊόντων που καταναλώνονται παγκοσμίως, όπως το φρέσκο γάλα, γάλα που έχει υποστεί ζύμωση και προϊόντα αυτού, συμπυκνωμένο γάλα, κρέμα γάλακτος, γάλα σε σκόνη και αποβουτυρωμένο γάλα, είναι μερικά από τα προϊόντα αυτά (Amaral et al., 2018). Σύμφωνα με τον Κώδικα Τροφίμων και Ποτών ορίζεται ως «Γάλα» το *«απαλλαγμένο από πρωτόγαλα προϊόν του ολοσχερούς, χωρίς διακοπή αρμέγματος υγιούς γαλακτοφόρου ζώου, που ζει και τρέφεται υπό υγιεινούς όρους και που δεν βρίσκεται σε κατάσταση υπερκόπωσης»*. Ως «Γάλα Ημιαποβουτυρωμένο» χαρακτηρίζεται το *«προϊόν που απομένει από το ναπό γάλα μετά την αφαίρεση μέρους από το λίπος του, χωρίς οποιαδήποτε προσθήκη, το οποίο πρέπει να περιέχει λίπος σε ποσοστό 1,5 - 1,8%»*. Επίσης, επισημαίνεται πως το θερμικά επεξεργασμένο γάλα που δεν πληροί τις απαιτήσεις ως προς την περιεκτικότητα σε λίπος που προβλέπονται για το πλήρες γάλα, το ημιαποβουτυρωμένο και το αποβουτυρωμένο γάλα, θεωρείται γάλα κατανάλωσης, υπό τον όρο ότι η περιεκτικότητα σε λίπος αναγράφεται στη συσκευασία σαφώς με ένα δεκαδικό ψηφίο και ευανάγνωστα με τη μορφή “...% λίπος”. Το εν λόγω γάλα δεν πρέπει να περιγράφεται ως πλήρες γάλα, ημιαποβουτυρωμένο ή αποβουτυρωμένο γάλα (Κώδικας Τροφίμων και Ποτών, 2016).

Μερικές από τις μορφές που καταναλώνεται το γάλα είναι:

- *Υγρό ανεπεξέργαστο γάλα:* είναι γάλα υψηλής ποιότητας και πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυστηρές απαιτήσεις υγιεινής.
- *Πλήρες γάλα:* με λίπος τουλάχιστον 3%, το οποίο υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία.
- *Γάλα χαμηλής λιποπεριεκτικότητας (Ελαφρύ):* υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία και διαχωρίζεται η κρέμα. Η λιποπεριεκτικότητα του είναι 1,5 -2 %.
- *Αποβουτυρωμένο γάλα:* το οποίο υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία και η περιεκτικότητά του σε λίπος είναι χαμηλότερη από 0,3% (Belitz et al., 2018).

Το αγελαδινό γάλα αποτελεί το 95% της παγκόσμιας αγοράς γαλακτοκομικών προϊόντων και είναι το ζωικό γάλα που χρησιμοποιούν περισσότερο οι άνθρωποι. Ωστόσο, το κατσικίσιο γάλα είναι ένα προϊόν με ξεχωριστές ιδιότητες που αναζητούν συγκεκριμένοι καταναλωτές καθώς και αγορές, το οποίο δεν μπορούν να αντικαταστήσουν με το αγελαδινό. Το μέσο μέγεθος των σωματιδίων του λίπους στο κατσικίσιο γάλα είναι μικρότερο από αυτό του αγελαδινού και έτσι είναι πιο εύκολο να αφομοιωθεί και να απορροφηθούν τα θρεπτικά του συστατικά από τον άνθρωπο (L. Wang et al., 2023). Το κατσικίσιο γάλα, σε σύγκριση με το αγελαδινό έχει πιο παχύρρευστη και κρεμώδη υφή και είναι περισσότερη η περιεκτικότητά του σε θρεπτικά συστατικά. Όσον αφορά τη σύνθεση τους, το κατσικίσιο γάλα έχει περισσότερα λιπαρά, πρωτεΐνες και λιγότερη λακτόζη, όμως, είναι αρκετά παρόμοια έχοντας και τα δύο είδη γάλακτος ποσοστά περίπου 12,2 % ολικά στερεά, 3,8% λιπαρά, 3,5% πρωτεΐνη, 4,1% λακτόζη και 0,8% τέφρα. Το αγελαδινό γάλα έχει ελαφρώς περισσότερη ολική καζεΐνη και λιγότερο μη πρωτεϊνικό άζωτο από το κατσικίσιο γάλα. Περισσότερη περιεκτικότητα σε ασβέστιο, φωσφόρο, κάλιο, μαγνήσιο και βιταμίνη Α έχει το κατσικίσιο γάλα, ενώ έχει λιγότερα επίπεδα νατρίου και θείου σε σύγκριση με το αγελαδινό. Η σύνθεση του γάλακτος καθώς και η γεύση και το χρώμα του επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες όπως η φυλή του ζώου, η ηλικία, η διατροφή του, το στάδιο της γαλουχίας, η μέθοδος εκτροφής, το περιβάλλον, οι εποχές και έτσι επιτρέπουν τη δημιουργία ποικιλίας γαλακτοκομικών προϊόντων (Visoka et al., 2023).

1 Γάλα

1.1 Χημική Σύσταση Γάλακτος

1.1.1 Συνθήκες που επηρεάζουν τη σύσταση του γάλακτος

Η σύσταση των γαλακτοκομικών προϊόντων εξαρτάται, γενικά, από το είδος του προϊόντος, το είδος του γάλακτος που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του και τη μέθοδο επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή διαφόρων διαδικασιών σε μεταβλητές συνθήκες, όπως είναι η θερμική επεξεργασία, η αφαίρεση ορού γάλακτος, η αφυδάτωση, η ζύμωση και η ωρίμανση, μπορούν να οδηγήσουν σε γαλακτοκομικά προϊόντα με αξιοσημείωτη διαφορά στη σύνθεση τους. Πρέπει, επίσης, να λαμβάνονται υπόψιν και οι διακυμάνσεις που υπάρχουν στη σύσταση του νωπού γάλακτος (Moatsou & Park, 2017).

Η σύσταση του γάλακτος διαφέρει μεταξύ διαφορετικών θηλαστικών και μεταξύ διαφορετικών φυλών του ίδιου είδους (Kailasapathy, 2015). Όσον αφορά το κατσικίσιο και το αγελαδινό γάλα στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1) παρατίθεται η εκατοστιαία τυπική χημική σύσταση τους, κατά μέσο όρο. Η σύσταση του κατσικίσιου γάλακτος μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από διάφορους παράγοντες, όπως η εποχή, το στάδιο γαλουχίας, η φυλή, η διατροφή της κατσίκας, και της συνθήκες περιβάλλοντος του ζώου (Moatsou & Park, 2017). Το ίδιο ισχύει και για το αγελαδινό γάλα, του οποίου η σύσταση μπορεί να επηρεαστεί τόσο από εσωτερικούς όσο και από εξωτερικούς παράγοντες του ζώου. Αυτοί οι παράγοντες είναι οι συνθήκες υγιεινής του μαστού του ζώου, η μικροβιακή δραστηριότητα και η ενζυμικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο νωπό γάλα, η φυλή του ζώου, το στάδιο γαλουχίας αλλά και από τις διαδικασίες ελέγχου ποιότητας και επεξεργασίας του γάλακτος (Foroutan et al., 2019).

Πίνακας 1.1 Μέση σύσταση βασικών θρεπτικών συστατικών στο αγελαδινό και κατσικίσιο γάλα.

Σύσταση (%)	Αγελαδινό Γάλα	Κατσικίσιο Γάλα
Νερό	86,6	86,5
Λίπος	3,6	3,8
Πρωτεΐνη	3,2	3,4
Καζεΐνη	2,6	2,4
Λακτόζη	4,7	4,1
Τέφρα	0,7	0,8

(Πηγές: Kailasapathy, 2015; Park et al., 2007)

1.1.2 Νερό

Το νερό στο γάλα χρησιμεύει ως μέσο στο οποίο βρίσκονται όλα τα συστατικά (ολικά στερεά) του γάλακτος, διαλυμένα ή εναιωρούνται. Μικρές ποσότητες νερού στο γάλα δεσμεύονται χημικά με τη λακτόζη και τα άλατα του γάλακτος και μερικά συνδέονται με τις πρωτεΐνες, επηρεάζοντας έτσι τις ιδιότητες και τη σταθερότητα τους. Το νερό ελέγχει, επίσης, τον ρυθμό πολλών αντιδράσεων, όπως την οξείδωση των λιπιδίων, την ενζυμική δραστηριότητα και την μικροβιακή ανάπτυξη, επηρεάζοντας τη σταθερότητα του γάλακτος και των γαλακτοκομικών προϊόντων (Goulding et al., 2019; Kailasapathy, 2015). Το νερό επηρεάζει τις συνθήκες αποθήκευσης του γάλακτος, τη διάρκεια αποθήκευσης, καθώς και την υφή και τις τεχνολογικές του ιδιότητες (Ruckold et al., 2000). Η ποσότητα νερού που απομένει στο τελικό προϊόν, έπειτα από την επεξεργασία του, επηρεάζει τη γεύση, την υφή, το χρώμα καθώς και την εμφάνιση του τελικού προϊόντος (Kailasapathy, 2015). Μπορεί η σύσταση του γάλακτος να ποικίλει σε σημαντικό βαθμό, όμως σε όλες τις περιπτώσεις, το νερό, είναι το κύριο συστατικό του γάλακτος σε ποσοστό 63-87% (Belitz et al., 2018)

1.1.3 Λιπίδια

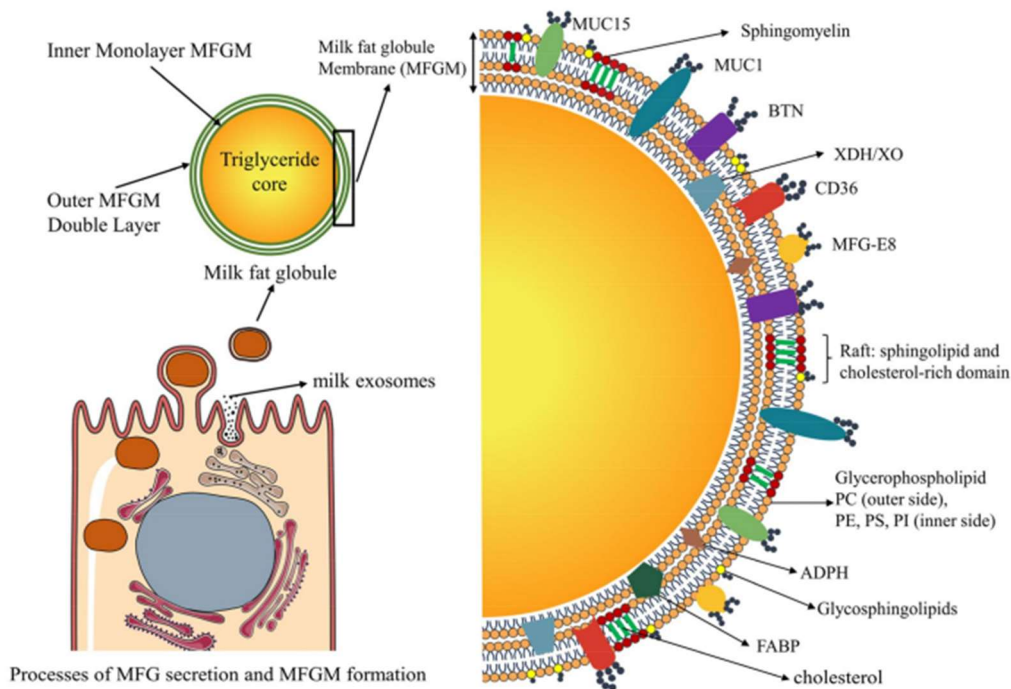
Τα λιπίδια είναι τα πιο σημαντικά συστατικά του γάλακτος ως προς το κόστος, τη θρεπτική αξία και ως τα φυσικά και αισθητηριακά χαρακτηριστικά που προσδίδουν στα γαλακτοκομικά προϊόντα (Park et al., 2007). Το λίπος στο γάλα

βρίσκεται σε μορφή σφαιριδίων, τα οποία κυμαίνονται σε μέγεθος από 0,1 έως 15 μm και αντιπροσωπεύουν ένα γαλάκτωμα της μορφής λίπος σε νερό. Τα σφαιρίδια του λίπους στο γάλα είναι δομικά και συνθετικά περίπλοκα και διακρίνονται σε δύο κύρια μέρη, στην μεμβράνη των λιποσφαιρίων γάλακτος και στον πυρήνα των τριγλυκεριδίων.

Η μεμβράνη των λιποσφαιρίων του γάλακτος (MFGM, Milk fat globules membrane) είναι ένα εξωτερικό στρώμα που αποτελείται κυρίως από φωσφολιπίδια και βοηθάει στην σταθερότητα του γαλακτώματος και καθυστερεί φαινόμενα αποσταθεροποίησης, όπως η κροκίδωση και η συνένωση, ενώ προστατεύει τα τριγλυκερίδια από λιπολυτικά ένζυμα (D'Incecco & Pellegrino, 2018). Τα φωσφολιπίδια αποτελούν το 0,8-1,0% του λίπους του γάλακτος, ενώ οι στερόλες, κυρίως η χοληστερόλη, αποτελούν το 0,2-0,4% (Belitz et al., 2018). Τα φωσφολιπίδια της μεμβράνης του λίπους του γάλακτος θεωρούνται χρήσιμοι παράγοντες όσον αφορά την πρόληψη της οξειδωσης, λόγω της μοναδικής σύνθεσης τους σε λιπαρά οξέα (Mohan et al., 2020).

Η σύνθεση των τριγλυκεριδίων ποικίλλει ανάλογα με τις εποχικές αλλαγές στη διατροφή, τη φυλή και το στάδιο γαλουχίας (D'Incecco & Pellegrino, 2018). Τα τριγλυκερίδια είναι εστέρες της γλυκερίνης με διάφορα λιπαρά οξέα. Η μεμβράνη των λιποσφαιρίων αποτελείται από πολύπλοκες κατηγορίες λιπιδίων, ενώ τα λιποσφαίρια αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από τριγλυκερίδια, τα οποία είναι τα κυριότερα λιπίδια στο γάλα, σε ποσοστό 97-98% των ολικών λιπιδίων. Όσον αφορά την λιποπεριεκτικότητα στα διάφορα είδη γάλακτος παρατηρούνται μεγάλες διαφορές (Κεχαγιάς & Τσάκαλη, 2017).

Τα σφαιρίδια του λίπους περιβάλλονται από μια μεμβράνη η οποία αποτελείται από φωσφολιπίδια και ένα διπλό στρώμα πρωτεϊνών (Belitz et al., 2018). Η διεπιφανειακή σύσταση των σφαιριδίων του λίπους γάλακτος περιλαμβάνει πρωτεΐνες γάλακτος (καζεΐνες και πρωτεΐνες ορού γάλακτος), πρωτεΐνες στη μεμβράνη του λίπους του γάλακτος, φωσφολιπίδια και γλυκοζυλιωμένα μόρια (L. Zhao et al., 2022). Οι πρωτεΐνες των μεμβρανών έχουν συγκεκριμένη φύση. Κατά την ομογενοποίηση η επιφάνεια των λιποσφαιρίων αυξάνεται κατά 4 έως 6 φορές και οι καζεΐνες εισέρχονται και συμμετέχουν στο σχηματισμό της μεμβράνης. Πέραν από τις λιποπρωτεΐνες, η μεμβράνη περιέχει και ένζυμα (Belitz et al., 2018).



Εικόνα 1.1 Έκκριση μεμβράνης σφαιρικού λίπους γάλακτος και η κατανομή των κύριων πρωτεϊνών της (Πηγή: Y. Wang et al., 2024)

1.1.4 Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες του γάλακτος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, το πήγμα δηλαδή στις καζεΐνες, οι οποίες είναι και το μεγαλύτερο μέρος των πρωτεϊνών σε ποσοστό 80% και το υπόλοιπο 20%, οι πρωτεΐνες του ορού γάλακτος. Οι καζεΐνες αποτελούνται από τις α_1 -καζεΐνες, τις α_2 -καζεΐνες, τις β -καζεΐνες και τις κ -καζεΐνες. Για τις δύο πρώτες υπάρχουν τέσσερις γενετικές παραλλαγές, οχτώ για την β -καζεΐνη και δύο της κ -καζεΐνης. Οι καζεΐνες εμφανίζουν μια χαρακτηριστική δομή, διότι δεν είναι σφαιρικές πρωτεΐνες, καθώς και φυσικές, βιολογικές και θρεπτικές ιδιότητες. Η καζεΐνη υπάρχει στο γάλα σε μεγάλα συσσωματώματα, τα μικκύλια καζεΐνης, τα οποία περιέχουν κolloειδές φωσφορικό ασβέστιο. Το μικκύλιο της καζεΐνης αποτελείται από περίπου 94% πρωτεΐνες (ως υπό-μικκύλια) και 6% μέταλλα (Cheung & Mehta, 2015).

Όσον αφορά τις πρωτεΐνες του ορού, οι κυριότερες ομάδες που ανήκουν σε αυτές είναι: η β -γαλακτογλοβουλίνη, η οποία βρίσκεται στις μεγαλύτερες ποσότητες, η α -γαλακταλβουμίνη, οι ανοσογλοβουλίνες, η οροαλβουμίνη και οι πρωτεόζες-πεπτόνες. Για την β -γαλακτογλοβουλίνη υπάρχουν έξι γενετικές παραλλαγές και για την α -γαλακταλβουμίνη δύο. Οι διαφορές στα κλάσματα αυτά της καζεΐνης και της

πρωτεΐνης του ορού αποδόθηκαν στις γενετικές διαφορές μεταξύ των ζώων και στις διαφορές μεταξύ των φυλών (Turck, 2013; Κεχαγιάς & Τσάκαλη, 2017).

Πίνακας 1.2 Ιδιότητες πρωτεϊνών γάλακτος

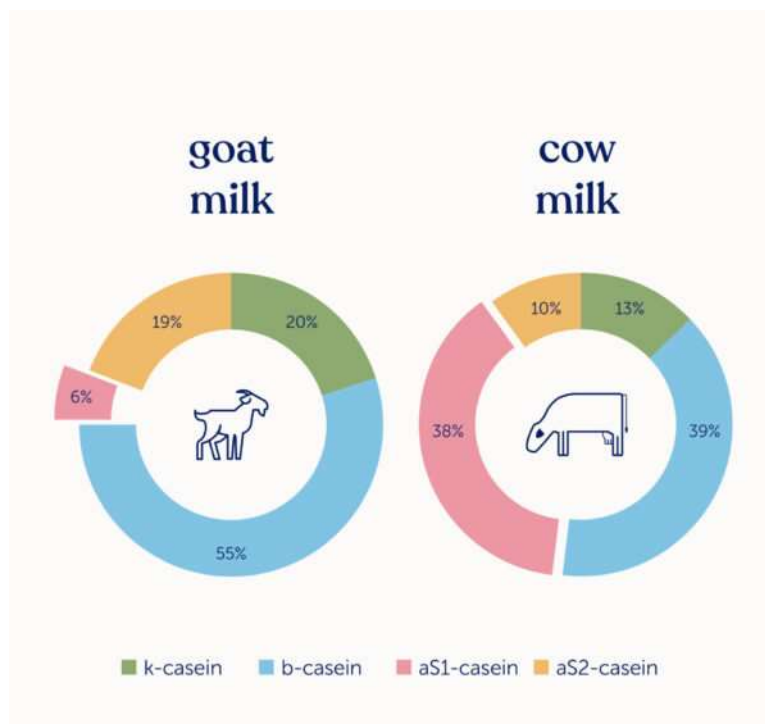
	Μέση συγκέντρωση (%)	Μοριακή μάζα	(Υπολείμματα/μόριο)			Ισοηλεκτρικό σημείο pH
			Αμινοξέα	Φωσφοσερίνη	Κυστεΐνη	
α ₁ -καζεΐνες	1,1	23,614	199	7-9	0	4,5
α ₂ -καζεΐνες	0,3	25,230	207	10-13	2	5,0
β-καζεΐνη	0,9	23,983	209	5	0	4,8
κ-καζεΐνη	0,3	19,023	169	1	2	5,6
β-γαλακτογλοβουλίνη	0,32	18,283	162	0	5	5,2
α-γαλακταλβουμίνη	0,12	14,176	123	0	8	4,3

Πηγή: (Cheung & Mehta, 2015)

Εκτός από τη φυλή του ζώου, το στάδιο της γαλουχίας του επηρεάζει επίσης την ποσότητα της καζεΐνης στο γάλα, η οποία κυμαίνεται συνήθως από 24 έως 29 g/L (Nayik et al., 2024). Οι γενετικές παραλλαγές προκύπτουν από την αντικατάσταση, σε κάποιο πρωτεϊνικό κλάσμα, ενός ή περισσοτέρων αμινοξέων με κάποιο ή κάποια άλλα, έχοντας διαφορές στις ιδιότητες τους. Όλες οι πρωτεΐνες του γάλακτος φαίνεται να είναι αλλεργιογόνες, ωστόσο η καζεΐνη, η β-γαλακτογλοβουλίνη και η α-γαλακταλβουμίνη είναι τα κύρια αλλεργιογόνα (Turck, 2013; Κεχαγιάς & Τσάκαλη, 2017). Οι διάφορες κατηγορίες πρωτεϊνών παρότι έχουν σε γενικές γραμμές τις ίδιες ιδιότητες στα διάφορα είδη γάλακτος, έχουν και ορισμένες διαφορές στις ιδιότητες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του γάλακτος κατά την επεξεργασία αλλά και κατά την αποθήκευση των γαλακτοκομικών προϊόντων. Για παράδειγμα, η μικρότερη συνεκτικότητα του πήγματος στο κατσικίσιο γάλα, σε σύγκριση με το αγελαδινό, έχει αποδοθεί στο μεγαλύτερο μέγεθος των μικελλών και στη μικρότερη ποσότητα ή έλλειψη της α₁-καζεΐνης στο κατσικίσιο γάλα (Κεχαγιάς & Τσάκαλη, 2017).

Έχει αναφερθεί ότι η β-καζεΐνη είναι η κύρια καζεΐνη (6-64%) στο κατσικίσιο γάλα, ενώ στο αγελαδινό γάλα η κύρια καζεΐνη είναι η α₁-καζεΐνη (50-54%). Το επίπεδο της α₂-καζεΐνης (10-25%) είναι σχετικά υψηλότερο στο κατσικίσιο γάλα, όμως το σύνολο της α₁ και α₂ καζεΐνης στο κατσικίσιο γάλα είναι μικρότερο σε σχέση με το αγελαδινό. Τέτοιες διαφορές μπορεί να συμβάλλουν στην καλύτερη

πεπτικότητα, στο σχηματισμό του τυροπήγματος αλλά και στην λιγότερη αλλεργιογόνο επίδραση τους (Naik et al., 2018).



Εικόνα 1.2 Ποσοστά καζεϊνών σε κατσικίσιο και αγελαδινό γάλα

Πηγή: <https://hcp.kendamil.com/digestive-benefits-of-goat-milk-infant-formula/>

1.1.5 Λακτόζη

Η λακτόζη είναι ο κύριος υδατάνθρακας του γάλακτος των θηλαστικών και υδρολύεται, σε γλυκόζη και γαλακτόζη, από τη λακτάση, η οποία είναι ένα ένζυμο της μεμβράνης της μικρολάχνης των κυττάρων του εντέρου. Αν η δραστηριότητα της λακτάσης είναι χαμηλή ή απουσιάζει τότε η άπεπτη λακτόζη μπορεί να προκαλέσει συμπτώματα δυσανεξίας στη λακτόζη, όπως φούσκωμα και κοιλιακό άλγος (Turck, 2013). Η δυσανεξία στη λακτόζη εμφανίζεται όταν το λεπτό έντερο δεν παράγει αρκετό ένζυμο λακτάσης για την πέψη της λακτόζης. Σε συνάρτηση τόσο της ποσότητας της λακτόζης που προσλαμβάνεται, όσο και στην δραστηριότητα της λακτάσης, άτομα που υποφέρουν από δυσανεξία στη λακτόζη παρουσιάζουν πολλά γαστρεντερικά προβλήματα. Έρευνες έχουν δείξει ότι περίπου το 70% του ενήλικου πληθυσμού παγκοσμίως έχει περιορισμένη έκφραση του ενζύμου της λακτάσης (Facioni et al., 2020). Η δραστηριότητα της λακτάσης, στον άνθρωπο, είναι υψηλότερη κατά τη γέννηση και μειώνεται μετά τον απογαλακτισμό (A. Li et al., 2023). Οι

γαλακτοβιομηχανίες γάλακτος για να καλύψουν της διατροφικές ανάγκες του πληθυσμού αυτού έχουν αναπτύξει προϊόντα χωρίς λακτόζη, προσθέτοντας εξωγενή λακτάση σε αυτά, συγκεκριμένα β-γαλακτοσιδάση (Dasriya et al., 2024). Μια δίαιτα χαμηλή σε λακτόζη είναι ένας τρόπος, για άτομα που έχουν δυσανεξία σε αυτή, ώστε να καταναλώνουν γαλακτοκομικά προϊόντα, καθώς η χαμηλότερη πρόσληψη λακτόζης μειώνει και τον κίνδυνο ανάπτυξης μακροχρόνιων επιπλοκών, από μη αντιμετωπισμένη δυσανεξία στη λακτόζη. Ως εκ τούτου, τα γαλακτοκομικά προϊόντα με υδρολυμένη λακτόζη παράγονται ευρέως ώστε να καλύψουν αυτή την αναπτυσσόμενη καταναλωτική αγορά. Η υδρόλυση της λακτόζης απελευθερώνει χαμηλό μοριακό βάρος των μονοσακχαριτών, της γλυκόζης και γαλακτόζης, όπου και οι δύο έχουν μειωμένες θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης (Tg) σε σύγκριση με τη λακτόζη (Queiroz et al., 2021). Η κατανάλωση γιαουρτιών και προϊόντων που έχουν υποστεί ζύμωση, τα οποία εμφανίζουν δραστηριότητα της λακτάσης και βοηθούν στην πέψη της λακτόζης, είναι χρήσιμα, όπως και η χρήση γάλακτος με χαμηλή περιεκτικότητα σε λακτόζη (Turck, 2013).

Η σύσταση και η συγκέντρωση της λακτόζης στο γάλα εξαρτάται κυρίως από την υγεία του μαστού, την ενεργειακή ισορροπία και τον μεταβολισμό της αγελάδας. Χαμηλότερα επίπεδα λακτόζης στο νωπό γάλα μπορούν να χρησιμεύσουν ως έγκαιρη πληροφόρηση για αναγνώριση μεταβολικών διαταραχών και υποκλινικής μαστίτιδας (ορίζεται σε σωματικά κύτταρα γάλακτος $\geq 1,0 \times 10^5$ κύτταρα/mL) (Antanaitis et al., 2021). Οι απαιτήσεις για την ανάπτυξη γαλακτοκομικών προϊόντων χαμηλής ή χωρίς λακτόζη είναι η αποφυγή πηγών λακτόζης, διασφαλίζοντας τη θρεπτική αξία και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος καθώς και το κόστος της παραγωγής. Η περιεκτικότητα σε λακτόζη απαιτείται να είναι μικρότερη από 1g/100g σε προϊόντα χαμηλής περιεκτικότητας σε λακτόζη και λιγότερο από 10mg/100g σε προϊόντα χωρίς λακτόζη. Οι κύριοι τρόποι για μείωση της περιεκτικότητας σε λακτόζη, στα γαλακτοκομικά προϊόντα, είναι η ενζυματική υδρόλυση, ο διαχωρισμός μεμβράνης και η ζύμωση. Σημαντική πρόκληση για τους κατασκευαστές, με την ανάπτυξη των τεχνολογιών για τη μείωση της λακτόζης, είναι να παρασκευάσουν προϊόντα χαμηλά σε λακτόζη ή χωρίς, που να συνάδουν ή να υπερβαίνουν τα παραδοσιακά γαλακτοκομικά προϊόντα στα θρεπτικά συστατικά, τη γεύση και την ποιότητα τους (A. Li et al., 2023).

Στα γαλακτοκομικά προϊόντα χωρίς λακτόζη, η λακτόζη προ-χωνεύεται σε γλυκόζη και γαλακτόζη. Επομένως, η περιεκτικότητα του γάλακτος χωρίς λακτόζη, σε

λακτόζη, μπορεί να είναι πολύ χαμηλή (<0,1 g/L), αλλά η περιεκτικότητα του σε γλυκόζη και γαλακτόζη να είναι περίπου 25 g/L. Η γλυκόζη και η γαλακτόζη είναι πιο γλυκές σε σύγκριση με τη λακτόζη, κάτι που επιτρέπει τη μείωση της πρόσθετης ζάχαρης στα γαλακτοκομικά προϊόντα, έως 10-15 g/kg, μειώνοντας έτσι και τις θερμίδες του προϊόντος (Dekker et al., 2019).

1.1.6 Άλατα

Στο γάλα υπάρχουν άλατα νατρίου, καλίου, χλωριούχου, θειικού, φωσφορικού, κιτρικού, ασβεστίου και μαγνησίου. Αν και τα άλατα είναι σχετικά δευτερεύοντα συστατικά του γάλακτος, είναι εξαιρετικά σημαντικά για πολλά τεχνολογικά και θρεπτικά χαρακτηριστικά του γάλακτος. Μερικά άλατα του γάλακτος είναι πλήρως διαλυτά, όμως άλλα όπως το φωσφορικό ασβέστιο, υπερβαίνουν τη διαλυτότητα τους υπό τις συνθήκες του γάλακτος και εμφανίζονται εν μέρει σε κolloειδή κατάσταση, τα οποία συνδέονται με τα μικκύλια της καζεΐνης. Η κατανομή των αλάτων μεταξύ διαλυτής και κolloειδούς φάσης επηρεάζεται σημαντικά από το pH και τη θερμοκρασία. Αυτές οι σχέσεις έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη σταθερότητα της καζεΐνης και κατά συνέπεια στις μεταποιητικές ιδιότητες του γάλακτος. Ακόμα, με την προσθήκη ορισμένων αλάτων, μπορεί να επηρεαστεί και η κατάσταση διαφόρων ειδών στο γάλα. Αλλαγές στη συγκέντρωση ορισμένων αλάτων του γάλακτος, όπως το φωσφορικό ασβέστιο και το κιτρικό, έχουν σημαντικές επιδράσεις στις φυσικοχημικές ιδιότητες της καζεΐνης και στην δυνατότητα επεξεργασίας του γάλακτος, κυρίως στην πήξη της πυτιάς και της θερμοανθεκτικότητας του (Goulding et al., 2019).

1.1.7 Βιταμίνες

Το γάλα περιέχει όλες τις βιταμίνες σε διάφορες ποσότητες. Κατά την επεξεργασία του, οι λιποδιαλυτές πρωτεΐνες παραμένουν στην κρέμα, ενώ οι υδατοδιαλυτές βιταμίνες παραμένουν στο αποβουτυρωμένο γάλα ή στον ορό (Belitz et al., 2018). Το βόειο γάλα είναι πολύ σημαντική πηγή ορισμένων βιταμινών, ιδιαίτερα της βιοτίνης (B7), της ριβοφλαβίνης (B2) και της κοβαλαμίνης (B12) για τη διατροφή του ενήλικου ανθρώπου. Εκτός, όμως, από τη διατροφική τους σημασία, τέσσερις βιταμίνες είναι σημαντικές και για τεχνολογικούς λόγους. Η βιταμίνη A (ρετινόλη) και τα καροτενοειδή είναι υπεύθυνα για το κίτρινο-πορτοκαλί χρώμα των προϊόντων που περιέχουν λίπος από αγελαδινό γάλα. Η βιταμίνη E (τοκοφερόλες) είναι

ένα ισχυρό αντιοξειδωτικό. Η βιταμίνη C (ασκορβικό οξύ) είναι αντιοξειδωτική και η βιταμίνη B12 (ριβοφλαβίνη), η οποία είναι πρασινωπή-κίτρινη, είναι υπεύθυνη για το χρώμα του ορού γάλακτος, συν-κρυσταλλώνεται με τη λακτόζη και είναι υπεύθυνη για το κιτρινωπό του χρώμα, το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί με ανά-κρυστάλλωση ή λευκαίνεται με οξείδωση (Goulding et al., 2019).

1.2 Φυσικές και Φυσικοχημικές ιδιότητες γάλακτος

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του γάλακτος περιλαμβάνουν το pH, την αγωγιμότητα, το ειδικό βάρος, το ποσοστό της τέφρας και του νερού στο γάλα, τα ποσοστά των ολικών στερεών, το ιξώδες καθώς και οπτικά χαρακτηριστικά όπως, ο δείκτης διάθλασης (Mohammed et al., 2022).

Το χρώμα του γάλακτος είναι ένα λευκό ή κιτρινόλευκο, αδιαφανές υγρό, το οποίο επηρεάζεται από τη σκέδαση και την απορρόφηση του φωτός από τα λιποσφαίρια και τα μικύλια της πρωτεΐνης. Έτσι, το αποβουτυρωμένο γάλα διατηρεί το λευκό του χρώμα. Το υποκίτρινο χρώμα ή αλλιώς κιτρινοπράσινο, προέρχεται από το καροτένιο, το οποίο προσλαμβάνεται κυρίως κατά τη βοσκή των ζώων και βρίσκεται στη λιπαρή φάση και από τη ριβοφλαβίνη η οποία βρίσκεται στην υδατινή φάση (Belitz et al., 2018). Στον Πίνακα 1.3 φαίνονται οι τιμές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του κατσικίσιου και του αγελαδινού γάλακτος. Οι πληροφορίες για τη σύσταση και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του γάλακτος είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των γαλακτοβιομηχανιών, καθώς και των γαλακτοκομικών προϊόντων διότι επηρεάζουν όλες τις βιομηχανικές διεργασίες όπως, η ανάμιξη και ομογενοποίηση, η ροή του υγρού, αποστείρωση, τη κατάψυξη και τον προσδιορισμό της ποιότητας των προϊόντων (Mohammed et al., 2022; Park et al., 2007).

Πίνακας 1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες κατσικίσιου και αγελαδινού γάλακτος

Ιδιότητες	Κατσικίσιο	Αγελαδινό
Πυκνότητα	1,029 - 1,039	1,023 – 1,040
Ιξώδες (Cp)	2,12	2,0
Σημείο πήξεως (-°C)	0,540 - 0,573	0,530 – 0,570
Οξύτητα (γαλακτικό οξύ %)	0,14 - 0,23	0,15 – 0,18
pH	6,50 - 6,80	6,65 – 6,71
Διάμετρος λιποσφαιρίων (μm)	3,49	4,55
Διάμετρος μικκελών καζεΐνης (nm)	260,0	180,0

Πηγή: (Park et al., 2007; Κεχαγιάς & Τσάκαλη, 2017)

Ο Κώδικας Τροφίμων και Ποτών επισημαίνει τα κατώτατα και ανώτατα όρια των φυσικών και χημικών σταθερών, όπως φαίνονται στην Εικόνα 1.3.

Προέλευση	Ειδικό Βάρος σε 15°C	Λίπος % (ελάχιστ.)	Σ. Υ. Α. Λ.* % (ελάχιστ.)
Αγελάδας ⁽¹⁵⁾	1,028 g/l (20%) ^{*(1)}	3,5	8,5 ^{*(2)}
Κατσίκας	1,032	4,0	9,00
Προβάτου	1,035	6,0	10,20
Βουβάλου	1,033	6,0	9,70

^{*(1)} ή το ισοδύναμο ανά λίτρο προκειμένου για γάλα διαφορετικής περιεκτικότητας σε λιπαρή ουσία.⁽¹⁴⁾

^{*(2)} ή ισοδύναμη συγκέντρωση προκειμένου για γάλα διαφορετικής περιεκτικότητας σε λιπαρή ουσία.⁽¹⁴⁾

Εικόνα 1.3 Κατώτατα και ανώτατα όρια φυσικών και χημικών σταθερών γάλακτος
Πηγή: (Κώδικας Τροφίμων και Ποτών, 2016)

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των σφαιριδίων του λίπους του γάλακτος, επηρεάζουν την πεπτικότητα των λιπιδίων τους. Τα λιπίδια του κατσικίσιου γάλακτος χωνεύονται πιο εύκολα και πιο γρήγορα σε σύγκριση με του αγελαδινού γάλακτος, το οποίο έχει μεγαλύτερα λιποσφαίρια και υψηλότερες συγκεντρώσεις λιπαρών οξέων μεσαίων και μικρών αλύσων. Συγκεκριμένα, τα μικρά σφαιρίδια λίπους αφομοιώνονται πιο αποτελεσματικά από τα μεγάλα λιποσφαίρια και οποιαδήποτε επεξεργασία που αλλάζει τη μακροδομή και τη διεπιφανειακή σύνθεση των λιποσφαιριδίων, μπορεί να επηρεάσει την πέψη των λιπιδίων (Zhang et al., 2022).

1.3 Επίδραση της επεξεργασίας στο γάλα

Το γάλα προκειμένου να είναι σταθερό και μικροβιολογικά ασφαλές τρόφιμο ομογενοποιείται και υφίσταται θερμική επεξεργασία. Η ομογενοποίηση μειώνει το μέγεθος των σφαιριδίων του λίπους του γάλακτος και αυξάνει την επιφάνεια τους. Καθώς το γάλα υποβάλλεται σε ομογενοποίηση τα μικκύλια της καζεΐνης καθώς και η πρωτεΐνες του ορού γάλακτος κολλάνε στην επιφάνεια των διαταραγμένων σφαιριδίων του λίπους αποκαθιστώντας τις σπασμένες περιοχές της μεμβράνης των λιποσφαιριδίων (D'Incecco & Pellegrino, 2018).

Η επεξεργασία των γαλακτοκομικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένης της ομογενοποίησης και της παστερίωσης, καθώς και της επεξεργασίας σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλάζει σημαντικά τη σύσταση και στις διεπιφανειακές ιδιότητες των σφαιριδίων λίπους του γάλακτος. Το προφίλ των λιπαρών οξέων δεν επηρεάζεται από την παστερίωση, την ομογενοποίηση ή την ξήρανση με ψεκασμό. Ωστόσο, επηρεάζονται οι αναλογίες των φωσφολιπιδίων και της χοληστερόλης. Επιπλέον, η

ομογενοποίηση, εκτός από τη μείωση του μεγέθους των λιποσφαιριδίων, οδηγεί στο σχηματισμό ενός νέου στρώματος διεπαφής όπου επισυνάπτονται οι πρωτεΐνες του γάλακτος στην επιφάνεια των λιποσφαιριδίων. Η θερμική επεξεργασία έχει ως αποτέλεσμα την αλληλεπίδραση μεταξύ της μεμβράνης του λίπους και των μετουσιωμένων πρωτεϊνών του γάλακτος. Αυτές οι αλλαγές στις διεπιφανειακές ιδιότητες των σφαιριδίων του γάλακτος επηρεάζουν την πέψη του λίπους του γάλακτος. Έτσι, η ομογενοποίηση αυξάνει τον ρυθμό πέψης των λιποσφαιριδίων του γάλακτος, ενώ η επεξεργασία μικρού χρόνου-υψηλής θερμοκρασίας (HTST) μειώνει τον ρυθμό πέψης. Είναι γνωστό πως τα λιποσφαιρίδια λίπους του κατσικίσιου γάλακτος χωνεύονται πιο εύκολα σε σύγκριση με τα λιποσφαιρίδια του αγελαδινού γάλακτος, λόγω του μικρότερου μεγέθους των σωματιδίων αυτών στο κατσικίσιο γάλα (L. Zhao et al., 2022). Επίσης, έχει αναφερθεί ότι το κατσικίσιο γάλα έχει μικρότερη θερμική σταθερότητα σε σύγκριση με το αγελαδινό, παρουσιάζει χαμηλότερο ποσοστό καθίζησης και μικρότερο μέγεθος μικκυλίων (Qin et al., 2021).

Η λυοφιλίωση, η οποία επιτυγχάνεται με εξάχνωση, διατηρεί τα ευαίσθητα στη θερμότητα συστατικά και παρουσιάζει πλεονεκτήματα στη διατήρηση της γεύσης του γάλακτος και στις βιοδραστικότητες του, παρότι είναι μια χρονοβόρα και ακριβή μέθοδος. Έρευνες έχουν δείξει πως το αγελαδινό γάλα που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με λυοφιλίωση είχε σχετικά υψηλότερα επίπεδα φωσφατιδυλοχολίνης (PC), αλλά χαμηλότερες συγκεντρώσεις ελεύθερων λιπαρών οξέων βραχείας αλυσίδας, διαπιστώνοντας έτσι ότι οι μεμβράνες των λιποσφαιριδίων του γάλακτος έχουν ακανόνιστο σχήμα, είναι σαν νιφάδες, ημιδιαφανή φύλλα με αιχμηρές άκρες (Zhang et al., 2022).

1.4 Συσκευασία γάλακτος

Η συσκευασία εξυπηρετεί διάφορες λειτουργίες όπως η μεταφορά, η επικοινωνία μέσω της ετικέτας, με σημαντικότερη όμως λειτουργία την προστασία του προϊόντος. Η συσκευασία προστατεύει το γάλα από περιβαλλοντικούς, φυσικούς, μηχανικούς και χημικούς κινδύνους. Επίσης, προστατεύει το προϊόν από την απώλεια επιθυμητών αρωματικών ενώσεων ή συλλογή ανεπιθύμητων οσμών. Το γάλα είναι ένα σύνθετο μίγμα νερού, πρωτεϊνών, λιπιδίων, υδρογονανθράκων, ενζύμων, βιταμινών και ιχνοστοιχείων. Η υποβάθμιση της ποιότητας του μπορεί να σχετιστεί με την επίδραση του φωτός και του οξυγόνου, προκαλώντας οξειδωση του λίπους του γάλακτος, επίσης από την δραστηριότητα των βακτηρίων και των ενζύμων, που έχει

επίδραση στη γεύση του προϊόντος και συλλογή πτητικών ενώσεων σε οποιοδήποτε στάδιο της επεξεργασίας ή αλληλεπίδρασης με το υλικό συσκευασίας με αποτέλεσμα την αλλοίωση της γεύσης του προϊόντος. Ακόμα, η ασφάλεια του προϊόντος μπορεί να επηρεαστεί είτε από την ατελή καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, που μεταφέρονται στο γάλα μέσω του ζώου, είτε από διαστραυρούμενη μόλυνση με ένα συγκεκριμένο παθογόνο σε οποιοδήποτε στάδιο, μετά τη συλλογή. Έτσι, η συσκευασία, ως αναπόσπαστο μέρος των εργασιών επεξεργασίας, μπορεί να προσφέρει αποτελεσματική προστασία στο προϊόν από τέτοιους κινδύνους.

Τα γαλακτοκομικά προϊόντα ποικίλλουν σημαντικά ως προς τη σύνθεση τους, την θερμική επεξεργασία και τα υλικά συσκευασίας. Για την επιλογή ενός συγκεκριμένου υλικού συσκευασίας για το γάλα, λαμβάνονται υπόψιν: α) οι ιδιότητες του προϊόντος, συμπεριλαμβανομένων και των μηχανισμών αλλοίωσης, β) η επιθυμητή διάρκεια ζωής, γ) ο κίνδυνος μεταφοράς και δ) ειδικές ιδιότητες των διαθέσιμων υλικών και μηχανημάτων συσκευασίας. Τα σύγχρονα υλικά συσκευασίας για το γάλα περιλαμβάνουν το γυαλί, πλαστικό και χαρτί (Kontominas, 2010).

Στην έρευνα τους οι Cadwallader et al. (2023) μελέτησαν το ρόλο της συσκευασίας στη γεύση του γάλακτος. Στα πλήρη και ελαφριά γάλατα που η συσκευασία τους ήταν χάρτινη ή γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LLDPE, linear low-density polyethylene) είχαν λιγότερη γλυκιά αρωματική γεύση κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, σε σύγκριση με τα γάλατα που οι περιέκτες τους ήταν γυαλί, PET, HDPE ή LDPE.



Εικόνα 1.4 Συσκευασία γάλακτος σε διαφορετικούς περιέκτες

1.5 Αναλυτικές μέθοδοι για την ανάλυση γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων

Προηγμένες Αναλυτικές Τεχνικές

1.5.1 Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC)

Η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης, HPLC (High-performance liquid chromatography), θεωρείται χρήσιμο εργαλείο για την εκτέλεση πολλών μετρήσεων στο γάλα και τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση των συστατικών τους και για τα επίπεδα πρόσθετης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά (Kamal & Karoui, 2015).

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της HPLC στο γάλα είναι η ανάλυση των πρωτεϊνών. Συγκεκριμένα, η υγρή χρωματογραφία HPLC αντίστροφης φάσης (RP-HPLC) χρησιμοποιείται ευρέως για τον διαχωρισμό και την ποσοτικοποίηση των πρωτεϊνών του ορού γάλακτος, όπως η β-λακτοσφαιρίνη και η α-λακταλβουμίνη, καθώς και των καζεϊνών (Bramanti et al., 2003). Η μέθοδος αυτή προσφέρει υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια, καθιστώντας την κατάλληλη για τον εντοπισμό και τον έλεγχο της νοθείας στο γάλα, ειδικά όταν πρόκειται για την ανίχνευση προσμίξεων από άλλα είδη γάλακτος (Ferreira & Caçote, 2003).

Η HPLC συνδυάζεται με άλλες τεχνικές, όπως η φασματομετρία μάζας (MS), για την ποσοτική ανάλυση των λιπαρών οξέων και την ταυτοποίηση συγκεκριμένων λιπαρών οξέων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες για τον έλεγχο της αυθεντικότητας και της ποιότητας του γάλακτος (Roopia et al., 2017). Η χρήση της HPLC επιτρέπει την ανίχνευση ακόμη και μικρών διαφορών στην περιεκτικότητα σε λιπαρά οξέα, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία (Mafra et al., 2007).

Επιπλέον, η HPLC έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης της γεωγραφικής προέλευσης και της διατροφής των αγελάδων στη σύσταση των λιπαρών οξέων του γάλακτος. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων μπορούν να βοηθήσουν στην πιστοποίηση του γάλακτος ως βιολογικό ή συμβατικό, καθώς και στην ταυτοποίηση του τόπου προέλευσης του προϊόντος (Zachar et al., 2011).

1.5.2 Φασματομετρία Μάζας (MS)

Η φασματομετρία μάζας βασίζεται στον ιοντισμό των μορίων του δείγματος και στον διαχωρισμό των ιόντων με βάση τον λόγο της μάζας προς το φορτίο τους (m/z). Τα ιόντα που ανιχνεύονται, παρουσιάζονται ως φάσμα μάζας που αντιπροσωπεύει τα διαφορετικά συστατικά του δείγματος (Marshall & Hendrickson, 2008).

Η MS χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση πρωτεϊνών και πεπτιδίων στο γάλα, συμπεριλαμβανομένων των κύριων πρωτεϊνών ορού και καζεΐνης. Σε συνδυασμό με τεχνικές όπως η Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC-MS) ή η Αέρια Χρωματογραφία (GC-MS), η MS επιτρέπει τον διαχωρισμό και την ανάλυση των πρωτεϊνών, λιπαρών οξέων, σακχάρων και άλλων σημαντικών συστατικών του γάλακτος. Για παράδειγμα, η χρήση της HPLC-MS έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για τον προσδιορισμό των πρωτεϊνών του γάλακτος, ενώ η GC-MS χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση των αρωματικών ενώσεων και των πτητικών συστατικών που επηρεάζουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του γάλακτος (Li et al., 2023).

Η MS είναι κρίσιμη για την ανίχνευση της νοθείας στο γάλα, όπως η προσθήκη αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο ή πρόβειο γάλα, μέσω της ταυτοποίησης χαρακτηριστικών πρωτεϊνών ή πεπτιδίων που είναι ειδικά για κάθε είδος. Για παράδειγμα, η τεχνική MALDI-MS (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Mass Spectrometry) έχει αναπτυχθεί για την ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών πεπτιδίων της καζεΐνης, προσφέροντας μια ταχεία και ακριβή μέθοδο για την ανίχνευση προσμίξεων (Nicolau et al., 2011; Tehrani et al., 2024).

Η MS χρησιμοποιείται επίσης για την ανάλυση της συνολικής σύστασης του γάλακτος, διευκολύνοντας την καταγραφή του πλήρους διατροφικού προφίλ του προϊόντος. Αυτή η τεχνική είναι ζωτικής σημασίας για την ταυτοποίηση αλλεργιογόνων πρωτεϊνών και την διασφάλιση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ασφάλειας τροφίμων (Piras et al., 2021; Tehrani et al., 2024).

1.5.3 Φασματοσκοπία Υπερύθρου (IR)

Η φασματοσκοπία υπερύθρου χρησιμοποιείται ευρέως ως τεχνική στις γαλακτοβιομηχανίες, για τον έλεγχο των πρώτων υλών, των διεργασιών και την ανάλυση του τελικού προϊόντος ώστε να τηρούνται οι προδιαγραφές. Η φασματοσκοπία υπερύθρου εφαρμόζεται για την ανάλυση πολλών κατηγοριών τροφίμων με χρήση των τεχνικών της φασματοσκοπίας στο εγγύς υπέρυθρο (NIR, 800 έως 2.500 nm) και το μέσο υπέρυθρο (MIR, 2.500 έως 25.000 nm) (De Marchi et al., 2018). Η φασματοσκοπία μέσου υπερύθρου μέσω της αποτίμησης των φασμάτων υπερύθρου, τα οποία προέρχονται από την απορρόφηση ακτινοβολίας από τις χημικές ουσίες του τροφίμου, επιτυγχάνει τον προσδιορισμό του προφίλ των συστατικών τροφίμων, την αξιολόγηση των μεταβολών τους κατά την επεξεργασία των τροφίμων, τη διάκριση ειδών τροφίμων, τον έλεγχο της διατηρησιμότητας των τροφίμων, της αυθεντικότητας, της προέλευσης, της ύπαρξης νοθείας, κλπ. Επίσης από την αποτίμηση των απορροφήσεων στην περιοχή του δακτυλικού αποτυπώματος ($1500\text{-}500\text{ cm}^{-1}$) μπορεί πιθανόν να επιτευχθεί χαρακτηρισμός συγκεκριμένων κατηγοριών τροφίμων με εφαρμογές και στην περίπτωση του γάλακτος και των γαλακτοκομικών προϊόντων (Anjos, 2020).

Επειδή η σύσταση των φυσικών προϊόντων τροφίμων ποικίλει, ανάλογα με πολλούς παράγοντες (ποικιλία/είδος, γεωγραφική προέλευση, καλλιέργεια/εκτροφή, κλπ.), έχουν δημιουργηθεί βιβλιοθήκες αναμενόμενων απορροφήσεων ανάλογα με τα συστατικά των τροφίμων, την προέλευσή τους ή/και την πιθανή επεξεργασία τους (Karoui & De Baerdemaeker, 2007).

Η υπέρυθρη φασματοσκοπία έχει το πλεονέκτημα ότι είναι μη καταστρεπτική μέθοδος και είναι κατάλληλη για χρήση σε ερευνητικό εργαστήριο και σε βιομηχανικό περιβάλλον (Anjos, 2020). Επίσης, δεν χρειάζεται προ-επεξεργασία του δείγματος και είναι μια γρήγορη μέθοδος (Zhao et al., 2022). Ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση ή η ανίχνευση ενός συγκεκριμένου συστατικού, η φασματοσκοπικές τεχνικές προσφέρουν τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ των μελετούμενων δειγμάτων, μέσω του εντοπισμού ιδιαίτερων φασματικών διαφορών (De Marchi et al., 2018).

Αρκετές μελέτες παγκοσμίως έχουν αποδείξει ότι ο συνδυασμός της NIR φασματοσκοπίας με τη χημειομετρία μπορεί να επιτύχει αξιόπιστες, ακριβείς και αποτελεσματικές πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα των προϊόντων στις

βιομηχανίες τροφίμων. Σε διάφορες μελέτες έχουν αναπτυχθεί ποσοτικά και ποιοτικά μοντέλα, βασισμένα στην NIR φασματοσκοπία, για την ανίχνευση νοθείας στο γάλα και τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Για το κατσικίσιο γάλα και τα παράγωγα του, υπάρχουν μελέτες, που χρησιμοποιούν τη φασματοσκοπία NIR για να ανιχνεύσουν τη νοθεία του με αγελαδινό γάλα (Zhao et al., 2022).

Η φασματοσκοπία MIR είναι η πλέον προτιμότερη μέθοδος ανάλυσης γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σχεδόν κάθε χημική ουσία, εκτός από μερικά άλατα και πολύ απλές χημικές ενώσεις, έχει χαρακτηριστικές απορροφήσεις στο φάσμα. Ουσίες που απαντώνται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιοριστούν, λόγω του επίπεδου του θορύβου της μεθόδου (Karoui & De Baerdemaeker, 2007).

1.5.4 Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Η φασματοσκοπία NMR (Nuclear Magnetic Resonance) είναι μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στα γαλακτοκομικά προϊόντα, καθώς παρέχει μοναδικές πληροφορίες που μπορούν να εφαρμοστούν στην έρευνα ή στον ποιοτικό έλεγχο των γαλακτοκομικών προϊόντων. Κύρια χαρακτηριστικά της φασματοσκοπίας NMR είναι, πως είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος, παρέχει αρκετά δεδομένα για το ίδιο δείγμα μέσω διαφορετικών αναλύσεων, έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει διαφορετικούς πυρήνες και διαθέτει μεγάλη ευαισθησία. Τα λιπίδια του γάλακτος μπορούν να αναλυθούν είτε από φάσματα ^1H , είτε από φάσματα ^{13}C το οποίο παρέχει, λόγω χαμηλό σήμα θορύβου, καλύτερη ανάλυση (Belloque & Ramos, 1999). Για τη μελέτη του γάλακτος έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι πειραμάτων NMR. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν την ανάλυση της περιεκτικότητας σε λίπος του γάλακτος, χαρακτηρισμό δομικών αλλαγών στις καζεΐνες, για τα μικκύλια της καζεΐνης και για τις πρωτεΐνες του ορού γάλακτος (Sundekilde et al., 2013).

Στην ανάλυση του γάλακτος, η NMR χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση των λιπιδίων, των πρωτεϊνών και των μεταβολιτών, διευκολύνοντας τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών ειδών γάλακτος, όπως αγελαδινό και κατσικίσιο (Q. Li et al., 2017). Η NMR έχει χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση των χαρακτηριστικών υπογραφών του γάλακτος που σχετίζονται με τη γεωγραφική προέλευση και την αυθεντικότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων. Με τη χρήση NMR φασματοσκοπίας,

έχουν αναγνωρισθεί ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες ταυτότητας του γάλακτος, προσφέροντας αξιόπιστες πληροφορίες για τη διατροφική αξία και την προέλευση του προϊόντος (Balthazar et al., 2021).

Μια από τις κύριες εφαρμογές της NMR είναι η ανίχνευση νοθείας. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό προσμίξεων, όπως η προσθήκη αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο ή η νοθεία με χαμηλότερης ποιότητας γάλα, μέσω της ταυτοποίησης χαρακτηριστικών ενώσεων που είναι ειδικές για κάθε τύπο γάλακτος (Q. Li et al., 2017). Η NMR φασματοσκοπία έχει κερδίσει την προσοχή στην επιστήμη των γαλακτοκομικών προϊόντων λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της, όπως την ελάχιστη προετοιμασία δειγμάτων, τη μη καταστρεπτική εφαρμογή της, είναι ταχεία μέθοδος και τη δυνατότητα εξέτασης πολλών στοιχείων του δείγματος ταυτόχρονα (Hu et al., 2007; Rysova et al., 2021). Μειονεκτήματα της NMR φασματοσκοπίας είναι είναι το υψηλό της κόστος, η ευαισθησία της μεθόδου και οι απαιτήσεις για το μέγεθος του δείγματος (Belloque & Ramos, 1999; Sundekilde et al., 2013; Wishart, 2008).

1.6 Ανασκόπηση μελετών σε γάλατα

Πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην ανάλυση της χημικής σύστασης του γάλακτος, εξετάζοντας τα βασικά θρεπτικά συστατικά όπως οι πρωτεΐνες, τα λιπαρά οξέα, οι υδατάνθρακες και οι βιταμίνες. Η αναγνώριση και ποσοτικοποίηση αυτών των συστατικών παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη θρεπτική αξία του γάλακτος και την ποιότητά του. Για παράδειγμα, η μελέτη από τους Villar-Hernández et al. (2023) χρησιμοποίησε τεχνικές φασματοσκοπίας για την ανάλυση του κατσικίσιου γάλακτος και τη διαφοροποίηση της χημικής σύστασης ανάλογα με τη φυλή των ζώων και τις συνθήκες παραγωγής. Η χημική ανάλυση του γάλακτος είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της θρεπτικής του αξίας και της ποιότητας. Οι μέθοδοι όπως η φασματοσκοπία Raman και η φασματομετρία μάζας (MS) έχουν εφαρμοστεί εκτενώς στην ποσοτικοποίηση των βασικών συστατικών του γάλακτος, όπως τα λιπαρά οξέα, οι πρωτεΐνες και τα υδατάνθρακες. Η μελέτη των Li et al. (2022) χρησιμοποίησε τη φασματοσκοπία Raman για την ανάλυση της παρουσίας αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο, καταδεικνύοντας τη χρησιμότητα της μεθόδου αυτής στην ανίχνευση νοθείας και στην αξιολόγηση της αυθεντικότητας του προϊόντος. Μελέτες έχουν γίνει επίσης για την περιεκτικότητα του αγελαδινού, του πρόβειου και του κατσικίσιου γάλακτος σε μέταλλα, χρησιμοποιώντας φασματομετρία ατομικής απορρόφησης, με

την τεχνική της φλόγας, προσδιορίζοντας υψηλότερα επίπεδα Ca και Mg στο κατσικίσιο γάλα (Korac et al., 2023).

Άλλη μελέτη συγκρίνει τις δομικές μεταβολές στο αποβουτυρωμένο γάλα αγελάδας, κασίικας και προβάτου κατά τη διάρκεια της γαστρικής πέψης, παρέχοντας πληροφορίες για τη δυναμική της πέψης και τις πιθανές διατροφικές επιπτώσεις της (Roy et al., 2021). Η μελέτη των Stergiadis et al. (2019) συνέκρινε το θρεπτικό προφίλ του αγελαδινού και κατσικίσιου γάλακτος λιανικής πώλησης, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα του κατσικίσιου γάλακτος, ως προς την υψηλότερη περιεκτικότητά του σε πολυακόρεστα λιπαρά και μέταλλα υψηλής διατροφικής αξίας, συστατικά που επηρεάζονται και από την γαλακτική περίοδο και τις πρακτικές εκτροφής.

Η φασματοσκοπία υπερύθρου FTIR (Fourier Transform Infrared) έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τη ανάλυση διάκρισης αγελαδινού και κατσικίσιου γάλακτος. Σε μια πρόσφατη μελέτη, η Windarsih et al. (2020) έδειξαν ότι η τεχνική αυτή μπορεί να προσφέρει γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα, επιτρέποντας την ποσοτικοποίηση των λιπαρών οξέων και τη διαφοροποίηση της σύστασης μεταξύ των δύο τύπων γάλακτος. Πολλοί συγγραφείς διερεύνησαν την ικανότητα του μέσου υπερύθρου (MIR) να προσδιορίσει τη γεωγραφική προέλευση διάφορων γαλακτοκομικών προϊόντων. Οι αναλύσεις τους επικεντρώθηκαν στην αποτίμηση φασμάτων υπερύθρου περιοχής σάρωσης από 4000 έως 900 cm^{-1} . Εντός αυτού του φάσματος μελετήθηκαν τρεις φασματικές περιοχές (3000-2800, 1700-1500 και 1500-900 cm^{-1}), οι οποίες δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για διάφορες ενώσεις /χαρακτηριστικές ομάδες (Karoui & De Baerdemaeker, 2007). Οι μελέτες επίσης ασχολούνται με την ανάλυση της επίδρασης των συνθηκών εκτροφής και σίτισης των ζώων στην ποιότητα του γάλακτος. Για παράδειγμα, η ανάλυση του FTIR στις μελέτες του Dadousis et al. (2021) έδειξε ότι η σύσταση του γάλακτος επηρεάζεται από τις διατροφικές συνήθειες των ζώων, την περίοδο γαλακτοπαραγωγής και τη φυλή. Αυτό οδηγεί στη δυνατότητα βελτίωσης των συνθηκών παραγωγής με στόχο την αύξηση της απόδοσης και της ποιότητας του γάλακτος.

Ένα σημαντικό κομμάτι των ερευνών επικεντρώνεται στην ανίχνευση προσμίξεων στο γάλα, κυρίως μέσω προηγμένων φασματοσκοπικών τεχνικών και χημειομετρικών εργαλείων. Οι μελέτες αυτές στοχεύουν στην ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της προσθήκης άλλων ειδών γάλακτος, όπως του αγελαδινού σε κατσικίσιο ή πρόβειο γάλα, σε περιπτώσεις ελέγχου νοθείας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Yulyana et al. (2024), που χρησιμοποίησε τη

μέθοδο FTIR σε συνδυασμό με χημειομετρικά μοντέλα για την ανίχνευση και ταυτοποίηση νοθείας μέσω της προσθήκης αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο. Επίσης, όσον αφορά την ανίχνευση της προσθήκης αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο, οι Liu et al. (2019) χρησιμοποίησαν ένα καινοτόμο σύστημα ανοσοανάλυσης με λωρίδες, επιτρέποντας την ταχεία και ακριβή διάκριση των δύο τύπων γάλακτος. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση πρωτεϊνών, στην εκτίμηση των διαφοροποιήσεων μεταξύ ειδών γάλακτος και στον προσδιορισμό του χαρακτηριστικότερου προφίλ πρωτεϊνών ανά κατηγορία γάλακτος. Η μέθοδος έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική σε βιομηχανικές εφαρμογές. Μια άλλη σημαντική μελέτη από τους Demiasi et al. (2023) χρησιμοποίησε συνδυασμό ηλεκτροχημικών μεθόδων και χημειομετρικών μοντέλων για την ανίχνευση προσμίξεων στο γάλα, συγκεκριμένα για τη διάκριση αγελαδινού και κατσικίσιου γάλακτος, επιτρέποντας την ανίχνευση και την πρόβλεψη νοθείας κατσικίσιου γάλακτος με αγελαδινό γάλα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ταχεία ανίχνευση νοθείας με υψηλή ακρίβεια, ακόμη και όταν οι προσμίξεις είναι σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.

Η χρήση της φασματοσκοπίας NMR σε συνδυασμό με τη χημειομετρία έχει επίσης αναδειχθεί ως μία από τις πλέον ακριβείς μεθόδους για την ανίχνευση της νοθείας στο γάλα. Η μελέτη των Balthazar et al. (2021) έδειξε ότι η φασματοσκοπία NMR μπορεί να διακρίνει με ακρίβεια διαφορές μεταξύ νοθευμένου και μη γάλακτος, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων. Η πρωτεομική έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των μεταβολών στις πρωτεΐνες κατά την επεξεργασία του γάλακτος, με έμφαση τη θερμική. Για παράδειγμα, έχει μελετηθεί η αντίδραση Maillard που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας του γάλακτος και επηρεάζει την πεπτικότητα των πρωτεϊνών και τη θρεπτική αξία τους (Scaloni et al., 2002). Η ανάλυση με πρωτεομική τεχνική αποκάλυψε αλλαγές στις πρωτεΐνες του γάλακτος μετά από επεξεργασία UHT, όπως η λακτοσυλίωση της β-λακτογλοβουλίνης, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 70% του περιεχομένου σε προϊόντα γάλακτος σε σκόνη (Monaci & Van Hengel, 2007). Επιπλέον, η πρωτεομική έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας και αποθήκευσης γαλακτοκομικών προϊόντων. Για παράδειγμα, η ανάλυση πρωτεϊνών μέσω φασματομετρίας μάζας βοήθησε στον εντοπισμό πρωτεϊνών που είναι ευαίσθητες στις αλλαγές θερμοκρασίας, επιτρέποντας την καλύτερη διαχείριση των θερμικών επεξεργασιών (Arena et al., 2010).

Στο βιβλίο τους οι Martinho et al. (2018) αναφέρουν πως ο ευκολότερος και ταχύτερος τρόπος για την ανάλυση του πρωτεόματος του γάλακτος είναι η δισδιάστατη (2D) ηλεκτροφόρηση. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα μελέτης των μοριακών δομών των πρωτεϊνών με στόχο την ταυτοποίησή τους (MALDI-TOF MS). Επίσης, αναφέρουν πως η τεχνική LC-MS/MS είναι ικανή για την ανάλυση των πρωτεϊνών του γάλακτος, παρά την έλλειψη πληροφοριών σχετικά με τις διαφορές των πρωτεομορφών. Οι Di Girolamo et al. (2014) χρησιμοποίησαν MALDI-TOF MS για την ανίχνευση νοθείας σε γάλα γαϊδούρας και κατσίκας. Η μέθοδος αυτή επέτρεψε την ταυτοποίηση μοναδικών πεπτιδίων που σχετίζονται με την αυθεντικότητα του προϊόντος, αποδεικνύοντας ότι η πρωτεομική προσέγγιση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην ανίχνευση νοθείας και διαφοροποιήσεων στη σύσταση των γαλακτοκομικών προϊόντων.

Η χρήση της υγρής χρωματογραφίας σε συνδυασμό με τη φασματομετρία μάζας (LC-MS) έχει γίνει όλο και πιο γνωστή για την ανάλυση του γάλακτος και της αυθεντικότητας του (Imperiale et al., 2023). Οι George et al. (2018) και Y. Li et al (2018) έκαναν ανασκόπηση για τη λιποδομική του γάλακτος, οι Contarini & Povololo (2013) ανέφεραν για τα φωσφολιπίδια του λίπους του γάλακτος, χρησιμοποιώντας LC-MS. Άλλες ανασκοπήσεις επικεντρώνονται στην πρωτεομική του γάλακτος (Gagriaire et al., 2009), στη μεταβολομική του γάλακτος (Sen et al., 2021) καθώς και στην ανάλυση των βιταμινών του γάλακτος, όπως τη βιταμίνη D και τη βιταμίνη E (Kasalová et al., 2015; Lima et al., 2014), με χρήση LC-MS.

Η μελέτη των Bouroutzika et al. (2022) παρουσιάζει μια εκτενή ανάλυση της εφαρμογής πρωτεομικών μεθόδων στο γάλα ζώων εκτροφής όπως αγελάδες, κατσίκες και πρόβατα. Εξετάζει, επίσης, τη σημασία των βιοδραστικών πεπτιδίων και των λιποπρωτεϊνών της μεμβράνης των λιποσφαιρίων του γάλακτος (MFGM) σε διάφορα είδη γάλακτος, αναδεικνύοντας τον ρόλο τους στη βελτίωση της ποιότητας των γαλακτοκομικών προϊόντων. Χρησιμοποίησε πρωτεομικές μεθόδους για την ανάλυση του γάλακτος από διάφορα ζώα, όπως αγελάδες, κατσίκες και πρόβατα. Μέσω της φασματομετρίας μάζας (MS) εντοπίστηκαν βιοδραστικά πεπτίδια και πρωτεΐνες που παίζουν σημαντικό ρόλο στη θρεπτική αξία και την ποιότητα του γάλακτος. Τα ευρήματά τους περιλάμβαναν επίσης την ανίχνευση μετα-μεταφραστικών τροποποιήσεων που σχετίζονται με τη θερμική επεξεργασία του γάλακτος.

Στη μελέτη τους οι MkaDEM et al. (2023) συνέκριναν τις φυσικοχημικές ιδιότητες, τα λιπαρά οξέα, τις φαινολικές ενώσεις και τη μικροχλωρίδα του ζυμωμένου

αγελαδινού και κατσικίσιου γάλακτος σε διαφορετικούς περιέκτες, δείχνοντας σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο τύπων γάλακτος.

Οι Korma et al. (2022) συνέκριναν το λίπος του γάλακτος από δύο κινεζικές φυλές κατσίκας, αποκαλύπτοντας διαφορές στα λιπαρά οξέα, τις τριακυλογλυκερόλες, τη θερμική συμπεριφορά και τα υπέρυθρα φάσματα αυτών, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές όπως GC, UPCC-Q-TOF-MS, DSC και FT-IR.

Στον Πίνακα 1.4 είναι συγκεντρωμένες οι μελέτες που έχουν γίνει στα γάλατα με βάση τη μέθοδο ανάλυσης, τις κύριες χρήσεις της καθώς και τα ευρήματα των ερευνών αυτών.

Πίνακας 1.4α Ανασκόπηση μελετών που έχουν γίνει στο γάλα

Μελέτη	Μέθοδος	Στόχος	Ευρήματα
Villar-Hernández et al., 2023	Φασματοσκοπία	Διαφοροποίηση της χημικής σύστασης του κατσικίσιου γάλακτος ανά φυλή	Το κατσικίσιο γάλα από διαφορετικές φυλές είχε ποικίλες συγκεντρώσεις πρωτεϊνών και λιπαρών.
W. Li et al., 2022	Φασματοσκοπία Raman	Ανάλυση αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο	Εντόπισε και ποσοτικοποίησε αγελαδινό γάλα στο κατσικίσιο με υψηλή ακρίβεια.
Korac et al., 2023	Φασματομετρία ατομικής απορρόφησης	Ανάλυση περιεκτικότητας σε μέταλλα	Το κατσικίσιο γάλα είχε υψηλότερα επίπεδα Ca και Mg σε σχέση με το αγελαδινό και το πρόβειο.
Roy et al., 2021	Δομικές αλλαγές κατά τη γαστρική πέψη	Σύγκριση αποβουτυρωμένου γάλακτος από διαφορετικά είδη	Το κατσικίσιο γάλα είχε ταχύτερη πέψη σε σύγκριση με το αγελαδινό, πιθανόν λόγω της δομής των πρωτεϊνών του.
Stergiadis et al., 2019	Διατροφικό προφίλ	Σύγκριση θρεπτικών προφίλ	Το κατσικίσιο γάλα παρουσίασε υψηλότερα πολυακόρεστα λιπαρά και μέταλλα.
Windarsih et al., 2020	Φασματοσκοπία FTIR	Ποσοτικοποίηση λιπαρών οξέων	Η FTIR ανέδειξε διαφορές στα λιπαρά οξέα μεταξύ των δύο τύπων γάλακτος, με υψηλότερες τιμές στο κατσικίσιο γάλα.
Karoui & De Baerdemaeker, 2007	MIR	Προσδιορισμός γεωγραφικής προέλευσης γάλακτος	Τα FTIR και MIR έδειξαν ότι η γεωγραφική προέλευση επηρεάζει τη χημική σύσταση του γάλακτος.
Dadousis et al., 2021	Φασματοσκοπία FTIR	Επίδραση διατροφής και εκτροφής	Η διατροφή και η περίοδος γαλακτοπαραγωγής επηρεάζουν τη σύνθεση πρωτεϊνών και λιπιδίων.
Yulyana et al., 2024	FTIR και Χημειομετρία	Ανίχνευση νοθείας	Η μέθοδος FTIR προσδιόρισε προσμίξεις αγελαδινού σε κατσικίσιο γάλα με ακρίβεια άνω του 95%.
Liu et al. 2019	Ανοσοανάλυση	Ανίχνευση προσμίξεων σε κατσικίσιο γάλα	Ανίχνευσε την προσθήκη αγελαδινού γάλακτος σε κατσικίσιο με λωρίδες ανοσοανάλυσης.

Πίνακας 1.4β Ανασκόπηση μελετών που έχουν γίνει στο γάλα

Μελέτη	Μέθοδος	Στόχος	Ευρήματα
Demiati et al. 2023	Ηλεκτροχημικές Μέθοδοι	Ανίχνευση νοθείας	Ανίχνευση νοθείας κατσικίσου γάλακτος με αγελαδινό με ακρίβεια και ταχύτητα.
Balthazar et al. 2021	NMR και Χημειομετρία	Ανίχνευση νοθείας	Το NMR διακρίνει μεταξύ αυθεντικού και νοθευμένου γάλακτος.
Scaloni et al. 2002	Πρωτεομική	Μελέτη της αντίδρασης Maillard	Οι θερμικές επεξεργασίες γάλακτος επηρεάζουν την πεπτικότητα των πρωτεϊνών
Monaci & Van Hengel 2007, Arena et al. 2010	LC-MS	Ανάλυση πρωτεϊνικών αλλαγών Ανάλυση πρωτεϊνών και θερμικής επεξεργασίας	Ταυτοποίηση πρωτεϊνών που υφίστανται τροποποιήσεις μετά την επεξεργασία UHT. Εντοπισμός πρωτεϊνών που μεταβάλλονται με τις θερμικές επεξεργασίες.
Martinho et al. 2018	2D Ηλεκτροφόρηση, LC-MS/MS	Ανάλυση πρωτεομάδας γάλακτος	Ανάλυση πρωτεϊνών του γάλακτος και ταυτοποίηση διαφοροποιημένων πρωτεϊνών.
Di Girolamo et al. 2014	MALDI-TOF MS	Ανίχνευση νοθείας	Ανίχνευση προσμίξεων σε γάλα κατσίκας και γαϊδούρας με πρωτεομική προσέγγιση.
Imperiale et al. 2023 George et al. 2018, Y. Li et al. 2018	LC-MS	Ανάλυση αυθεντικότητας Ανασκόπηση λιποδομικής του γάλακτος	Η LC-MS έδειξε την αυθεντικότητα του γάλακτος μέσω της ανάλυσης πρωτεϊνών και λιπιδίων. Ανάλυση φωσφολιπιδίων και λιπιδίων σε γάλα διαφορετικών ειδών.
Bouroutzika et al. 2022	Πρωτεομική	Ανάλυση πρωτεϊνών και βιοδραστικών πεπτιδίων	Εντοπισμός βιοδραστικών πεπτιδίων σε αγελαδινό, κατσικίσιο και πρόβειο γάλα.
Mkadem et al. 2023	Φασματοσκοπικές Μέθοδοι	Σύγκριση φυσικοχημικών ιδιοτήτων και λιπαρών οξέων	Διαφορές στη μικροχλωρίδα, τα λιπαρά οξέα και τη θερμική συμπεριφορά του κατσικίσου γάλακτος.
Korma et al. 2022	GC, UPCC-Q-TOF-MS, DSC, FT-IR	Ανάλυση λιπαρών οξέων και τριακυλογλυκερολών	Διαφορές στα λιπαρά οξέα και τη θερμική συμπεριφορά του λίπους σε κατσικίσιο γάλα.

Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη διαφορετικών ειδών γάλακτος, κυρίως του αγελαδινού και κατσικίσιου, με τη χρήση φασματοσκοπίας υπερύθρου (ATR-FTIR), της χρωματομετρίας σε συνδυασμό με χημειομετρία. Η εργασία στοχεύει στη διερεύνηση των διαφορών στη χημική σύσταση διαφορετικών ειδών γάλακτος, με χρήση ταχείων και μη καταστρεπτικών μεθόδων. Αρκετές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε γάλατα, έχουν επικεντρωθεί στην ανίχνευση νοθείας και στον έλεγχο της αυθεντικότητας τους. Η παρούσα μελέτη στοχεύει στη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών ειδών γάλακτος με τη χρήση φασματοσκοπίας υπερύθρου ATR-FTIR, σε λυοφιλιωμένα δείγματα γάλακτος, στην ανάλυση του χρώματος των δειγμάτων, τη μικροσκοπική ανάλυση αυτών καθώς και τη διερεύνηση της δευτεροταγούς δομής των πρωτεϊνών τους, σε συνδυασμό με χημειομετρία. Η μελέτη αποσκοπεί στην κάλυψη του ερευνητικού κενού που υπάρχει, με χρήση πρότυπου συνδυασμού μεθόδων.

2 Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Δειγματοληψία και κωδικοποίηση

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συλλογή και σύγκριση διαφόρων ειδών γάλακτος, με τη χρήση φασματοσκοπίας υπερύθρου (ATR-FTIR Spectroscopy), χρωματομετρίας και χημειομετρίας.

Αρχικώς έγινε ενδεδειγμένη ανίχνευση και καταγραφή όλων των ειδών γάλακτος που κυκλοφορούν στην Ελληνική αγορά και ταξινόμηση ανάλογα με τον τύπο του γάλακτος (αγελαδινό, κατσικίσιο, πρόβιο), την περιεκτικότητα σε λίπος (πλήρες και ελαφρύ), την περιεκτικότητα σε λακτόζη, την μέθοδο επεξεργασίας και τον τύπο παστερίωσης, κλπ. Στη συνέχεια επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό πλήθος διαφορετικών προϊόντων, με κριτήρια το πόσο δημοφιλή είναι, την μεγαλύτερη δυνατή κάλυψη των ανωτέρω ταξινομήσεων και το τρόπο επεξεργασίας τους.

Τα δείγματα γάλακτος προμηθεύτηκαν από την Ελληνική αγορά και μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο, αποθηκεύτηκαν σε συνθήκες ψύξης και προγραμματίστηκαν οι ακόλουθες αναλύσεις. Οι συνθήκες παραλαβής και αποθήκευσης των δειγμάτων ήταν όμοιες για όλα τα δείγματα. Επιλέχθηκαν οι δύο επικρατέστερες κατηγορίες ζωικού γάλακτος που υπάρχουν στην αγορά, το αγελαδινό και το κατσικίσιο γάλα. Εξετάστηκαν συνολικά 51 δείγματα γάλακτος εκ των οποίων τα 39 ήταν αγελαδινά και τα 12 κατσικίσια. Τα δείγματα, εκτός από την προέλευση τους, διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την περιεκτικότητά τους σε λίπος (πλήρες και ελαφρύ) καθώς και με βάση την παρουσία ή όχι λακτόζης.

Ακολούθησε η κωδικοποίηση των δειγμάτων και η καταγραφή της διατροφικής αξίας κάθε γάλακτος. Η κωδικοποίηση των δειγμάτων γάλακτος έγινε με βάση την περιεκτικότητα του λίπους και την προέλευση του γάλακτος, αγελαδινό ή κατσικίσιο. Αρχικά δόθηκε μια πρώτη διαφοροποίηση στους κωδικούς βάζοντας στο πρώτο μέρος το γράμμα «M» και έναν αύξοντα αριθμό για κάθε δείγμα, έτσι υπάρχουν οι κωδικοί M1 έως M51, όσα δηλαδή και τα δείγματα γάλακτος. Το πρώτο με το δεύτερο μέρος κάθε κωδικού διαχωρίστηκε με μια τελεία. Στο δεύτερο μέρος της κωδικοποίησης των δειγμάτων το πρώτο ψηφίο συμβολίζει την προέλευση του γάλακτος, με το νούμερο «1» να αναλογεί στο αγελαδινό γάλα και το νούμερο «2» στο κατσικίσιο. Το δεύτερο ψηφίο αυτού του αριθμού συμβολίζει την περιεκτικότητα σε λίπος των δειγμάτων, το «1» ελαφρύ και το «2» πλήρες. Στα γάλατα χωρίς λακτόζη προστέθηκε ένα επιπλέον στοιχείο στο τέλος του κωδικού τους «LF»: Lactose Free.

Πίνακας 2.1 Επεξήγηση κωδικοποίησης δειγμάτων διαφορετικών ειδών γάλακτος

Mx.11	→	Αγελαδινό Γάλα Ελαφρύ
Mx.12	→	Αγελαδινό Γάλα Πλήρες
Mx.21	→	Κατσικίσιο Γάλα Ελαφρύ
Mx.22	→	Κατσικίσιο Γάλα Πλήρες

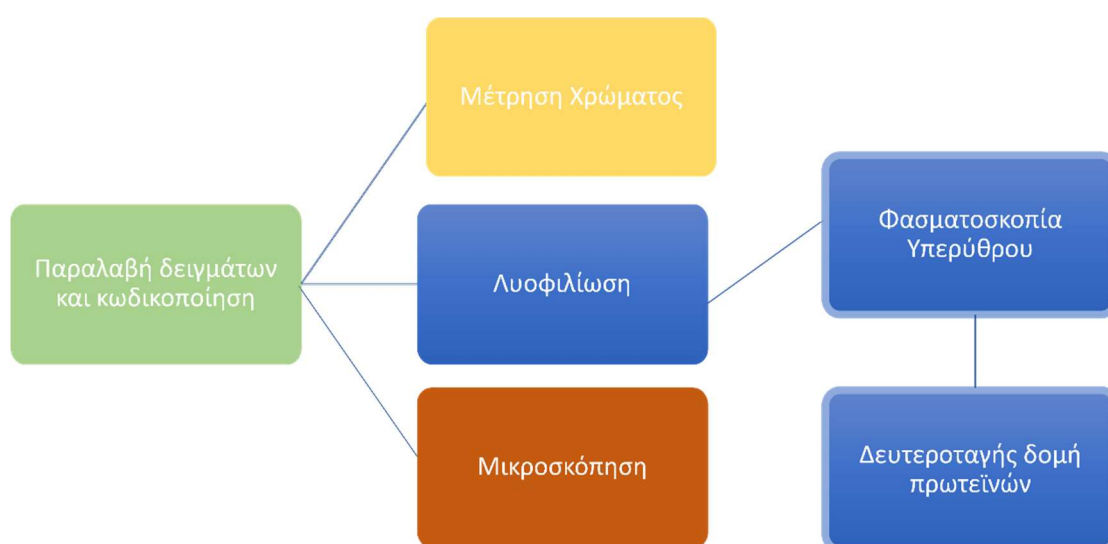
Πίνακας 2.2 Σύνολο δειγμάτων που εξετάστηκαν

A/A	Δείγματα	Προέλευση	Περιεκτικότητα λίπους
1	M1.12	Αγελαδινό	Πλήρες
2	M2.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
3	M3.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
4	M8.12	Αγελαδινό	Πλήρες
5	M9.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
6	M4.12	Αγελαδινό	Πλήρες
7	M5.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
8	M6.12	Αγελαδινό	Πλήρες
9	M7.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
10	M16.12	Αγελαδινό	Πλήρες
11	M17.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
12	M14.12	Αγελαδινό	Πλήρες
13	M15.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
14	M10.12	Αγελαδινό	Πλήρες
15	M11.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
16	M12.12	Αγελαδινό	Πλήρες
17	M13.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
18	M18.12	Αγελαδινό	Πλήρες
19	M19.12	Αγελαδινό	Πλήρες
20	M20.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
21	M21.12	Αγελαδινό	Πλήρες
22	M22.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
23	M23.12	Αγελαδινό	Πλήρες
24	M24.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
25	M25.12	Αγελαδινό	Πλήρες

26	M26.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
27	M27.12	Αγελαδινό	Πλήρες
28	M28.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
29	M29.12	Αγελαδινό	Πλήρες
30	M30.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
31	M31.12	Αγελαδινό	Πλήρες
32	M32.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
33	M33.12	Αγελαδινό	Πλήρες
34	M34.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
35	M35.12.LF	Αγελαδινό	Πλήρες
36	M36.11.LF	Αγελαδινό	Ελαφρύ
37	M37.12	Αγελαδινό	Πλήρες
38	M38.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ
39	M39.11.LF	Αγελαδινό	Ελαφρύ
40	M40.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
41	M41.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
42	M42.21	Κατσικίσιο	Ελαφρύ
43	M43.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
44	M44.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
45	M45.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
46	M46.21.LF	Κατσικίσιο	Ελαφρύ
47	M47.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
48	M48.21	Κατσικίσιο	Ελαφρύ
49	M49.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
50	M50.22	Κατσικίσιο	Πλήρες
51	M51.21	Κατσικίσιο	Ελαφρύ

2.2 Πειραματική πορεία

Στα δείγματα γάλακτος προσδιορίστηκαν οι παράμετροι χρώματος με τη χρήση χρωματόμετρου. Παράλληλα δείγματα γάλακτος παρατηρήθηκαν οπτικά και ελήφθησαν οι σχετικές εικόνες με χρήση μικροσκοπίου. Στη συνέχεια ακολούθησε λυοφιλίωση των δειγμάτων και τα στερεά υπολείμματα αναλύθηκαν με φασματοσκοπία υπερύθρου. Ακολούθησε η μελέτη των φασμάτων υπερύθρου των δειγμάτων γάλακτος για τον προσδιορισμό της δευτεροταγούς δομής των πρωτεϊνών τους. Όλα τα αποτελέσματα χρώματος και φασματοσκοπίας υπερύθρου επεξεργάστηκαν στατιστικά και έγινε συγκριτική μελέτη.



Εικόνα 2.1 Πειραματική πορεία μελέτης διαφόρων ειδών γάλακτος

2.3 Λυοφιλίωση

Πριν την ανάλυση των δειγμάτων με φασματοσκοπία υπερύθρου, προκειμένου να εξαλειφθούν σφάλματα στις μετρήσεις των δειγμάτων λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του γάλακτος σε υγρασία, έγινε λυοφιλίωση των δειγμάτων.

Αρχικά, τα δείγματα γάλακτος τοποθετήθηκαν σε μεταλλικές φόρμες με υποδοχές (**Εικόνα 2.2**) πραγματοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις για κάθε προϊόν, χρησιμοποιώντας ίδια ποσότητα για όλα τα δείγματα. Έπειτα τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία στις φόρμες με τα δείγματα με σκοπό τη συνεχή καταγραφή της θερμοκρασίας τους, κατά τη λυοφιλίωση. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στην κατάψυξη, στους $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπου και παρέμειναν για 3 ημέρες.

Μετά το πέρας της περιόδου κατάψυξης τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον λυοφιλιωτή (freeze dryer) και συνδέθηκαν τα θερμοστοιχεία, που είχαν τοποθετηθεί στις φόρμες, με το μηχάνημα (**Εικόνα 2.3**). Χρησιμοποιήθηκε ο λυοφιλιωτής της εταιρείας GELLERT (CryoDryer 20, Germany). Αφού σφραγίστηκε ο θάλαμος, σε κενό πίεσης 1000 mbar και μπήκε σε λειτουργία, ξεκίνησε η πτώση της θερμοκρασίας εντός αυτού, ώσπου να φτάσει τους -25°C . Έπειτα, ακολούθησε η διαδικασία της ξήρανσης με λυοφιλίωση για τα δείγματα γάλακτος, μέχρι την πλήρη αφυδάτωσή τους. Τα δείγματα παρέμειναν στον λυοφιλιωτή για 1 ημέρα. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας τα τρία δείγματα κάθε γάλακτος τυλίχτηκαν σε μεμβράνη και συσκευάστηκαν σε polybag με βάση τον κωδικό τους, για περαιτέρω ανάλυση.



Εικόνα 2.2 Δείγματα γάλακτος πριν τη λυοφιλίωση, τοποθέτηση σε φόρμες



Εικόνα 2.3 Τοποθέτηση δειγμάτων στον λυοφιλιωτή, σύνδεση θερμοστοιχείων



Εικόνα 2.4 Λυοφιλιωτής, GELLERT

(Πηγή: <https://www.gellerteng.com/Cryo-20>)

2.4 Μέτρηση Χρώματος

Για τη μέτρηση των παραμέτρων του χρώματος χρησιμοποιήθηκε χρωματόμετρο τριπλής διέγερσης (CR400 Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan), το οποίο αποτελείται από μια κεφαλή μέτρησης διαμέτρου 8 mm και έναν επεξεργαστή δεδομένων με μνήμη 300 μετρήσεων. Το χρωματόμετρο χρησιμοποιεί φωτισμό διάχυσης και η οπτική γωνία του είναι 0°, για ακριβείς μετρήσεις μεγάλης ποικιλίας αντικειμένων. Πριν τη λήψη των μετρήσεων το χρωματόμετρο βαθμονομείται με τη χρήση πρότυπης λευκής κεραμικής πλάκας (calibration).

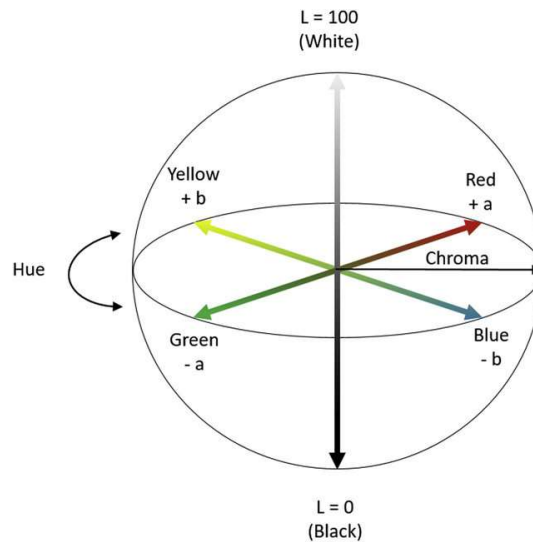
Για τον προσδιορισμό των χρωματικών παραμέτρων των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε το χρωματικό μοντέλο CIELAB, όπου L*: φωτεινότητα, a*: πράσινη-κόκκινη απόχρωση, b*:μπλε-κίτρινη απόχρωση και h: χροιά σε μοίρες. Τα δείγματα γάλακτος τοποθετήθηκαν σε τριβλία Petri και πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε τρία διαφορετικά σημεία του κάθε δείγματος, για κάθε παράμετρο του χρώματος (L*, a*, b*, h).

Υπολογίστηκε, επίσης, ο δείκτης λευκότητας των δειγμάτων (WI), με τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων του χρώματος (L*, a*, b*) και με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης (Milovanovic et al., 2020):

$$WI = 100 - [(100-L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5} \quad (1)$$



Εικόνα 2.5 Τοποθέτηση δειγμάτων σε τριβλία Petri, μέτρηση παραμέτρων χρώματος



Εικόνα 2.6 Διάγραμμα χρωματικού χώρου CIELAB

(Πηγή: Ly et al., 2020)

2.5 Φασματοσκοπία Μετασχηματισμού Fourier με Αποσβένουσα Ολική Ανάκλαση (ATR-FTIR)

Με την ολοκλήρωση της λυοφιλίωσης των δειγμάτων γάλακτος, ακολούθησε η λήψη των φασμάτων ATR-FTIR, ώστε να ληφθεί το φάσμα για κάθε δείγμα. Χρησιμοποιήθηκε φασματόμετρο ATR-FTIR (Shimadzu, IRAffinity-1S FTIR Spectrometer, Japan), χρησιμοποιώντας την τεχνική της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης (ATR). Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου και έγινε μια αρχική λήψη φάσματος του περιβάλλοντος χώρου (background scan). Χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα από κάθε δείγμα η οποία τοποθετήθηκε στο φασματόμετρο, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με κατάλληλο λογισμικό μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή για την απεικόνιση των φασμάτων και την λήψη των απαραίτητων δεδομένων για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η τιμή αναφοράς της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης έχει καθοριστεί στα $3284,77\text{ cm}^{-1}$. Όλα τα φάσματα καταγράφηκαν στην περιοχή μεταξύ $4.000 - 499\text{ cm}^{-1}$ με την διακριτική ικανότητα του οργάνου στα 4 cm^{-1} , ενώ κάθε τελικό φάσμα προέκυπτε από τον μέσο όρο 20 σαρώσεων (scans). Το φάσμα υπερέθρου κάθε δείγματος υποβλήθηκε σε ATR διόρθωση, εξομάλυνση, κανονικοποίηση και ανάδειξη των απορροφήσεων. Η επεξεργασία και η ανάλυσή τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού LabSolutions IR (version 2.21) και η αποτίμηση των φασμάτων έγινε με βάση την βιβλιογραφία.



Εικόνα 2.7 Φασματοόμετρο ATR-FTIR

(Πηγή: <https://www.toshvin.com/products/spectroscopy/firspectrophotometers/iraffiity-1s/>)

2.6 Προσδιορισμός Δευτεροταγούς δομής πρωτεϊνών από τα φάσματα υπερόθρου

Καθώς η περιοχή των αμιδίων I ($1600-1700\text{ cm}^{-1}$) παρέχει πληροφορίες για τη δευτεροταγή δομή των πρωτεϊνών, έγινε εξομάλυνση αυτής χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση, των Savitzky-Golay, εννιά σημείων ώστε να μειωθεί ο θόρυβος της κορυφής αυτής. Με σκοπό την ακρίβεια της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε μια βασική διόρθωση. Για την ανάλυση των δεύτερων παραγώγων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Origin 8.5 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, ΗΠΑ) ώστε να εντοπιστούν οι θέσεις της κορυφής που υποδεικνύουν τις διαφορετικές δευτεροταγείς δομές των πρωτεϊνών στην περιοχή της ομάδας των αμιδίων I. Χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις Gauss για την ανάλυση της προσαρμοσμένης καμπύλης, αυτής της περιοχής. Η σχετική αφθονία των διαφορετικών δευτεροταγών δομών προσδιορίστηκε με ανάλυση των περιοχών κάτω από τις κορυφές. Το ποσοστό των δευτεροταγών δομών των πρωτεϊνών υπολογίστηκε διαιρώντας την κάθε επιμέρους περιοχή κάθε κορυφής, με τη συνολική περιοχή της κορυφής του αμιδίου I και στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας με το 100, με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\text{Μεμονωμένη αποσυνελιγμένη περιοχή κορυφής}}{\text{Συνολική περιοχή αμιδίου I}} \times 100 = \text{Αναλογία δευτεροταγούς δομής πρωτεΐνης} \quad (2)$$

2.7 Μικροσκοπία δειγμάτων γάλακτος

Για την εξέταση των δειγμάτων, στο μικροσκόπιο, χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο CX23 (OLYMPUS, Tokyo, Japan). Με τη βοήθεια σταγονόμετρου τοποθετήθηκαν 2 σταγόνες από κάθε δείγμα σε αντικειμενοφόρο πλάκα και καλύφθηκαν με καλυπτρίδα. Στη συνέχεια η πλάκα μεταφέρθηκε στην τράπεζα του μικροσκοπίου και ακολούθησαν οι λήψεις των εικόνων. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε δείγμα γάλακτος. Για τις λήψεις των εικόνων χρησιμοποιήθηκε ο φακός x40 και πραγματοποιήθηκαν όλες οι αναλύσεις στην ίδια μεγέθυνση. Καθώς ο προσοφθάλμιος φακός του μικροσκοπίου επιφέρει μια μεγέθυνση κατά 10 φορές, η συνολική μεγέθυνση όπου εξετάστηκαν τα δείγματα είναι x400. Για τη λήψη των εικόνων των δειγμάτων γάλακτος, το μικροσκόπιο ήταν συνδεδεμένο με την οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπου με τη βοήθεια κάμερας και του προγράμματος EPview εμφανιζόταν η μικροσκόπηση του δείγματος στην οθόνη και λήφθηκαν οι φωτογραφίες των δειγμάτων.



Εικόνα 2.8 Μικροσκόπιο CX23, OLYMPUS

(Πηγή: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/upright/cx23/>)

2.8 Στατιστική Ανάλυση

Η ανάλυση των δεδομένων διεξήχθη χρησιμοποιώντας τη στατιστική δοκιμασία ANOVA, για να εξακριβωθούν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τύπων γάλακτος. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η δοκιμασία Tukey HSD για να προσδιοριστούν οι ομοιογενείς υποομάδες και η σχετική θέση των τύπων γάλακτος μέσα σε αυτές.

3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

3.1 Σύσταση διαφορετικών ειδών γάλακτος

Ο Πίνακας 3.1 περιλαμβάνει όλα τα δείγματα γάλακτος με τις κωδικοποιήσεις τους και την αναλυτική σύστασή τους σε κύρια και δευτερεύοντα συστατικά. Ακολουθεί ο Πίνακας 3.2 ο οποίος παρουσιάζει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση της σύστασης ανά κατηγορία δειγμάτων με τη σχετική στατιστική σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών, σε επίπεδο σημαντικότητας ($P < 0.05$). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατηγοριών. Τα σημαντικότερα ευρήματα παρατίθενται στη συνέχεια. Η περιεκτικότητα σε λίπος δεν επηρεάζεται από την προέλευση του γάλακτος παρά μόνο από την διεργασία αφαίρεσής του. Συγκεκριμένα τα ελαφριά αγελαδινά και κατσικίσια γάλατα δεν διαφέρουν σημαντικά ως προς το περιεχόμενο λίπος τους. Το ίδιο ισχύει και για τα πλήρη. Τα κατσικίσια γάλατα περιέχουν σημαντικά ($P < 0.05$) μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη σε σχέση με τα αγελαδινά. Επίσης, το αγελαδινό γάλα έχει σημαντικά ($P < 0.05$) μεγαλύτερη συγκέντρωση άλατος από ότι το κατσικίσιο. Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες διαπιστώνεται σημαντική ($P < 0.05$) διαφορά μεταξύ του αγελαδινού γάλακτος χαμηλών λιπαρών υλών και του πλήρους κατσικίσιου. Στα υπόλοιπα δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά.

Πίνακας 3.1 Σύνολο δειγμάτων γάλακτος και η σύσταση τους

A/A	Δείγματα	Προέλευση	Περιεκτικότητα λίπους	Λίπος (g)	Πρωτεΐνη (g)	Υδατάνθρακες (g)	Σάκχαρα (g)	Αλάτι (g)
1	M1.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,6	3,4	5,0	5,0	0,100
2	M2.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,4	5,1	5,1	0,100
3	M3.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	0,3	3,4	5,2	5,2	0,100
4	M8.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,7	3,4	4,7	4,7	0,080
5	M9.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,7	3,5	4,8	4,7	0,090
6	M4.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,7	3,4	4,7	4,7	0,080
7	M5.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,7	3,5	4,8	4,7	0,090
8	M6.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,7	3,3	4,6	4,6	0,110
9	M7.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,3	4,7	4,7	0,120
10	M16.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,6	4,6	0,110
11	M17.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,3	4,7	4,7	0,120
12	M14.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,8	3,4	4,7	4,7	0,110

13	M15.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,4	4,7	4,7	0,120
14	M10.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,7	3,5	4,6	4,6	0,084
15	M11.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,5	4,7	4,7	0,084
16	M12.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,7	4,7	0,100
17	M13.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,2	4,7	4,7	0,100
18	M18.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,7	4,7	0,110
19	M19.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,6	4,6	0,110
20	M20.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,3	4,7	4,7	0,120
21	M21.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,7	3,4	4,7	4,7	0,080
22	M22.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,7	3,5	4,8	4,7	0,090
23	M23.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,9	3,2	4,6	4,6	0,100
24	M24.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,3	4,7	4,7	0,100
25	M25.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,3	4,8	4,8	0,100
26	M26.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,4	4,8	4,8	0,100
27	M27.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,6	4,6	0,110
28	M28.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,3	4,7	4,7	0,120
29	M29.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,6	3,4	4,6	4,6	0,120
30	M30.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,5	4,7	4,7	0,130
31	M31.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,7	3,2	4,8	4,8	0,180
32	M32.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,7	4,9	4,9	0,180
33	M33.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,6	3,3	4,7	4,7	0,100
34	M34.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1	3,4	4,7	4,7	0,100
35	M35.12.LF	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,7	4,7	0,080
36	M36.11.LF	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,2	4,6	4,3	0,100
37	M37.12	Αγελαδινό	Πλήρες	3,5	3,2	4,7	4,7	0,100
38	M38.11	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,5	4,8	4,8	0,110
39	M39.11.LF	Αγελαδινό	Ελαφρύ	1,5	3,3	4,7	4,7	0,120
40	M40.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	3,5	3,6	4,4	4,4	0,080
41	M41.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	3,7	3,7	4,6	4,5	0,080
42	M42.21	Κατσικίσιο	Ελαφρύ	1,7	3,7	4,6	4,5	0,080
43	M43.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	3,5	3,6	4,3	4,3	0,034
44	M44.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	4,0	3,4	4,6	4,6	0,080
45	M45.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	4,0	3,7	4,3	4,3	0,080
46	M46.21.LF	Κατσικίσιο	Ελαφρύ	1,5	3,6	4,7	4,3	0,080
47	M47.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	3,7	3,7	4,6	4,5	0,080

48	M48.21	Κατσικίσιο	Ελαφρύ	1,7	3,7	4,6	4,4	0,080
49	M49.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	3,5	3,6	4,4	4,4	0,080
50	M50.22	Κατσικίσιο	Πλήρες	3,7	3,7	4,6	4,5	0,080
51	M51.21	Κατσικίσιο	Ελαφρύ	1,7	3,8	4,8	4,4	0,080

Πίνακας 3.2 Γενική χημική σύσταση δειγμάτων γάλακτος με βάση την επισήμανση των προϊόντων ως εκατοστιαία περιεκτικότητα (%w/v)

Γενική χημική σύσταση	Αγελαδινό ελαφρύ (M11 – 20 δείγματα)	Αγελαδινό πλήρες (M12 – 19 δείγματα)	Κατσικίσιο ελαφρύ (M21 – 4 δείγματα)	Κατσικίσιο πλήρες (M22 – 8 δείγματα)
Λιπαρές ουσίες	1,4±0,3 ^α	3,6±0,1 ^β	1,7±0,1 ^α	3,7±0,2 ^β
Πρωτεΐνες	3,4±0,1 ^α	3,3±0,1 ^α	3,7±0,1 ^β	3,6±0,1 ^β
Υδατάνθρακες	4,8±0,1 ^α	4,7±0,1 ^{αβ}	4,7±0,1 ^{αβ}	4,5±0,1 ^β
Αλάτι	0,11±0,02 ^α	0,10±0,02 ^α	0,08±0,0 ^β	0,07±0,02 ^β

Τα αποτελέσματα δίνονται ως μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (mean ± SD)

Διαφορετικό μικρό γράμμα κατά μήκος της ίδιας σειράς υποδηλώνει σημαντική στατιστική διαφορά ($P < 0.05$)

Στην έρευνα τους οι Agora et al. (2013) έδειξαν πως το λίπος του αγελαδινού γάλακτος αντιστοιχεί περίπου σε 3,79% w/v, το λίπος του κατσικίσιου γάλακτος σε 3,73% w/v και η πρωτεΐνη του αγελαδινού και κατσικίσιου γάλακτος σε 3,98% και 3,02% w/v αντίστοιχα. Συμπεράναν πως δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ της σύστασης των δύο αυτών ειδών γάλακτος, όμως αναφέρουν πως αρκετές μελέτες δείχνουν ότι το κατσικίσιο γάλα εξακολουθεί να είναι καλύτερο από το αγελαδινό καθώς είναι πιο εύπεπτο λόγω του μεγέθους των λιποσφαιριδίων του και λόγω των αμινοξέων στην πρωτεΐνη του. Το κατσικίσιο γάλα έχει υψηλότερη συγκέντρωση μικρότερων σφαιριδίων λίπους σε σύγκριση με το αγελαδινό, καθιστώντας το πιο εύπεπτο για πολλούς καταναλωτές. Το λίπος στο κατσικίσιο γάλα περιέχει περισσότερα λιπαρά οξέα βραχείας αλύσου, τα οποία συμβάλλουν και στη χαρακτηριστική του γεύση. Το αγελαδινό γάλα περιέχει υψηλότερες συγκεντρώσεις λιπαρών οξέων μεγαλύτερης αλυσίδας, τα οποία επηρεάζουν τη δομή και τη συνοχή του προϊόντος (Roy et al., 2020). Όσον αφορά την πρωτεΐνη τους, δύο από τα κύρια χαρακτηριστικά που διακρίνουν το κατσικίσιο από το αγελαδινό γάλα είναι το μέγεθος των μικκυλίων της καζεΐνης και το χαμηλό επίπεδο α_{s1}-καζεΐνης στο κατσικίσιο γάλα. Η α_{s1}-καζεΐνη, μια πρωτεΐνη που σχετίζεται με αλλεργικές αντιδράσεις, καθιστά το κατσικίσιο γάλα πιο ανεκτό για άτομα με ευαισθησίες στο αγελαδινό γάλα. Τα μικκύλια καζεΐνης στο κατσικίσιο γάλα είναι μεγαλύτερα από αυτά στο αγελαδινό

γάλα, που κυμαίνονται από 100 έως 200 nm σε σύγκριση με 60 έως 80 nm, αντίστοιχα (Kumar et al., 2016; Moatsou & Park, 2017).

3.2 Χρώμα γάλακτος

Στην σύγκριση του χρώματος των δειγμάτων γάλακτος παρουσιάστηκαν διαφορές τόσο ως προς την προέλευση τους, όσο και με βάση την περιεκτικότητά τους σε λίπος (

Πίνακας 3.3). Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα, όλα τα είδη γάλακτος που μελετήθηκαν έδωσαν τιμές φωτεινότητας (Lightness) και λευκότητας (Whiteness) μη σημαντικά διαφορετικές. Ως εκ τούτου προκύπτει το συμπέρασμα ότι τόσο η προέλευση του γάλακτος όσο και η περιεκτικότητά του σε λίπος δεν επηρεάζει σημαντικά τη φωτεινότητά του. Σχετικά με την παράμετρο b^* (yellow-blue), τα αγελαδινά πλήρη γάλατα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη ($P<0.05$) τιμή κίτρινης απόχρωσης, συγκριτικά με όλα τα μελετούμενα δείγματα γάλακτος ενώ τα αγελαδινά χαμηλών λιπαρών, έδωσαν τη μικρότερη ($P<0.05$) τιμή. Τα κατσικίσια γάλατα, ελαφριά και πλήρη, δεν διαφοροποιήθηκαν μεταξύ τους ως προς την παράμετρο b^* και κυμάνθηκαν σε ενδιάμεσες τιμές. Όσον αφορά την παράμετρο a^* (red-green), τα δείγματα αγελαδινού γάλακτος χαμηλών λιπαρών παρουσίασαν μεγαλύτερη ($P<0.05$) πράσινη απόχρωση (αρνητικότερη τιμή a^*) συγκριτικά με τα δείγματα πλήρους γάλακτος και μη στατιστικά διαφορετική από τα δείγματα κατσικίσιου γάλακτος χαμηλών λιπαρών. Άρα φαίνεται ότι τα δείγματα γάλακτος χαμηλής περιεκτικότητας σε λίπος τείνουν να παρουσιάζουν αρνητικότερες τιμές a^* (πιο πρασινωπά) από τα πλήρη γάλατα. Εξαιρετικά ενδιαφέροντα είναι η διαφοροποίηση που προσδιορίστηκε μεταξύ των δειγμάτων γάλακτος χαμηλής και υψηλής περιεκτικότητας σε λίπος ως προς την παράμετρο της απόχρωσης/χρoιάς (hue), με τα πρώτα να διαθέτουν σημαντικά ($P<0.05$) μεγαλύτερες τιμές. Επιπλέον, θα μπορούσε να αναφερθεί μία μη σημαντική τάση των κατσικίσιων δειγμάτων γάλακτος με χαμηλά λιπαρά να παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές χρoιάς, από τα αντίστοιχα αγελαδινά.



Εικόνα 3.1 Δείγματα γάλακτος - Χρωματικές διαφορές

Πίνακας 3.3 Χρωματικές παράμετροι δειγμάτων γάλακτος

Χρωματικές παράμετροι	Αγελαδινό ελαφρύ (M11 – 20 δείγματα)	Αγελαδινό πλήρες (M12 – 19 δείγματα)	Κατσικίσιο ελαφρύ (M21 – 4 δείγματα)	Κατσικίσιο πλήρες (M22 – 8 δείγματα)
L* (Lightness)	75,67±5,55 ^a	78,91±6,94 ^a	73,23±7,89 ^a	74,24±5,02 ^a
a* (red – green)	-3,26±0,61 ^a	-2,50±0,45 ^b	-3,07±0,48 ^{ab}	-2,33±0,36 ^b
b* (yellow - blue)	3,52±1,18 ^a	5,33±1,12 ^γ	4,79±0,26 ^b	4,92±0,54 ^b
h (hue angle)	133,68±13,72 ^a	115,46±4,53 ^b	122,52±2,53 ^a	115,29±1,48 ^b
WI (Whiteness)	75,20±5,54 ^a	78,10±6,93 ^a	72,63±7,89 ^a	73,67±5,02 ^a

Τα αποτελέσματα δίνονται ως μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (mean ± SD)

Διαφορετικό μικρό γράμμα κατά μήκος της ίδιας σειράς υποδηλώνει σημαντική στατιστική διαφορά (P<0.05)

Σύμφωνα με τους Milovanovic et al. (2020) το πλήρες αγελαδινό γάλα έχει μια κιτρινωπή απόχρωση, η οποία προκύπτει από την παρουσία των καροτενοειδών, ιδιαίτερα του β-καροτενίου, που δεν διασπάται από τις αγελάδες. Αυτό αποδίδει στο γάλα μια υψηλότερη τιμή στην παράμετρο b* της χρωματικής κλίμακας CIELAB, η οποία μετρά την ισορροπία μεταξύ κίτρινου και μπλε χρώματος. Το αγελαδινό χαμηλής περιεκτικότητας σε λίπος αντιθέτως παρουσιάζει μικρές τιμές b* λόγω απομάκρυνσης των λιπαρών ουσιών οπότε και των καροτενοειδών. Το κατσικίσιο γάλα είναι λιγότερο κίτρινο ή πιο λευκό σε σύγκριση με το πλήρες αγελαδινό, κάτι που οφείλεται στην έλλειψη καροτενοειδών. Οι κασίκες μετατρέπουν το β-καροτένιο σε βιταμίνη A, και έτσι το χρώμα του γάλακτος είναι λιγότερο κίτρινο. Αυτό φαίνεται και στις μετρήσεις L* της κλίμακας CIELAB, όπου το κατσικίσιο γάλα παρουσιάζει υψηλότερες τιμές φωτεινότητας.

3.3 Αποτελέσματα απορροφήσεων των φασμάτων ATR-FTIR

Στην παρούσα μελέτη, αναλύθηκαν δεδομένα απορρόφησης από διάφορα είδη γάλακτος μέσω φασματοσκοπίας υπερύθρου, με σκοπό την εξερεύνηση ποιοτικών διαφορών μεταξύ των διάφορων ειδών γάλακτος. Η ανάλυση διενεργήθηκε για πολλαπλούς κυματαριθμούς, όπου τα αποτελέσματα έδειξαν διαφορετικές στατιστικές σημαντικότητες μεταξύ των ομάδων, διαφοροποιώντας τη συμβολή των ειδών στις τιμές απορρόφησης.

Πίνακας 3.4 Σχετική ένταση ταινιών απορρόφησης των φασμάτων ATR-FTIR των δειγμάτων γάλακτος

Κυματαριθμός (cm ⁻¹)	Αγελαδινό ελαφρύ (M11 – 20 δείγματα)	Αγελαδινό πλήρες (M12 – 19 δείγματα)	Κατσικίσιο ελαφρύ (M21 – 4 δείγματα)	Κατσικίσιο πλήρες (M22 – 8 δείγματα)
3200-3300	0,736±0,175 ^a	0,632±0,172 ^a	0,749±0,034 ^a	0,588±0,236 ^a
2922	0,382±0,098 ^b	0,578±0,046 ^a	0,487±0,055 ^b	0,559±0,027 ^a
2854	0,104±0,038 ^a	0,207±0,036 ^b	0,151±0,022 ^a	0,191±0,017 ^b
1741-1745	0,172±0,062 ^a	0,289±0,055 ^b	0,240±0,041 ^b	0,307±0,046 ^b
1638-1645	0,437±0,038 ^a	0,417±0,063 ^a	0,469±0,031 ^a	0,417±0,020 ^a
1535-1545	0,200±0,019 ^a	0,187±0,029 ^a	0,209±0,008 ^a	0,181±0,013 ^a
1440-1450	0,046±0,021 ^a	0,089±0,016 ^a	0,077±0,008 ^a	0,085±0,014 ^a
1396-1400	0,028±0,030 ^a	0,011±0,019 ^a	0,015±0,017 ^a	0,009±0,024 ^a
1382	0,010±0,020 ^a	0,023±0,017 ^a	0,014±0,028 ^a	0,043±0,032 ^b
1311-1313	0,011±0,004 ^a	0,012±0,002 ^a	0,011±0,002 ^a	0,011±0,001 ^a
1242-1245	0,051±0,013 ^a	0,051±0,004 ^a	0,057±0,003 ^a	0,061±0,011 ^a
1145-1149	0,053±0,019 ^a	0,087±0,012 ^b	0,081±0,007 ^b	0,092±0,009 ^b
1064	0,016±0,016 ^a	0,019±0,020 ^a	0,018±0,016 ^a	0,007±0,014 ^a
1026-1028	0,371±0,189 ^a	0,350±0,206 ^a	0,308±0,180 ^a	0,443±0,168 ^a
918	0,001±0,003 ^a	0,001±0,002 ^a	0,003±0,007 ^a	-
891	0,038±0,009 ^a	0,038±0,009 ^a	0,041±0,028 ^a	0,044±0,007 ^a
777	0,043±0,007 ^a	0,036±0,006 ^a	0,036±0,010 ^a	0,039±0,002 ^a
700	0,029±0,004 ^a	0,029±0,003 ^a	0,028±0,006 ^a	0,028±0,001 ^a
538-542	0,039±0,014 ^a	0,045±0,010 ^a	0,043±0,020 ^a	0,044±0,018 ^a

Τα αποτελέσματα δίνονται ως μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (mean ± SD)

Διαφορετικό μικρό γράμμα κατά μήκος της ίδιας σειράς υποδηλώνει σημαντική στατιστική διαφορά (P<0.05)

Με έντονη γραφή επισημαίνονται οι κυματαριθμοί όπου παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

➤ Κυματαριθμός 3200-3300 cm⁻¹

Η περιοχή αυτή συνδέεται συχνά με τις δονήσεις τάσεις του υδροξυλίου (-OH), που μπορεί να υποδηλώνουν την περιεκτικότητα σε νερό και άλλα υδρόφιλα συστατικά (Iffah Kamillah binti Md Suhaini et al., 2024; Nandiyanto et al., 2019). Οι διαφορές στις απορροφήσεις μεταξύ των δειγμάτων δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

➤ Κυματαριθμοί 2854 cm^{-1} και 2922 cm^{-1} :

Η περιοχή 2854 cm^{-1} σχετίζεται με τις δονήσεις τάσεις του C-H, στα λιπαρά οξέα (Conceição et al., 2019; Pathare et al., 2022). Σε αυτόν τον κυματαριθμό τα πλήρη γάλατα, αγελαδινό και κατσικίσιο είχαν στατιστικά σημαντική διαφορά ($P < 0.05$) με τις υψηλότερες τιμές απορρόφησης, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα γάλατα χαμηλών λιπαρών. Ομοίως και για τον κυματαριθμό 2922 cm^{-1} , τα αγελαδινό πλήρες και κατσικίσιο πλήρες είχαν σημαντικά ($P < 0.05$) υψηλότερες τιμές από το ελαφρύ αγελαδινό και ελαφρύ κατσικίσιο γάλα. Οι υψηλές απορροφήσεις στο 2922 cm^{-1} , στα πλήρη γάλατα, υποδηλώνουν την παρουσία υψηλότερων συγκεντρώσεων λιπαρών οξέων. Οι Saji et al. (2024), τονίζουν στην έρευνα τους τη χρησιμότητα της FTIR στην ανάλυση λιπαρών οξέων.

➤ Κυματαριθμός 1741-1745 cm^{-1} :

Η περιοχή αυτή συνδέεται με τις δονήσεις του καρβονυλίου (C=O) που είναι σημαντικές για την ανάλυση λιπαρών οξέων (Balan et al., 2020). Το αγελαδινό γάλα χαμηλών λιπαρών είχε τη χαμηλότερη στατιστικά ($P < 0.05$) απορρόφηση, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη γάλακτος, τα οποία δεν είχαν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Αυτό μπορεί να αντανακλά σε σημαντικές διαφορές στην περιεκτικότητα των λιπαρών οξέων.

➤ Κυματαριθμός 1638-1645 cm^{-1}

Η περιοχή αυτή είναι γνωστή για την παρουσία του αμιδίου I, το οποίο διέπεται από τις δονήσεις τάσης του C=O (70-85%) και του C-N (10-20%) (Iffah Kamilah binti Md Suhaini et al., 2024; Jaiswal et al., 2015; Stocco et al., 2023). Στην έρευνα τους οι Daniloski et al. (2022) αναφέρουν πως η κορυφή στα 1650 cm^{-1} , περίπου, μπορεί να ληφθεί ως ένδειξη της παρουσίας σημαντικής ποσότητας α -έλικας, της δευτεροταγής δομής των πρωτεϊνών σε δείγματα γάλακτος που έφεραν A1 β -καζεΐνης. Επίσης, αναφέρουν την κορυφή 1645 cm^{-1} ως δομή τυχαίου πηνίου (random coil). Οι Jaiswal et al. (2015) αναφέρουν το εύρος 1639-1613 cm^{-1} πως αντιστοιχεί στη δομή β -φύλλων της πρωτεΐνης. Δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών ειδών γάλακτος για αυτόν τον κυματαριθμό.

➤ Κυματαριθμός 1535-1545 cm^{-1}

Η περιοχή αυτή σχετίζεται με τις δονήσεις αμιδίων II (N-H), σημαντικές για την ανάλυση πρωτεϊνών (Minić et al., 2023; Pathare et al., 2022). Οι απορροφήσεις σε αυτόν τον κυματαριθμό επίσης δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

➤ Κυματαριθμός 1440-1450 cm^{-1} :

Αυτή η περιοχή σχετίζεται με τις δονήσεις C-H και C-O (Conceição et al., 2019). Η κορυφή αυτή αποδίδεται στις δονήσεις κάμψεις του αιθυλίου (CH_2CH_3) (Iffah Kamilah binti Md Suhaini et al., 2024). Στον κυματαριθμό 1440-1450 cm^{-1} , όλοι οι τύποι γάλακτος εκτός από το αγελαδινό ελαφρύ έδειξαν σχετικά υψηλότερες τιμές απορρόφησης. Ωστόσο, δεν υπήρξε στατιστική διαφορά μεταξύ των υποομάδων, πράγμα που υποδηλώνει πως οι διαφορές μπορεί να μην είναι βιοχημικά ουσιώδεις.

➤ Κυματαριθμός 1396-1400 cm^{-1}

Αυτή η περιοχή σχετίζεται με τις δονήσεις των καρβοξυλικών ομάδων, σημαντικές για την ανάλυση οργανικών οξέων στο γάλα, όπως επισημαίνεται στο άρθρο των (Thummajitsakul et al., 2023). Για αυτή την περιοχή δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων.

➤ Κυματαριθμός 1382 cm^{-1} :

Σε αυτόν τον κυματαριθμό το κατσικίσιο πλήρες γάλα είχε τη μεγαλύτερη στατιστικά ($P < 0.05$) απορρόφηση συγκριτικά με υπόλοιπα είδη γάλακτος. Η διαφοροποίηση αυτή πιθανώς να συνδέεται με τη συγκέντρωση συγκεκριμένων λιπιδίων (Daniloski et al., 2022).

➤ Κυματαριθμός 1311-1313 cm^{-1}

Αυτή η περιοχή σχετίζεται με τις δονήσεις αλκυλίων, σημαντικές για την ανάλυση πρωτεϊνών και λιπιδίων (Saji et al., 2024). Σε αυτόν τον κυματαριθμό δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων γάλακτος.

➤ Κυματαριθμός 1242-1245 cm^{-1}

Αυτή η περιοχή σχετίζεται με τις δονήσεις αμιδίων III (C-N), σημαντικές για την ανάλυση πρωτεϊνών (Sonvanshi et al., 2024). Δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα δείγματα γάλακτος.

➤ Κυματαριθμός 1145-1149 cm^{-1} :

Στο εύρος των κυματαριθμών 1145-1149 cm^{-1} , το ελαφρύ αγελαδινό γάλα είχε τη χαμηλότερη στατιστικά απορρόφηση ($P < 0.05$) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη γάλακτος, τα οποία δεν είχαν στατιστικά σημαντική ($P < 0.05$) διαφορά μεταξύ τους. Αυτή η διαφοροποίηση σχετίζεται με την παρουσία πρωτεϊνών και λιπιδίων στα γάλατα (Nandiyanto et al., 2019).

➤ Κυματαριθμός 1064 cm^{-1}

Η περιοχή αυτή σχετίζεται με τις δονήσεις τάσης του C-O, σημαντικές για την ανάλυση των υδατανθράκων (Stocco et al., 2023). Η α -τοκοφερόλη στο γάλα αναφέρεται ότι έχει κορυφή στα 1089-1058 cm^{-1} λόγω δονήσεως κάμψης της ομάδας του φαινυλίου σε αυτή (Jaiswal et al., 2015). Στην έρευνα τους οι Arifah et al. (2022) αναφέρουν την κορυφή 1077 cm^{-1} ως την κορυφή της λακτόζης. Οι κύριες διαφορές για τα γάλατα χωρίς λακτόζη είναι η απουσία της περιοχής γύρω στα 1115 και η χαμηλή ένταση στα 1045 που σχετίζονται με τις δονήσεις τάσης του C-O-C και C-O, αντίστοιχα (Pinto et al., 2021). Μεταξύ των δειγμάτων γάλακτος που εξετάστηκαν δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, σε αυτόν τον κυματαριθμό.

➤ Κυματαριθμοί 1026-1028 cm^{-1}

Η περιοχή αυτή συνδέεται με τις δονήσεις τάσεις C-O-C, σημαντικές για την ανάλυση των υδατανθράκων (Jin et al., 2023). Δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Σύμφωνα με τους Suhaini et al. (2024) οι υδροξυλομάδες της λακτόζης παρατηρήθηκαν στον κυματαριθμό 1039 cm^{-1} . Τα φασματικά χαρακτηριστικά της λακτόζης δεν είναι ευδιάκριτα και συχνά επικαλύπτονται με άλλα συστατικά του γάλακτος κυρίως με αυτά του νερού και συμβάλλουν έτσι στην περιπλοκότητα της ακριβούς περιεκτικότητας σε λακτόζη (Diaz-Olivares et al., 2024).

➤ Κυματαριθμός 918 cm^{-1}

Η απορρόφηση σε κυματαριθμό 918 cm^{-1} έδωσε αμελητέες εντάσεις για όλα τα είδη γάλακτος, χωρίς την ύπαρξη στατιστικά σημαντικών διαφορών μεταξύ τους. Ωστόσο, η απορρόφηση στα 918 cm^{-1} , παρατηρήθηκε μόνο στα γάλατα χωρίς λακτόζη, τα οποία είχαν σχετικές εντάσεις ταινιών απορρόφησης $0,011 \pm 0,01$, γεγονός που αποτελεί σημαντικό εύρημα της παρούσας μελέτης. Η συγκεκριμένη κορυφή μπορεί να συσχετιστεί με τη μοριακή δομή και τη σύνθεση των γαλάτων χωρίς λακτόζη,

παρέχοντας πληροφορίες για τη διαδικασία παραγωγής και τις ιδιαιτερότητες αυτών των προϊόντων. Στην έρευνα τους οι Pinto et al. (2021) επίσης παρατήρησαν πως η περιοχή μεταξύ των κυματαριθμών 900 cm^{-1} έως 1200 cm^{-1} είναι σημαντική για τη διάκριση μεταξύ του κανονικού γάλακτος και γάλακτος χωρίς λακτόζη. Η περιοχή γύρω από τον κυματαριθμό 918 cm^{-1} είναι γνωστή ότι σχετίζεται με τις δονήσεις κάμπυεις της ομάδας C-O-C, στα ανωμερή των σακχάρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα γάλατα χωρίς λακτόζη παρουσίασαν την επιπλέον απορρόφηση στα 918 cm^{-1} η οποία αποδίδεται σε β-ανωμερείς δομές σακχάρων και η οποία πιθανόν επικαλύπτεται σε γάλατα με υψηλές περιεκτικότητες λακτόζης. Ειδικά στα γάλατα χωρίς λακτόζη, αυτή η κορυφή μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία συγκεκριμένων ενώσεων ή υποπροϊόντων που προκύπτουν από τη διαδικασία αφαίρεσης της λακτόζης. Η αφαίρεση της λακτόζης συχνά περιλαμβάνει την υδρόλυση της λακτόζης σε γλυκόζη και γαλακτόζη μέσω της προσθήκης του ενζύμου λακτάση. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση νέων κορυφών ή την τροποποίηση των υφιστάμενων κορυφών στο φάσμα FTIR λόγω των αλλαγών στη χημική σύνθεση του γάλακτος (Thummajitsakul et al., 2023). Η λακτόζη μέσα στο διάλυμα βρίσκεται στις δύο ανωμερές μορφές της, την α-λακτόζη και τη β-λακτόζη, εκ των οποίων η πρώτη έχει πολύ χαμηλή διαλυτότητα και υπό συνήθειες συνθήκες κρυστάλλωσης είναι η μόνη, από τις δύο μορφές, που κρυσταλλώνεται (Schiele et al., 2020). Το νερό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία κρυστάλλωσης της λακτόζης (Toxqui-Terán et al., 2024). Η γαλακτόζη εμφανίζεται με τη μορφή β-λακτόζης, ενώ η γλυκόζη μπορεί να υπάρχει και στις δύο μορφές, α-λακτόζη και β-λακτόζη (Wiercigroch et al., 2017). Στην έρευνα του οι Wiercigroch et al. (2017) αναφέρουν πως ο κυματαριθμός 915 cm^{-1} προέρχεται από τη γαλακτόζη, η οποία, όπως αναφέρθηκε, εμφανίζεται με τη μορφή της β-λακτόζης.

➤ Κυματαριθμός 891 cm^{-1} ,

Οι κυματαριθμοί 928 cm^{-1} , 900 cm^{-1} και 876 cm^{-1} αποδίδονται σε δονήσεις τάσης του C-C των ανωμερών μορφών της λακτόζης, ενώ στα 800 cm^{-1} και 793 cm^{-1} αποδίδονται οι παραμορφώσεις του δακτυλίου των μορφών αυτών. Τα δεδομένα αυτά υποστηρίζουν την παρουσία των ανωμερών μορφών στο υδατινο διάλυμα της λακτόζης (Márquez et al., 2015; Wiercigroch et al., 2017). Οι Lei et al. (2010) αναφέρουν πως οι κυματαριθμοί 917 cm^{-1} , 897 cm^{-1} και 973 cm^{-1} αντιστοιχούν στον δακτύλιο του υδατάνθρακα της κρυσταλλωμένης λακτόζης. Οι Hong et al. (2021), στην έρευνα τους

για τις εφαρμογές της υπέρυθρης φασματοσκοπίας στη δομική ανάλυση πολυσακχαριτών, αναφέρουν πως οι απορροφήσεις στα 890 και στα 920 cm^{-1} υποδηλώνει την ύπαρξη β-διαμόρφωσης ενώ στα 820, και στα 864 έως 866 cm^{-1} την ύπαρξη της α-διαμόρφωσης (Hong et al. 2021). Επίσης οι απορροφήσεις στα 899, 875 and 778 cm^{-1} σε δείγματα υψηλής περιεκτικότητας σε λακτόζη ενισχύονται (Lei et al., 2010). Ως εκ τούτου η απορρόφηση στα 891 cm^{-1} , στην παρούσα μελέτη, παρουσιάζει πιθανόν ενισχυμένη ταινία στα δείγματα που περιέχουν λακτόζη, έναντι των ελευθέρων λακτόζης δειγμάτων. Αυτή η εκδοχή πιθανόν αιτιολογεί την απουσία της ταινίας στα 918 cm^{-1} στα δείγματα που περιέχουν λακτόζη λόγω επικάλυψής της από την ταινία στα 891 cm^{-1} . Πολλαπλές κορυφές στην περιοχή μεταξύ των κυματαριθμών 920 cm^{-1} έως 840 cm^{-1} υποδεικνύουν την παρουσία και των δύο διαμορφώσεων, α και β. Ωστόσο, κάποιες ασυνέπειες μπορεί να βρεθούν σε διαφορετικές έρευνες, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικές πηγές, διαφορετικές μεθόδους δειγματοληψίας και στα διάφορα όργανα υπέρυθρης φασματοσκοπίας (Hong et al., 2021).

➤ Κυματαριθμοί 777 cm^{-1} , 700 cm^{-1} , 538-542 cm^{-1}

Οι περιοχές αυτές σχετίζονται με τις δονήσεις των ομάδων αλκυλίων, σημαντικές για την ανάλυση πρωτεϊνών και λιπιδίων (Sonvanshi et al., 2024). Αντιστοιχούν κυρίως στις ομάδες O-C-C, O-C-C και C-C-O, με έντονη κορυφή κοντά στα 551 cm^{-1} . Μια ευρεία ζώνη παρατηρείται επίσης στα 757 cm^{-1} (σύζευξη των CO, COHO και HOH) (Wiercigroch et al., 2017). Δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων γάλακτος σε αυτούς τους κυματαριθμούς.

Η περιοχή 1582-930 cm^{-1} αποτελείται από κορυφές για υδατάνθρακες και οργανικά οξέα (Pathare et al., 2022). Στην έρευνα τους οι Saji et al. (2024) αναφέρουν τις περιοχές των κυματαριθμών και τις αντίστοιχες λειτουργικές ομάδες τους για τα φάσματα στο FT-MIR, των γαλακτοκομικών προϊόντων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.2**.

Wavenumber regions and corresponding functional groups mainly present in the FT-MIR spectra of dairy products.

	Functional group	Wavenumber region (cm ⁻¹)
Fats	C-H	3000-2800
	C=O	1750-1700
	C=C-H	3100-3000
Proteins	Amide I	1750-1650
	C=O	1750-1700
	Amide II	1550-1500
	N-H	3500-3300
Carbohydrates	C-N	1300-1000
	C-H	3000-2800
	C-O	1200-1000
Water	O-H	3600-3200
	H-O-H	1700-1600
Alcohol	O-H	3600-3200
	C-O	1300-1000
Amine	N-H	3500-3300
	C-N	1300-1000
	N-H	3500-3300
Aromatic	C-H	3100-3000
	C=C	1600-1450
Carbonyl	C=O	1750-1650
Ether	C-O	1300-1000

Εικόνα 3.2 Περιοχές κυματαριθμών και αντίστοιχες λειτουργικές ομάδες στα φάσματα FT-MIR γαλακτοκομικών προϊόντων

3.4 Αποτελέσματα δευτεροταγούς δομής πρωτεϊνών

Η ανάλυση των δευτεροταγών δομών των πρωτεϊνών σε διάφορα είδη γάλακτος είναι σημαντική για την κατανόηση των διαφορών στη χημική σύσταση και τις ιδιότητες του γάλακτος. Αυτή, δημιουργεί έναν ορισμένο αριθμό δομών όπως οι α-έλικες, β-φύλλα, β-στροφές και τυχαία πηνία (McSweeney & Fox, 2013). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.5) βρίσκεται η εκατοστιαία σύσταση (%) των μοριακών ειδών των πρωτεϊνών με βάση τη δευτεροταγή τους δομή στα δείγματα γάλακτος.

Πίνακας 3.5 Εκατοστιαία σύσταση (%) των μοριακών ειδών των πρωτεϊνών με βάση τη δευτεροταγή τους δομή στα δείγματα γάλακτος

Δομή (%)	Αγελαδινό ελαφρύ (M11 – 20 δείγματα)	Αγελαδινό πλήρες (M12 – 19 δείγματα)	Κατσικίσιο ελαφρύ (M21 – 4 δείγματα)	Κατσικίσιο πλήρες (M22 – 8 δείγματα)
β-φύλλο, παράλληλο	23,42±4,72 ^α	14,65±3,84 ^β	26,51±7,15 ^α	15,71±4,31 ^β
Τυχαίο πηνίο	37,50±3,48 ^α	40,45±1,92 ^α	35,72±2,80 ^α	37,76±1,70 ^α
α-Έλικα	29,67±4,06 ^{αβ}	34,78±2,37 ^α	27,65±2,14 ^β	30,62±2,77 ^{αβ}
β-Στροφή	9,40±1,99 ^α	10,12±3,93 ^{αβ}	10,12±2,50 ^α	15,91±1,24 ^β

Τα αποτελέσματα δίνονται ως μέσος όρος ± τυπική απόκλιση (mean ± SD)

Διαφορετικό μικρό γράμμα κατά μήκος της ίδιας σειράς υποδηλώνει σημαντική στατιστική διαφορά (P<0.05)

Β-φύλλο, παράλληλο (β-Parallel Sheet)

Σύμφωνα με τα στατιστικά αποτελέσματα για τις δομές του β-παράλληλου φύλλου, παρατηρήθηκε πως τα ελαφριά γάλατα, κατσικίσια και αγελαδινά, δεν είχαν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους (P<0.05) και είχαν μεγαλύτερες τιμές από τα πλήρη γάλατα, τα οποία επίσης δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Επομένως, επηρεάζεται η συγκεκριμένη δομή από την περιεκτικότητα του γάλακτος σε λίπος. Παρατηρείται, επίσης, πως τα κατσικίσια γάλατα έχουν σχετικά μεγαλύτερες τιμές από τα αγελαδινά γάλατα, άρα πιθανώς επηρεάζεται το ποσοστό του β-φύλλου στα γάλατα από τη προέλευση του γάλακτος. Αυτό υποδηλώνει ότι οι πρωτεΐνες στο κατσικίσιο γάλα μπορεί να έχουν μεγαλύτερη τάση να σχηματίζουν παράλληλα φύλλα β, πιθανόν λόγω διαφορών στη δομή και τη σύνθεση των πρωτεϊνών. Οι πρωτεΐνες β-φύλλο παράλληλο παίζουν κρίσιμο ρόλο στη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα των γαλακτικών προϊόντων. Κάτι που εξηγεί και την καλύτερη ικανότητα πήξης του αγελαδινού γάλακτος (McSweeney & Fox, 2013; Ye et al., 2017).

Τυχαίο Πηνίο (Random Coil)

Δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών ειδών γάλακτος όσον αφορά τα τυχαία πηνία. Παρόλα αυτά, το αγελαδινό πλήρες γάλα εμφάνισε το υψηλότερο ποσοστό τυχαίου πηνίου ($40,45 \pm 1,92\%$), ενώ το κατσικίσιο ελαφρύ το χαμηλότερο ($35,72 \pm 2,80\%$). Το τυχαίο πηνίο συνήθως υποδεικνύει ευελιξία στις πρωτεΐνες, η οποία μπορεί να επηρεάζει τη λειτουργικότητά τους. Οι μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές του τυχαίου πηνίου μεταξύ των τύπων γάλακτος μπορεί να αντικατοπτρίζουν τη διαφορετική ευελιξία και ακαμψία των πρωτεϊνών (Chen et al., 2023). Το υψηλότερο ποσοστό τυχαίων πηνίων στο αγελαδινό γάλα μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη συγκέντρωση σε $\alpha 1$ -καζεΐνη, η οποία έχει πιο ευέλικτη δομή (McSweeney & Fox, 2013).

α -Έλικα (α -Helix)

Οι πρωτεΐνες στο αγελαδινό πλήρες γάλα εμφάνισαν το υψηλότερο ποσοστό α -έλικας ($34,78 \pm 2,37\%$), υποδηλώνοντας υψηλότερη περιεκτικότητα σε δομές α -έλικας. Το αγελαδινό πλήρες γάλα δεν εμφάνισε στατιστικά σημαντική διαφορά ($P < 0.05$) με το αγελαδινό ελαφρύ και το κατσικίσιο πλήρες γάλα, για τη συγκεκριμένη δομή. Όσον αφορά το κατσικίσιο ελαφρύ γάλα, το οποίο είχε το μικρότερο ποσοστό, είχε στατιστικά σημαντική διαφορά με το αγελαδινό πλήρες γάλα, ωστόσο ούτε αυτό παρουσίασε σημαντικές διαφορές με τα υπόλοιπα είδη γάλακτος. Παρατηρείται, όμως, τα πλήρη γάλατα να έχουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με τα γάλατα με χαμηλά λιπαρά. Οι α -έλικες παίζουν σημαντικό ρόλο στη δομή και τη σταθερότητα των πρωτεϊνών, και η αυξημένη παρουσία τους στο αγελαδινό πλήρες γάλα μπορεί να σχετίζεται με την επεξεργασία και την αποθήκευση του γάλακτος (Ye et al., 2017). Σύμφωνα με μελέτες το κατσικίσιο γάλα έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε $\alpha 2$ -καζεΐνη, η οποία διαθέτει περισσότερες α -έλικες. Οι α -έλικες στο κατσικίσιο γάλα συμβάλλουν στη μειωμένη αλλεργιογόνο δράση του, καθώς αυτές οι δομές είναι λιγότερο πιθανό να προκαλέσουν αλλεργίες (McSweeney & Fox, 2013).

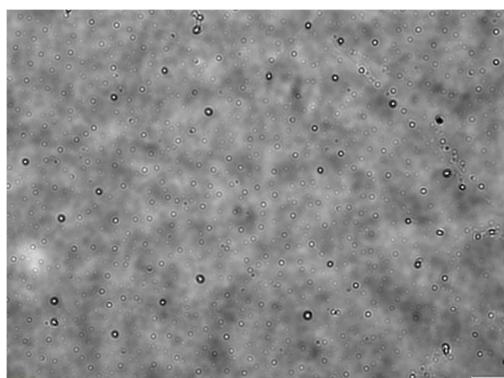
β -Στροφή (β -Turn)

Τα ελαφριά γάλατα, κατσικίσια και αγελαδινά είχαν τα χαμηλότερα ποσοστά σε β -στροφή και δεν διέφεραν μεταξύ τους στατιστικά σημαντικά ($P < 0.05$), καθώς ούτε με

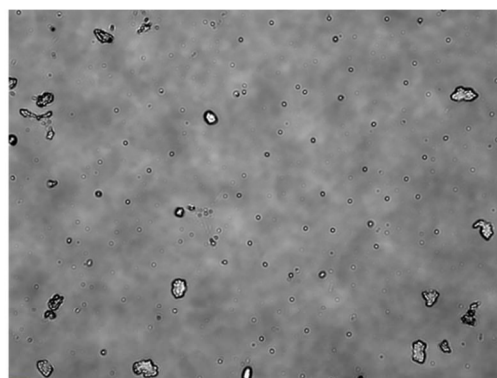
το αγελαδινό πλήρες γάλα. Το κατσικίσιο πλήρες γάλα είχε το υψηλότερο ποσοστό β-στροφή (15,91±1,24%), το οποίο δε διέφερε στατιστικά σημαντικά από το αγελαδινό πλήρες γάλα, όμως είχε σημαντική διαφορά σε σύγκριση με τα γάλατα με χαμηλά λιπαρά. Οι β-στροφές είναι σημαντικές για την ευκαμψία των πρωτεϊνών και μπορεί να επηρεάζουν τις αλληλεπιδράσεις τους με άλλα μόρια στο γάλα. Αυτές οι δομές είναι σημαντικές για τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα των πρωτεϊνών και οι διαφοροποιήσεις στα ποσοστά τους μπορεί να επηρεάζουν την ποιότητα και την επεξεργασία του γάλακτος (Chen et al., 2023). Το χαμηλό σχετικά ποσοστό της β-στροφής, εξηγείται και από την έλλειψη της κορυφής 1681-1665 cm^{-1} , η οποία αντιστοιχεί σε αυτή τη δομή (Daniloski et al., 2022).

3.5 Αποτελέσματα Μικροσκόπησης

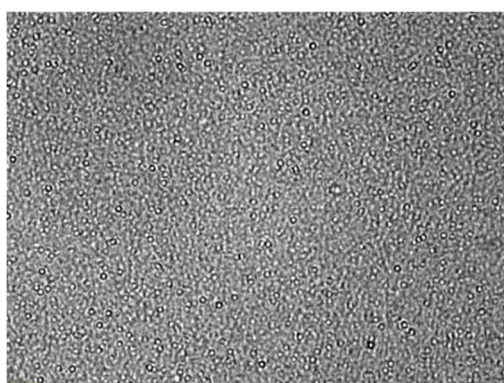
Η εικόνα από το αγελαδινό ελαφρύ γάλα δείχνει μικρά και αραιά κατανεμημένα λιπαρά σφαιρίδια, κάτι που υποδεικνύει τη χαμηλή περιεκτικότητα σε λιπαρά. Η ομοιογένεια είναι υψηλή, κάτι που είναι τυπικό για τα ελαφριά γάλατα που έχουν υποστεί ομογενοποίηση. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία, η οποία αναφέρει ότι τα λιπαρά σφαιρίδια στο αγελαδινό γάλα μειώνονται σε μέγεθος και πυκνότητα μετά από επεξεργασία και ομογενοποίηση (Lu et al., 2021). Η εικόνα του αγελαδινού πλήρους γάλακτος δείχνει μεγαλύτερα και πιο πυκνά κατανεμημένα λιπαρά σφαιρίδια σε σύγκριση με το ελαφρύ γάλα. Αυτό υποδεικνύει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε λιπαρά συστατικά. Η ομοιογένεια είναι ελαφρώς χαμηλότερη, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας λιπαρών, κάτι που επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία, η οποία αναφέρει ότι το πλήρες γάλα έχει μεγαλύτερα λιπαρά σφαιρίδια και χαμηλότερη ομοιογένεια (Cheong et al., 2009).



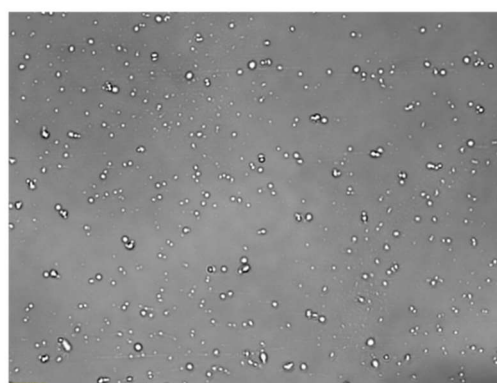
Αγελαδινό Γάλα Ελαφρύ



Αγελαδινό Γάλα Πλήρες



Κατσικίσιο Γάλα Ελαφρύ



Κατσικίσιο Γάλα Πλήρες

Εικόνα 3.3 Εικόνες διαφορετικών ειδών γάλακτος στο μικροσκόπιο

Η εικόνα από το κατσικίσιο πλήρες γάλα δείχνει μεγάλα και σχετικά πυκνά κατανεμημένα λιπαρά σφαιρίδια. Η ομοιογένεια είναι καλή, αν και υπάρχουν διαφορές στη μορφή των σφαιριδίων λόγω της φύσης του κατσικίσιου γάλακτος. Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι τα λιπαρά σφαιρίδια στο κατσικίσιο γάλα είναι μικρότερα και περισσότερα σε σχέση με το αγελαδινό γάλα, κάτι που εξηγεί τη διαφορά στην κατανομή των σφαιριδίων. Η εικόνα από το κατσικίσιο ελαφρύ γάλα δείχνει μικρότερα και αραιότερα κατανεμημένα λιπαρά σφαιρίδια, παρόμοια με αυτά του αγελαδινού ελαφρύ γάλακτος. Η ομοιογένεια είναι υψηλή λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε λιπαρά και της επεξεργασίας ομογενοποίησης. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία που αναφέρει ότι τα κατσικίσια γάλατα, ειδικά τα ελαφριά, έχουν υψηλή ομοιογένεια και μικρότερα σφαιρίδια λιπαρών (Lu et al., 2021).

Συμπερασματικά, τα ελαφριά γάλατα εμφανίζουν λιγότερα και μικρότερα λιπαρά σφαιρίδια σε σύγκριση με τα πλήρη γάλατα. Τα πλήρη γάλατα έχουν πιο πυκνή κατανομή και μεγαλύτερο μέγεθος λιπαρών σφαιριδίων. Η ομοιογένεια είναι γενικά υψηλή σε όλα τα δείγματα, με τα ελαφριά γάλατα να εμφανίζουν ελαφρώς καλύτερη ομοιογένεια λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε λιπαρά.

4 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση και σύγκριση σε διάφορα είδη γάλακτος. Η μελέτη αυτή βασίστηκε στη φασματοσκοπία υπερύθρου (ATR-FTIR), διαφορές στις χρωματικές παραμέτρους, στη σύνθεση των διαφορετικών ειδών γάλακτος, στο ποσοστό των δευτεροταγών δομών των πρωτεϊνών τους καθώς και στις διαφορές τους με μικροσκόπηση. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τις διαφορές που υφίστανται μεταξύ των διαφορετικών τύπων γάλακτος και πώς αυτές οι διαφορές μπορούν να επηρεάσουν τη χρήση και τις ιδιότητες του γάλακτος σε διάφορες εφαρμογές.

Η ανάλυση των δειγμάτων γάλακτος έδειξε ότι υπάρχουν σαφείς διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση των διάφορων τύπων γάλακτος. Συγκεκριμένα, το κατσικίσιο γάλα αποδείχθηκε ότι είναι πιο πλούσιο σε πρωτεΐνες σε σχέση με το αγελαδινό γάλα, ενώ το αγελαδινό γάλα παρουσίασε υψηλότερη συγκέντρωση άλατος. Η περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες είχε σημαντική διαφορά μεταξύ του αγελαδινού γάλακτος χαμηλών λιπαρών υλών και του πλήρους κατσικίσιου. Η διαφοροποίηση στη χημική σύσταση μπορεί να εξηγηθεί από τη διαφορετική βιοχημική σύνθεση του γάλακτος από διάφορα είδη ζώων. Το κατσικίσιο γάλα, για παράδειγμα, είναι γνωστό για την υψηλή περιεκτικότητά του σε μικρά λιποσφαιρίδια και ιδιαίτερες πρωτεΐνες που το καθιστούν πιο εύπεπτο για ορισμένους καταναλωτές. Οι διαφορές αυτές έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στη διατροφική αξία όσο και στις ιδιότητες επεξεργασίας του γάλακτος.

Η φωτεινότητά του γάλακτος δεν επηρεάζεται από τη προέλευση του γάλακτος, ούτε από τη περιεκτικότητά του σε λίπος. Τα δείγματα γάλακτος χαμηλής περιεκτικότητας σε λίπος, δηλαδή τα ημι-αποβουτυρωμένα γάλατα, τείνουν να είναι πιο πρασινωπά (αρνητικότερες τιμές a^*) από τα πλήρη γάλατα. Τα αγελαδινά πλήρη γάλατα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη τιμή κίτρινης απόχρωσης (b^*), συγκριτικά με όλα τα μελετούμενα δείγματα γάλακτος ενώ τα αγελαδινά χαμηλών λιπαρών, έδωσαν τη μικρότερη. Τα κατσικίσια γάλατα, ελαφριά και πλήρη, δεν διαφοροποιήθηκαν μεταξύ τους ως προς την παράμετρο b^* και κυμάνθηκαν σε ενδιάμεσες τιμές. Η παρουσία καροτενοειδών και άλλων χρωστικών ουσιών στο αγελαδινό γάλα μπορεί να εξηγήσει το πιο κιτρινωπό χρώμα του. Η απόχρωση/χροιά των δειγμάτων γάλακτος είχε σημαντικά υψηλότερες τιμές στα γάλατα με χαμηλά λιπαρά συγκριτικά με τα πλήρη γάλατα και παρατηρήθηκαν χαμηλότερες τιμές αυτής της παραμέτρου στα κατσικίσια

δείγματα γάλακτος σε σχέση με τα αγελαδινά. Οι διαφορές αυτές στο χρώμα μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική σύσταση των λιπαρών και των πρωτεϊνών στα είδη γάλακτος, καθώς και στη διαφορά στην επεξεργασία τους. Οι διαφορές στο χρώμα μπορούν επίσης να επηρεάσουν την αντίληψη του καταναλωτή για την ποιότητα και τη φρεσκάδα του γάλακτος, κάνοντας την παράμετρο αυτή σημαντική για τους παραγωγούς και τους διανομείς.

Η ανάλυση ATR-FTIR έδειξε σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των ομάδων γάλακτος σε διάφορους κυματαριθμούς, υποδεικνύοντας διαφοροποιήσεις στη χημική σύνθεση των ειδών γάλακτος. Συγκεκριμένα, για τους κυματαριθμούς 2854 cm^{-1} και 2922 cm^{-1} τα πλήρη γάλατα κατσικίσια και αγελαδινά είχαν μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τα αντίστοιχα γάλατα με χαμηλά λιπαρά. Οι υψηλότερες τιμές απορρόφησης υποδηλώνουν την παρουσία υψηλότερων συγκεντρώσεων λιπαρών οξέων στα πλήρη γάλατα. Διαφορές για τα λιπίδια και τα λιπαρά οξέα των δειγμάτων έδειξαν επίσης και οι απορροφήσεις στους κυματαριθμούς $1741\text{-}1745\text{ cm}^{-1}$, 1382 cm^{-1} και $1145\text{-}1149\text{ cm}^{-1}$. Ο κυματαριθμός 918 cm^{-1} αποτελεί ένα σημαντικό εύρημα για τα γάλατα χωρίς λακτόζη, καθώς ο συγκεκριμένος κυματαριθμός δεν εμφανίστηκε στα γάλατα που περιείχαν λακτόζη. Οι κυματαριθμοί 918 cm^{-1} και 891 cm^{-1} αποδίδονται στα ανωμερή της λακτόζης, δηλαδή στην β-λακτόζη και α-λακτόζη.

Από τη μελέτη των δευτεροταγών δομών των πρωτεϊνών στα διάφορα είδη γάλακτος προκύπτει πως η δομή του β-φύλλου παράλληλου φαίνεται να επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του γάλακτος σε λίπος, καθώς τα ελαφριά γάλατα, τόσο τα κατσικίσια όσο και τα αγελαδινά, παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά β-φύλλου συγκριτικά με τα πλήρη γάλατα. Επιπλέον, παρατηρείται μία τάση τα κατσικίσια γάλατα να εμφανίζουν μεγαλύτερα ποσοστά β-φύλλου παράλληλου σε σχέση με τα αγελαδινά γάλατα, υποδηλώνοντας ότι η προέλευση του γάλακτος και, κατ' επέκταση, η σύσταση των πρωτεϊνών μπορεί να επηρεάζει αυτή τη δομή. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη διαφοροποίηση της δομής των πρωτεϊνών, όπως η α_{s2} -καζεΐνη στο κατσικίσιο γάλα, που φαίνεται να έχει μεγαλύτερη τάση σχηματισμού αυτής της δομής. Όσον αφορά τα τυχαία πηνία, παρατηρείται ότι, αν και δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ειδών γάλακτος, το αγελαδινό πλήρες γάλα εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό, γεγονός που μπορεί να συνδέεται με την αυξημένη ευκαμψία των πρωτεϊνών του, όπως της α_{s1} -καζεΐνης, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλότερη ευελιξία. Αυτή η ευκαμψία μπορεί να επηρεάζει τη λειτουργικότητα και την αλληλεπίδραση των πρωτεϊνών με άλλα συστατικά του γάλακτος. Η δομή της α-έλικας

εμφανίζεται σε υψηλότερα ποσοστά στο αγελαδινό πλήρες γάλα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αυξημένη περιεκτικότητα σε λίπος μπορεί να ενισχύει τη διαμόρφωση αυτής της δομής. Αν και δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των περισσότερων ειδών γάλακτος, το κατσικίσιο ελαφρύ γάλα εμφανίζει τα χαμηλότερα ποσοστά α-έλικας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη διαφορετική σύνθεση των πρωτεϊνών του κατσικίσιου γάλακτος. Η αυξημένη παρουσία α-έλικας στα πλήρη γάλατα συνδέεται επίσης με τη σταθερότητα των πρωτεϊνών και τις διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία και αποθήκευση του γάλακτος. Όσον αφορά τη δομή της β-στροφής, παρατηρείται ότι τα γάλατα με χαμηλά λιπαρά έχουν τα χαμηλότερα ποσοστά αυτής της δομής συγκριτικά με τα αντίστοιχα πλήρη, χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Το κατσικίσιο πλήρες γάλα εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό β-στροφής, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη σύσταση των πρωτεϊνών του και στην ιδιαίτερη δομή της α_2 -καζεΐνης, η οποία προάγει τον σχηματισμό β-στροφών. Αυτές οι δομές είναι σημαντικές για την ευκαμψία των πρωτεϊνών και μπορεί να επηρεάζουν τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων.

Η μικροσκόπηση των δειγμάτων γάλακτος έδειξε πως τα ελαφριά γάλατα, τόσο το αγελαδινό όσο και το κατσικίσιο, εμφανίζουν μικρότερα και αραιότερα κατανομημένα λιπαρά σφαιρίδια σε σύγκριση με τα πλήρη γάλατα, λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε λιπαρά. Η ομοιογένεια στα ελαφριά γάλατα είναι υψηλότερη, καθώς η επεξεργασία και η ομογενοποίηση μειώνουν το μέγεθος των σφαιριδίων. Αντίθετα, τα πλήρη γάλατα παρουσιάζουν μεγαλύτερα λιπαρά σφαιρίδια και ελαφρώς χαμηλότερη ομοιογένεια. Αυτές οι διαφορές σχετίζονται με την περιεκτικότητα σε λιπαρά και επηρεάζουν την υφή και τη λειτουργικότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων. Τα κατσικίσια γάλατα, τόσο τα πλήρη όσο και τα ελαφριά, εμφανίζουν μικρότερα αλλά περισσότερα σε αριθμό λιπαρά σφαιρίδια σε σύγκριση με τα αγελαδινά γάλατα. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη ομοιογένεια, ειδικά στα ελαφριά κατσικίσια γάλατα, λόγω της φύσης των λιπαρών σφαιριδίων τους. Αντίθετα, τα αγελαδινά γάλατα, και ιδιαίτερα τα πλήρη, εμφανίζουν μεγαλύτερα λιπαρά σφαιρίδια, τα οποία κατατάσσονται με χαμηλότερη ομοιογένεια σε σύγκριση με τα κατσικίσια. Αυτές οι διαφορές μπορούν να επηρεάσουν την υφή και τη συμπεριφορά των γαλακτοκομικών προϊόντων.

Η χρήση της φασματοσκοπίας υπερύθρου (ATR-FTIR) σε συνδυασμό με χημειομετρικές αναλύσεις αποδείχθηκε εξαιρετικά χρήσιμη για την ανίχνευση και την

κατανόηση των διαφορών μεταξύ των διαφόρων ειδών γάλακτος. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης των γαλακτοκομικών προϊόντων, την κατανόηση των διαφορών μεταξύ των διάφορων τύπων γάλακτος και την ανάπτυξη νέων προϊόντων που να ικανοποιούν τις διαφορετικές καταναλωτικές ανάγκες και προτιμήσεις.

Υποδείξεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε σημαντικές διαφορές στη χημική σύνθεση και τις δευτεροταγείς δομές των πρωτεϊνών μεταξύ διαφορετικών ειδών γάλακτος χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία υπερύθρου και χημειομετρικές αναλύσεις. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά ακόμα ερευνητικά ερωτήματα που παραμένουν ανοιχτά και αξίζουν περαιτέρω διερεύνηση. Οι υποδείξεις για περαιτέρω έρευνα περιλαμβάνουν τα εξής:

- Ανάλυση της σύστασης και της ποιότητας των γαλάτων χωρίς λακτόζη:

Εφαρμογή φασματοσκοπικών μεθόδων όπως FTIR και NMR για την ανάλυση των διαφορών στη χημική σύσταση μεταξύ γαλάτων με και χωρίς λακτόζη, με έμφαση στη σύγκριση των λιπαρών οξέων, των πρωτεϊνών και των σακχάρων μετά την αφαίρεση της λακτόζης.

- Αξιολόγηση της θρεπτικής αξίας και των αλλεργιογόνων ιδιοτήτων:

Εξέταση του κατά πόσο η αφαίρεση λακτόζης επηρεάζει την αλλεργιογόνο δράση των πρωτεϊνών και τη θρεπτική αξία των γαλάτων χωρίς λακτόζη, ιδιαίτερα σε σύγκριση με το πλήρες και ελαφρύ γάλα.

- Ποιοτική Ανάλυση Αμινοξέων και Λιπαρών Οξέων:

Μια λεπτομερέστερη ανάλυση της ποιότητας και της σύστασης των αμινοξέων και των λιπαρών οξέων στα διαφορετικά είδη γάλακτος θα μπορούσε να παρέχει καλύτερη κατανόηση των διαφορών στις πρωτεΐνες και τα λιπίδια. Τεχνικές όπως η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) και η αέρια χρωματογραφία (GC) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτή την ανάλυση.

- Διερεύνηση Βιολειτουργικών Ιδιοτήτων:

Η ανάλυση των βιολειτουργικών ιδιοτήτων του γάλακτος, όπως η αντιοξειδωτική και αντιμικροβιακή δραστηριότητα, σε σχέση με τη χημική του σύνθεση και τις δευτεροταγείς δομές των πρωτεϊνών θα μπορούσε να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τις ευεργετικές ιδιότητες του γάλακτος και τη δυνατότητα χρήσης του σε ειδικά διατροφικά προϊόντα.

➤ Εφαρμογή σε Άλλα Γαλακτοκομικά Προϊόντα:

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλα γαλακτοκομικά προϊόντα όπως το τυρί, το γιαούρτι και το βούτυρο, για την ανάλυση των διαφορών στη χημική σύσταση και τις δευτεροταγείς δομές των πρωτεϊνών, και πώς αυτές επηρεάζουν τις ιδιότητες και την ποιότητα των προϊόντων.

➤ Μελέτη Επίδρασης Προσθέτων και Συντηρητικών:

Η επίδραση διαφόρων προσθέτων και συντηρητικών στη χημική σύσταση και τη δευτεροταγή δομή των πρωτεϊνών του γάλακτος θα μπορούσε να εξεταστεί για να κατανοηθεί πώς επηρεάζουν την ποιότητα και την ασφάλεια του γάλακτος.

➤ Συσχέτιση με Διατροφικές και Υγείας Ιδιότητες:

Μια σημαντική περιοχή για περαιτέρω έρευνα είναι η συσχέτιση των χημικών και δομικών ιδιοτήτων του γάλακτος με τις διατροφικές του αξίες και τις επιδράσεις στην υγεία. Η μελέτη της επίδρασης του γάλακτος σε διάφορες παθήσεις, όπως η δυσανεξία στη λακτόζη και η αλλεργία στο γάλα, μπορεί να παράσχει πολύτιμες πληροφορίες για την ανάπτυξη εξατομικευμένων διατροφικών λύσεων.

➤ Διαφορές στην Πρωτεΐνη Καζεΐνης:

Η καζεΐνη είναι μια κύρια πρωτεΐνη στο γάλα και παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιοτητές του. Περαιτέρω μελέτη των διαφορών στη σύνθεση και τις δομές της καζεΐνης μεταξύ των ειδών γάλακτος μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την παραγωγή και επεξεργασία του γάλακτος.

Η συνέχιση της έρευνας σε αυτές τις κατευθύνσεις μπορεί να προσφέρει νέες γνώσεις και να βελτιώσει τις πρακτικές παραγωγής και επεξεργασίας γάλακτος, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη καινοτόμων και ποιοτικών γαλακτοκομικών προϊόντων.

5 Βιβλιογραφία

- Amaral, J. S., Mafra, I., Pissard, A., Fernández Pierna, J. A., & Baeten, V. (2018). Milk and milk products. In *FoodIntegrity Handbook* (pp. 1–23). Eurofins Analytics France. <https://doi.org/10.32741/fihb.1.milk>
- Anjos, V. (2020). Near And Mid Infrared Spectroscopy To Assess Milk Products Quality: A Review Of Recent Applications. *Journal of Dairy Research & Technology*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.24966/DRT-9315/100014>
- Antanaitis, R., Juozaitienė, V., Jonike, V., Baumgartner, W., & Paulauskas, A. (2021). Milk lactose as a biomarker of subclinical mastitis in dairy cows. *Animals*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/ani11061736>
- Anusha Siddiqui, S., Mahmood Salman, S. H., Ali Redha, A., Zannou, O., Chabi, I. B., Oussou, K. F., Bhowmik, S., Nirmal, N. P., & Maqsood, S. (2024). Physicochemical and nutritional properties of different non-bovine milk and dairy products: A review. In *International Dairy Journal* (Vol. 148). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105790>
- Arifah, M. F., Irnawati, Ruslin, Nisa, K., Windarsih, A., & Rohman, A. (2022). The Application of FTIR Spectroscopy and Chemometrics for the Authentication Analysis of Horse Milk. *International Journal of Food Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7643959>
- Arora, R., Bhojak, N., & Joshi, R. (2013). *Comparative Aspects of Goat and Cow Milk*. www.ijesi.org
- Balan, B., Dhaulaniya, A. S., Jamwal, R., Amit, Sodhi, K. K., Kelly, S., Cannavan, A., & Singh, D. K. (2020). Application of Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) spectroscopy coupled with chemometrics for detection and quantification of formalin in cow milk. *Vibrational Spectroscopy*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103033>
- Balthazar, C. F., Guimarães, J. T., Rocha, R. S., Pimentel, T. C., Neto, R. P. C., Tavares, M. I. B., Graça, J. S., Alves Filho, E. G., Freitas, M. Q., Esmerino, E. A., Granato, D., Rodrigues, S., Raices, R. S. L., Silva, M. C., Sant’Ana, A. S., & Cruz, A. G. (2021). Nuclear magnetic resonance as an analytical tool for monitoring the quality and

- authenticity of dairy foods. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 108, pp. 84–91). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.011>
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2018). *Χημεία Τροφίμων* (4η Έκδοση). ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
- Belloque, J., & Ramos, M. (1999). *Application of NMR spectroscopy to milk and dairy products*.
- Bouroutzika, E., Proikakis, S., Theodosiadou, E. K., Katsafadou, A. I., Valasi, I., & Tsangaris, G. T. (2022). *A Proteomics Approach in Farm Animals' Milk: A Comprehensive Analysis*. <https://doi.org/10.20944/preprints202210.0097.v1>
- Bramanti, E., Sortino, C., Onor, M., Beni, F., & Raspi, G. (2003). Separation and determination of denatured α 1-, α 2-, β - and κ -caseins by hydrophobic interaction chromatography in cows', ewes' and goats' milk, milk mixtures and cheeses. *Journal of Chromatography A*, 994(1–2), 59–74. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(03\)00483-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(03)00483-7)
- Cadwallader, D. C., Gerard, P. D., & Drake, M. A. (2023). The role of packaging on the flavor of fluid milk. *Journal of Dairy Science*, 106(1), 151–167. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22060>
- Chen, L., Hong, T., Li, Z., Shen, G., Gu, Y., & Han, J. (2023). A comparison of milk fat globule membranes and whey proteomes: New insight into variation nutrient differences between Buffalo, Cow, Goat, and Yak. *Food Chemistry*, 429. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136845>
- Cheong, F. C., Xiao, K., & Grier, D. G. (2009). Technical note: Characterizing individual milk fat globules with holographic video microscopy. *Journal of Dairy Science*, 92(1), 95–99. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1361>
- Cheung, P. C. K., & Mehta, B. M. (2015). *Handbook of Food Chemistry*.
- Conceição, D. G., Gonçalves, B. H. R. F., da Hora, F. F., Faleiro, A. S., Santos, L. S., & Ferrão, S. P. B. (2019). Use of FTIR-ATR spectroscopy combined with multivariate analysis as a screening tool to identify adulterants in raw milk. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30(4), 780–785. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180208>

- Contarini, G., & Povolo, M. (2013). Phospholipids in milk fat: Composition, biological and technological significance, and analytical strategies. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 14, Issue 2, pp. 2808–2831). <https://doi.org/10.3390/ijms14022808>
- Dadousis, C., Cipolat-Gotet, C., Stocco, G., Ferragina, A., Dettori, M. L., Pazzola, M., do Nascimento Rangel, A. H., & Vacca, G. M. (2021). Goat farm variability affects milk Fourier-transform infrared spectra used for predicting coagulation properties. *Journal of Dairy Science*, *104*(4), 3927–3935. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19587>
- Daniloski, D., McCarthy, N. A., O’Callaghan, T. F., & Vasiljevic, T. (2022). Authentication of β -casein milk phenotypes using FTIR spectroscopy. *International Dairy Journal*, *129*. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105350>
- Dasriya, V., Agrawal, A., Sharma, A., & Sharma, M. (2024). *LACTOSE-FREE DAIRY PRODUCTS*.
- De Marchi, M., Penasa, M., Zidi, A., & Manuelian, C. L. (2018). Invited review: Use of infrared technologies for the assessment of dairy products—Applications and perspectives. *Journal of Dairy Science*, *101*(12), 10589–10604. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15202>
- Dekker, P. J. T., Koenders, D., & Bruins, M. J. (2019). Lactose-free dairy products: Market developments, production, nutrition and health benefits. In *Nutrients* (Vol. 11, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nu11030551>
- Demiati, Wahyuni, W. T., Rafi, M., & Putra, B. R. (2023). The detection of goat milk adulteration with cow milk using a combination of voltammetric fingerprints and chemometrics analysis. *Chemical Papers*, *77*(8), 4307–4317. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02780-w>
- Di Girolamo, F., Masotti, A., Salvatori, G., Scapatucci, M., Muraca, M., & Putignani, L. (2014). A sensitive and effective proteomic approach to identify she-donkey’s and goat’s milk adulterations by MALDI-TOF MS fingerprinting. *International Journal of Molecular Sciences*, *15*(8), 13697–13719. <https://doi.org/10.3390/ijms150813697>

- Diaz-Olivares, J. A., Gote, M. J., Saeys, W., Adriaens, I., & Aernouts, B. (2024). Near-infrared spatially-resolved spectroscopy for milk quality analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108783>
- D’Incecco, P., & Pellegrino, L. (2018). MICROSCOPY TECHNIQUES ARE EFFECTIVE TOOLS FOR IMPLEMENTING STUDIES IN DAIRY SCIENCE AND TECHNOLOGY. *Istituto Lombardo - Accademia Di Scienze e Lettere • Incontri Di Studio*. <https://doi.org/10.4081/incontri.2018.437>
- Eurostat. (2022). *Milk and milk product statistics*.
- Facioni, M. S., Raspini, B., Pivari, F., Dogliotti, E., & Cena, H. (2020). Nutritional management of lactose intolerance: The importance of diet and food labelling. In *Journal of Translational Medicine* (Vol. 18, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12967-020-02429-2>
- FAO. (2019). *Chapter 7. Dairy and dairy products*. <https://doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>
- Ferreira, I. M. P. L. V., & Caçote, H. (2003). Detection and quantification of bovine, ovine and caprine milk percentages in protected denomination of origin cheeses by reversed-phase high-performance liquid chromatography of beta-lactoglobulins. *Journal of Chromatography A*, 1015(1–2), 111–118. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(03\)01261-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(03)01261-5)
- Foroutan, A., Guo, A. C., Vazquez-Fresno, R., Lipfert, M., Zhang, L., Zheng, J., Badran, H., Budinski, Z., Mandal, R., Ametaj, B. N., & Wishart, D. S. (2019). Chemical Composition of Commercial Cow’s Milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(17), 4897–4914. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00204>
- Gagriaire, V., Jardin, J., Jan, G., & Lortal, S. (2009). Invited review: Proteomics of milk and bacteria used in fermented dairy products: from qualitative to quantitative advances. In *Journal of Dairy Science* (Vol. 92, Issue 3, pp. 811–825). American Dairy Science Association. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1476>
- George, A. D., Gay, M. C. L., Trengove, R. D., & Geddes, D. T. (2018). Human milk lipidomics: Current techniques and methodologies. In *Nutrients* (Vol. 10, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nu10091169>

- Goulding, D. A., Fox, P. F., & O'Mahony, J. A. (2019). Milk proteins: An overview. In *Milk Proteins: From Expression to Food* (pp. 21–98). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00002-5>
- Hong, T., Yin, J. Y., Nie, S. P., & Xie, M. Y. (2021). Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective. *Food Chemistry: X*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100168>
- Hu, F., Furihata, K., Kato, Y., & Tanokura, M. (2007). Nondestructive quantification of organic compounds in whole milk without pretreatment by two-dimensional NMR spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(11), 4307–4311. <https://doi.org/10.1021/jf062803x>
- Iffah Kamilah binti Md Suhaini, Norliza binti Julmohammad, Tharshini Govindasamy, Emeline Tan, Sabrina Soloi, Norziana Julmohamad, & Md Jahurul Haque Akanda. (2024). Quantification of Adulterant Residues in UHT Milk Products using ATR-FTIR Spectroscopy Coupled with Multivariate Analysis. *Journal of Advanced Research Design*, 115(1), 1–13. <https://doi.org/10.37934/ard.115.1.113>
- Imperiale, S., Morozova, K., Ferrentino, G., & Scampicchio, M. (2023). Analysis of milk with liquid chromatography–mass spectrometry: a review. In *European Food Research and Technology* (Vol. 249, Issue 4, pp. 861–902). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04197-3>
- Jaiswal, P., Jha, S. N., Borah, A., Gautam, A., Grewal, M. K., & Jindal, G. (2015). Detection and quantification of soymilk in cow-buffalo milk using Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared spectroscopy (ATR-FTIR). *Food Chemistry*, 168, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.010>
- Jin, H., Dong, G. M., Wu, H. Y., Yang, Y. R., Huang, M. Y., Wang, M. Y., & Yang, R. J. (2023). Identification of adulterated milk based on auto-correlation spectra. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121987>
- Kailasapathy, K. (2015). Chemical Composition, Physical, and Functional Properties of Milk and Milk Ingredients. In *Dairy Processing and Quality Assurance* (pp. 77–105). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118810279.ch04>

- Kamal, M., & Karoui, R. (2015). Analytical methods coupled with chemometric tools for determining the authenticity and detecting the adulteration of dairy products: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 46, Issue 1, pp. 27–48). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.007>
- Karoui, R., & De Baerdemaeker, J. (2007). A review of the analytical methods coupled with chemometric tools for the determination of the quality and identity of dairy products. In *Food Chemistry* (Vol. 102, Issue 3, pp. 621–640). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.042>
- Kasalová, E., Aufartová, J., Krčmová, L. K., Solichová, D., & Solich, P. (2015). Recent trends in the analysis of vitamin D and its metabolites in milk - A review. In *Food Chemistry* (Vol. 171, pp. 177–190). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.102>
- Kontominas, M. G. (2010). *Packaging and the Shelf Life of Milk*.
- Korac, S., Huremovic, J., Zero, S., & Ljubijankic, N. (2023). Content of Metals in Cow, Sheep and Goat Milk Samples. *Glasnik Hemicara i Tehnologa Bosne i Hercegovine, Issue 60*. <https://doi.org/10.35666/2232-7266.2023.60.01>
- Korma, S. A., Li, L., Wei, W., Liu, P., Zhang, X., Bakry, I. A., An, P., Abdrabo, K. A. E., Manzoor, M. F., Umair, M., Cacciotti, I., Lorenzo, J. M., & Conte-Junior, C. A. (2022). A Comparative Study of Milk Fat Extracted from the Milk of Different Goat Breeds in China: Fatty Acids, Triacylglycerols and Thermal and Spectroscopic Characterization. *Biomolecules*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/biom12050730>
- Kumar, H., Yadav, D., Kumar, N., & Seth, R. (2016). *Nutritional and nutraceutical properties of goat milk-A review*. <https://www.researchgate.net/publication/301693090>
- Lei, Y., Zhou, Q., Zhang, Y. L., Chen, J. B., Sun, S. Q., & Noda, I. (2010). Analysis of crystallized lactose in milk powder by Fourier-transform infrared spectroscopy combined with two-dimensional correlation infrared spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, 974(1–3), 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.12.030>
- Li, A., Zheng, J., Han, X., Yang, S., Cheng, S., Zhao, J., Zhou, W., & Lu, Y. (2023). Advances in Low-Lactose/Lactose-Free Dairy Products and Their Production. In *Foods*

- (Vol. 12, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/foods12132553>
- Li, J. Y., Ge, Q., Liu, B., Gao, Z. P., & Guo, C. F. (2023). Quantification of cow milk in adulterated goat milk by HPLC-MS/MS using N-acetylglucosamine as a reliable biomarker of cow milk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105583>
- Li, Q., Yu, Z., Zhu, D., Meng, X., Pang, X., Liu, Y., Frew, R., Chen, H., & Chen, G. (2017). The application of NMR-based milk metabolite analysis in milk authenticity identification. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(9), 2875–2882. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8118>
- Li, W., Huang, W., Fan, D., Gao, X., Zhang, X., Meng, Y., & Liu, T. C. Y. (2022). Rapid quantification of goat milk adulteration with cow milk using Raman spectroscopy and chemometrics. *Analytical Methods*, 15(4), 455–461. <https://doi.org/10.1039/d2ay01697d>
- Li, Y., Liu, X., Meng, L., & Wang, Y. (2018). Qualitative and quantitative analysis of furosine in fresh and processed ginsengs. *Journal of Ginseng Research*, 42(1), 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.12.004>
- Lima, M. S. R., Dimenstein, R., & Ribeiro, K. D. S. (2014). Vitamin e concentration in human milk and associated factors: A literature review. In *Jornal de Pediatria* (Vol. 90, Issue 5, pp. 440–448). Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/j.jpmed.2014.04.006>
- Liu, B., Si, J., Zhao, F., Wang, Q., Wang, Y., Li, J., Li, C., & Li, T. (2019). Rapid detection of cow milk adulteration/contamination in goat milk by a lateral flow colloidal gold immunoassay strip. *Journal of Dairy Research*, 86(1), 94–97. <https://doi.org/10.1017/S0022029919000116>
- Lu, N., Wang, J., Chen, Z., Zhang, X., Chen, C., & Wang, S. (2021). The effect of adding phospholipids before homogenization on the properties of milk fat globules. *LWT*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111659>
- Ly, B. C. K., Dyer, E. B., Feig, J. L., Chien, A. L., & Del Bino, S. (2020). Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective

- Skin Color Measurement. In *Journal of Investigative Dermatology* (Vol. 140, Issue 1, pp. 3-12.e1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>
- Mafra, I., Roxo, Á., Ferreira, I. M. P. L. V. O., & Oliveira, M. B. P. P. (2007). A duplex polymerase chain reaction for the quantitative detection of cows' milk in goats' milk cheese. *International Dairy Journal*, *17*(9), 1132–1138. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2007.01.009>
- Márquez, M. J., Brizuela, A. B., Davies, L., & Brandán, S. A. (2015). Spectroscopic and structural studies on lactose species in aqueous solution combining the HATR and Raman spectra with SCRF calculations. *Carbohydrate Research*, *407*, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2015.01.019>
- Marshall, A. G., & Hendrickson, C. L. (2008). High-resolution mass spectrometers. In *Annual Review of Analytical Chemistry* (Vol. 1, Issue 1, pp. 579–599). <https://doi.org/10.1146/annurev.anchem.1.031207.112945>
- Martinho, A., Eckersall, D., & Miller, I. (2018). Proteomics in Domestic Animals: from Farm to Systems Biology. In *Proteomics in Domestic Animals: from Farm to Systems Biology*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69682-9>
- McSweeney, P. L. H., & Fox, P. F. (2013). *Advanced Dairy Chemistry*.
- Milovanovic, B., Djekic, I., Miocinovic, J., Djordjevic, V., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Mörlein, D., & Tomasevic, I. (2020). What is the color of milk and dairy products and how is it measured? In *Foods* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods9111629>
- Minić, D. A. P., Milinčić, D. D., Kolašinac, S., Rac, V., Petrović, J., Soković, M., Banjac, N., Lađarević, J., Vidović, B. B., Kostić, A., Pavlović, V. B., & Pešić, M. B. (2023). Goat milk proteins enriched with *Agaricus blazei* Murrill ss. Heinem extracts: Electrophoretic, FTIR, DLS and microstructure characterization. *Food Chemistry*, *402*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134299>
- Mkadem, W., Indio, V., Belguith, K., Oussaief, O., Savini, F., Giacometti, F., El Hatmi, H., Serraino, A., De Cesare, A., & Boudhrioua, N. (2023). Influence of Fermentation Container Type on Chemical and Microbiological Parameters of Spontaneously Fermented Cow and Goat Milk. *Foods*, *12*(9). <https://doi.org/10.3390/foods12091836>

- Moatsou, G., & Park, Y. W. (2017). Goat milk: Goat milk products: Types of products, manufacturing technology, chemical composition, and marketing. In *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals: Second Edition* (pp. 84–150). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119110316.ch2.3>
- Mohammed, M. E. A., Brima, E. I., Alasidy, A., Qurishi, N., Algarni, M., & Alshehri, B. M. A. (2022). Physicochemical properties and some mineral concentration of milk samples from different animals and altitudes. *Open Chemistry*, *20*(1), 494–504. <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0171>
- Mohan, M. S., O’Callaghan, T. F., Kelly, P., & Hogan, S. A. (2020). Milk fat: opportunities, challenges and innovation. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (pp. 1–33). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1778631>
- Monaci, L., & Van Hengel, A. J. (2007). Effect of heat treatment on the detection of intact bovine β -lactoglobulins by LC mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *55*(8), 2985–2992. <https://doi.org/10.1021/jf063083x>
- Naik, H. D., Venkatesh, M., & Kumar, H. A. (2018). Isolation and Characterisation of Bioactive Peptides Components from Caprine Milk Casein Fractions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *7*(11), 2020–2026. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2018.711.229>
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftr spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, *4*(1), 97–118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Nayik, G. A., Gull, A., Masoodi, L., Navaf, M., Sunooj, K. V., Ucak, İ., Afreen, M., Kaur, P., Rehal, J., Jagdale, Y. D., Ramniwas, S., Singh, R., & Mugabi, R. (2024). Milk proteins: chemistry, functionality and diverse industrial applications. In *Cogent Food and Agriculture* (Vol. 10, Issue 1). Informa Healthcare. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2377686>
- Nicolaou, N., Xu, Y., & Goodacre, R. (2011). MALDI-MS and multivariate analysis for the detection and quantification of different milk species. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *399*(10), 3491–3502. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-4728-6>

- Park, Y. W., Juárez, M., Ramos, M., & Haenlein, G. F. W. (2007). Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, *68*(1–2), 88–113. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.09.013>
- Pathare, P. B., Shaa, M., & Editors, R. (2022). *Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables*.
- Pinto, P. A., Anconi, A. C. S. A., de Abreu, L. R., Magalhães, E. J., & Nunes, C. A. (2021). Strategies to determine lactose in cow milk by mid infrared spectroscopy. *Journal of Food Composition and Analysis*, *104*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104176>
- Piras, C., Hale, O. J., Reynolds, C. K., Jones, A. K., Taylor, N., Morris, M., & Cramer, R. (2021). Speciation and milk adulteration analysis by rapid ambient liquid MALDI mass spectrometry profiling using machine learning. *Scientific Reports*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82846-5>
- Poonia, A., Jha, A., Sharma, R., Singh, H. B., Rai, A. K., & Sharma, N. (2017). Detection of adulteration in milk: A review. In *International Journal of Dairy Technology* (Vol. 70, Issue 1, pp. 23–42). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12274>
- Qin, Y., Cheng, M., Wang, L., Huang, M., Wang, J., & Wang, C. (2021). Comparative study on the microstructure and functional properties of casein in goat milk processed by different methods. *International Journal of Food Science and Technology*, *56*(4), 1682–1689. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14789>
- Queiroz, E. S., Lopes Rezende, A. L., Perrone, Í. T., Francisquini, J. d. A., Fernandes de Carvalho, A., Germano Alves, N. M., Cappa de Oliveira, L. F., & Stephani, R. (2021). Spray drying and characterization of lactose-free goat milk. *LWT*, *147*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111516>
- Roy, D., Ye, A., Moughan, P. J., & Singh, H. (2020). Composition, Structure, and Digestive Dynamics of Milk From Different Species—A Review. In *Frontiers in Nutrition* (Vol. 7). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.577759>
- Roy, D., Ye, A., Moughan, P. J., & Singh, H. (2021). Structural changes in cow, goat, and sheep skim milk during dynamic in vitro gastric digestion. *Journal of Dairy Science*, *104*(2), 1394–1411. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18779>

- Ruckold, S., Grobecker, K. H., & Isengard, H.-D. (2000). *Determination of the contents of water and moisture in milk powder*.
- Rysova, L., Legarova, V., Pacakova, Z., Hanus, O., Nemeckova, I., Klimesova, M., & Havlik, J. (2021). Detection of bovine milk adulteration in caprine milk with N-acetyl carbohydrate biomarkers by using ¹H nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, *104*(9), 9583–9595. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20077>
- Saji, R., Ramani, A., Gandhi, K., Seth, R., & Sharma, R. (2024). Application of FTIR spectroscopy in dairy products: A systematic review. *Food and Humanity*, *2*, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100239>
- Scaloni, A., Perillo, V., Franco, P., Fedele, E., Froio, R., Ferrara, L., & Bergamo, P. (2002). *Characterization of heat-induced lactosylation products in caseins by immunoenzymatic and mass spectrometric methodologies*. www.bba-direct.com
- Schiele, S. A., Meinhardt, R., Eder, C., & Briesen, H. (2020). ATR-FTIR spectroscopy for in-line anomer concentration measurements in solution: A case study of lactose. *Food Control*, *110*. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107024>
- Sen, C., Ray, P. R., & Bhattacharyya, M. (2021). A critical review on metabolomic analysis of milk and milk products. In *International Journal of Dairy Technology* (Vol. 74, Issue 1, pp. 17–31). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12745>
- Sonvanshi, V., Gandhi, K., Ramani, A., Sharma, R., & Seth, R. (2024). ATR-FTIR coupled with chemometric techniques to detect vanaspati ghee (hydrogenated vegetable oil) adulteration in milk fat. *Results in Chemistry*, *7*. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101343>
- Stergiadis, S., Nørskov, N. P., Purup, S., Givens, I., & Lee, M. R. F. (2019). Comparative nutrient profiling of retail goat and cow milk. *Nutrients*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/nu11102282>
- Stocco, G., Dadousis, C., Pazzola, M., Vacca, G. M., Dettori, M. L., Mariani, E., & Cipolat-Gotet, C. (2023). Prediction accuracies of cheese-making traits using Fourier-transform infrared spectra in goat milk. *Food Chemistry*, *403*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134403>

- Sundekilde, U. K., Larsen, L. B., & Bertram, H. C. (2013). NMR-Based Milk Metabolomics. *Metabolites*, 3(2), 204–222. <https://doi.org/10.3390/metabo3020204>
- Tehrani, T., Pont, L., & Benavente, F. (2024). Rapid detection and quantification of milk adulteration using MALDI-MS protein profiling and multivariate calibration. *Journal of Food Composition and Analysis*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106147>
- Thummajitsakul, S., Paensanit, P., Saeieo, T., Sirirat, J., & Silprasit, K. (2023). FTIR and multivariate analysis of total phenolic content, antioxidant and anti-amylase activities of extracts and milk of *Glycine max L.* and *Phaseolus vulgaris L.* *Electronic Journal of Biotechnology*, 64, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2023.04.001>
- Toxqui-Terán, A., Lara-Mota, E. E., Leyva-Porras, C. C., Alvarez-Salas, C., & Saavedra-Leos, M. Z. (2024). Moisture sorption phenomena of lactose anomers and evaluation of morphological stability. *Materials Chemistry and Physics*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129486>
- Turck, D. (2013). Cow's milk and goat's milk. *World Review of Nutrition and Dietetics*, 108, 56–62. <https://doi.org/10.1159/000351485>
- Villar-Hernández, B. de J., Amalfitano, N., Cecchinato, A., Pazzola, M., Vacca, G. M., & Bittante, G. (2023). Phenotypic Analysis of Fourier-Transform Infrared Milk Spectra in Dairy Goats. *Foods*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/foods12040807>
- Visoka, Y., Majadi, M., Kovacs, Z., & Gecaj, R. M. (2023). Utilizing Near-Infrared Spectroscopy for Discriminant Analysis of Goat Milk Composition across Diverse Breeds and Lactation Seasons. 64. <https://doi.org/10.3390/foods2023-15072>
- Wang, L., Wu, T., Zhang, Y., Yang, K., He, Y., Deng, K., Liang, C., & Gu, Y. (2023). Comparative studies on the nutritional and physicochemical properties of yoghurts from cows', goats', and camels' milk powder. *International Dairy Journal*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105542>
- Wang, Y., Wu, J., Zhang, H., Yang, X., Gu, R., Liu, Y., & Wu, R. (2024). Comprehensive review of milk fat globule membrane proteins across mammals and lactation periods in health and disease. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2387763>

- Wiercigroch, E., Szafraniec, E., Czamara, K., Pacia, M. Z., Majzner, K., Kochan, K., Kaczor, A., Baranska, M., & Malek, K. (2017). Raman and infrared spectroscopy of carbohydrates: A review. In *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* (Vol. 185, pp. 317–335). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.05.045>
- Windarsih, A., Irnawati, & Rohman, A. (2020). Application of ftir-atr spectroscopy and chemometrics for the detection and quantification of lard oil in bovine milk fat. *Food Research*, 4(5), 1732–1738. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(5\).087](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(5).087)
- Wishart, D. S. (2008). Metabolomics: applications to food science and nutrition research. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 19, Issue 9, pp. 482–493). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.03.003>
- Ye, M. P., Zhou, R., Shi, Y. R., Chen, H. C., & Du, Y. (2017). Effects of heating on the secondary structure of proteins in milk powders using mid-infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 89–95. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11443>
- Yulyana, A., Rohman, A., Arifah, M. F., Windarsih, A., & Nisa, K. (2024). Authentication analysis of goat milk from cow milk using Fourier Transform Infrared spectroscopy and chemometrics. *Food Research*, 8(2), 459–466. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.8\(2\).1025](https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(2).1025)
- Zachar, P., Soltes, M., Kasarda, R., Novotny, J., Novikmecova, M., & Marcincakova, D. (2011). *Analytical methods for the species identification*.
- Zhang, Y., Zheng, Z., Liu, C., Tan, C. ping, Xie, K., & Liu, Y. (2022). A comparative study between freeze-dried and spray-dried goat milk on lipid profiling and digestibility. *Food Chemistry*, 387. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132844>
- Zhao, L., Wang, J., & Mao, X. (2022). Composition and interfacial properties play key roles in different lipid digestion between goat and cow milk fat globules in vitro. *Food Chemistry*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131538>
- Zhao, X., Wang, Y., Liu, X., Jiang, H., Zhao, Z., Niu, X., Li, C., Pang, B., & Li, Y. (2022). Single-and Multiple-Adulterants Determinations of Goat Milk Powder by NIR Spectroscopy Combined with Chemometric Algorithms. *Agriculture (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/agriculture12030434>

Κεχαγιάς, Χ., & Τσάκαλη, Ε. (2017). *Επιστήμη και Τεχνολογία Γάλακτος και Γαλακτοκομικών Προϊόντων* (1st ed.). ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ.

Κώδικας Τροφίμων και Ποτών. (2016). *Άρθρο 80* (Vol. 366).

Ιστοσελίδες

- https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Milk_and_milk_product_statistics#cite_note-1
- <https://hcp.kendamil.com/digestive-benefits-of-goat-milk-infant-formula/>
- <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/upright/cx23/>