



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής
Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση
Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ειρήνης Σ. Ζαφείρη

Επιβλέπων : Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής
Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση
Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ειρήνης Σ. Ζαφείρη

Επιβλέπων : Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Ιουλίου 2025.

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025

.....
Ειρήνη Σ. Ζαφείρη

Κάτοχος μεταπτυχιακού προγράμματος [Τεχνοοικονομικά Συστήματα] της Σχολής
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ειρήνη Ζαφείρη 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων για τη συστηματική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων με σκοπό τον εντοπισμό βέλτιστων συνθηκών πειράματος για την παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών (GOS). Στη εργασία αξιολογούνται τα πειραματικά αποτελέσματα ενζυμικών αντιδράσεων στο τυρόγαλο, ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας γάλακτος, με στόχο την παραγωγή GOS, όπου εμφανίζουν υψηλή διατροφική και φαρμακευτική αξία.

Το τυρόγαλο αποτελεί παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής τυριού, το οποίο είναι πλούσιο σε διάφορα συστατικά καθιστώντας το επιβλαβές για το περιβάλλον. Ένα από τα συστατικά του είναι η υψηλή συγκέντρωση σε λακτόζη, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί ως υπόστρωμα για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας μέσω ενζυμικών αντιδράσεων. Ειδικότερα, η επιλογή του ενζύμου β-γαλακτοζιδάση είναι ευρέως διαδεδομένη για την μετατροπή της λακτόζης σε γαλακτοολιγοσακχαρίτες, οι οποίες ανήκουν στην ομάδα των πρεβιοτικών ουσιών. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται εκτενής αναφορά στη χημική σύσταση του τυρογάλακτος, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της λακτόζης, τις τεχνικές ανάκτησής της και τις ενζυμικές μεθόδους μετατροπής της. Παρουσιάζεται ο τρόπος δράσης του ενζύμου β-γαλακτοζιδάση και ο μηχανισμός παραγωγής GOS, οι παράμετροι επίδρασης της ενζυμικής αντίδρασης καθώς και ο ορισμός των γαλακτοολιγοσακχαριτών και η δράση τους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο των πολυκριτηριακών μεθόδων επικεντρώνοντας στις μεθόδους Pareto, TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE. Μέσα από μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδύεται η εφαρμογή των μεθόδων αυτών σε διάφορους κλάδους για την εκτίμηση κινδύνων ή την αξιολόγηση προσφορών σε επίπεδο προμηθευτών ή πρώτων υλών. Επιπλέον, γίνεται αναφορά ως προς την χρήση των μεθόδων αυτών σε βιομηχανίες προκειμένου να βελτιστοποιηθούν διάφορες παραγωγικές διαδικασίες. Η πολυκριτηριακή ανάλυση στη παρούσα διπλωματική περιλάμβανε την αξιολόγηση 252 πειραματικών αποτελεσμάτων ως προς την απόδοση σε GOS, τον χρόνο ενζυμικής αντίδρασης, την συγκέντρωση της παραγόμενης γαλακτόζης και την υπολειπόμενη συγκέντρωση λακτόζης. Με την εφαρμογή της μεθόδου Pareto επιτεύχθηκε ο εντοπισμός του μετώπου Pareto, όπου οι κυριαρχούμενες λύσεις ήταν μόλις 69. Τέλος, η ανάλυση ολοκληρώθηκε με την εφαρμογή των TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE ώστε να εντοπιστούν τα πειράματα με την καλύτερη ισορροπία μεταξύ των κριτηρίων.

Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης δείχνουν ότι δεν υπάρχει μία μοναδική ιδανική λύση. Οι καλύτερες επιλογές εξαρτώνται από τις προτεραιότητες του εκάστοτε αποφασίζοντα (π.χ. έμφαση στην υψηλή απόδοση ή στον ελάχιστο χρόνο). Η μελέτη αναδεικνύει τη χρησιμότητα των MCDA μεθόδων στην αξιολόγηση πολύπλοκων πειραματικών δεδομένων, προσφέροντας ένα εργαλείο για στοχευμένη βελτιστοποίηση βιομηχανικών διεργασιών. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται η τεχνική δυνατότητα μετατροπής του τυρογάλακτος σε GOS, προωθώντας την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη βιομηχανική παραγωγή.

Λέξεις Κλειδιά: Πολυκριτηριακές μέθοδοι, βέλτιστη λύση, τυρόγαλα, ενζυμική παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών

Abstract

This thesis focuses on the use of multi-criteria decision-making (MCDM) methods for the systematic evaluation of experimental results, with the aim of identifying optimal experimental conditions for the production of galacto-oligosaccharides (GOS). The study evaluates the experimental results of enzymatic reactions in whey, a by-product of the dairy industry, targeting GOS production due to their high nutritional and pharmaceutical value.

Whey is a by-product of the cheese-making process and is rich in various components, making it potentially harmful to the environment. One of its main constituents is lactose, which can be utilized as a substrate for the production of high-value-added products through enzymatic reactions. Specifically, the use of the enzyme β -galactosidase is widely applied for the conversion of lactose into galacto-oligosaccharides, which belong to the group of prebiotic compounds. This thesis includes an extensive discussion on the chemical composition of whey, the advantages and disadvantages of lactose, techniques for its recovery, and enzymatic methods for its conversion. The mode of action of β -galactosidase and the mechanism of GOS production are presented, along with the key parameters affecting the enzymatic reaction (pH, temperature, substrate and enzyme concentration, and reaction time), as well as the definition and function of galacto-oligosaccharides.

Subsequently, the theoretical and mathematical background of multi-criteria decision-making methods is presented, focusing on the Pareto, TOPSIS, VIKOR, and PROMETHEE methods. Through a literature review, the application of these methods across various sectors emerges—for risk assessment, supplier or raw material evaluation, and optimization of industrial production processes.

In this thesis, multi-criteria analysis was applied to evaluate 252 experimental results based on GOS yield, enzymatic reaction time, the concentration of produced galactose, and the residual lactose concentration. By applying the Pareto method, the Pareto front was identified, with only 69 non-dominated solutions. Finally, the analysis concluded with the application of TOPSIS, VIKOR, and PROMETHEE methods to identify the experiments that achieved the best balance between high GOS yield, galactose concentration, low reaction time, and minimal residual lactose.

The results of the multi-criteria analysis indicate that there is no single ideal solution. The best choices depend on the priorities of each decision-maker (e.g., emphasis on high yield versus minimal reaction time). The study highlights the usefulness of MCDA methods in evaluating complex experimental data, offering a tool for targeted optimization of industrial processes. At the same time, the technical feasibility of converting whey into GOS is confirmed, promoting circular economy principles and sustainable industrial production.

Keywords: Multi-criteria methods, optimal solution, whey, enzymatic production of galacto-oligosaccharides

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	7
Abstract	9
Πίνακας Περιεχομένων	11
Κατάλογος Εικόνων	12
Κατάλογος Πινάκων.....	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	15
1.1 Διερεύνηση υπάρχουσας γνώσης	15
1.2 Σκοπός και αντικείμενο μελέτης	16
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας	16
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο	17
2.1 Γλυκός ορός ή Τυρόγαλα	17
2.1.1 Παραγωγική διαδικασία τυριού	19
2.1.2 Συστατικά τυρογαλακτος	20
2.1.3 Γιατί αποτελεί πρόβλημα ο γλυκός ορός και ποια η αξιοποίησή του	22
2.2 Αξιοποίηση λακτόζης μέσω ενζυμικών αντιδράσεων.....	23
2.2.1 Λακτόζη.....	23
2.2.2 Ανάκτηση λακτόζης τυρογάλακτος.....	25
2.2.3 Το φαινόμενο της κρυστάλλωσης της λακτόζης.....	26
2.2.4 Δυσανεξία στη λακτόζη.....	27
2.2.5 Εφαρμογές της λακτόζης.....	27
2.3 Ενζυμική μετατροπή της λακτόζης	28
2.4 Βιομηχανική αξιοποίηση της β-γαλακτοζιδάσης	31
2.5 Γαλακτοολιγοσακχαρίτες	31
2.5.1 Παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών	32
2.5.2 Χαρακτηρισμός γαλακτοολιγοσακχαριτών.....	34
2.5.3 Τα οφέλη των γαλακτοολιγοσακχαριτών στην ανθρώπινη υγεία	34
2.6 Πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων	35
2.6.1 Ανάλυση πολυκριτηριακών μεθόδων.....	36
2.6.3 Μέθοδος TOPSIS	38
2.6.4 Μέθοδος VIKOR.....	40
2.6.5 Μέθοδος PROMETHEE	42
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία.....	45
Κεφάλαιο 4: Ανάλυση – Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	47
4.1 Εύρεση εφικτών λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto	47
4.2 Πολυκριτηριακή ανάλυση εφικτών λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto	48
4.2.1 Μέθοδος TOPSIS	48
4.2.2 Μέθοδος VIKOR.....	50
4.2.3 Μέθοδος PROMETHEE	53
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - Προτάσεις	57
Βιβλιογραφία.....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	65

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Κατηγορίες προϊόντων γάλακτος.....	17
Εικόνα 2.2: Παραγωγική διαδικασία παρασκευής τυριού	20
Εικόνα 2.3: 3D απεικόνιση β-γαλακτογλοβουλίνης.....	21
Εικόνα 2.4: Τρισδιάστατη δομή α-γαλακτοαλβουμίνης.....	21
Εικόνα 2.5: Σύνθεση λακτόζης.....	24
Εικόνα 2.6: Ανωμερείς μορφές λακτόζης	24
Εικόνα 2.7: Βιομηχανική διαδικασία ανάκτησης της λακτόζης	25
Εικόνα 2.8: Μορφή Tomahawk κρυστάλλου λακτόζης	26
Εικόνα 2.9: Σχέση μεταξύ διάφορων μορφών λακτόζης.....	27
Εικόνα 2.10: Τα παράγωγα της λακτόζης.....	28
Εικόνα 2.11: Μηχανισμός αντίδρασης β-γαλακτοζιδάσης και λακτόζης	29
Εικόνα 2.12: Απεικόνιση β-γαλακτοζιδάσης προέλευσης από <i>Penicillium spp.</i>	29
Εικόνα 2.13: Μηχανισμός υδρόλυσης λακτόζης από β-γαλακτοζιδάσης	30
Εικόνα 2.14: Μηχανισμός αντίδρασης β-γαλακτοζιδάσης σε γαλακτοζίδια.....	31
Εικόνα 2.15: Χημική παραγωγή ολιγοσακχαριτών, (α) β-(1→4) δεσμός και (β) β-(1→6) δεσμός	32
Εικόνα 2.16: Αντιδράσεις υδρόλυσης της λακτόζης και τρανσγαλακτοζυλίωσης με χρήση ενζύμου.....	33
Εικόνα 2.17: Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας υποστήριξης πολλαπλών κριτηρίων	36
Εικόνα 2.18: Συμβολή θεωρητικών ρευμάτων στην επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων	37
Εικόνα 2.19: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας	45

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση όξινου και γλυκού ορού.....	18
Πίνακας 2.2: Φυσικές ιδιότητες ισομερών της λακτόζης.....	25
Πίνακας 3.1 Πειραματικές συνθήκες ενζυμικής αντίδρασης.....	46
Πίνακας 4.1: Κατάταξη λύσεων Pareto εφαρμόζοντας μέθοδο TOPSIS	49
Πίνακας 4.2: Κατάταξη λύσεων Pareto εφαρμόζοντας μέθοδο VIKOR.....	51
Πίνακας 4.3: Κατάταξη λύσεων Pareto εφαρμόζοντας μέθοδο PROMETHEE	54

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Διερεύνηση υπάρχουσας γνώσης

Στην ερευνητική κοινότητα έχει μελετηθεί η παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών μέσω ενζυμικής μετατροπής της λακτόζης. Το 2012 οι Palai, Mitra και Bhattacharya μελέτησαν την σύνθεση GOS κάνοντας χρήση του ενζύμου από *Bacillus circulans* ενώ το 2015 οι Fisher και Kleinschmidt χρησιμοποίησαν *Aspergillus oryzae* και *Kluyveromyces lactis* για τη σύνθεση GOS από διάφορους τύπους ορού. Τρία χρόνια αργότερα, οι τελευταίοι εξέτασαν συνδυασμούς ενζύμων από *Cryptococcus laurenti*, *A. oryzae* και *K. Lactis* προκειμένου να μελετήσουν την απόδοση της αντίδρασης σε GOS.

Όσον αφορά τις πολυκριτηριακές μεθόδους αποφάσεων η χρήση τους για την αξιολόγηση και ιεράρχηση των εναλλακτικών λύσεων είναι διαδεδομένη σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Στην βιομηχανία τροφίμων ο Cheng & Zhang (2023) ανέπτυξαν ένα βελτιωμένο μοντέλο VIKOR για την εκτίμηση των κινδύνων ασφάλειας στη διαδικασία παραγωγής τροφίμων. Η Serpa et al. (2022) εφάρμοσε τις μεθόδους fuzzy AHP και fuzzy TOPSIS σε αλυσίδα αρτοποιίας, προκειμένου να εντοπιστούν εναλλακτικές λύσεις για τη βελτίωση της ποιότητας της παραγωγικής διεργασίας και της βιωσιμότητας. Μία πιο πρόσφατη μελέτη από τον Gülmaz (2025), προτείνει έναν υβριδικό συνδυασμό TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE II για την επιλογή βέλτιστης τεχνολογίας ξήρανσης ροδάκινων. Στη μελέτη αυτή αξιολογήθηκαν οκτώ εναλλακτικές τεχνολογίες βάσει 12 κριτηρίων (ποιότητα προϊόντος, κόστος, ενεργειακή κατανάλωση κ.ά.), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η ξήρανση υπό κενό ήταν η καλύτερη λύση στην πλειονότητα σεναρίων.

Στον τομέα της φαρμακοβιομηχανίας μελέτες, όπως της Raveena & Umamaheswari (2025) παρουσίασε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο MCDM για βιώσιμη επιλογή προμηθευτών φαρμακευτικών. Συνδύασε fuzzy TOPSIS, Γκρι Συσχέτιση (GRA) και Μηχανική Μάθηση (SVR) για σταθμολόγηση κριτηρίων και ιεράρχηση προμηθευτών με έμφαση στην αξιοπιστία και βιωσιμότητα, αναδεικνύουν την αναγκαιότητα χρήσης MCDA σε βασικά θέματα όπως η επιλογή προμηθευτών και η διαχείριση αποθεμάτων. Φυσικά, και σε γενικότερους βιομηχανικούς κλάδους οι MCDA καλούνται να βοηθήσουν στην επιλογή προμηθευτών και την αξιολόγηση της βιωσιμότητας. Έρευνα των Menon & Ravi (2022) έδειξε ότι η χρήση συνδυασμού AHP+TOPSIS για την επιλογή προμηθευτών με κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες βιωσιμότητας, επέτρεψε ιεράρχηση προμηθευτών με βάση 4 διαστάσεις βιωσιμότητας (οικονομική, περιβαλλοντική, κοινωνική, ηθική) και 16 υποκριτήρια, προσφέροντας ολοκληρωμένο πλαίσιο στήριξης αποφάσεων.

Οι παραπάνω μελέτες φανερώνουν ότι τα πολυκριτηριακά μοντέλα παρέχουν τεκμηριωμένες διαδικασίες λήψης αποφάσεων κατανέμοντας στα κριτήρια ποσοτικά ή ποιοτικά βάρη και με τη χρήση των αλγορίθμων, όπως TOPSIS και VIKOR, οι εναλλακτικές λύσεις ιεραρχούνται αντικειμενικά. Οι MCDA διευκολύνουν σημαντικά τη βελτιστοποίηση των προμηθειών, της ποιότητας και των διεργασιών στις βιομηχανικές εφαρμογές ενώ εάν συνδυαστεί με τις μελέτες αξιοποίησης παραπροϊόντων, όπως το τυρόγαλο, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά ευρήματα. Με την παρούσα διπλωματική γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης της χρήσης των MCDA ώστε να δημιουργηθεί ένα πρωτόκολλο και για μελλοντικές έρευνες. Η εφαρμογή των MCDA θα συνεισφέρει στην βιομηχανία καθώς αποτελέσματα σε ερευνητικό επίπεδο θα μπορούν να φιλτράρονται ώστε

να επιλέγονται τα επικρατέστερα για να προχωρήσουν σε ημιβιομηχανικό έλεγχο και κατ' επέκταση στη γραμμή παραγωγής αξιολογώντας και τα χρηματοοικονομικά μεγέθη.

1.2 Σκοπός και αντικείμενο μελέτης

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ενζυμικής παραγωγής γαλακτοολιγοσακχαριτών (GOS) εφαρμόζοντας πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων. Ειδικότερα, στόχος ήταν η αναζήτηση των βέλτιστων πειραματικών συνθηκών για την ενζυμική κατάλυση της λακτόζης και παραγωγής GOS αξιοποιώντας τα δεδομένα από 252 πειράματα και εφαρμόζοντας μεθόδους όπως η TOPSIS, η VIKOR και η PROMETHEE. Μέσα από την ερευνητική προσέγγιση αυτή επιδιώχθηκε τόσο η τεχνική αξιοποίηση ενός περιβαλλοντικά επιβλαβές παραπροϊόντος της γαλακτοβιομηχανίας, το τυρόγαλο, όσο και η επιστημονική μελέτη της καταλληλότητας των πολυκριτηριακών εργαλείων σε βιομηχανικές εργασίες.

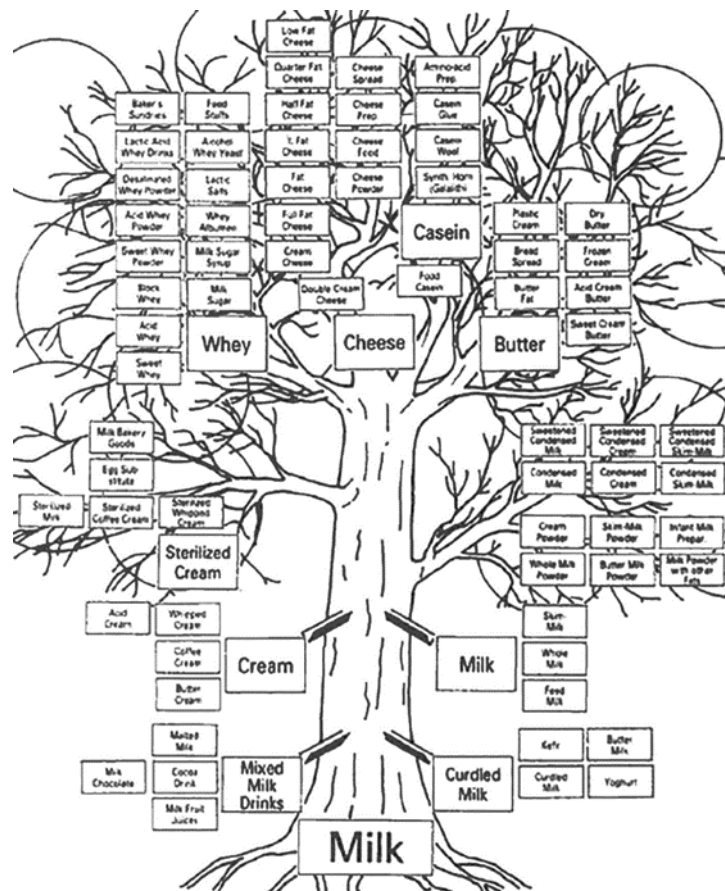
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 1 καλείται εισαγωγή και αποτυπώνει την υπάρχουσα βιβλιογραφικά γνώση, τον σκοπό, το αντικείμενο μελέτης και την δομή της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται εκτενής αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αναλύονται βασικές έννοιες, όπως οι ενζυμικές αντιδράσεις και τα προϊόντα αυτών καθώς και οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων. Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ενώ στο Κεφάλαιο 4 έγινε η ανάλυση και έκθεση των αποτελεσμάτων. Τέλος, το Κεφάλαιο 5 συνοψίζει τα κυριότερα ευρήματα της έρευνας.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Γλυκός ορός ή Τυρόγαλα

Η θρεπτική αξία του γάλακτος έγινε αντιληπτή από τον άνθρωπο από πολύ νωρίς και υιοθετήθηκε στην ανθρώπινη διατροφή ως βασικό αγαθό. Ως γάλα ορίζεται το έκκριμα των μαστικών αδένων θηλυκών θηλαστικών, όπως των αγελάδων, αιγών και προβάτων. Είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά συμβάλλοντας στην ευημερία του οργανισμού και ήδη από τα πρώτα χρόνια της ζωής ο άνθρωπος καρπώθηκε το γάλα, στη νωπή μορφή του. Σήμερα το γάλα εκτός από την φυσική μορφή του χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή μιας ευρείας ποικιλίας προϊόντων γάλακτος. (ΠΗΓΗ: Weigand)



Εικόνα 2.1: Κατηγορίες προϊόντων γάλακτος

Λόγω της συνεχούς αυξανόμενης παραγωγής προϊόντων από γάλα έχει δημιουργηθεί και μεγάλος όγκος αποβλήτων. Κατά τη βιομηχανική επεξεργασία του γάλακτος ως κύριο παραπροϊόν με μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι ο ορός γάλακτος. Ως «ορός γάλακτος» ορίζεται το κίτρινο ημιδιαφανές κλάσμα που προκύπτει μετά την πήξη του γάλακτος και τον διαχωρισμό της καζεΐνης κατά την παραγωγική διαδικασία του τυριού και του γιαουρτιού. Στην γαλακτοβιομηχανία συναντώνται τέσσερις τύποι ορού γάλακτος. Αυτοί είναι ο γλυκός ορός, ο όξινος ορός, ο φυσικός ορός και ο αλμυρός ορός (Nishanthi, Vasiljevic & Chandrapela 2017), εκ των οποίων οι δύο πρώτοι τύποι αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής. Ο όξινος ορός προκύπτει από διεργασίες που χρησιμοποιούν τη μικροβιακή ζύμωση ή την προσθήκη οργανικών ή ανόργανων οξέων για

την επίτευξη της καθίζησης της καζεΐνης και τη μετέπειτα πήξη του γάλακτος. Ο όξινος ορός εντοπίζεται στην παραγωγή γιαουρτιού ή νωπών τυριών, όπως το τυρί cottage (*Jelen 2002*). Ο γλυκός ορός, από την άλλη, παράγεται κατά την πήξη της καζεΐνης του γάλακτος. Η πήξη επιτυγχάνεται με χρήση πυτιάς και σε συνθήκες pH περίπου ίση με 6,5. Για τον λόγο αυτό, ο γλυκός ορός εντοπίζεται στις διαδικασίες παραγωγής τυριού και είναι κοινώς γνωστός ως τυρόγαλο.

Το κύριο συστατικό του γλυκού και όξινου ορού είναι το νερό σε ποσοστό 94%, ενώ άλλα κύρια συστατικά είναι η λακτόζη, οι πρωτεΐνες ορού γάλακτος και τα μεταλλικά άλατα. Κυριότερη διαφορά των δύο τύπων ορού είναι η περιεκτικότητα σε λακτόζη. Ακόμη, διαφέρουν ως προς τη σύνθεση των πρωτεϊνών και την οξύτητα του ορού. Πιο συγκεκριμένα, το pH του γλυκού ορού λαμβάνει τιμές από 6,0 έως 6,5, σε αντίθεση με τον όξινο ορό που εμφανίζει χαμηλότερες τιμές pH κοντά στο 4,5. Η χαμηλή τιμή pH του όξινου ορού οφείλεται στη μετατροπή της λακτόζης σε γαλακτικό οξύ (*Fischer και Kleinschmidt 2015, Jelen 2002*). Στον Πίνακα 2.1 (ΠΗΓΗ: Fischer και Kleinschmidt 2015) παρουσιάζεται η χημική σύσταση των δύο αυτών τύπου ορών, αποτυπώνοντας τις συγκλίσεις και αποκλίσεις τους.

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση όξινου και γλυκού ορού

Συστατικά	Γλυκός ορός	Όξινος ορός
Ολικά σάκχαρα (g·L ⁻¹)	38,7 ± 0,75	39,1 ± 1,17
Γλυκόζη (g·L ⁻¹)	0,30 ± 0,02	Μη ανιχνεύσιμο
Γαλακτόζη (g·L ⁻¹)	0,43 ± 0,05	1,10 ± 0,09
Λακτόζη (g·L ⁻¹)	38,0 ± 0,68	38,0 ± 1,08
Ολική πρωτεΐνη (g·L ⁻¹)	5,56 ± 0,08	3,02 ± 0,03
Πρωτεΐνη ορού (g·L ⁻¹)	5,11 ± 0,07	2,42 ± 0,70
Καζεΐνη (g·L ⁻¹)	0,45 ± 0,09	0,60 ± 0,18
NPN (g·L ⁻¹)	0,71 ± 0,02	1,63 ± 0,05
Τέφρα (g·L ⁻¹)	4,33 ± 0,01	7,42 ± 0,01
Γαλακτικό οξύ (g·L ⁻¹)	0,58 ± 0,01	8,11 ± 0,08
Λίπη (g·L ⁻¹)	0,47 ± 0,01	0,18 ± 0,01
Na ⁺ (mM)	16,5 ± 0,35	18,6 ± 0,25
NH ₄ ⁺ (mM)	2,41 ± 0,05	10,4 ± 0,25
K ⁺ (mM)	29,6 ± 0,95	45,2 ± 0,59
Mg ²⁺ (mM)	2,81 ± 0,09	4,90 ± 0,09
Ca ²⁺ (mM)	8,44 ± 0,22	25,5 ± 0,70
Cl ⁻ (mM)	21,5 ± 0,53	42,6 ± 0,56
NO ₃ ⁻ (mM)	0,81 ± 0,04	0,33 ± 0,02
PO ₄ ²⁻ (mM)	8,35 ± 0,19	17,6 ± 0,37
SO ₄ ²⁻ (mM)	1,14 ± 0,18	0,64 ± 0,02

2.1.1 Παραγωγική διαδικασία τυριού

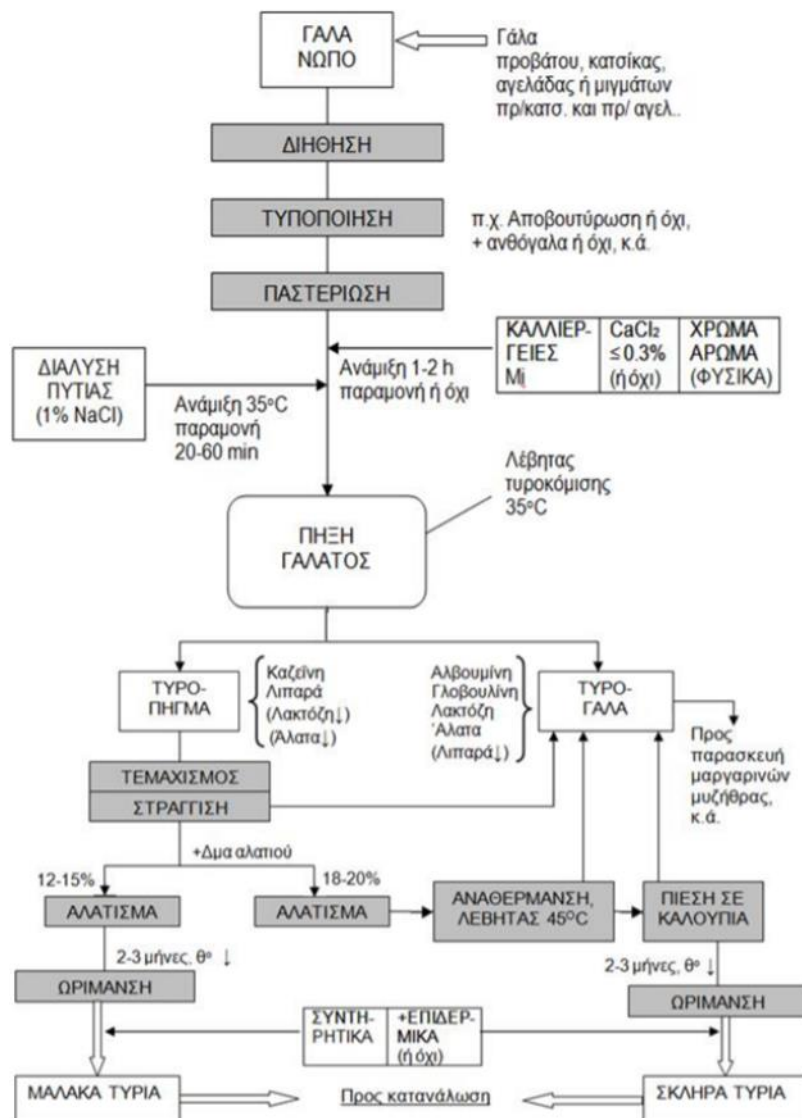
Η παραγωγική διαδικασία για τα περισσότερα είδη τυριού αποτελείται από αρκετά στάδια και πραγματοποιείται στις τυροκομικές μονάδες. Κατά το πρώτο στάδιο το γάλα μεταφέρεται από τους παραγωγούς και τους σταθμούς συγκέντρωσης στην τυροκομική μονάδα. Για την μεταφορά απαιτούνται βυτιοφόρα, που πληρούν τις προδιαγραφές του συστήματος υγιεινής και ασφάλειας (HACCP), συνήθως σε θερμοκρασία 4°C. Αφού η μονάδα παραλάβει το γάλα, το αποθηκεύει προσωρινά σε δεξαμενές θερμοκρασίας 4°C και λαμβάνονται δείγματα προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο απαιτούμενος ποιοτικός έλεγχος του γάλακτος. Κατά το στάδιο αυτό πραγματοποιείται έλεγχος της θερμοκρασίας, της οξύτητας και των αντιβιοτικών του γάλακτος, προσδιορίζεται η περιεκτικότητα της εμπεριεχόμενης λακτόζης, οι πρωτεΐνες του γάλακτος, τα λίπη και τυχόν στερεά υπολείμματα. Στη συνέχεια, το γάλα θερμαίνεται στους 35°C και φυγοκεντρείται με στόχο τον καθαρισμό του και ακολούθως θα αποθηκευτεί σε ειδικές δεξαμενές. Καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής του γάλακτος στις δεξαμενές αποθήκευσης οι έλεγχοι από εξειδικευμένο προσωπικό για αντιβιοτικά και μικροβιακό φορτίο επαναλαμβάνονται προκειμένου να βεβαιωθεί ότι το γάλα παραμένει εντός προδιαγραφών για περαιτέρω επεξεργασία και χρήση.

Επόμενο στάδιο στις τυροκομικές μονάδες αποτελεί η παστερίωση του γάλακτος, στάδιο υψίστης σημασίας. Κατά το στάδιο αυτό, γίνεται θέρμανση του γάλακτος στους 75°C για λίγα λεπτά και ακολούθως μεταφέρεται στο σύστημα στο σύστημα ψύξης για την άμεση πτώση της θερμοκρασίας του στους 35°C. Τέλος, το γάλα μεταφέρεται στον τυρολέβητα, για να ξεκινήσει η διαδικασία πήξης του. Υπάρχουν δύο μέθοδοι επίτευξης της πήξης του γάλακτος: προσθήκη πυτιάς ή όξυνση του γάλακτος χρησιμοποιώντας οξυπαραγωγικούς μικροοργανισμούς. Στην πρώτη μέθοδο, επιλέγεται η προσθήκη της πυτιάς, η οποία περιέχει το ένζυμο ρεννίνη. Το ένζυμο αυτό αλληλεπιδρά με την καζεΐνη του γάλακτος και σχηματίζει την παρα-κ-καζεΐνη, η οποία λόγω ύπαρξης ιόντων ασβεστίου, οδηγεί στην πήξη του γάλακτος. Η διαδικασία αυτή έχει διάρκεια από 20-60 min ανάλογα με τον τύπο του τυριού. Στην δεύτερη περίπτωση, οι μικροοργανισμοί που εισάγονται στο γάλα οδηγούν σε μείωση του pH μέχρι το ισοηλεκτρικό σημείο της καζεΐνης οδηγώντας έτσι στην πήξη του. Η προσέγγιση αυτή έχει μεγαλύτερη διάρκεια (1-2 h).

Κατά το στάδιο της πήξης παράγεται και ο γλυκός ορός, ο οποίος περιέχει σχεδόν όλη την ποσότητα των πρωτεϊνών ορού, τη μεγαλύτερη ποσότητα λακτόζης, τα άλατα και μικρότερη ποσότητα από το λίπος που αρχικά περιέχονταν στο γάλα. Το σχηματισμένο τυρόπηγμα που παρασκευάστηκε με την πήξη του γάλακτος κατά το προηγούμενο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας τεμαχίζεται. Κατά τον τεμαχισμό διαχωρίζεται το τυρόγαλο από το τυρόπηγμα και ακολουθεί η απομάκρυνση του τυρογάλακτος με χρήση αντλίας μέσω ανοξείδωτων σωλήνων, ενώ το τυρόπηγμα μεταφέρεται σε ειδικά καλούπια υπό πίεση για να γίνει η στράγγιση αυτού. Κατά την στράγγιση αποβάλλεται επιπλέον ποσότητα τυρογάλακτος, η οποία απομακρύνεται και συλλέγεται. Επόμενο στάδιο στην παραγωγική διαδικασία είναι το αλάτισμα του τυριού. Το στάδιο αυτό έχει και ρυθμιστικό ρόλο καθώς με το αλάτισμα γίνεται έλεγχος των ενζυμικών αντιδράσεων που βελτιώνουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τυριού. Σημαντικό ρόλο παίζουν η θερμοκρασία και η τιμή pH για την απορρόφηση του αλατιού, ενώ το αλάτισμα πραγματοποιείται είτε με προσθήκη κόκκων αλατιού είτε με τοποθέτηση του τυριού σε άλμη.

Τελευταίο και ίσως πιο σημαντικό στάδιο είναι η ωρίμανση του τυριού. Κατά το στάδιο της ωρίμανσης, το τυρί αποκτά τα μοναδικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του (οσμή, γεύση, άρωμα, υφή, χρώμα) ανάλογα με το είδος του. Στο στάδιο αυτό, οι πρωτεΐνες διασπώνται σε

αμινοξέα, η λακτόζη σε γλυκόζη και γαλακτόζη και το λίπος υδrolύεται σε ελεύθερα λιπαρά οξέα. Ένα γενικό διάγραμμα της διαδικασίας παραγωγής τυριού αποτυπώνεται στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 2.2) (ΠΗΓΗ: Ανδρικόπουλος Ν.Κ.).



Εικόνα 2.2: Παραγωγική διαδικασία παρασκευής τυριού

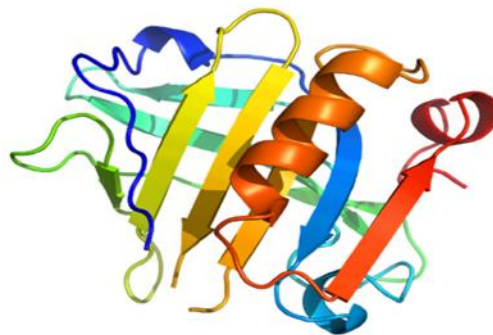
2.1.2 Συστατικά τυρογάλακτος

Ο γλυκός ορός, γνωστός και ως τυρόγαλα, είναι το υγρό υπόλειμμα κατά την παραγωγή τυριού και δημιουργείται λόγω της καθίζησης της καζεΐνης στο γάλα κατά την πήξη αυτού προς σχηματισμό τυριού. Αποτελεί το βασικότερο παραπροϊόν, καθώς ισοδυναμεί με το 85-90% του όγκου του γάλακτος που χρησιμοποιείται σε κάθε παραγωγή τυριού. Παράλληλα, το τυρόγαλα συγκρατεί έως και το 55% από τα θρεπτικά του συστατικά του γάλακτος, όπως είναι για παράδειγμα το γαλακτικό οξύ. Το γαλακτικό οξύ αποτελεί θρεπτικό συστατικό για τον άνθρωπο και παράγεται σε μεγάλες ποσότητες κανονικά στον οργανισμό του ανθρώπου από την βακτηριακή χλωρίδα του παχέως εντέρου. Ιστορικά εντοπίζεται η χορήγηση δροσιστικού τυρογάλακτος σε ασθενείς από τον Ιπποκράτη τον 4^ο π.Χ. αιώνα για τη βελτίωση της πέψης, τον καθαρισμό του αίματος, την προστασία του ήπατος και άλλες

φυσικές δράσεις. Αποτελείται κυρίως από νερό σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90%, ενώ περιέχει στερεά υπολείμματα του τυριού, καθώς και διάφορα ευδιάλυτα συστατικά, που αναλύονται ακολούθως.

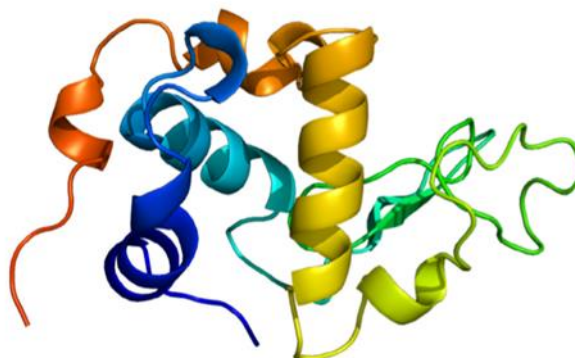
Η λακτόζη αποτελεί το κυριότερο συστατικό του γλυκού ορού και περιέχεται σε συγκεντρώσεις 4,8-5,5% w/v. Είναι σάκχαρο της ομάδας των δισακχαριτών, καθώς αποτελείται από ένα μόριο γαλακτόζης και ένα μόριο γλυκόζης, ενωμένα με έναν β-γλυκοζιτικό δεσμό. Παρότι εμφανίζει υψηλή διατροφικής αξίας και ενισχύει την απορρόφηση του ασβεστίου, δεν δύναται να αξιοποιηθεί απευθείας από τον οργανισμό καθώς απαιτείται η διάσπαση αυτής από το ένζυμο λακτάση. Το ένζυμο αυτό εκκρίνεται από το έντερο ενώ απουσία ή μη επαρκή ποσότητα του ενζύμου αυτού προκαλεί τη λεγόμενη πάθηση “δυσανεξία στη λακτόζη”.

Δεύτερο συστατικό του τυρογάλακτος είναι οι πρωτεΐνες. Οι πρωτεΐνες συναντώνται στον γλυκό ορό σε ποσοστό 0,5-1% w/v και είναι κυρίως πρωτεΐνες ορού. Η μορφή τους είναι σφαιροειδή μορφή. Η πιο ευρέως γνωστή πρωτεΐνη στον ορό είναι η β-γαλακτογλοβουλίνη (Εικόνα 2.3), η οποία αποτελεί το 10% των συνολικών πρωτεϊνών του γάλακτος και το 58% των πρωτεϊνών του ορού (Kilara και Vaghela 2018, Zall 1992).



Εικόνα 2.3: 3D απεικόνιση β-γαλακτογλοβουλίνης

Η δεύτερη πρωτεΐνη που συναντάται στον ορό είναι η α-γαλακτοαλβουμίνη (Εικόνα 2.4). Συγκεντρώνει το 2% του συνόλου των πρωτεϊνών του γάλακτος και το 13% των πρωτεϊνών του ορού.



Εικόνα 2.4: Τρισδιάστατη δομή α-γαλακτοαλβουμίνης

Το λίπος στον γλυκό ορό συναντάται σε ποσοστό 0,09-0,35% w/v και εξαρτάται από τα λιπαρά του γάλακτος που χρησιμοποιήθηκε (*Altuntas & Hapoglu 2019, Zall 1992*). Επιπλέον, ο γλυκός ορός είναι πλούσιος σε άλατα, όπως κάλιο, νάτριο και χλώριο και σε μικρότερη περιεκτικότητα ασβέστιο, μαγγάνιο, φωσφόρος και άλλα. Η διαφορετική σύστασή μεταξύ όξινου και γλυκού ορού οφείλεται στην διαφορετική παραγωγική τους διαδικασία (*Fischer & Kleinschmidt 2015*). Τέλος, στον γλυκό ορό εντοπίζονται υδατοδιαλυτές βιταμίνες, οι οποίες δεν εγκλωβίστηκαν στο τυρόπηγμα κατά την πήξη του γάλακτος. Βιταμίνες του γλυκού ορού που έχουν ταυτοποιηθεί είναι το φολικό οξύ, η θειαμίνη, η χολίνη, η νιασίνη, το παντοθενικό οξύ και η ριβοφλαβίνη (*Zall 1992*).

2.1.3 Γιατί αποτελεί πρόβλημα ο γλυκός ορός και ποια η αξιοποίησή του

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, ο γλυκός ορός αποτελεί ένα παραπροϊόν υψηλής θρεπτικής αξίας. Ωστόσο, λόγω της σύστασής του σε οργανικές και ανόργανες ουσίες κατατάσσεται ως ένα ρυπογόνο προϊόν. Επιπλέον, καθώς παράγεται σε μεγάλους όγκους κατά την παραγωγική διαδικασία (85-90% του όγκου του γάλακτος που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη) δυσκολεύεται η διαχείρισή του (*Park και Oh 2010*). Η απόχυσή του στο υδάτινο περιβάλλον δεν αποτελεί λύση καθώς οι επιπτώσεις τόσο για το περιβάλλον όσο και για την έμβια ζωή γύρω από την τυροκομική μονάδα είναι σοβαρές.

Η αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών πραγματοποιείται από μικροοργανισμούς εφόσον η ποσότητα των οργανικών ουσιών δεν ξεπερνά τα επίπεδα ικανότητας αποικοδόμησής τους από το οικοσύστημα. Τα υδατοδιαλυτά συστατικά που εμπεριέχονται στο τυρόγαλο χρησιμοποιούνται ως θρεπτικά υλικά από τους μικροοργανισμούς. Τα προϊόντα της οξείδωσης απελευθερώνονται στο περιβάλλον ενώ ο πληθυσμός των μικροοργανισμών αυξάνεται μέσω της κυτταρικής διαίρεσης. Με αυτή την διαδικασία επιτυγχάνεται η μείωση των οργανικών ουσιών από τους μικροοργανισμούς με κατανάλωση οξυγόνου. Ωστόσο, για να αποφανθεί εάν πραγματοποιείται ή όχι ρύπανση του περιβάλλοντος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απαίτηση σε οξυγόνο. Προκειμένου να μην επηρεάζεται το οικοσύστημα θα πρέπει το οξυγόνο που απομένει στο σύστημα να είναι επαρκές για την επιβίωση των οργανισμών του συστήματος.

Ωστόσο, το οργανικό φορτίο του τυρογάλακτος δεν διαλύεται στο νερό και η βιολογική απαίτηση σε οξυγόνο είναι υψηλή. Η μέση τιμή του BOD του τυρογάλακτος είναι περίπου 44 g/L. Δεδομένου ότι η μέση κατανάλωση νερού ανά άτομο είναι περίπου 100 L ημερησίως και το αντίστοιχο BOD είναι 54 g, η χύτευση 1 L τυρογάλακτος ισοδυναμεί με την ποσότητα των αποβλήτων ενός ατόμου την ημέρα (*Altuntas & Hapoglu 2019*). Μόνο από αυτή τη σύγκριση γίνεται αντιληπτή η σοβαρότητα της περιβαλλοντικής ρύπανσης, εξαιτίας της υψηλής κατανάλωσης οξυγόνου που προκαλεί το τυρόγαλα. Η ανεξέλεγκτη απόρριψή του θα είχε καταστροφικές συνέπειες για την υδρόβια ζωή και τη διατήρησή της. Γι' αυτό, η σύσταση του τυρογάλακτος πρέπει να αξιολογείται κάθε φορά, ώστε να προστατεύεται το περιβάλλον και οι υδρόβιοι οργανισμοί.

Στο παρελθόν, το τυρόγαλα αντιμετωπιζόταν ως απόβλητο με μικρή οικονομική αξία. Έτσι, δεν αξιοποιούνταν και οι γαλακτοβιομηχανίες το απομάκρυναν με τρόπους που επιβάρυναν το περιβάλλον: είτε το ψέκαζαν σε χωράφια, είτε το απέρριπταν σε ποτάμια και λίμνες, είτε το χρησιμοποιούσαν ως ζωοτροφή. Σήμερα, η αυξημένη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και η πρόοδος της τεχνολογίας έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα σε νέες ερευνητικές κατευθύνσεις. Ο γλυκός ορός έχει πλέον μελετηθεί και χαρακτηριστεί πλήρως, αποκαλύπτοντας τις φυσικοχημικές, βιολογικές και θρεπτικές του ιδιότητες. Παράλληλα, οι γαλακτοβιομηχανίες έχουν εξελίξει τις μεθόδους επεξεργασίας του, ενώ η συνεχής

αναζήτηση καινοτομίας στον τομέα των τροφίμων έχει ανοίξει τον δρόμο για την αξιοποίησή του στην παραγωγή νέων προϊόντων.

Σήμερα, ο γλυκός ορός χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα σε διάφορες φυσικοχημικές και βιοτεχνολογικές διεργασίες, οδηγώντας στην παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας. Η πλούσια περιεκτικότητά του σε πρωτεΐνες και λακτόζη τον καθιστά ιδανικό για την παρασκευή βρεφικών τροφών και ροφημάτων. Επιπλέον, χάρη στα ανόργανα συστατικά και τη λακτόζη που περιέχει, έχει αξιοποιηθεί στην παραγωγή αλκοολούχων ποτών, όπως κρασί, μύρα και σαμπάνια. Τέλος, πέρα από τον κλάδο των τροφίμων, το τυρόγαλο βρίσκει εφαρμογές και στον τομέα της ενέργειας, καθώς μελετάται η χρήση του για την παραγωγή βιοαερίου (Altuntas & Haroglu 2019, Smither 2008).

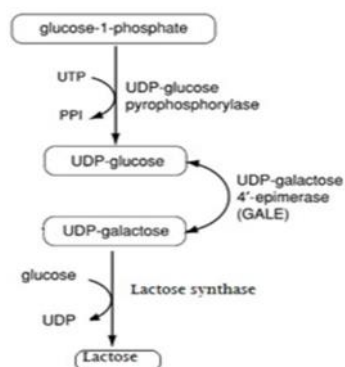
2.2 Αξιοποίηση λακτόζης μέσω ενζυμικών αντιδράσεων

Η απομόνωση της λακτόζης αναφέρεται για πρώτη φορά το 1633 από τον Ιταλό ιατρό Fabrizio Bartoletti. Ακολούθησαν έρευνες και δημοσιεύσεις σχετικά με την ικανότητα της λακτόζης να ανακουφίσει πόνους από διάφορες παθήσεις, όπως συμπτώματα αρθρίτιδας, ενώ μόλις 200 χρόνια μετά ανακαλύφθηκαν τα προϊόντα της υδρόλυσης της λακτόζης. Συγκεκριμένα, το 1812 ο Heinrich Vogel αναγνώρισε ότι η γλυκόζη είναι ένα προϊόν της υδρόλυσης της λακτόζης ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 1856, ο Luis Pasteur κατάφερε να αποκρυσταλλώσει και το δεύτερο προϊόν, την γαλακτόζη.

Σήμερα, η λακτόζη έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο στην ερευνητική κοινότητα όσο και στη βιομηχανική, καθώς φαίνεται ότι η αξιοποίησή της υπόσχεται πολλές δυνατότητες. Η χρήση της λακτόζης είναι ευρέως και εντοπίζεται σε φαρμακοβιομηχανίες, βιομηχανίες τροφίμων, ενώ μελετάται και η παραγωγή βιοαερίου από αυτή. Πέρα από την αξιοποίηση της λακτόζης για την παραλαβή της σε κρυσταλλική μορφή, βρίσκει εφαρμογή και ως υπόστρωμα για τη σύνθεση ολιγοσακχαριτών μέσω ενζυμικών αντιδράσεων. Για την επίτευξη των ενζυμικών, αυτών, αντιδράσεων κυρίαρχο ρόλο έχει το ένζυμο β-γαλακτοζιδάση, το οποίο μπορεί να παραχθεί από διάφορους μικροοργανισμούς.

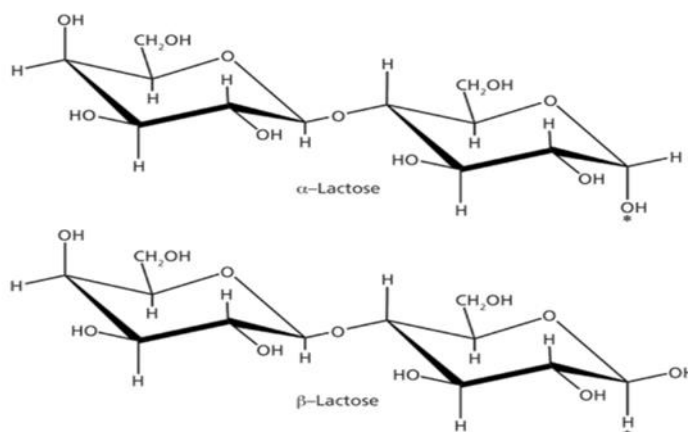
2.2.1 Λακτόζη

Η λακτόζη είναι ένας φυσικός δισακχαρίτης που εντοπίζεται αποκλειστικά στο γάλα των θηλαστικών και αποτελεί βασική πηγή ενέργειας. Συντίθεται στα επιθηλιακά κύτταρα του μαστού και αποτελείται από δυο μόρια μονοσακχαριτών, τη γαλακτόζη και τη γλυκόζη. Το μόριο της γαλακτόζης συνδέεται με το μόριο της γλυκόζης με β-(1→4) γλυκοζιτικό δεσμό. Η σύνδεση των δύο μορίων αυτών μπορεί να καταλυθεί από ένα σύμπλοκο πρωτεΐνης που ονομάζεται σύνθεση λακτάσης. Το UDP-γαλακτοζυλοτρανσφεράση καταλύει τη μετακίνηση της γαλακτόζης από την UDP-γαλακτόζη στη γλυκόζη. Η α-γαλακτοαλβουμίνη συμβάλει στη μείωση της σταθεράς Michaelis για την τρανσφεράση δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για τη σύνδεση των δύο μορίων. Στην Εικόνα 2.5 αναπαριστάται γραφικά ο μηχανισμός σύνθεσης της λακτόζης (Illanes 2016).



Εικόνα 2.5: Σύνθεση λακτόζης

Η λακτόζη συναντάται σε δύο μορφές ισομερών, την α-λακτόζη και τη β-λακτόζη. Η ύπαρξη των δύο αυτών ανωμερών οφείλεται στην διαμόρφωση της ομάδα υδροξυλίου του C-1 άνθρακα του μορίου της γλυκόζης. Η ομάδα υδροξυλίου αυτή είναι ελεύθερη και μπορεί να υπάρξει είτε πάνω είτε κάτω από το επίπεδο του δακτυλίου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Ανωμερείς μορφές λακτόζης

Τα δύο ανωμερή εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στις ιδιότητές τους. Κυριότερη διαφορά εμφανίζουν στην διαλυτότητά τους, όπου στους 20°C η β-λακτόζη είναι περίπου 7 φορές πιο διαλυτή από την α-λακτόζη, κάτι που σε υψηλές θερμοκρασίες αντιστρέφεται. Η συχνότερη μορφή της α-λακτόζης που συναντάται στη φύση είναι σε κρυσταλλική ένυδρη μορφή, ενώ η β-λακτόζη εντοπίζεται άνυδρη και κρυσταλλώνεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 93,5°C. Τέλος, τα δύο ανωμερή της λακτόζης εμφανίζουν διαφορές και ως προς τον πολυμορφισμό τους και τις φυσικές τους ιδιότητες, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. (Illanes 2016, Johnson & Conforti 2003).

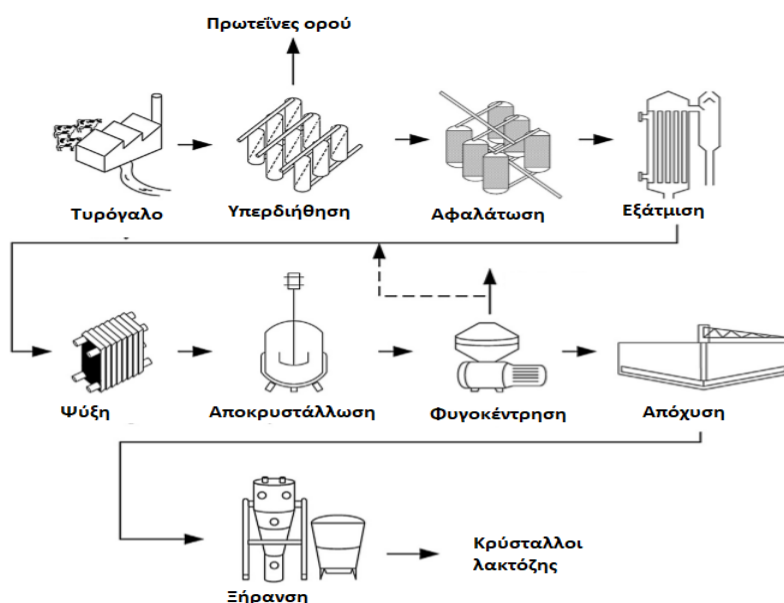
Πίνακας 2.2: Φυσικές ιδιότητες ισομερών της λακτόζης

Ιδιότητες	α-λακτόζη	β-λακτόζη
Μοριακό βάρος ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	360	342
Σημείο τήξης ($^{\circ}\text{C}$)	202	252
Πυκνότητα ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	1,54	1,59
Ειδική στροφική ικανότητα	+89,4	+35
Θερμότητα διαλυτοποίησης ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	- 50,2	- 9,62
Διαλυτότητα σε νερό (20°C , $\text{g}/100\text{ mL}$)	7,4	50

2.2.2 Ανάκτηση λακτόζης τυρογάλακτος

Όπως έχει διαπιστωθεί, κυριότερη πηγή λακτόζης σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι το γάλα των θηλαστικών. Καθώς το τυρόγαλα αποτελεί παραπροϊόν της επεξεργασίας γάλακτος, εγκλωβίζοντας υψηλά επίπεδα λακτόζης, το καθιστά εξαιρετική πρώτη ύλη για την ανάκτησή της, ενώ μέσω της μεθόδου της υπερδιήθησης μπορεί να απομονωθεί η πρωτεΐνη ορού γάλακτος, ένα πολύτιμο θρεπτικό συστατικό.

Για την ανάκτηση λακτόζης από το διήθημα ακολουθείται διαδικασία βασισμένη στη μέθοδο της κρυστάλλωσης και απεικονίζεται αναλυτικά στην Εικόνα 2.7 (ΠΗΓΗ: Illanes 2016).



Εικόνα 2.7: Βιομηχανική διαδικασία ανάκτησης της λακτόζης

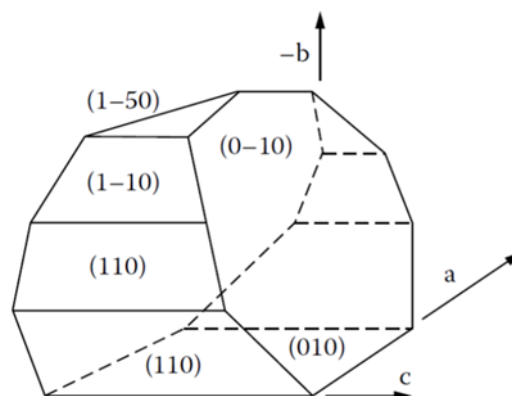
Αρχικά, το διήθημα προσυμπυκνώνεται μέσω αντίστροφης ώσμωσης και μερική αφαλάτωσης. Στη συνέχεια ρυθμίζεται η συγκέντρωση της λακτόζης με εξάτμιση πολλών σταδίων και ακολουθεί η κρυστάλλωση με ψύξη του υπερκορεσμένου αυτού διαλύματος. Οι κρύσταλλοι της λακτόζης ανακτώνται μέσω απόχυσης ή φυγοκέντρωσης του υγρού. Τέλος, οι κρύσταλλοι υποβάλλονται σε ξήρανση προκειμένου να μειώσουν το ποσοστό

υγρασίας σε 5-12%. Φυσικά, μπορεί να υπάρξει και περεταίρω επεξεργασία αναλόγως με την χρήση που προορίζονται οι κρύσταλλοι (Illanes 2016).

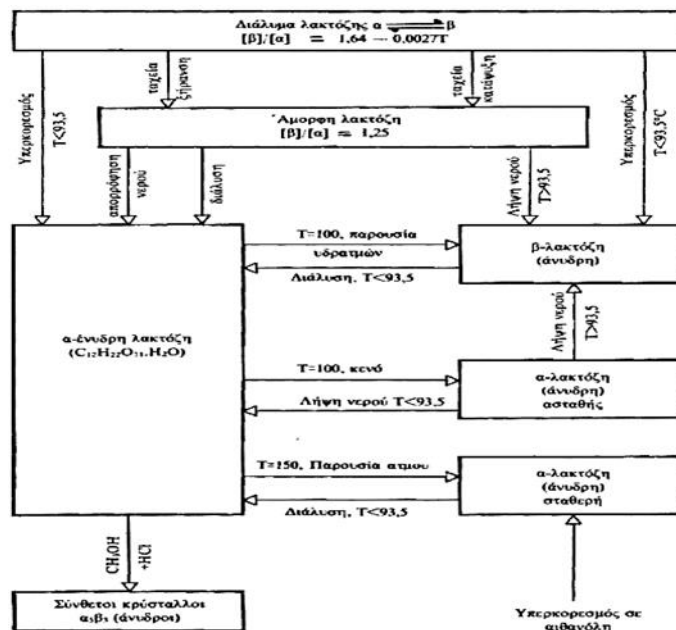
2.2.3 Το φαινόμενο της κρυστάλλωσης της λακτόζης

Το φαινόμενο της κρυστάλλωσης της λακτόζης αποτελεί πολυσύνθετο φαινόμενο και έχει μελετηθεί μόλις την τελευταία δεκαετία. Η κρυστάλλωση της λακτόζης έχει υψίστη σημασία για τον τομέα τροφίμων και ιδίως στα γαλακτοκομικά προϊόντα με μειωμένη υγρασία, όπως οι σκόνες γάλακτος, το σακχαρούχο συμπυκνωμένο γάλα και το παγωτό. Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί σχετικά με το φαινόμενο αυτό με κυριότερο την κρυστάλλωση άμορφων σακχάρων, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στον τομέα των τροφίμων αφού μπορούν να ενισχύσουν ένα βρώσιμο προϊόν ως προς τη φυσική αλλά και τη χημική αλλοίωσή του.

Η διαφορά στο χημικό δυναμικό μεταξύ ενός μορίου που βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και ενός μορίου στην υπερκορεσμένη του κατάσταση αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την κρυστάλλωση ενός μορίου. Η κρυστάλλωση είναι μία διαδικασία που πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Τα στάδια αυτά είναι η πυρήνωση και η πυρηνογένεση. Κατά την αύξηση του υπερκορεσμού του διαλύματος ο ρυθμός αύξησης των κρυστάλλων αυξάνεται και αυτός. Από την διαδικασία της κρυστάλλωσης προκύπτουν διαφορετικά σχήματα κρυστάλλων ανάλογα με τις διαφορετικές φάσεις αυτών. Συνεπώς, ο υπερκορεσμός του διαλύματος καθορίζει την μορφή των κρυστάλλων. Οι πιο κοινές μορφές κρυστάλλων είναι τα σχήματα πυραμίδας, Tomahawk (Εικόνα 2.8) και πρίσματος. Εάν το διάλυμα εμφανίζει υψηλό υπερκορεσμό, τότε κρύσταλλοι πρίσματος θα σχηματιστούν αποκλειστικά. Αντιθέτως, όσο ο υπερκορεσμός μειώνεται παρατηρείται η δημιουργία κρυστάλλων σε σχήματα διαμαντιού, πυραμίδας και τέλος Tomahawk. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των κρυστάλλων είναι η θερμοκρασία, το pH, το ιξώδες καθώς και η παρουσία ακαθαρσιών. Η σχέση μεταξύ των διαφόρων μορφών λακτόζης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 (ΠΗΓΗ: Δημήτριος Γιώτσας 2011).



Εικόνα 2.8: Μορφή Tomahawk κρυστάλλου λακτόζης



Εικόνα 2.9: Σχέση μεταξύ διάφορων μορφών λακτόζης

2.2.4 Δυσανεξία στη λακτόζη

Ως δυσανεξία στη λακτόζη ορίζεται η ανάπτυξη γαστρεντερικών συμπτωμάτων μετά από κατανάλωση ποσότητας λακτόζης. Εάν η ποσότητα της λακτόζης που καταναλωθεί από έναν άνθρωπο υπερβαίνει την ικανότητα του γαστρεντερικού συστήματος να την μεταβολίσει δύναται να εμφανίσει συμπτώματα δυσανεξίας στη λακτόζη. Η ικανότητα διάσπασης της λακτόζης επιτυγχάνεται με το ένζυμο λακτάσης, το οποίο εμφανίζει υψηλή δραστικότητα κατά τη βρεφική και νεαρή ηλικία. Καθώς, περνάει ο άνθρωπος στην ενηλικίωση η δραστικότητα του ενζύμου μειώνεται αισθητά με αποτέλεσμα να ξεκινά η εμφάνιση προβλημάτων δυσανεξίας της λακτόζης. Γεγονός αποτελεί ότι ένας στους τέσσερις ανθρώπους επιτυγχάνει υψηλό επίπεδο δραστικότητας της λακτάσης σε όλη του τη ζωή με αποτέλεσμα να μην εμφανίσει δυσανεξία σε αυτήν (Suarez *et al.* 2003).

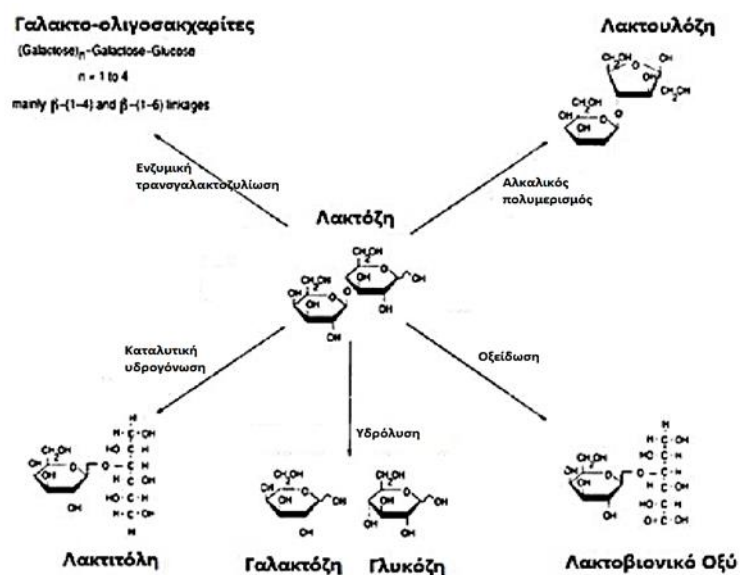
Τέλος, η δυσανεξία στη λακτόζη δεν θα πρέπει να συγχέεται με την αλλεργία στο γάλα. Η εμφάνιση αλλεργίας στο γάλα δηλώνει την αδυναμία του ανοσοποιητικού συστήματος του ατόμου να αντιδρά σε μία ή περισσότερες πρωτεΐνες που περιέχει αυτό. Η αλλεργία στο γάλα εμφανίζεται συνήθως από τη βρεφική ηλικία σε αντίθεση με την πάθηση της δυσανεξίας στη λακτόζη που εμφανίζεται κατά την ενήλικη ζωή του ατόμου. Συνεπώς, η δυσανεξία στη λακτόζη αφορά στην υδρόλυση της λακτόζης και εξαρτάται από την ποσότητα της λακτόζης που προσλαμβάνει κάποιος, τα επίπεδα δραστικότητας του ενζύμου λακτάσης, τον γαστρεντερικό χρόνο διέλευσης αυτής και την ικανότητα της μικροχλωρίδας του παχέος εντέρου να ζυμώσει την λακτόζη.

2.2.5 Εφαρμογές της λακτόζης

Η λακτόζη θεωρείται ως ιδανικός φορέας και σταθεροποιητής αρωμάτων και φαρμακευτικών προϊόντων λόγω της ήπιας γεύσης της και της ευκολίας στη διαχείρισή της. Στη φαρμακοβιομηχανία, η λακτόζη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανής ουσία προστατεύοντας τη βιολογική διαθεσιμότητα και αξία του φαρμάκου. Βρίσκει εφαρμογή σε διαβητικά προϊόντα, γλυκαντικά χαμηλής θερμιδικής αξίας καθώς και σε προϊόντα αδυνατίσματος.

Ωστόσο, στα προϊόντα τροφίμων δεν μπορεί να προστεθεί απευθείας εξαιτίας της χαμηλής της διαλυτότητας. Μόνη εξαίρεση αποτελούν τα βρεφικά τρόφιμα, καθώς ενισχύει το προϊόν λόγω της ομοιότητάς της με τη σύνθεση του μητρικού γάλακτος. Δρα αυξάνοντας την θρεπτική αξία των βρεφικών προϊόντων, δεσμεύοντας γεύσεις και αρώματα στα τρόφιμα, ενώ παράλληλα συνεισφέρει στην διάρκεια αποθήκευσής τους. Τέλος, άλλη μια εφαρμογή της λακτόζης στη βιομηχανία τροφίμων είναι η χρήση της σε προϊόντα αρτοποιίας για να προσδώσει το επιθυμητό τελικό χρώμα, αξιοποιώντας την αντίδραση Maillard (Johnson & Conforti 2003).

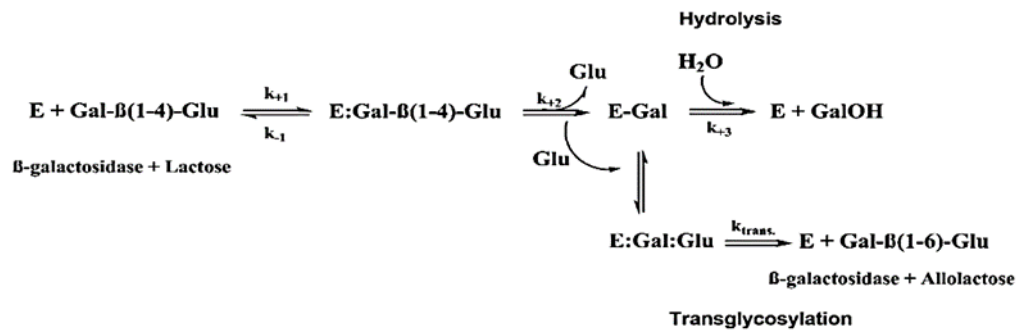
Η λακτόζη βρίσκει εφαρμογή και στον τομέα των καυσίμων, καθώς μελέτες δείχνουν ότι δύναται να αξιοποιηθεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Από την χρήση του γλυκού ορού μπορεί να παραχθεί βιοαέριο, βιοιθανόλη καθώς και άλλα προϊόντα ζύμωσης. Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζονται διάφορα προϊόντα που παράγονται από την λακτόζη ως πρώτη ύλη (ΠΗΓΗ: Yang & Silva 1995).



Εικόνα 2.10: Τα παράγωγα της λακτόζης

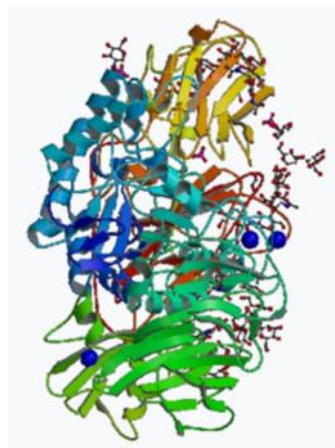
2.3 Ενζυμική μετατροπή της λακτόζης

Η ενζυμική σύνθεση γαλακτοολιγοσακχαριτών (Galactooligosaccharides, GOS) χρησιμοποιώντας λακτόζη ως υπόστρωμα και ελεύθερη β-γαλακτοζιδάσης ως ένζυμο περιλαμβάνει δύο βασικές αντιδράσεις, την υδρόλυση και την τρανσγαλακτοζυλίωση. Κατά την πρώτη αντίδραση πραγματοποιείται η διάσπαση του μορίου της λακτόζης μέσω της υδρόλυσης απελευθερώνοντας στο διάλυμα ένα μόριο γαλακτόζης και ένα μόριο γλυκόζης. Ακολουθεί η αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίωσης όπου συντίθενται τελικά οι GOS. Στην Εικόνα 2.11 (Bras, Fernandes & Ramos 2010) παρουσιάζονται σχηματικά οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα.



Εικόνα 2.11: Μηχανισμός αντίδρασης β-γαλακτοζιδάσης και λακτόζης

Το ένζυμο που συμμετέχει στην καταλυτική αυτή αντίδραση είναι η β-γαλακτοζιδάση (Εικόνα 2.12), η οποία είναι γνωστή και ως λακτάση. Το ένζυμο αυτό είναι υπεύθυνο για την κατάλυση της υδρόλυσης της λακτόζης στα αντίστοιχα μονοσάκχαρα μέσω διάσπασης του γλυκοζιτικού δεσμού. Πέρα από την υδρολυτική του δράση, μπορεί να δρα παράλληλα και ως καταλύτης στην αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίωσης. Κατά την αντίδραση αυτή συμβάλλει στη σύνθεση των γαλακτοολιγοσακχαριτών. Έχει ευρεία χρήση στην βιομηχανία των τροφίμων για την παραγωγή γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων χαμηλής περιεκτικότητας σε λακτόζη.

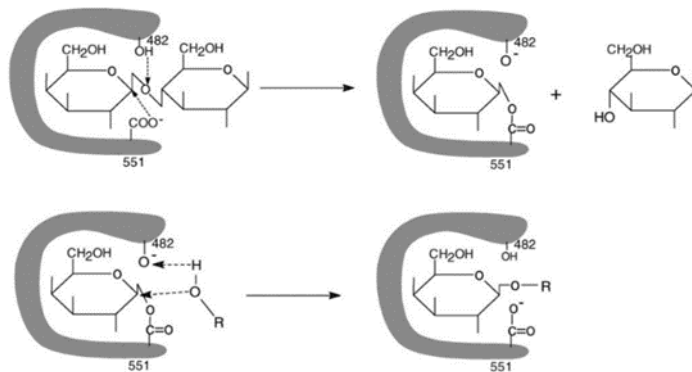


Εικόνα 2.12: Απεικόνιση β-γαλακτοζιδάσης προέλευσης από *Penicillium spp.*

Το ένζυμο της β-γαλακτοζιδάσης βρίσκεται σε μύκητες, ζυμομύκητες και βακτήρια. Μπορεί να συντεθεί και να απομονωθεί από τους μικροοργανισμούς αυτούς ενώ κυριότεροι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ως πηγή της β-γαλακτοζιδάσης είναι ο *Aspergillus oryzae* και ο *Kluyveromyces lactis*. Τέλος, έχει βρεθεί ότι η β-γαλακτοζιδάση υπάρχει και σε ορισμένα καρποφόρα δένδρα, όπως οι ροδακινιές και οι μηλιές. Η δράση του ενζύμου στα φυτά συνδέεται με την ωρίμανση πολλών καρπών μειώνοντας τις γαλακτοζυλομάδες του κυτταρικού τοιχώματος (Gosling et al. 2010, Liu et al. 2017).

Η ενζυμική υδρόλυση του γλυκοζιτικού δεσμού της λακτόζης πραγματοποιείται με όξινη κατάλυση παρουσία ενός δότη πρωτονίων και ενός πυρηνόφιλου. Ο μηχανισμός περιεγράφηκε για πρώτη φορά από τον Wellenfels, ο οποίος χρησιμοποίησε τη λακτάση από τον μικροοργανισμό *E. coli*. Στον μηχανισμό αυτό, η κυστόνη και η ιστιδίνη λειτουργούν ως δότες πρωτονίων και ως θέση πυρηνόφιλου, αντίστοιχα. Ωστόσο, σήμερα,

έχει γίνει γνωστό ότι η χρήση της β-γαλακτοζιδάσης από μικροοργανισμούς παρέχει το πλεονέκτημα να δρα και στις δύο θέσεις. Έτσι, κατά την ενζυμική αντίδραση η β-γαλακτοζιδάση λόγω των δύο γλουταμινικών οξέων που διαθέτει έχει διττή δράση: δότης πρωτονίων και θέση πυρηνόφιλου.

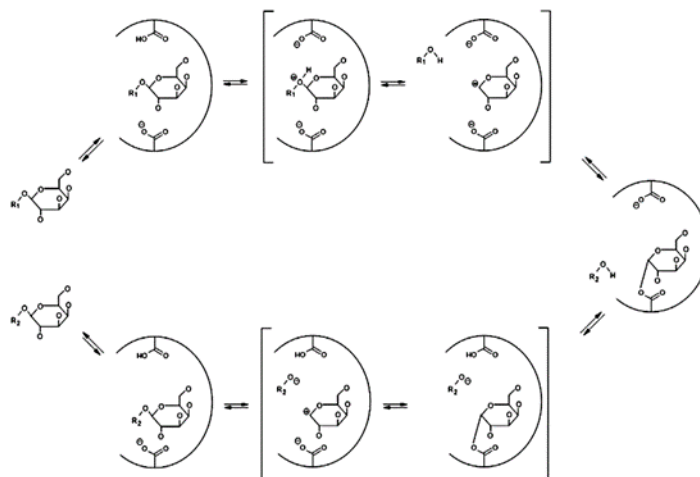


Εικόνα 2.13: Μηχανισμός υδρόλυσης λακτόζης από β-γαλακτοζιδάσης

Κατά το πρώτο στάδιο της αντίδρασης, σχηματίζεται ένα ενδιάμεσο σύμπλοκο μεταξύ του ενζύμου και της γαλακτοζυλομάδας, ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται ένα μόριο γλυκόζης. Στη συνέχεια, το σύμπλοκο αυτό μεταφέρεται και προσδένεται σε έναν δέκτη που διαθέτει ομάδα υδροξυλίου. Η επιλογή του δέκτη σε αυτό το δεύτερο στάδιο εξαρτάται από τη σύσταση του διαλύματος. Εάν η συγκέντρωση της λακτόζης στο διάλυμα είναι υψηλή, αυξάνεται η πιθανότητα το υπόλοιπο σύμπλοκο να προσδεθεί σε ένα άλλο μόριο λακτόζης, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός ολιγοσακχαρίτη. Αντίθετα, όταν η περιεκτικότητα της λακτόζης είναι χαμηλή και δεν υπάρχουν άλλα διαθέσιμα σάκχαρα, το ένζυμο απελευθερώνει ελεύθερη γαλακτόζη (Εικόνα 2.13, Zhou & Chen 2001).

Αν και η κύρια λειτουργία της β-γαλακτοζιδάσης είναι η υδρόλυση της λακτόζης, υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να προωθηθεί η αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίωσης. Μετά την υδρόλυση, στο υπόστρωμα παραμένει αδιάσπαστη λακτόζη καθώς και τα μονοσακχαρίδια γλυκόζη και γαλακτόζη. Σε αυτό το στάδιο, δέκτης της γαλακτοζυλομάδας μπορεί να είναι είτε κάποιο από τα μονοσάκχαρα είτε η ίδια η λακτόζη. Το αποτέλεσμα είναι η σύνθεση ποικίλων σακχάρων, όπως δισακχαρίτες, τρισακχαρίτες και ακόμη πιο πολύπλοκες ενώσεις με υψηλότερο βαθμό πολυμερισμού.

Η απόδοση της αντίδρασης της τρανσγαλακτοζυλίωσης εξαρτάται από την συγκέντρωση της λακτόζης στο διάλυμα και τις ιδιότητες του ενζύμου. Το ένζυμο θα πρέπει να μπορεί να απομακρύνει τα μόρια νερού από τη θέση πρόσδεσης και να επιτρέπει τη σύνδεση του συμπλόκου με πυρηνόφιλο σάκχαρο. Καθώς, η αντίδραση προχωράει η περιεκτικότητα της λακτόζης στο διάλυμα μειώνεται, ενώ οι GOS αυξάνονται. Όταν παρατηρηθεί η μέγιστη συγκέντρωση GOS, ο ρυθμός σύνθεσης των γαλακτοολιγοσακχαριτών ισούται με την υδρόλυση αυτών. Τότε αρχίζει να εμφανίζεται εντονότερα η υδρόλυση GOS μέχρι να επανέλθει η θερμοδυναμική ισορροπία στο διάλυμα. Στην Εικόνα 2.14 φαίνεται ο μηχανισμός αντίδρασης της β-γαλακτοζιδάσης με γλυκοζίδια (Gosling et al. 2010).



Εικόνα 2.14: Μηχανισμός αντίδρασης β-γαλακτοζιδάσης σε γαλακτοζίδια

2.4 Βιομηχανική αξιοποίηση της β-γαλακτοζιδάσης

Η β-γαλακτοζιδάση έχει ευρεία χρήση στη βιομηχανία, καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, στον τομέα των τροφίμων αξιοποιείται κυρίως στην επεξεργασία γαλακτοκομικών προϊόντων. Το ένζυμο μπορεί να είναι βακτηριακής ή μυκητιακής προέλευσης και χρησιμοποιείται κυρίως για την υδρόλυση της λακτόζης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να έχει μικρότερη συγκέντρωση λακτόζης, παράγοντας έτσι μια ποικιλία προϊόντων κατάλληλα για όσους εμφανίζουν δυσανεξία στη λακτόζη.

Παράλληλα, η βιομηχανία αξιοποιεί την ικανότητα της β-γαλακτοζιδάσης να καταλύει την αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίωσης για την σύνθεση ολιγοσακχαριτών. Η προσθήκη των γαλακτοολιγοσακχαριτών (GOS) σε γαλακτοκομικά προϊόντα ενισχύει τη θρεπτική τους αξία και τους προσδίδει πρεβιοτικές ιδιότητες, οφέλη υψηλής σημασίας για την υγεία των καταναλωτών. Επιπλέον, το ένζυμο συμβάλλει στον περιορισμό του φαινομένου της κρυστάλλωσης της λακτόζης, ένα φαινόμενο μη επιθυμητό σε προϊόντα, όπως τα παγωτά και τα συμπυκνωμένα γάλατα.

Εκτός από τον τομέα των τροφίμων, η β-γαλακτοζιδάση βρίσκει εφαρμογή και στη φαρμακοβιομηχανία. Χρησιμοποιείται σε σκευάσματα που λαμβάνονται πριν την κατανάλωση γαλακτοκομικών προϊόντων, συμβάλλοντας στη διατήρηση χαμηλού pH στο στομάχι. Επιπλέον, μελέτες έχουν αναδείξει τη δυνατότητα χρήσης του ενζύμου στην παραγωγή βιοαερίου, βιοαιθανόλης και βιοαισθητήρων.

2.5 Γαλακτοολιγοσακχαρίτες

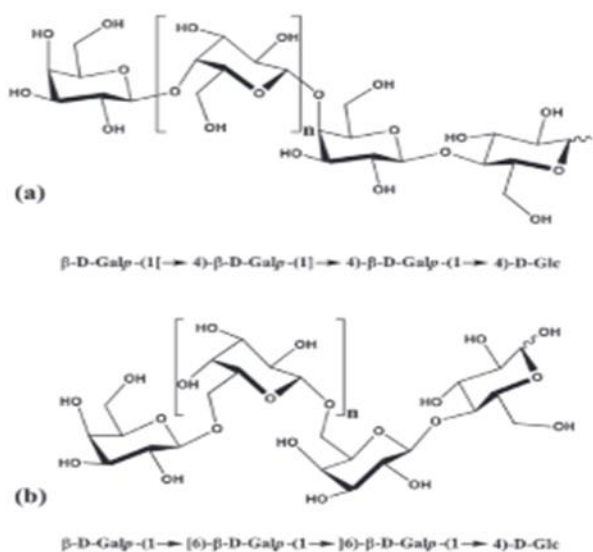
Οι γαλακτοολιγοσακχαρίτες (Galactooligosaccharides, GOS) έχουν λάβει σημαντικό ενδιαφέρον από την ερευνητική κοινότητα στο τομέα των τροφίμων λόγω της αναγνωρισμένης θρεπτικής τους αξίας και τα οφέλη τους στην ανθρώπινη υγεία. Η αξιοποίηση αυτών ως συστατικά τροφίμων στη βιομηχανία των τροφίμων έχει αρχίσει να αναπτύσσεται με κύρια εφαρμογή τους τα βρεφικά σκευάσματα, τα προϊόντα ζαχαροπλαστικής ως γλυκαντικά, καθώς και τα προϊόντα αρτοποιίας και ποτά.

Οι γαλακτοολιγοσακχαρίτες αποτελούν προϊόν ένωσης μονοσακχαριτών που παράγονται από παράλληλες αντιδράσεις τρανσγαλακτοζυλίσωσης. Αποτελούνται από μόρια γαλακτόζης και γλυκόζης και εμφανίζουν παρόμοια δομή με τους ολιγοσακχαρίτες του μητρικού γάλακτος. Είναι μη εύπεπτοι και οι πρεβιοτικές τους ιδιότητες τους καθιστούν αποδεκτούς στην επιστημονική κοινότητα. Μπορούν να παραχθούν διάφορα ολιγομερή που διαφέρουν ως προς τον βαθμό πολυμερισμού. Το τελικό προϊόν που προκύπτει από την αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίσωσης εξαρτάται από το ένζυμο που θα χρησιμοποιηθεί, την περιεκτικότητα σε λακτόζη καθώς και τις συνθήκες αντίδρασης (Coulrier et al. 2009).

Οι γαλακτοολιγοσακχαρίτες δρουν με δυο μηχανισμούς. Μπορούν να αναπτύσσουν επιλεκτικά ευεργετικά βακτήρια στην περιοχή της εντερικής μικροχλωρίδας αλλά και παράγουν λιπαρά οξέα βραχείας αλυσίδας. Λόγω των ευεργετικών τους ιδιοτήτων και την ενίσχυση του οργανισμού, η ζήτησή τους έχει αυξηθεί και κατ' επέκταση, τα τελευταία χρόνια, ο τομέας των τροφίμων έχει ενδιαφερθεί για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη των GOS. Ωστόσο, θέματα όπως νομοθεσία, ασφάλεια, σύνθεση, ιδιότητες και σταθερότητα αυτών, είναι σε πρώιμο στάδιο και εξελίσσονται ακόμη.

2.5.1 Παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών

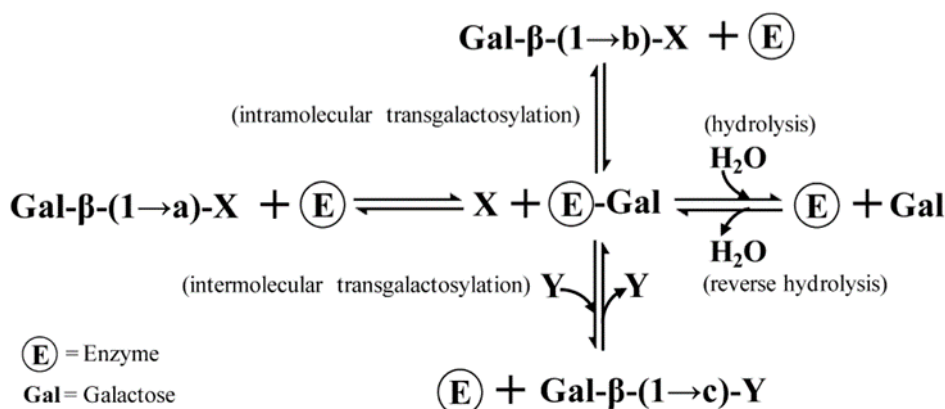
Η παραγωγή των γαλακτοολιγοσακχαριτών μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι με χρήση χημικών μεθόδων ενώ η δεύτερη προσέγγιση είναι μέσω ενζυμικών αντιδράσεων, με τον δεύτερο μηχανισμό να είναι ο πλέον διαδεδομένος. Η χημική σύνθεση ολιγοσακχαριτών από μονοσακχαρίτες απαιτεί την παρουσία ανόργανου οξέος και βασίζεται σε μία διαδικασία γνωστή ως “αναστροφή”, η οποία περιγράφηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1950, στο πλαίσιο της όξινης υδρόλυσης της λακτόζης. Μέσω αυτής της χημικής διεργασίας παράγεται ένα πολύπλοκο μείγμα δισακχαριτών και τρισακχαριτών, με συνδέσμους α- και β- ανωμερούς διαμόρφωσης (Εικόνα 2.15), καθώς και άνυδρα σάκχαρα. Η μέθοδος της χημικής σύνθεσης εφαρμόζεται σε πολλαπλά στάδια αντιδράσεων, κυρίως για την προστασία των υδροξυλίων ομάδων κατά την πορεία της σύνθεσης. Ωστόσο, η έλλειψη εκλεκτικότητας ως προς το τελικό προϊόν και οι απαιτητικές, συχνά σκληρές, συνθήκες που χρειάζονται για την αντίδραση καθιστούν αυτή τη μέθοδο ακατάλληλη για τη μαζική παραγωγή ολιγοσακχαριτών (Torres 2010).



Εικόνα 2.15: Χημική παραγωγή ολιγοσακχαριτών, (α) β-(1→4) δεσμός και (β) β-(1→6) δεσμός

Τα προβλήματα της χημικής σύνθεσης γαλακτοολιγοσακχαριτών μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση ενζύμων για την παραγωγή GOS. Η τεχνική της ενζυμικής αντίδρασης εκτός από μία εφικτή λύση αποτελεί και μία οικονομική διεργασία χωρίς να εμφανίζει αντίκτυπο στο περιβάλλον. Τα ένζυμα που απαιτούνται στη διεργασία αυτή είναι γλυκοζυλοτρανσφεράσες και γλυκοζιτικές υδρολάσες, με τις δεύτερες να χρησιμοποιούνται κυρίως από την βιομηχανία λόγω της εμπορικής τους διαθεσιμότητας και της χαμηλής τιμής τους.

Η ενζυμική σύνθεση γαλακτοολιγοσακχαριτών πραγματοποιείται μέσω μιας διφασικής διαδικασίας. Στο πρώτο στάδιο, το οποίο είναι μη αναστρέψιμο, σχηματίζεται ένα ενδιάμεσο σύμπλοκο μεταξύ της γαλακτοζυλομάδας και του ενζύμου. Κατά τη φάση αυτή απελευθερώνεται ένα μόριο γλυκόζης, το οποίο παραμένει ελεύθερο στο διάλυμα. Το ενδιάμεσο αυτό προϊόν, που φέρει ομοιοπολικό δεσμό, στη συνέχεια υφίσταται υδρόλυση μέσω μηχανισμού οξέος-βάσης, με αναστροφή της διαμόρφωσης. Στο δεύτερο στάδιο της αντίδρασης, η γαλακτοζυλομάδα μεταφέρεται σε έναν νουκλεόφιλο αποδέκτη – συνήθως ένα άλλο μόριο σακχάρου αντί για νερό – οδηγώντας στον σχηματισμό ενός ολιγοσακχαρίτη. Ο μηχανισμός αυτός απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.16 (Torres et al. 2010).



Εικόνα 2.16: Αντιδράσεις υδρόλυσης της λακτόζης και τρανσγαλακτοζυλίωσης με χρήση ενζύμου

Η μετατροπή της λακτόζης σε γαλακτοολιγοσακχαρίτες μέσω της δράσης της β-γαλακτοζιδάσης αποτελεί μια κινητικά ελεγχόμενη διεργασία, όπου η υδρόλυση και η τρανσγαλακτοζυλίωση βρίσκονται σε ανταγωνισμό. Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, η θερμοδυναμικά ευνοούμενη υδρόλυση της λακτόζης σε D-γαλακτόζη και D-γλυκόζη ανταγωνίζεται τη δράση της τρανσφεράσης, η οποία οδηγεί στη σύνθεση ενός πολύπλοκου μείγματος ολιγοσακχαριτών.

Η κατανόηση της χρονικής εξέλιξης της αντίδρασης είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του χρονικού σημείου στο οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση σε GOS. Η αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίωσης περιλαμβάνει τόσο ενδομοριακούς όσο και διαμοριακούς μηχανισμούς. Στην ενδομοριακή μεταφορά της γαλακτόζης παράγονται ισομερή της λακτόζης, ενώ κατά τη διαμοριακή τρανσγαλακτοζυλίωση σχηματίζονται γαλακτοολιγοσακχαρίτες. (Torres et al. 2010).

Όσον αφορά την προέλευση του ενζύμου, που θα συμμετέχει στην αντίδραση, καθορίζει την ικανότητα και την προτίμηση του κατά την αντίδραση της τρανσγαλακτοζυλίωσης, δηλαδή τη σύνδεση της γαλακτόζης με κάποιο άλλο σάκχαρο. Επιπλέον, η αρχική συγκέντρωση της λακτόζης αυξάνει την πιθανότητα το μόριο αποδέκτη να είναι η λακτόζη

και όχι το νερό, κάτι που θα οδηγούσε στην υδρόλυση. Κάποιες φορές, ωστόσο, οι GOS που έχουν ήδη σχηματιστεί δρουν ως υπόστρωμα και υδρολύονται πάλι κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Ακόμη, η θερμοκρασία και η τιμή pH του συστήματος θα πρέπει να βρίσκονται σε ένα εύρος τιμών, όπου το ένζυμο δρα και είναι επαρκώς σταθερό (*Fischer & Kleinschmidt 2018*). Η θερμοκρασία επηρεάζει τόσο τη σταθερότητα του ενζύμου όσο και τη διαλυτότητα της λακτόζης, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η ταχύτητα της αντίδρασης. Συνεπώς κατά την αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργούνται ευνοϊκότερες συνθήκες με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παραγωγή των γαλακτοολιγοσακχαριτών λόγω της υψηλότερης διαλυτότητας λακτόζης και μεγαλύτερου ρυθμού της αντίδρασης. Φυσικά, η αύξηση της θερμοκρασίας δεν πρέπει να υπερβαίνει το σημείο όπου καταστέλλεται η δράση του ενζύμου.

2.5.2 Χαρακτηρισμός γαλακτοολιγοσακχαριτών

Κατά την ενζυμική αντίδραση παράγεται ένα μείγμα ολιγοσακχαριτών, που πρέπει να ταυτοποιηθεί. Η ταυτοποίηση των μειγμάτων αυτών αποτέλεσε πρόκληση του τομέα της αναλυτικής χημείας. Στα μείγματα αυτά δύναται να εντοπιστούν αρκετές εκατοντάδες μεμονωμένες ενώσεις μαζί με τα ισομερή τους, οι οποίες μπορούν να διαφέρουν ως προς τον τύπο, τον αριθμό και τη σειρά των μονομερών στην αλυσίδα καθώς και τη σύνδεσή τους. Η επιλογή της τεχνικής ανάλυσης αποτελεί πρόκληση και βασίζεται από το βαθμό λεπτομέρειας που ζητείται, τον τύπο του ολιγοσακχαρίτη που πρόκειται να αναλυθεί και τη διαθεσιμότητά του. Μερικές από τις αναλυτικές τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα είναι Χρωματογραφία Αποκλεισμού Μεγέθους, Χρωματογραφία Ανιονεναλλαγής Υψηλής Απόδοσης με Παλμικό Αμπερομετρικό Ανιχνευτή, Χρωματογραφία Ανιονεναλλαγής Υψηλής Απόδοσης με Ανιχνευτή Μάζας, Υγρή Χρωματογραφία Υδρόφιλης Αλληλεπίδρασης και Ανάλυση Μεθυλίωσης (*Coulier 2009, Hernandez – Hernandez 2011*).

2.5.3 Τα οφέλη των γαλακτοολιγοσακχαριτών στην ανθρώπινη υγεία

Οι τομείς των τροφίμων και της υγείας είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Ένα τρόφιμο μπορεί να θεωρηθεί λειτουργικό εάν έχει αποδεδειγμένη ευεργετική δράση σε μία ή περισσότερες φυσιολογικές λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού, εάν προσφέρει την απαραίτητη θρεπτική αξία και εάν συμβάλλει στην βελτίωση και ενίσχυση της υγείας του ανθρώπου. Ακολουθώντας τον ορισμό αυτό, μια νέα κατηγορία λειτουργικών συστατικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία μεγάλη ποικιλία τροφίμων είναι οι γαλακτοολιγοσακχαρίτες.

Τα προϊόντα που προορίζονται για βρέφη και παιδιά αποτελούν τα κυριότερα τρόφιμα που παράγονται με χρήση GOS στην βιομηχανία των τροφίμων. Ο σημαντικότερος λόγος, που συντέλεσε στην ένταξη των GOS στα βρεφικά και παιδικά τρόφιμα, είναι η δομική και λειτουργική ομοιότητα αυτών με τους ολιγοσακχαρίτες που βρίσκονται φυσικά στο μητρικό γάλα. Το μητρικό γάλα περιέχει περισσότερα από 200 διαφορετικά είδη ολιγοσακχαριτών που αποτελούνται από πέντε κύριες δομικές μονάδες, τη γαλακτόζη, τη γλυκόζη, τη φουκόζη, το σιαλικό οξύ και την N-ακετυλογλυκοζαμίνη (*Bode & Jantscher-Kren 2012*). Ο ρόλος τους είναι να θρέφουν επιλεκτικά και να διεγείρουν την ανάπτυξη των καλών βακτηρίων του γαστρεντερικού συστήματος, να αποτρέπουν την προσκόλληση παθογόνων μικροοργανισμών στην επιφάνεια του εντερικού βλεννογόνου και να ενισχύουν το αναπτυσσόμενο ανοσοποιητικό σύστημα των βρεφών με στόχο την αντιμετώπιση μολύνσεων.

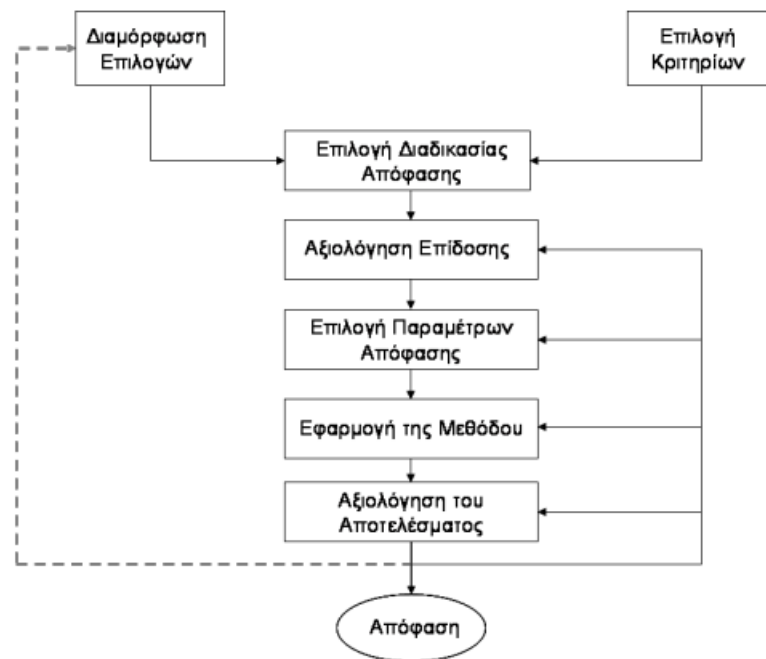
Οι βιομηχανικά παραγόμενοι GOS περιέχουν δύο από τις δομικές μονάδες των μητρικών GOS, τη γαλακτόζη και τη γλυκόζη, εμφανίζοντας, έτσι, παρόμοια δομή με αποτέλεσμα να δρουν όπως οι ολιγοσακχαρίτες του μητρικού γάλακτος. Πέρα από την πρόληψη και την αντιμετώπιση γαστρεντερικών διαταραχών από παθογόνα μικρόβια, τοξίνες και λοιμώξεις, συμβάλλουν επιπλέον στην πρόληψη αλλεργιών στα βρέφη. Ακόμη, βοηθούν στην απορρόφηση του ασβεστίου. Γεγονός αποτελεί ότι τα βρέφη απορροφούν έως και το 75% του ασβεστίου από το ανθρώπινο γάλα, κάτι που δεν παρατηρείται στα υπόλοιπα γάλατα, αφού το ποσοστό απορρόφησης δεν είναι ούτε το μισό (Leusen *et al.* 2014). Το ασβέστιο είναι ένα μέταλλο απαραίτητο για τα οστά και τη σωστή λειτουργία του εγκεφάλου, της καρδιάς και των μυών. Τέλος, έχει παρατηρηθεί μείωση της χοληστερόλης στο αίμα και μείωση της συχνότητας εμφάνισης ορισμένων τύπου καρκίνου.

Οι γαλακτοολιγοσακχαρίτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε τυποποιημένους και πρώιμους τύπους παρασκευασμάτων (γάλατα) για βρέφη, παρασκευάσματα δεύτερης βρεφικής ηλικίας (γάλατα, κρέμες, γιαούρτια) και άλλα είδη τροφίμων για ενήλικες. Χαρακτηρίζονται ως πρεβιοτικά, διότι προάγουν την ανάπτυξη ωφέλιμων βακτηρίων στο έντερο. Χρησιμοποιούνται παγκοσμίως όπως στις Ευρωπαϊκές χώρες, στις ΗΠΑ, στη Νότια Κορέα, στην Κίνα, στη Μαλαισία, στην Ινδία, στο Μεξικό και στην Αυστραλία. Φυσικά, σε κάθε χώρα τηρούνται και τα αντίστοιχα νομοθετικά πλαίσια.

2.6 Πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων

Ως πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) καλείται το σύνολο των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και σύγκριση εναλλακτικών λύσεων σε προβλήματα με αντικρουόμενα κριτήρια. Στοχεύουν στην εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης όταν απαιτείται συμβιβασμός μεταξύ πολλαπλών κριτηρίων και διαφόρων προτιμήσεων. Η αξιοποίηση των MCDA απομακρύνει την μονόπλευρη και μονοδιάστατη ανάλυση ενώ εισάγει τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη και υποβοηθάει στην λήψη αποφάσεων αξιοποιώντας τη θεωρία ωφέλειας πολλαπλών συνιστωσών. Σε αντίθεση με τις μονοκριτηριακές μεθόδους, όπου υπάρχει μόνο ένα κριτήριο βελτιστοποίησης, οι πολυκριτηριακές μέθοδοι επιτρέπουν ταυτόχρονη εξέταση αντικρουόμενων στόχων.

Οι MCDA μπορεί να είναι από απλές προσεγγίσεις, που απαιτείται μικρός όγκος πληροφοριών, έως αρκετά περίπλοκες μέθοδοι που βασίζονται σε μαθηματικές τεχνικές προγραμματισμού, όταν απαιτείται εκτενότερος όγκος πληροφοριών. Ο αποφασίζων καλείται να επιλέξει μεταξύ πολλαπλών κριτηρίων (ποσοτικά ή μη προσδιορισμένα) ενώ οι στόχοι είναι συγκρουόμενοι. Συνεπώς, η βέλτιστη λύση που προκύπτει εξαρτάται από τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα και πρέπει να αποτελεί ένα συμβιβασμό των αντικρουόμενων κριτηρίων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την διαμόρφωση και επιλογή των κριτηρίων, την αξιολόγηση των στοιχείων και παραμέτρων απόφασης πρώτου επιλεγεί η μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης. Φυσικά, ο χρήστης πρέπει να αξιολογήσει το αποτέλεσμα και να αποφασίσει εάν είναι αποδεκτό ή μη. Στην Εικόνα 2.17 (ΠΗΓΗ: ΠΣΥΑ: Ενότητα 1) αναπαριστάται η διαδικασία (Climaco 1997). Η υποστήριξη αποφάσεων με χρήση MCDA είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Σε κάθε επανάληψη, ο αποφασίζων μπορεί να αναθεωρήσει το μοντέλο που εφάρμοσε ως προς την καταλληλότητα και πληρότητά του μέχρι να μην επιδέχεται καμία άλλη βελτίωση το μοντέλο.



Εικόνα 2.17: Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας υποστήριξης πολλαπλών κριτηρίων

Η πολυκριτηριακή ανάλυση είναι σημαντική καθώς αντιμετωπίζει την πολυπλοκότητα των προβλημάτων. Αναγνωρίζει και διαχειρίζεται τα πολλαπλά κριτήρια που καθιστούν ένα πρόβλημα δύσκολο στην επίλυσή του. Βοηθά στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων παρέχοντας μια δομημένη προσέγγιση στην αξιολόγηση και σύγκριση εναλλακτικών λύσεων. Επιπλέον, ενισχύει τη διαφάνεια καθώς επιτρέπει τη συμμετοχή των αποφασιζόντων με στόχο την εξεύρεση συμβιβαστικών λύσεων σε περίπτωση αντικρουόμενων κριτηρίων απόφασης. Ουσιαστικά εισάγεται η έννοια της υποκειμενικότητας μέσω του καθορισμού στόχων και κριτηρίων διαφορετικής σημαντικότητας.

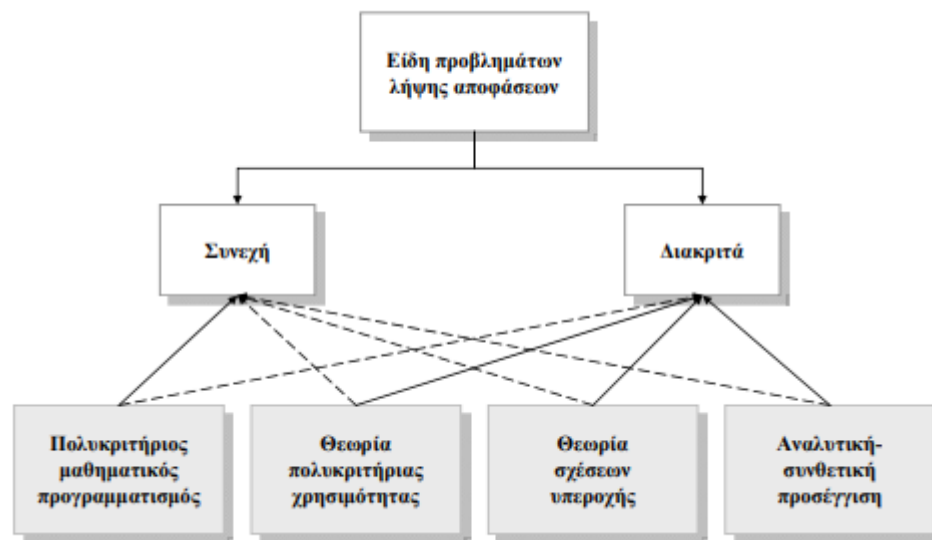
Οι MCDA χρησιμοποιούνται ευρέως σε τομείς όπως η μηχανική, η διοίκηση επιχειρήσεων, η περιβαλλοντική πολιτική, η υγειονομική περίθαλψη και η ενέργεια. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν προβλήματα επιλογής τεχνολογιών, σχεδιασμό έργων, προμήθειες και στρατηγικό σχεδιασμό μεταξύ άλλων. Για παράδειγμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παίζουν σημαντικό ρόλο ο ενεργειακός σχεδιασμός τόσο στην πολιτική, κοινωνική και οικονομική του διάσταση όσο και στην περιβαλλοντική. Η διαρκής αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση αποτελεί μια σημαντική πρόκληση καθώς απαιτείται η λήψη αποφάσεων μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών έργων. Αναλόγως το πεδίο εφαρμογής των πολυκριτηριακών μεθόδων επιλέγεται η καλύτερη δυνατή επιλογή βάσει των κριτηρίων.

2.6.1 Ανάλυση πολυκριτηριακών μεθόδων

Μέσα στα χρόνια έχουν περιγραφθεί διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις εμφανίζοντας διάφορες τόσο στην μορφή των υποδειγμάτων που αναπτύσσονται όσο και στη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη αυτών. Ερευνητές του κλάδου έχουν προτείνει διάφορες ομαδοποιήσεις των προσεγγίσεων της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η ομαδοποίηση που έχει υιοθετηθεί κυρίως περιλαμβάνει τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- i. **Πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός:** Στοχεύει στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης όταν υπάρχουν πολλαπλά, συχνά αντικρουόμενα, κριτήρια
- ii. **Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας:** Στοχεύει στην κατασκευή ενός συστήματος αξίας συνθέτοντας τις προτιμήσεις/αξίες των αποφασίζοντων σε ότι αφορά τα κριτήρια. Πρόκειται για την «Αμερικάνικη Σχολή» της πολυκριτηριακής ανάλυσης
- iii. **Θεωρία σχέσεων υπεροχής:** Στοχεύει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της μη – συγκρισιμότητας μεταξύ των εναλλακτικών. Πρόκειται για την «Γαλλική ή Ευρωπαϊκή Σχολή» της πολυκριτηριακής ανάλυσης
- iv. **Αναλυτική – συνθετική προσέγγιση:** Στοχεύει στην ανάπτυξη ενός γενικού μεθοδολογικού πλαισίου που μπορεί να κάνει χρήση ο αποφασίζων κατά την ανάλυση, καθορίζοντας το κατάλληλο υπόδειγμα σύνθεσης των κριτηρίων, το οποίο θα ανταποκρίνεται στο σύστημα προτιμήσεων/αξιών του. Πρόκειται για μια αντίθετη διαδικασία σε σχέση της ομάδας (ii)

Στην Εικόνα 2.18 (ΠΗΓΗ: Δούμπος (2000)) αποτυπώνεται η συμβολή των τεσσάρων αυτών προσεγγίσεων στην επίλυση τόσο συνεχών όσο και διακριτών προβλημάτων λήψης απόφασης. Είναι προφανές ότι και οι τρεις προσεγγίσεις (ii, iii & iv) του θεωρητικού ρεύματος δεν περιορίζονται στην αντιμετώπιση μόνο ενός είδους προβλήματος. Και οι τρεις θεωρίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση συνεχών προβλημάτων, βοηθώντας στην αποτύπωση του συστήματος προτιμήσεων των αποφασίζοντων. Αυτό όταν συνδυαστεί με τεχνικές του πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού οδηγεί στην επίλυση συνεχών προβλημάτων. Ομοίως, η προσέγγιση του πολυκριτηρίου μαθηματικού προγραμματισμού μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση διακριτών προβλημάτων.



Εικόνα 2.18: Συμβολή θεωρητικών ρευμάτων στην επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων

2.6.2 Μέθοδος Pareto

Η μέθοδος Pareto αποτελεί μεθοδολογία για την επίλυση προβλημάτων του πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού. Κατά την πολυκριτήρια βελτιστοποίηση, η έννοια της βέλτιστης λύσης αποδίδεται μέσω της έννοιας του βέλτιστου κατά Pareto (Pareto optimality). Μια λύση μπορεί να χαρακτηριστεί ως Pareto βέλτιστη όταν δεν υφίσταται άλλη εναλλακτική λύση που εμφανίζει υπεροχή σε όλα τα επιμέρους κριτήρια ταυτόχρονα και αυστηρά σε τουλάχιστον ένα από αυτά. Με πιο απλά λόγια, η μέθοδος εντοπίζει το σύνολο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων, δηλαδή τις λύσεις που δεν είναι χειρότερες σε όλα τα κριτήρια από άλλες λύσεις. Το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων καλείται σύνολο Pareto (Pareto front) και απεικονίζει τις πλέον αποδοτικές λύσεις για μια πολυκριτήρια αξιολόγηση.

Η εφαρμογή της Pareto είναι υψίστης σημασίας καθώς μειώνει το πλήθος των υποψήφιων λύσεων εστιάζοντας μόνο σε εκείνες που παρουσιάζουν την βέλτιστη ισορροπία μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων. Το σύνολο Pareto θα αποτελέσει την βάση για την εφαρμογή στη συνέχεια κάποιας μεθόδου MCDM. Πλεονεκτεί λόγω της απλότητάς της, της δυνατότητας μείωσης του πλήθους των λύσεων χωρίς απώλεια της ποικιλομορφίας και της ανεξαρτησίας της από υποκειμενικές προτιμήσεις. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι το μέγεθος των λύσεων που ανήκουν στο Pareto front να είναι μεγάλο καθιστώντας δυσχερή την τελική επιλογή, ενώ δεν παρέχει ιεράρχηση των λύσεων, δημιουργώντας την απαίτηση για αξιοποίηση επιπλέον εργαλείων ως προς την τελική απόφαση. Τέλος, η μέθοδος Pareto βρίσκει εφαρμογή σε τομείς όπως η διοικητική επιστήμη, η βιομηχανική παραγωγή, η εφοδιαστική αλυσίδα, η ενεργειακή διαχείριση και ο σχεδιασμός συστημάτων.

2.6.3 Μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος Technique for Order of Preference by Similarity (TOPSIS) είναι μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης, η οποία επιλέγεται σε προβλήματα εύρεσης καλύτερης εναλλακτικής λύσης από ένα σύνολο επιλογών βάσει πολλαπλών κριτηρίων. Αναπτύχθηκε ως εναλλακτική στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE, ανήκει στις μεθόδους της θεωρίας σχέσεων υπεροχής και βασίζεται στην αρχή ότι η επιλεγθείσα λύση πρέπει να απέχει την ελάχιστη γεωμετρική απόσταση από την θετική ιδεατή λύση και τη μέγιστη γεωμετρική απόσταση από την αρνητική ιδεατή λύση (Chen & Tsao, 2008 και Chen & Lee, 2010).

Η TOPSIS αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις μεθόδους στον χώρο της MCDA που αρχικά περιγράφηκε από τους Ching – Lai Hwang και Yoon το 1981. Πλεονεκτεί ως προς την απλότητά της τόσο στην κατανόηση όσο και στην εφαρμογή της. Υπολογιστικά είναι αποτελεσματική ειδικά σε μέτριο πλήθος αριθμό εναλλακτικών λύσεων και κριτηρίων. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων με την χρήση της μεθόδου TOPSIS είναι διάφανης και μπορεί εύκολα να εξηγηθεί ενώ ταυτόχρονα μπορεί να χειριστεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά δεδομένα. Ωστόσο, η TOPSIS εμφανίζει ευαισθησία ως προς τα βάρη των κριτηρίων απόφασης. Η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων είναι ευαίσθητη στα βάρη που έχουν ανατεθεί σε κάθε κριτήριο, και θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον προσδιορισμό των κατάλληλων βαρών. Τέλος, η ευελιξία που παρουσιάζει την καταστά ιδανική επιλογή σε διάφορους τομείς όπως η μηχανική, τα οικονομικά και η διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού.

Για την εφαρμογή της TOPSIS ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Σχεδίαση πίνακα απόφασης A

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{1n} \\ x_{m1} & x_{mn} \end{bmatrix}$$

όπου

$A_i \rightarrow$ οι εναλλακτικές με $i = 1, 2, \dots, m$

$C_j \rightarrow$ τα κριτήρια με $j = 1, 2, \dots, n$ και

$x_{ij} \rightarrow$ η επίδοση της εναλλακτικής A_i έναντι του κριτηρίου C_j

Υπολογισμός κανονικοποιημένου πίνακα απόφασης R

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1n} \\ r_{m1} & r_{mn} \end{bmatrix}$$

όπου

r_{ij} αναπαριστά την κανονικοποιημένη επίδοση της εναλλακτικής A_i έναντι του κριτηρίου C_j

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Υπολογισμός σταθμισμένου κανονικοποιημένου πίνακα P

$$p_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

όπου το διάνυσμα βαρών ορίζεται:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n] \text{ και } \sum_{j=1}^n w_j = 1$$

Προσδιορισμός διανυσμάτων της θετικής ιδεατής λύσης P^+ και της αρνητικής ιδεατής λύσης P^-

$$P^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+)$$

$$P^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-)$$

όπου:

$$p_i^+ = \{(\max p_{ij}, j \in J) \text{ or } (\min p_{ij}, j \in J')\}$$

$$p_i^- = \{(\min p_{ij}, j \in J) \text{ or } (\max p_{ij}, j \in J')\}$$

Υπολογισμός απόστασης κάθε εναλλακτικής από την θετική ιδεατή λύση S^+ και την αρνητική ιδεατή λύση D^-

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^-)^2}$$

Υπολογισμός σχετικής εγγύτητας RC_i στην θετική ιδεατή λύση για κάθε εναλλακτική A_i

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Κατάταξη

Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο RC_i , τόσο καλύτερη η πειραματική συνθήκη.

2.6.4 Μέθοδος VIKOR

Η μέθοδος VIKOR είναι μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης για λήψη αποφάσεων και αρχικά αναπτύχθηκε από τον Serafim Opricovic το 1979. Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η υπόθεση ότι ο συμβιβασμός είναι αποδεκτός για την επίλυση των αντικρουόμενων κριτηρίων και ότι ο αποφασίζων επιθυμεί μια λύση η οποία απέχει το λιγότερο από το ιδανικό. Η VIKOR ανήκει στις μεθόδους της θεωρίας σχέσεων υπεροχής και εξετάζει τα αντικρουόμενα και διαφορετικής φύσης κριτήρια προκειμένου να βρεθεί μια λύση συμβιβασμού.

Η βέλτιστη λύση μέσω της μεθόδου VIKOR υπολογίζεται βάσει της «εγγύτητας» από μια ιδεατή λύση. Για την αξιολόγηση της εναλλακτικής χρησιμοποιείται η L^p -μετρική, όπως διατυπώνεται ακολούθως:

$$d_p(x, y) = \begin{cases} \left(\sum_{j=1}^n |x_j - y_j|^p \right)^{1/p} & \text{for } 1 \leq p < \infty \\ \max_{1 \leq j \leq n} |x_j - y_j| & \text{for } p = \infty \end{cases}$$

όπου

$$x = (x_1, \dots, x_n) \quad , \quad y = (y_1, \dots, y_n) \in R^n$$

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα που παρέχει στον αποφασίζων να αντισταθμίσει δυο διαφορετικές οπτικές, ανάλογα την στρατηγική που θα επιλέξει. Σε περίπτωση που θέλει μια καλή επίδοση στο σύνολο των κριτηρίων επιλέγει $p = 1$ ενώ εάν στόχος είναι η διατήρηση χαμηλού βαθμού δυσαρέσκειας σε κάθε κριτήριο διακριτά επιλέγει $p = \infty$. Η VIKOR βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως η διαχείριση έργων, η διαχείριση κινδύνων επιλογή προϊόντων και προμηθευτών.

Τέλος, πολύ συχνά τα αποτελέσματα της VIKOR συγκρίνονται με αυτά της TOPSIS, παρότι χρησιμοποιεί διαφορετική συνάρτηση συνάθροισης και μέθοδο κανονικοποίησης των εναλλακτικών λύσεων. Η μέθοδος VIKOR κατά την αξιολόγηση των εναλλακτικών εστιάζει μόνο στη θετική ιδεατή λύση σε αντίθεση με την TOPSIS που λαμβάνει υπόψη τόσο την απόσταση από την θετική ιδεατή λύση όσο και από την αρνητική ιδεατή λύση. Συνεπώς, η VIKOR ταιριάζει καλύτερα σε λιγότερο επιφυλακτικούς αποφασίζοντες καθώς στοχεύει μόνο στην μεγιστοποίηση του οφέλους κατατάσσοντας τον κίνδυνο μιας απόφασης λιγότερο σημαντικό.

Για την εφαρμογή της VIKOR θεωρούμε:

$$\Omega \text{ς σύνολο εναλλακτικών: } A = \{A_1, \dots, A_m\}$$

$$\Omega \text{ς σύνολο κριτηρίων: } C = \{C_1, \dots, C_n\}$$

Ω ς επιδόσεις – βαθμολογίες των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο:

$$f_{ij}, i = 1, \dots, m \text{ και } j = 1, \dots, n$$

$$\Omega \text{ς βάρη των κριτηρίων: } W = \{w \in R^n : \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1, \dots, n\}$$

Έχοντας ορίσει τις παραμέτρους αυτές ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Προσδιορισμός καλύτερης και χειρότερης επίδοσης f_j^* και f_j^- αντίστοιχα για κάθε κριτήριο $C_j, j=1, \dots, n$

Αν το j -κριτήριο εκφράζει κάποιο όφελος, τότε:

$$f_j^* = \max_i f_{ij} \text{ και } f_j^- = \min_i f_{ij}$$

Αν το j -κριτήριο εκφράζει κάποιο κόστος, τότε:

$$f_j^* = \min_i f_{ij} \text{ και } f_j^- = \max_i f_{ij}$$

Υπολογισμός τιμών S_i και R_i , $i=1,...,m$

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \left| \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right|, i = 1, \dots, m$$

$$R_i = \max_j w_j \left| \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right|, i = 1, \dots, m$$

Υπολογισμός τιμών Q_i , $i=1,...,m$

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}, i = 1, \dots, m$$

όπου

$$S^* = \min_i S_i, S^- = \max_i S_i, R^* = \min_i R_i \text{ και } R^- = \max_i R_i$$

$v \in [0,1]$, και εκφράζει την οπτική του αποφασίζοντα ως προς τις δύο μετρικές προκειμένου να σταθμίσει την στρατηγική της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας έναντι της στρατηγικής της μεμονωμένης δυσαρέσκειας

Κατάταξη

Όσο μικρότερη τιμή έχει το Q_i , τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική λύση του προβλήματος. Συνεπώς, βέλτιστη λύση είναι αυτή με το ελάχιστο Q_i .

2.6.5 Μέθοδος PROMETHEE

Οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης Preference Ranking Optimization METHod for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) περιγράφηκαν από τους Bars, Mareschal και Vincke το 1986 και ανήκουν στην θεωρητική προσέγγιση σχέσεων υπεροχής επιτρέποντας την αποτελεσματική αντιμετώπιση προβλημάτων απόφασης (PROMETHEE I) και κατάταξης (PROMETHEE II). Θεωρείται μια αρκετά απλή μέθοδος ως προς την αντίληψη και εφαρμογή, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλής στον κλάδο των MCDA.

Στόχος είναι η επίτευξη μιας ευέλικτης στρατηγικής προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα αδυναμίας καθορισμού υποκειμενικότητας στα προβλήματα αξιολόγησης. Εισάγεται, συνεπώς, μια συνάρτηση προτίμησης για κάθε κριτήριο, με την οποία θα προσδιοριστεί και ο βαθμός προτίμησης μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων. Υπολογίζεται η θετική και η αρνητική ροή προτίμησης για κάθε εναλλακτική καθώς και η καθαρή ροή που αποτελεί τη διαφορά της αρνητικής από την θετική ροή. Οι θετικές ροές προτίμησης εκφράζουν την κυριαρχία μιας εναλλακτικής έναντι των υπόλοιπων λύσεων ενώ οι αρνητικές ροές εκφράζουν το κατά πόσο κυριαρχείται μια εναλλακτική από τις υπόλοιπες.

Οι μέθοδοι PROMETHEE έχουν συνεισφέρει στην θεωρητική προσέγγιση και πρακτική αντιμετώπιση πολυδιάστατων προβλημάτων που συναντά κανείς στον τομέα της χρηματοοικονομικής διοίκησης. Προβλήματα που αφορούν αξιολόγηση επενδυτικών

ευκαιριών ή κεφαλαίων, αξιολόγηση έργων και διαχείριση κινδύνου είναι οι κυριότερες εφαρμογές των PROMETHEE.

Για την εφαρμογή της PROMETHEE ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Υπολογισμός βαρών κριτηρίων

Είτε ορίζονται από τον αποφασίζων, είτε επιλέγεται ισοβαρής προσέγγιση είτε υπολογίζονται με χρήση μεθόδου υπολογισμού και απόδοσης βαρύτητας στα κριτήρια

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

Υπολογισμός συνάρτησης προτίμησης

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad \forall (a, b) \in A$$

όπου

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$$

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1$$

$$P_j(a, b) = 0, \text{ όταν } g_j(a) - g_j(b) \leq 0$$

Υπολογισμός του πολυκριτηρίου δείκτη προτίμησης

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b)$$

Υπολογισμός ροών υπεροχής

Θετική ροή $\varphi^+(a)$

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

Αρνητική ροή $\varphi^-(a)$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

Καθαρή ροή $\varphi(a)$

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$$

Κατάταξη

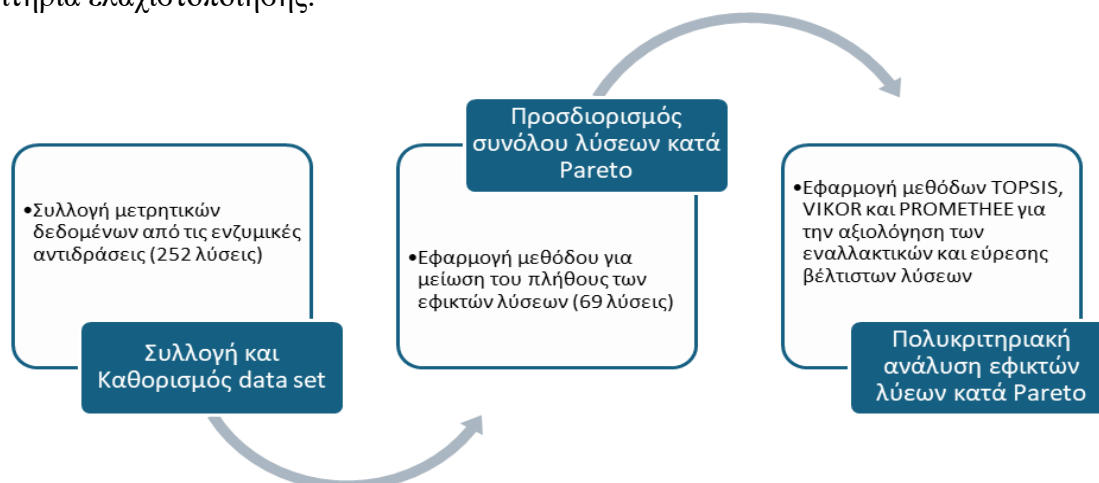
Μπορεί να υπάρξει μερική κατάταξη των δράσεων μέσω PROMETHEE I είτε ως προς τις θετικές ροές (υψηλότερη ϕ^+ οδηγεί σε υψηλότερη θέση στην κατάταξη) είτε ως προς τις αρνητικές ροές (χαμηλή ϕ^- οδηγεί σε υψηλότερη θέση στην κατάταξη). Για πλήρη κατάταξη των δράσεων μέσω PROMETHEE II γίνεται σύγκριση ως προς τις καθαρές ροές ϕ όπου υψηλότερη τιμή οδηγεί σε υψηλή θέση κατάταξης.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόζονται πολυκριτηριακές μέθοδοι για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ενζυμικής παραγωγής γαλακτοολιγοσακχαριτών από το τυρόγαλο. Το τυρόγαλο συνιστά ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα, καθώς παράγεται σε μεγάλες ποσότητες από τις μονάδες τυροκομίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 85–90% του αρχικού όγκου γάλακτος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τυριού καταλήγει ως τυρόγαλο. Η υψηλή του περιεκτικότητα σε λακτόζη το καθιστά κατάλληλο υπόστρωμα για τη βιομηχανική παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών. Η αυξημένη καταναλωτική ζήτηση για GOS οφείλεται κυρίως στις πρεβιοτικές του ιδιότητες, οι οποίες συμβάλλουν στη βελτίωση της εντερικής υγείας. Η ανάγκη για ισορροπημένη και λειτουργική διατροφή έχει οδηγήσει τις βιομηχανίες τροφίμων στην υιοθέτηση καινοτόμων στρατηγικών, με στόχο την ανάπτυξη προϊόντων εμπλουτισμένων με θρεπτικά συστατικά, όπως οι GOS. Αυτή η τάση αποτέλεσε το έναυσμα για την εντατικοποίηση της σχετικής έρευνας ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, με σημαντικό αριθμό επιστημονικών μελετών να δημοσιεύονται έκτοτε.

Έχουν πραγματοποιηθεί 18 ενζυμικές αντιδράσεις (πειράματα) που διαφέρουν ως προς την αρχική συγκέντρωση λακτόζης, την ενεργότητα του ενζύμου και τη θερμοκρασία. Για κάθε πείραμα καταγραφόταν η απόδοση σε GOS, η υπολειπόμενη συγκέντρωση λακτόζης, η παραγόμενη γαλακτόζη και ο χρόνος της ενζυμικής αντίδρασης. Στον Πίνακα 3.1 καταγράφονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι των πειραμάτων των ενζυμικών αντιδράσεων που λήφθηκαν τα δεδομένα. Συνολικά συλλέχθηκαν 252 set μετρήσεων. Κάθε μέτρηση αποτελείται από την τετράδα των αποτελεσμάτων Απόδοση GOS, συγκέντρωση παραγόμενης γαλακτόζης, χρόνος ενζυμικής αντίδρασης και εναπομείνουσα συγκέντρωση λακτόζης.

Για την εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων στο data set επιλέχθηκε πρώτα να βρεθεί το μέτωπο βέλτιστων λύσεων. Εφαρμόζοντας την μέθοδο Pareto περιορίζεται το σύνολο των λύσεων σε αυτές που είναι αποδοτικότερες επιλογές, μη λαμβάνοντας έτσι ο χρήστης το πλήρες εύρος κάθε παραμέτρου. Προέκυψαν 69 βέλτιστες λύσεις που στη συνέχεια αναλύθηκαν με τις μεθόδους TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE προκειμένου να αξιολογηθούν και να καταταχτούν σε κλίμακα βέλτιστων επιλογών. Κατά την εφαρμογή των MCDA ο αποφασίζων καλείται να αποφασίσει μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης GOS και της συγκέντρωσης της παραγόμενης γαλακτόζης ενώ τα κριτήρια χρόνος και υπολειπόμενη συγκέντρωση λακτόζης αποτελούν κριτήρια ελαχιστοποίησης.



Εικόνα 5.1 : Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

Πίνακας 3.1: Πειραματικές συνθήκες ενζυμικής αντίδρασης

C _{lac,initial} (% w/v)	Ενζυμικό φορτίο (U/mL)	Θερμοκρασία (οC)	pH
5	0,011	30	7
	0,022		
	0,045		
	0,011	40	
	0,022		
	0,045		
10	0,011	30	
	0,022		
	0,045		
	0,011	40	
	0,022		
	0,045		
15	0,011	30	
	0,022		
	0,045		
	0,011	40	
	0,022		
	0,045		

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση – Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.1 Εύρεση εφικτών λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto

Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην πολυκριτηριακή ανάλυση, η έννοια του Pareto χρησιμοποιείται για να εντοπίσουμε τις βέλτιστες εφικτές λύσεις όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα αντικρουόμενα κριτήρια. Η χρήση του Pareto επιτρέπει τη μείωση του πλήθους των εναλλακτικών εφικτών λύσεων, εστιάζοντας στις πιο υποσχόμενες εφικτές λύσεις για περαιτέρω αξιολόγηση με πολυκριτηριακές μεθόδους.

Το αρχικό data set αποτελούταν από 252 μετρήσεις. Εφαρμόζοντας την μέθοδο Pareto το πλήθος των βέλτιστων λύσεων προκύπτει ίσο με 69. Όλες οι εφικτές λύσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα Α του Παραρτήματος ενώ οι κατά Pareto λύσεις είναι αυτές που χαρακτηρίζονται ως no-dominant. Για την εφαρμογή της μεθόδου Pareto χρησιμοποιήθηκε Python τρέχοντας τον ακόλουθο κώδικα.

```
import pandas as pd
import numpy as np
def is_dominated(candidate, others, maximize_mask):
    --Έλεγχος εάν μια εφικτή λύση κυριαρχεί άλλης εφικτής λύσης
    for _, other in others.iterrows():
        better_or_equal = []
        strictly_better = []
        for i, to_max in enumerate(maximize_mask):
            if to_max:
                better_or_equal.append(other[i] >= candidate[i])
                strictly_better.append(other[i] > candidate[i])
            else:
                better_or_equal.append(other[i] <= candidate[i])
                strictly_better.append(other[i] < candidate[i])
        if all(better_or_equal) and any(strictly_better):
            return True
    return False
def pareto_front(df, maximize_mask):
    --Επιστρέφει μόνο τις μη κυριαρχούμενες (βέλτιστες κατά Pareto) λύσεις από το df
    pareto_mask = []
    for i in range(len(df)):
        candidate = df.iloc[i]
        others = df.drop(index=i)
        dominated = is_dominated(candidate, others, maximize_mask)
        pareto_mask.append(not dominated)
    return df[pareto_mask]
--Φόρτωση στην python το excel αρχείο με τα δεδομένα
file_path = "Data_ez.xlsx"
sheet_name = "Sheet1"
df = pd.read_excel(file_path, sheet_name=sheet_name)
--Ορισμός των στηλών που περιέχουν τα κριτήρια
objective_columns = ["GOS", "Cgal", "Time", "Clac"]
df_obj = df[objective_columns]
```

--Ορισμός κριτηρίων ως στόχος μεγιστοποίησης (True) ή ελαχιστοποίησης (False)

`maximize_mask = [True, True, False, False]`

--Υπολογισμός μέτωπου Pareto

`pareto_df = pareto_front(df_obj, maximize_mask)`

--Ανάκτηση γραμμών που αντιστοιχούν σε λύσεις κατά Pareto

`pareto_full = df.loc[pareto_df.index]`

--Αποθήκευση αποτελέσματος

`pareto_full.to_excel("pareto_front.xlsx", index=False)`

`print("Pareto front saved to pareto_front.xlsx")`

4.2 Πολυκριτηριακή ανάλυση εφικτών λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto

4.2.1 Μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας τα ίδια κριτήρια αξιολόγησης, αλλά με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στάθμισης: ισοβαρή και ανισοβαρή βάρη. Στην περίπτωση της ισοβαρούς προσέγγισης για τα κριτήρια Απόδοση GOS (%), Cgal (%w/v), Χρόνος (min) & Clac (%w/v) είχαν βαρύτητα προτίμησης 0,25. Αντιθέτως, στην ανισοβαρή προσέγγιση τα βάρη για τα κριτήρια ορίστηκαν ως 0,6 για την Απόδοση GOS (%), 0,1 για τη Cgal (%w/v), 0,2 για τον Χρόνος (min) & 0,1 για τη Clac (%w/v).

Με την ισοβαρή προσέγγιση, όλα τα κριτήρια θεωρούνται εξίσου σημαντικά, γεγονός που εξασφαλίζει ουδετερότητα. Αυτό, όμως, ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζει την πραγματική επιρροή των παραμέτρων. Αντίθετα, η χρήση ανισοβαρών βαρών ενσωματώνει τη σχετική βαρύτητα του κάθε κριτηρίου, προσφέροντας πιο ρεαλιστικά και στοχευμένα αποτελέσματα. Για τη μελέτη αυτή μεγαλύτερη επιρροή έχει η απόδοση σε GOS καθώς κύριος στόχος είναι η μέγιστη παραγωγή γαλακτοολιγοζακχαριτών ενώ ο χρόνος αποτελεί το δεύτερο σε σημαντικότητα κριτήριο με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής GOS. Η Cgal (%w/v) και η Clac (%w/v) παρουσιάζουν ουδετερότητα ως προς την επιλογή.

Στον πίνακα 4.2 αποτυπώνεται η κατάταξη των πειραμάτων βάσει της μεθόδου TOPSIS για ισοβαρή και ανισοβαρή προσέγγιση. Η συγκριτική ανάλυση των κατατάξεων καταδεικνύει αξιοσημείωτες διαφορές. Το πείραμα 244 από την 1^η θέση στην ισοβαρή κατάταξη, κατεβαίνει στην 28^η στην ανισοβαρή, δείχνοντας υπερεκτίμηση λιγότερο κρίσιμων κριτηρίων στην αρχική στάθμιση. Αντίστροφα, το πείραμα 29 ανεβαίνει από την 15^η στην 1^η θέση με ανισοβαρή προσέγγιση, δείχνοντας ότι κάποιο από τα βασικά κριτήρια επηρέασε καθοριστικά το αποτέλεσμα. Αντίστοιχες σημαντικές βελτιώσεις σημειώνουν τα πειράματα 85 (από 23^η θέση στην 3^η), 141 (από 25^η θέση στην 5^η) και 155 (από 24^η θέση στην 4^η).

Πειράματα όπως το 157, 158 και 159 παρότι είχαν υψηλή κατάταξη με ισοβαρή προσέγγιση (5^η, 4^η και 6^η θέση αντίστοιχα) παρουσίασαν σημαντική πτώση με χρήση ανισοβαρών κριτηρίων (20^η, 24^η και 27^η θέση). Αυτό υποδηλώνει υπερεκτίμηση ορισμένων δευτερευόντων παραμέτρων στην ισοβαρή προσέγγιση. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν, επίσης, τα πειράματα με σταθερή κατάταξη ή μικρές αποκλίσεις. Πειράματα με σταθερή κατάταξη είναι τα 34, 62, 233, 248, 249 και 250, υποδεικνύοντας ισορροπημένες αποδόσεις σε όλα τα κριτήρια.

Αξιολογώντας τις συνολικές μεταβολές, η ανισοβαρή προσέγγιση οδηγεί σε πιο διαφοροποιημένες και στοχευμένες κατατάξεις, ενσωματώνοντας την ουσία του κάθε κριτηρίου στη λήψη απόφασης. Αντίθετα, η ισοβαρής προσέγγιση αποδίδει μεγαλύτερη σταθερότητα, αλλά ενδέχεται να αποκρύπτει κρίσιμες διαφορές μεταξύ εναλλακτικών. Συμπερασματικά, η στάθμιση των κριτηρίων επηρεάζει καθοριστικά τα αποτελέσματα της μεθόδου TOPSIS, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη επιλογής κατάλληλων βαρών ανάλογα με το σκοπό της ανάλυσης.

Πίνακας 4.1: Κατάταξη λύσεων Pareto εφαρμόζοντας μέθοδο TOPSIS

A/A	Κατάταξη	
	TOPSIS Ισοβαρή	TOPSIS Ανισοβαρή
22	33	26
27	60	57
29	15	1
33	13	8
34	18	18
35	22	17
36	32	25
37	38	35
38	42	41
39	46	45
40	51	50
41	59	56
62	14	14
63	21	19
65	37	34
68	50	49
69	58	54
72	12	2
73	7	13
74	3	7
75	8	6
76	10	11
77	20	16
78	31	23
79	36	33
80	41	40
81	45	44
82	49	48
83	57	53
85	23	3
98	68	66
112	66	63
125	56	58
140	69	69

141	25	5
153	54	59
154	65	62
155	24	4
156	17	10
157	5	20
158	4	24
159	6	27
160	11	29
161	19	31
162	29	32
163	34	37
164	40	42
165	44	46
166	48	51
167	53	55
168	64	61
183	28	15
197	27	12
210	67	67
224	63	68
233	39	39
238	62	65
240	26	9
242	9	21
243	2	22
244	1	28
245	16	30
246	30	36
247	35	38
248	43	43
249	47	47
250	52	52
251	55	60
252	61	64

4.2.2 Μέθοδος VIKOR

Η μέθοδος VIKOR, όπως και η TOPSIS, αποτελεί μια πολυκριτηριακή μέθοδο λήψης αποφάσεων που βασίζεται στον προσδιορισμό της λύσης με το μικρότερο συμβιβασμό μεταξύ αντιφατικών κριτηρίων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφαρμόστηκε σε δύο παραλλαγές: ως ισοβαρή και ως ανισοβαρή προσέγγιση, διατηρώντας τα ίδια κριτήρια αξιολόγησης. Στην περίπτωση της ισοβαρούς προσέγγισης όλα τα κριτήρια (Απόδοση GOS (%), Cgal (%w/v), Χρόνος (min) και Clac (%w/v)) είχαν βάρος 0,25. Αντιθέτως, στην ανισοβαρή προσέγγιση τα βάρη για τα κριτήρια ορίστηκαν ως 0,6 για την Απόδοση GOS (%), 0,1 για τη Cgal (%w/v), 0,2 για τον Χρόνος (min) & 0,1 για τη Clac (%w/v).

Στον πίνακα 4.3 αποτυπώνεται η κατάταξη των πειραμάτων βάσει της μεθόδου VIKOR για ισοβαρή και ανισοβαρή προσέγγιση. Η σύγκριση αποκαλύπτει μεγάλες ανακατατάξεις όταν χρησιμοποιήθηκαν άνισα βάρη. Για παράδειγμα από την 24^η θέση στην ισοβαρή προσέγγιση μετακινείται στην 1^η θέση στην ανισοβαρή ενώ το πείραμα 248 από την 14^η καταλαμβάνει την 2^η θέση, δείχνοντας ότι υπερτερούσαν σε κριτήρια με μεγάλη βαρύτητα. Παρόμοια άνοδο παρουσιάζουν και τα πειράματα 250 (από την 28^η θέση στην 3^η) και 251 (από την 34^η θέση στην 4^η), εδραιώνοντας τη σημασία της βαρύτητας στα κριτήρια απόφασης.

Αντίθετα, υπήρξαν και πειράματα που εμφάνισαν σημαντική πτώση στην κατάταξη όταν μελετήθηκαν στην ανισοβαρή προσέγγιση. Οι περιπτώσεις αυτές δηλώνουν ότι η καλή επίδοση σε λιγότερο σημαντικά κριτήρια επηρέαζε δυσανάλογα την κατάταξή τους με ισοβαρή στάθμιση. Αυτές οι περιπτώσεις είναι τα πειράματα 29 (από την 45^η θέση στην 66^η), 85 (από την 23^η θέση στην 63^η) και 141 (από την 17^η θέση στην 64^η). Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, ότι πολλά πειράματα που ανήκαν στην πρώτη δεκάδα της ισοβαρούς κατάταξης υποχώρησαν σημαντικά, όπως το πείραμα 183 από την 6^η θέση κατέλαβε την 67^η στην ανισοβαρή προσέγγιση και το πείραμα 240 από την 3^η θέση στην 49^η.

Τέλος, παρατηρούνται και περιπτώσεις σταθερότητας όπου διατήρησαν παρόμοια θέση ανεξάρτητα από την προσέγγιση ως προς τα βάρη. Τέτοια πειράματα είναι τα 22 και 238, δείχνοντας ότι εμφανίζουν ισορροπημένη απόδοση σε όλα τα κριτήρια ανεξαρτήτως βαρύτητας.

Η μέθοδος VIKOR αποκαλύπτει έντονες διαφοροποιήσεις στις τελικές κατατάξεις όταν αλλάζει η στάθμιση των κριτηρίων, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημασία επιλογής κατάλληλων βαρών για ρεαλιστική και αντικειμενική αξιολόγηση. Η ανισοβαρής στάθμιση στη VIKOR οδηγεί σε δυναμικότερες αλλαγές και αναδεικνύει διαφορετικές λύσεις ως βέλτιστες. Η επιλογή των βαρών δεν είναι τυπικό στάδιο αλλά κρίσιμο βήμα με σημαντικό αντίκτυπο στην απόφαση. Τέλος, η μέθοδος VIKOR φαίνεται να επιφέρει πιο έντονες διαφοροποιήσεις στις κατατάξεις από ό,τι η TOPSIS όταν εφαρμόζονται ανισοβαρή βάρη. Αυτό οφείλεται στη φύση της μεθόδου, που εστιάζει στη συμβιβαστική λύση και στο βαθμό δυσaréσκειας, ενισχύοντας τις επιδράσεις συγκεκριμένων κριτηρίων.

Πίνακας 4.2: Κατάταξη λύσεων Pareto εφαρμόζοντας μέθοδο VIKOR

Α/Α	Κατάταξη	
	VIKOR Ισοβαρή	VIKOR Ανισοβαρή
22	32	32
27	33	28
29	45	66
33	31	37
34	26	24
35	35	31
36	46	35
37	52	43
38	54	45
39	50	47
40	48	50
41	55	54

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

62	27	34
63	30	27
65	53	48
68	59	56
69	62	60
72	40	46
73	39	29
74	42	40
75	41	42
76	49	38
77	56	51
78	64	55
79	65	57
80	66	62
81	68	65
82	69	68
83	67	69
85	23	63
98	13	25
112	29	52
125	44	23
140	5	16
141	17	64
153	47	21
154	37	53
155	11	59
156	12	30
157	19	18
158	21	14
159	22	12
160	16	10
161	18	9
162	38	13
163	51	19
164	57	22
165	61	33
166	58	39
167	63	44
168	43	58
183	7	67
197	4	61
210	20	26
224	25	20
233	1	5
238	36	36
240	3	49
242	6	17
243	8	15

244	10	11
245	9	8
246	2	7
247	15	6
248	14	2
249	24	1
250	28	3
251	34	4
252	60	41

4.2.3 Μέθοδος PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE αποτελεί μια πολυκριτηριακή μέθοδο αξιολόγησης των εφικτών λύσεων βασιζόμενη στη σύγκριση κάθε εναλλακτικής με κάθε άλλη ως προς το σύνολο των κριτηρίων. Στην παρούσα ανάλυση υπολογίστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων της PROMETHEE I (θετική και αρνητική ροή) και PROMETHEE II (καθαρή ροή) κατατάσσοντας στην αντίστοιχη θέση τα πειράματα. Η θετική ροή δείχνει την υπεροχή μίας λύσης έναντι των άλλων, η αρνητική ροή αποτυπώνει πόσο υστερεί μία λύση σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές, ενώ η κανονική ροή είναι η διαφορά τους και αποτελεί βασικό δείκτη συνολικής κατάταξης.

Βάσει της κανονικής ροής αρκετά πειράματα καταλαμβάνουν την κορυφαία θέση υποδηλώνοντας την ισοδυναμία στην υπεροχή τους σύμφωνα με την PROMETHEE II. Συγκεκριμένα, τα πειράματα 29, 85, 141, 155, 183, 197, 240, 243, 244, 245, 246 και 247 καταλαμβάνουν την 1^η θέση παρά τις διαφορετικές τιμές ϕ^+ και ϕ^- . τα πειράματα αυτά υπερέρχουν ή υστερούν με παρόμοιο τρόπο απέναντι σε άλλες εναλλακτικές.

Συγκρίνοντας τις κατατάξεις που προκύπτουν βάσει των PROMETHEE I και II φαίνονται να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις. Για παράδειγμα, το πείραμα 22 κατατάσσεται 1^ο στην PROMETHEE I αλλά βρίσκεται πιο χαμηλά στην κατάταξη βάσει την PROMETHEE II. Αυτό αποκαλύπτει ότι, παρά την ισχυρή υπεροχή το πείραμα αυτό δέχθηκε και υσχυρή υποτίμηση από άλλα πειράματα, μειώνοντας την τελική του κατάταξη. Ωστόσο, υπάρχουν και λύσεις που εμφανίζουν σταθερότητα. Τα πειράματα 36, 37 και 38 εμφανίζουν σχετικά κοντινές τιμές σε θετική και αρνητική ροή προτίμησης με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μέτριες τιμές στην κανονική ροή. Αυτό υποδηλώνει μια σταθερή αλλά όχι κυρίαρχη επίδοση των κριτηρίων στα πειράματα αυτά. Στις περιπτώσεις αυτές η κανονική ροή δρα ως ουδέτερος δείκτης αξιολόγησης αφού η υπεροχή και η υστέρηση είναι σχεδόν ισοδύναμες.

Εν κατακλείδι, η μέθοδος PROMETHEE αναδεικνύει τα σύνθετα χαρακτηριστικά κάθε πειράματος τόσο στα σημεία υπεροχής όσο και υστέρησης. Η PROMETHEE I παρουσιάζει μια πρώτη εκτίμηση για το πώς μια λύση αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες ενώ η PROMETHEE II ακολουθεί προκειμένου να δείξει μια πιο σαφή εικόνα στην κατάταξη καθώς λαμβάνει υπόψη το καθαρό όφελος. Η ύπαρξη πολλών λύσεων στην 1^η θέση της PROMETHEE II αναδεικνύει μια πιθανή σύμπτωση λύσεων με ισοδύναμη συνολική αξία. Για να αντιμετωπιστεί απαιτείται χρήση πρόσθετων κριτηρίων ή εκ νέου στάθμιση για να διαφοροποιηθούν οι λύσεις.

Πίνακας 4.3: Κατάταξη λύσεων Pareto εφαρμόζοντας μέθοδο PROMETHEE

Α/Α	Κατάταξη		
	PROMETHEE I (φ+)	PROMETHEE I (φ-)	PROMETHEE II (φ)
22	1	68	19
27	2	66	39
29	3	69	1
33	4	67	10
34	5	64	63
35	6	65	44
36	7	63	50
37	8	62	56
38	9	56	58
39	10	59	43
40	11	59	33
41	12	58	29
62	13	59	18
63	14	55	34
65	15	54	31
68	16	52	38
69	17	53	25
72	18	56	7
73	19	48	41
74	20	49	34
75	21	50	18
76	22	47	34
77	23	40	43
78	24	40	36
79	25	42	28
80	26	42	23
81	27	39	23
82	28	44	14
83	29	44	8
85	30	51	1
98	31	37	31
112	32	35	28
125	33	34	30
140	34	33	29
141	35	46	1
153	36	30	32
154	37	31	27
155	38	38	1
156	39	35	4
157	40	32	10
158	41	29	18

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

159	42	28	19
160	43	26	22
161	44	24	22
162	45	23	23
163	46	19	23
164	47	17	23
165	48	18	22
166	49	22	18
167	50	19	16
168	51	19	11
183	52	26	1
197	53	25	1
210	54	15	13
224	55	13	15
233	56	11	13
238	57	10	13
240	58	16	1
242	59	14	5
243	60	11	1
244	61	9	1
245	62	8	1
246	63	7	1
247	64	6	1
248	65	5	2
249	66	4	2
250	67	3	3
251	68	2	2
252	69	1	1

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαδεδομένες πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων (TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE) προκειμένου να επιλεγθούν οι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής γαλακτοολογοσακχαριτών από τυρόγαλο. Ωστόσο, από την ανάλυση προέκυψε ότι κάθε μία από τις μεθόδους κατέληξε σε διαφορετική κατάταξη των πειραμάτων.

Ο κυριότερος λόγος των διαφορετικών αποτελεσμάτων οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό που εφαρμόζει κάθε μέθοδος. Συγκεκριμένα, η μέθοδος TOPSIS αξιολογεί κάθε λύση συγκρίνοντας την με μια ιδεατή και μια αντι-ιδεατή λύση. Κατά συνέπεια, ευνοεί τις λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην καλύτερη απόδοση όλων των κριτηρίων ταυτόχρονα, ευνοώντας λύσεις που είναι ισορροπημένες σε όλα τα κριτήρια. Αντιθέτως, η VIKOR δίνει έμφαση στον συμβιβασμό ανάμεσα στη βελτίωση του χειρότερου κριτηρίου και στη συνολική απόδοση. Προσπαθεί να μειώσει τη “δυσарέσκεια” από το χειρότερο κριτήριο. Με την μέθοδο αυτή ευνοούνται λύσεις με μικρές διαφοροποιήσεις στα κατώτερα κριτήρια ακόμα κι αν υστερούν ελαφρώς στα καλύτερα. Τέλος, η PROMETHEE βασίζεται σε συγκρίσεις ζεύγους εναλλακτικών ανά κριτήριο και υπολογίζει καθαρές ροές προτιμήσεων. Με την μέθοδο αυτή ευνοούνται εναλλακτικές που υπερέχουν ως προς τον αριθμό και την ισχύ των προτιμήσεων έναντι των άλλων. Ακόμη και εάν μια λύση δεν πλησιάζει την ιδανική μπορεί να υπερισχύσει καθώς πλεονεκτεί σε περισσότερα συγκριτικά σημεία. Συνεπώς, η φύση του μηχανισμού της μεθόδου που επιλέγεται κάθε φορά επηρεάζει αισθητά το αποτέλεσμα καθορίζοντας ποια πειράματα μπορούν να θεωρηθούν βέλτιστα.

Άλλος ένας λόγος που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα είναι η ευαισθησία στην κατανομή και την ομοιογένεια των δεδομένων, δηλαδή πως ανταποκρίνεται κάθε μέθοδος σε διαφορές στη διασπορά και κατανομή των τιμών. Για παράδειγμα, η TOPSIS υπολογίζει αποστάσεις στον ευκλείδειο χώρο και εμφανίζει ευαισθησία στην διακύμανση των τιμών. Η μη ορθή κανονικοποίηση ή η εμφάνιση μεγάλων αποκλίσεων των δεδομένων, τότε οι υπολογιζόμενες αποστάσεις μπορεί να υποδείξουν παραπλανητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, σε περιπτώσεις ισοδύναμων λύσεων, όπως υπάρχουν και στην παρούσα διπλωματική, η TOPSIS αδυνατεί να ξεχωρίσει τις λύσεις. Ωστόσο, η VIKOR βρίσκει καλύτερη εφαρμογή σε περιβάλλοντα με έντονες διαφορές, καθώς εστιάζει στη σχετική βελτίωση του χειρότερου κριτηρίου. Συνεπώς, λύσεις που αναδεικνύονται βέλτιστες από την VIKOR δύναται να απορριφθούν στην περίπτωση της TOPSIS. Τέλος, και η PROMETHEE παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία στις επιμέρους διακυμάνσεις μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων, αναδεικνύοντας ως βέλτιστες λύσεις διαφορετικές εναλλακτικές από τις άλλες δύο μεθόδους, καθώς εμφανίζει προτίμηση βάσει πλήθους και έντασης των κριτηρίων.

Φυσικά, επίδραση έχουν και τα οριζόμενα από τον αποφασίζων βάρη. Κατά τις ισοβαρή και ανισοβαρή προσεγγίσεις παρατηρήθηκε ότι η TOPSIS δέχεται μεγάλη επίδραση από τα βάρη καθώς επηρεάζουν τις σχετικές αποστάσεις από τις ιδανικές λύσεις. Αυτό αποδίδεται στη γεωμετρική φύση της μεθόδου και η αλλαγή των βαρών που επιλέγεται για κάθε κριτήριο μεταβάλλει το σημείο αναφοράς και κατ' επέκταση την τελική κατάταξη. Η VIKOR καθώς λαμβάνει υπόψη και τις αποστάσεις από τη χειρότερη λύση δεν εμφανίζει δραστικές αλλαγές στην κατάταξη.

Η ανάλυση αποδεικνύει ότι δεν υφίσταται μία και μοναδική μέθοδος για την εύρεση της βέλτιστης εφικτής λύσης. Κάθε μέθοδος επικεντρώνεται σε διαφορετική πτυχή του προβλήματος ενώ η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το πλαίσιο λήψης της απόφασης. Η πολυκριτηριακή προσέγγιση, όταν χρησιμοποιείται συνδυαστικά, προσφέρει πολυδιάστατη κατανόηση του προβλήματος και μπορεί να υποστηρίξει καλύτερα τον σχεδιασμό σύνθετων παραγωγικών διαδικασιών, όπως η παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών από τυρόγαλο.

Κρίνεται σκόπιμη η επέκταση των πειραμάτων με χρήση διαφορετικών ενζύμων ή/και συνθηκών για τη συλλογή μεγαλύτερης βάσης δεδομένων και με τη χρήση MCDA να αποφασιστούν οι βέλτιστες εναλλακτικές προκειμένου να εξεταστεί σε ημιβιομηχανική κλίμακα. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη εφαρμογής των MCDA και σε άλλα βιομηχανικά παραπροϊόντα ενώ θα πρέπει παράλληλα να πραγματοποιηθεί οικονομική αξιολόγηση των βέλτιστων εναλλακτικών.

Βιβλιογραφία

- Akal, C. (2017). Dairy in Human Health and Disease Across the Lifespan. Chapter 28: Benefits of Whey Proteins on Human Health, Elsevier Inc.
- Altuntas, S., Hapoglu, H. (2019). Kefir-type drinks from whey, In Grumezescu, A., Holban, A.M. *Trends in Non-alcoholic Beverages*, Elsevier, 185–226
- Antonopoulou, A., Stamatelatou, K., Venetsaneas, N., Kornaros, M., Lyberatos, G. (2008). Biohydrogen and Methane Production from Cheese Whey in a Two-Stage Anaerobic Process, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 5227–5233
- Athes, V., Combes D. (1998). Effect of high hydrostatic pressure on enzyme stability. *Stability and Stabilization of Biocatalysts*, 205-210.
- Belitz, H.-D., Grosch, W., Scieberle P. (2018). Χημεία Τροφίμων, εκδ. Τζιόλα, 4^η έκδοση, 550-560.
- Bhargava, A., Jelen, P. (1996). Lactose Solubility and Crystal Growth as Affected by Mineral Impurities. *Journal of Food Science*, 61, No. 1
- Blaschek, K.M., Wendorff, W.L., Rankin, S.A. (2007). Survey of Salty and Sweet Whey Composition from Various Cheese Plants in Wisconsin, *J. Dairy Sci.*, 90, 2029–2034.
- Bode, L., Jantscher-Kren, E. (2012). Structure-Function Relationships of Human Milk Oligosaccharides. *American Society for Nutrition*, Adv. Nutr. 3, 383–391.
- Borshchevskaya, L.N., Gordeeva, T.L., Kalinina, A.N., Sineokii, S.P. (2016). Spectrophotometric Determination of Lactic Acid. *Journal of Analytical Chemistry*, 71, No. 8, 755–758.
- Bradford, M.M. (1976). A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254.
- Bras, N.F., Fernandes, P.A., Ramos, M.J. (2010). QM/MM Studies on the α -Galactosidase Catalytic Mechanism: Hydrolysis and Transglycosylation Reactions, *J. Chem. Theory Comput.*, 6, 421–433.
- Chen, S. M., Tsao, C. Y. (2008). The interval-valued fuzzy TOPSIS method and experimental analysis, *Fuzzy sets and systems*, 159(11), 1410-1428
- Cheng L., Zhang W. (2023), Food Production Safety Risk Assessment Based on Game Combination Weighting AEC-VIKOR Model, *Chengdu*
- Climaco J. (1997), Multicriteria Analysis, New York: Springer – Verlag
- Coulier, L., Timmermans, J., Bas, R., Van Den Dool, E., Haaksman, I., Klarenbeek, B., Slaghek, T., Van Dongen, W. (2009). In-Depth Characterization of Prebiotic

Galactooligosaccharides by a Combination of Analytical Techniques. *J. Agric. Food Chem.* 57, 8488–8495.

Dickson, R.C., Dickson, L.R., Markin, J.S. (1979). Purification and Properties of an Inducible β -Galactosidase Isolated from the Yeast *Kluyveromyces lactis*, *Journal of Bacteriology*, 51-61.

EPA Method 9038, United States Environmental Protection Agency

Fan, F., Roos, Y.H. (2017). Structural strength and crystallization of amorphous lactose in food model solids at various water activities, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 40, 27–34.

Fischer, C., Kleinschmidt, T. (2015). Synthesis of galactooligosaccharides using sweet and acid whey as a substrate. *International Dairy Journal*, 48, 15-22.

Fischer, C., Kleinschmidt, T. (2018). Synthesis of Galactooligosaccharides in Milk and Whey: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* Vol.17

Gosling, A., Stevens, G.W., Barber, A.R., Kentish, S.E., Gras, S.L. (2010). Recent advances refining galactooligosaccharide production from lactose. *Food Chemistry*, 121, 307-318.

Guerrero, C., Vera, C., Conejeros, R., Illanes, A. (2015) Transgalactosylation and hydrolytic activities of commercial preparations of β -galactosidase for the synthesis of prebiotic carbohydrates. *Enzyme and Microbial Technology*, 70, 9-17.

Gulmez, B. (2025). A novel hybrid MCDM framework combining TOPSIS, PROMETHEE II, and VIKOR for peach drying method selection, *Curr Res Food Sci*

Hernández-Hernández, O., Montanés, F., Clemente, A., Moreno, F.J., Sanz, M.L. (2011). Characterization of galactooligosaccharides derived from lactulose, *Journal of Chromatography*, 1218, 7691–7696.

Huang CL, Yoon K. (1981), Multi attribute decision making: methods and applications, New York: Springer – Verlag

Illanes A. (2016). Lactose-Derived Prebiotics. Chapter 1: Lactose: Production and Upgrading

Jelen, P. (2002). Utilization and Products, *Whey Processing*, 2739-2745.

Johnson, E.A., Echavarri-Erasun, C. (2011). The Yeasts, a Taxonomic Study, Chapter 3: Yeast Biotechnology

Johnson, J.M., Conforti, F.D. (2003). Lactose, *Elsevier Science*, 3472-3476.

Kilara, A., Vaghela, M.N. (2018). Proteins in Food Processing, Chapter 4: Whey Proteins, Elsevier Ltd

- Kim, C.S., Ji, E.S., Oh, D.K. (2003). Expression and characterization of *Kluyveromyces lactis* β -galactosidase in *Escherichia coli*. *Biotechnology Letters*, 25, 1769–1774.
- Korhonen, H., Pihlanto – Leppälä, A., Rantamäki, P., Tupasela, T. (1998). The functional and biological properties of whey proteins prospects for the development of functional foods, *Agricultural and Food Science in Finland*, Vol. 7, 283-296.
- Lacy, L.R., Dickson, R.C. (1981). Transcriptional Regulation of the *Kluyveromyces lactis*, β -Galactosidase Gene, *Molecular and Cellular Biology*, 629-634.
- Leusen, E., Torringa, E., Groenink, P., Kortleve, P., Geene, R., Schoterman, M., Klarenbeek B. (2014). Industrial Applications of Galactooligosaccharides, Food Oligosaccharides: Production, *Analysis and Bioactivity*, 1st edition, John Wiley & Sons, Ltd
- Lievore, P., Simões, D.R.S., Silva, K.M., Drunkler, N.L., Barana, A.C., Nogueira, A., Demiate I.M. (2013). Chemical characterisation and application of acid whey in fermented milk. *Journal of Food and Science Technology*
- Liua, Y., Chenb, Z., Jianga, Z., Yanb, Q., Yanga, S. (2017). Biochemical characterization of novel β -galactosidase from *Paenibacillus barengoltzii* suitable for lactose hydrolysis and galactooligosaccharides synthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 1055-1063.
- Lu, L., Xiao, M., Li, Z., Li, U., Wang, F.S. (2009). A novel transglycosylating β -galactosidase from *Enterobacter cloacae* B5. *Process Biochemistry*, 44, 232–236.
- Manera, A.P., de Almeida Costa, F.A., Rodrigues, M.I., Kalil, S.J., Filho, F.M. (2010). Galacto-oligosaccharides Production Using Permeabilized Cells of *Kluyveromyces marxianus*. *International Journal of Food Engineering*, 6(6), 4.
- Maugard, T., Gaunt, D., Legoy, M.D., Besson, T. (2003). Microwave-assisted synthesis of galacto-oligosaccharides from lactose with immobilized β -galactosidase from *Kluyveromyces lactis*, *Biotechnology Letters*, 25, 623–629.
- Neri, D.F.M, Balcãoa, V.M., Costaa, R.C., Rochaa, I.C.A.P., Ferreiraa, E.M.F.C., Torres, D.P.M.,. Rodriguesa, L.R.M., Carvalho Jr., L.B., Teixeira, J.A. (2009). Galacto-oligosaccharides production during lactose hydrolysis by free *Aspergillus oryzae* β -galactosidase and immobilized on magnetic polysiloxane–polyvinyl alcohol. *Food Chemistry*, 115, 92–99.
- Nishanthi, M., Vasiljevic, T., Chandrapala, J. (2017). Properties of whey proteins obtained from different whey streams. *International Dairy Journal*, 66, 76-83.
- Opricovic, S. , & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research* 156 (2), 445–455.
- Opricovic, S. & Tzeng, G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, 178 (2), 514-529.

- Panesar, P.S., Kaur, R., Singh, R.S., Kennedy, J.F. (2018). Biocatalytic strategies in the production of galactooligosaccharides and its global status. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 667-679.
- Palai, T., Mitra, S., Bhattacharya, P.K., (2012). Kinetics and design relation for enzymatic conversion of lactose into galacto-oligosaccharides using commercial grade β -galactosidase, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 114 No. 4, 418-423.
- Park, A.R, Oh, D.K. (2010). Galacto-oligosaccharide production using microbial β -galactosidase: current state and perspectives. *Appl. Microbiol Biotechnol*, 85, 1279–1286.
- Pedroso Serpa N., Cardoso da Silva D. Jr., da Silva Wegner R., da Silva Stertz E., Teixeira C. S., Dias Lopes L. F. (2022), Quality and sustainability in the production process: A study of bakeries using an integrated multi-criteria method based on fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS, *Wiley*
- Raveena R., Umamaheswari S. (2025), Integrated MCDM framework for sustainable pharmacy supplier selection using pioneering criteria with fuzzy TOPSIS SVR and GRA, *Scientific Reports*
- Roos, Y.R., Karel, M. (1991). Plasticizing Effect of Water on Thermal Behavior and Crystallization of Amorphous Food Models. *Journal of Food Science*, Volume 56, No. 1
- Roos, Y.R., Karel, M. (1992). Crystallization of Amorphous Lactose. *Journal of Food Science*, Volume 57, No. 3
- Santibáñez, L., Fernández-Arrojob, L., Guerreroa, C., Ploub, F.J., Illanes, A. (2016). Removal of lactose in crude galacto-oligosaccharides by β -galactosidase from *Kluyveromyces lactis*. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 133, 85 – 91.
- Singh, R., Geetanjali (2016). Protein By-products, Chapter 16: Whey Proteins and Their Value-Added Applications, Elsevier Inc.
- Smithers G.W. (2008). Whey and whey proteins—From ‘gutter-to-gold’, *International Dairy Journal*, 18, 695-704.
- Splechtna, B., Nguyen, T., Steinböck, M., Kulbe, K.D., Lorenz, W., Haltrich D. (2006). Production of Prebiotic Galacto-Oligosaccharides from Lactose Using α -Galactosidases from *Lactobacillus reuteri*. *Journal Agricultural and Food Chemistry*, 54, 4999-5006.
- Suarez, F., Shannon, C., Hertzler, S., Savaiano, D. Lactose Intolerance. *Food Intolerance*, 2634-2642
- Tallapragada, P., Rayavarapu, B. (2019). Milk-based Beverages, Chapter 5: Recent Trends and Developments in Milk-Based Beverages, Elsevier Inc.
- Torres, D.P.M., do Pilar F. Goncalves, M., Teixeira, J.A., Rodrigues, L.R. (2010). Galacto-Oligosaccharides: Production, Properties, Applications, and Significance as Prebiotics. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* Vol.9

Verma, M. (2013). HPAE-PAD for the Analysis of Carbohydrates. *Thermo Fisher Scientific, Sunnyvale, CA, USA*

Zall, R.R. (1992). Sources and Composition of Whey and Permeate, In Zadow, J.G. *Whey and Lactose Processing, Elsevier Science Publishers*, 2–72

Zhou, Q.Z.K., Chen, X.D. (2001). Effects of temperature and pH on the catalytic activity of the immobilized β -galactosidase from *Kluyveromyces lactis*, *Biochemical Engineering Journal*, 9, 33–40.

Γαλάνη Ι. Ε. (2016), Παραγωγή συστατικών υψηλής προστιθέμενης αξίας από τα απόβλητα της βιομηχανίας γιαουρτιού, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δούμπος, Μ. (2000), Πολυκριτήριες μέθοδοι ταξινόμησης και εφαρμογές στη χρηματοοικονομική διοίκηση, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Δούμπος, Μ. (2009), Πολυκριτήρια συστήματα αποφάσεων, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Ζαφείρη Ε. (2020), Ενζυμική επεξεργασία τυρογάλακτος για παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ρούσης Μ. (2009), Θεωρητική μελέτη πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών – Τμήμα Πληροφορικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Σίσκος, Ι. (2008), Μοντέλα Αποφάσεων – Μεθοδολογία Επιχειρησιακής Έρευνας, Θεωρία Πολυκριτήριας Ανάλυσης, Εφαρμογές σε Επιχειρήσεις και Οργανισμούς, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα

Τσίκα Ε. (2019), Αξιοποίηση όξινου ορού γιαουρτιού για παραγωγή γαλακτοολιγοσακχαριτών με χρήση βιοκαταλυτών, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ Α: Σύνολο Εφικτών λύσεων

A/A	C _{lac,initial} (% w/v)	Ενεργότητα (U/mL)	Θερμοκρασία (°C)	Απόδοση GOS	C _{gal} (%w/v)	Χρόνος (min)	C _{lac} (%w/v)	Dominated
1	5	0,011	30	0	0	0	5,353	Yes
2	5	0,011	30	1,221	0,879	15	4,437	Yes
3	5	0,011	30	1,769	1,633	30	4,297	Yes
4	5	0,011	30	1,879	1,771	45	3,22	Yes
5	5	0,011	30	4,221	2,28	60	3,055	Yes
6	5	0,011	30	4,934	3,363	90	2,736	Yes
7	5	0,011	30	5,783	3,755	120	2,199	Yes
8	5	0,011	30	6,162	4,013	180	1,271	Yes
9	5	0,011	30	8,29	5,213	240	1,067	Yes
10	5	0,011	30	8,559	5,712	300	0,784	Yes
11	5	0,011	30	8,017	5,562	360	0,467	Yes
12	5	0,011	30	7,999	5,912	420	0,37	Yes
13	5	0,011	30	7,609	5,863	480	0,28	Yes
14	5	0,011	30	2,117	6,686	1440	0	Yes
15	5	0,022	30	0	0,08	0	5,234	Yes
16	5	0,022	30	1,769	1,65	15	4,208	Yes
17	5	0,022	30	5,339	2,718	30	3,469	Yes
18	5	0,022	30	6,31	3,277	45	2,553	Yes
19	5	0,022	30	7,377	4,203	60	2,294	Yes
20	5	0,022	30	8,039	4,482	90	1,344	Yes
21	5	0,022	30	8,474	5,194	120	0,964	Yes
22	5	0,022	30	8,431	5,306	180	0,42	No
23	5	0,022	30	8,264	6,456	240	0,246	Yes
24	5	0,022	30	8,115	7,175	300	0,168	Yes
25	5	0,022	30	8,387	7,371	360	0,149	Yes
26	5	0,022	30	8,673	7,467	420	0,139	Yes
27	5	0,022	30	8,779	7,598	480	0,126	No
28	5	0,022	30	1,776	7,759	1440	0	Yes
29	5	0,045	30	1,179	1,254	0	4,304	No
30	5	0,045	30	4,193	2,013	15	3,487	Yes
31	5	0,045	30	5,399	2,81	30	2,205	Yes
32	5	0,045	30	8,209	4,128	45	1,896	Yes
33	5	0,045	30	8,052	4,567	60	1,365	No
34	5	0,045	30	10,372	5,179	90	0,73	No
35	5	0,045	30	8,918	5,939	120	0,482	No
36	5	0,045	30	8,156	6,598	180	0,196	No
37	5	0,045	30	6,853	6,902	240	0,075	No
38	5	0,045	30	6,718	7,385	300	0,027	No
39	5	0,045	30	6,438	7,643	360	0,021	No

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

40	5	0,045	30	6,026	7,801	420	0,016	No
41	5	0,045	30	3,937	7,916	480	0	No
42	5	0,045	30	0,656	7,808	1440	0	Yes
43	5	0,011	40	0	0,501	0	5,979	Yes
44	5	0,011	40	0	1,481	15	5,389	Yes
45	5	0,011	40	1,216	2,457	30	4,563	Yes
46	5	0,011	40	2,33	3,26	45	3,901	Yes
47	5	0,011	40	2,037	4,193	60	3,17	Yes
48	5	0,011	40	3,407	5,21	90	2,297	Yes
49	5	0,011	40	3,797	5,642	120	1,557	Yes
50	5	0,011	40	4,579	6,407	180	0,838	Yes
51	5	0,011	40	4,856	7,126	240	0,5	Yes
52	5	0,011	40	4,506	7,639	300	0,279	Yes
53	5	0,011	40	4,23	7,868	360	0,19	Yes
54	5	0,011	40	3,885	8,465	420	0,093	Yes
55	5	0,011	40	3,277	8,982	480	0,61	Yes
56	5	0,011	40	2,196	7,124	1440	0	Yes
57	5	0,022	40	0	0,716	0	5	Yes
58	5	0,022	40	5,282	2,616	15	3,729	Yes
59	5	0,022	40	5,548	3,325	30	2,385	Yes
60	5	0,022	40	7,517	4,325	45	2,267	Yes
61	5	0,022	40	7,582	4,618	60	1,68	Yes
62	5	0,022	40	8,351	5,678	90	1,027	No
63	5	0,022	40	9,641	6,983	120	0,76	No
64	5	0,022	40	7,211	6,897	180	0,26	Yes
65	5	0,022	40	6,657	7,382	240	0,139	No
66	5	0,022	40	4,08	7,769	300	0,104	Yes
67	5	0,022	40	4,15	7,625	360	0,025	Yes
68	5	0,022	40	3,334	8,604	420	0	No
69	5	0,022	40	2,269	9,1	480	0	No
70	5	0,022	40	1,031	7,99	1440	0	Yes
71	5	0,045	40	0,954	0,505	0	5,478	Yes
72	5	0,045	40	6,703	3,924	15	2,736	No
73	5	0,045	40	9,183	5,876	30	1,521	No
74	5	0,045	40	7,988	6,468	45	0,943	No
75	5	0,045	40	7,446	5,65	60	0,536	No
76	5	0,045	40	8,238	7,166	90	0,244	No
77	5	0,045	40	6,545	7,351	120	0,116	No
78	5	0,045	40	4,447	7,801	180	0,05	No
79	5	0,045	40	3,141	8,101	240	0,035	No
80	5	0,045	40	1,979	8,423	300	0,017	No
81	5	0,045	40	1,461	8,999	360	0	No
82	5	0,045	40	0,602	9,423	420	0	No
83	5	0,045	40	0,43	9,638	480	0	No
84	5	0,045	40	0,172	8,76	1440	0	Yes
85	10	0,011	30	0,866	1,478	0	10,438	No

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

86	10	0,011	30	1,837	2,254	15	9,018	Yes
87	10	0,011	30	2,528	3,088	30	8,729	Yes
88	10	0,011	30	4,608	4,026	45	8,365	Yes
89	10	0,011	30	5,523	4,532	60	7,277	Yes
90	10	0,011	30	6,955	5,311	90	6,365	Yes
91	10	0,011	30	8,896	6,439	120	5,781	Yes
92	10	0,011	30	12,31	7,629	180	4,819	Yes
93	10	0,011	30	10,771	7,841	240	3,132	Yes
94	10	0,011	30	11,472	9,331	300	2,557	Yes
95	10	0,011	30	11,846	10,055	360	2,13	Yes
96	10	0,011	30	13,554	11,31	420	1,888	Yes
97	10	0,011	30	13,252	12,188	480	1,537	Yes
98	10	0,011	30	7,741	14,826	1440	0,111	No
99	10	0,022	30	0	1,302	0	10,754	Yes
100	10	0,022	30	3,029	2,892	15	9,616	Yes
101	10	0,022	30	4,821	4,175	30	8,118	Yes
102	10	0,022	30	6,268	5,261	45	7,683	Yes
103	10	0,022	30	5,981	4,562	60	5,339	Yes
104	10	0,022	30	7,477	6,559	90	4,921	Yes
105	10	0,022	30	9,404	8,019	120	4,423	Yes
106	10	0,022	30	10,991	8,945	180	2,955	Yes
107	10	0,022	30	11,294	9,964	240	2,072	Yes
108	10	0,022	30	12,131	11,302	300	1,641	Yes
109	10	0,022	30	12,334	11,414	360	1,157	Yes
110	10	0,022	30	12,198	11,797	420	0,885	Yes
111	10	0,022	30	11,771	11,834	480	0,678	Yes
112	10	0,022	30	3,865	15,02	1440	0,073	No
113	10	0,045	30	0,817	1,208	0	11,293	Yes
114	10	0,045	30	4,4	3,422	15	7,555	Yes
115	10	0,045	30	6,717	5,196	30	6,529	Yes
116	10	0,045	30	8,073	6,225	45	5,427	Yes
117	10	0,045	30	8,662	7,27	60	4,348	Yes
118	10	0,045	30	10,761	8,876	90	3,155	Yes
119	10	0,045	30	11,839	10,064	120	2,371	Yes
120	10	0,045	30	12,576	11,416	180	1,343	Yes
121	10	0,045	30	11,703	11,371	240	0,737	Yes
122	10	0,045	30	11,176	11,736	300	0,458	Yes
123	10	0,045	30	10,491	11,816	360	0,295	Yes
124	10	0,045	30	10,601	12,576	420	0,229	Yes
125	10	0,045	30	10,219	12,985	480	0,146	No
126	10	0,045	30	1,855	15,806	1440	0,029	Yes
127	10	0,011	40	0,7	1,425	0	11,146	Yes
128	10	0,011	40	1,96	2,101	15	10,471	Yes
129	10	0,011	40	3,02	3,243	30	9,95	Yes
130	10	0,011	40	3,394	3,28	45	8,491	Yes
131	10	0,011	40	4,314	4,218	60	8,393	Yes

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

132	10	0,011	40	5,194	5,199	90	7,256	Yes
133	10	0,011	40	9,934	5,794	120	6,346	Yes
134	10	0,011	40	11,672	7,319	180	4,869	Yes
135	10	0,011	40	12,65	8,81	240	3,977	Yes
136	10	0,011	40	14,939	9,623	300	3,146	Yes
137	10	0,011	40	15,349	10,473	360	2,493	Yes
138	10	0,011	40	15,857	10,842	420	1,953	Yes
139	10	0,011	40	16,522	11,402	480	1,634	Yes
140	10	0,011	40	10,269	13,759	1440	0,142	No
141	10	0,022	40	0,812	1,701	0	10,859	No
142	10	0,022	40	3,231	3,849	15	9,083	Yes
143	10	0,022	40	4,293	5,423	30	7,183	Yes
144	10	0,022	40	8,601	6,716	45	5,825	Yes
145	10	0,022	40	8,327	7,86	60	4,975	Yes
146	10	0,022	40	10,902	8,743	90	3,407	Yes
147	10	0,022	40	12,643	10,514	120	2,642	Yes
148	10	0,022	40	13,374	12,041	180	1,416	Yes
149	10	0,022	40	12,294	11,844	240	0,773	Yes
150	10	0,022	40	12,702	13,2	300	0,543	Yes
151	10	0,022	40	12,462	14,12	360	0,387	Yes
152	10	0,022	40	10,677	14,256	420	0,281	Yes
153	10	0,022	40	10,599	15,191	480	0,237	No
154	10	0,022	40	3,227	16,933	1440	0,023	No
155	10	0,045	40	1,638	0,894	0	10,715	No
156	10	0,045	40	8,325	4,133	15	7,328	No
157	10	0,045	40	12,062	7,957	30	5,293	No
158	10	0,045	40	14,223	9,352	45	3,792	No
159	10	0,045	40	14,91	9,841	60	2,7	No
160	10	0,045	40	16,046	11,399	90	1,582	No
161	10	0,045	40	16,102	12,387	120	1	No
162	10	0,045	40	14,989	13,495	180	0,442	No
163	10	0,045	40	12,519	14,224	240	0,23	No
164	10	0,045	40	10,829	15,143	300	0,15	No
165	10	0,045	40	8,746	15,122	360	0,125	No
166	10	0,045	40	7,934	14,071	420	0,093	No
167	10	0,045	40	6,873	14,958	480	0,089	No
168	10	0,045	40	0,917	17,174	1440	0,014	No
169	15	0,011	30	0,708	0,754	0	15,004	Yes
170	15	0,011	30	0,893	1,26	15	14,795	Yes
171	15	0,011	30	1,506	2,31	30	14,839	Yes
172	15	0,011	30	2,375	2,646	45	13,978	Yes
173	15	0,011	30	3,727	3,335	60	13,943	Yes
174	15	0,011	30	4,92	4,136	90	12,827	Yes
175	15	0,011	30	5,887	4,73	120	12,095	Yes
176	15	0,011	30	7,412	5,954	180	10,421	Yes
177	15	0,011	30	9,112	7,227	240	9,763	Yes

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση
Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

178	15	0,011	30	9,951	7,384	300	8,113	Yes
179	15	0,011	30	11,762	8,223	360	7,872	Yes
180	15	0,011	30	12,404	8,787	420	6,823	Yes
181	15	0,011	30	13,766	10,083	480	6,628	Yes
182	15	0,011	30	17,253	16,792	1440	0,648	Yes
183	15	0,022	30	0	1,929	0	14,552	No
184	15	0,022	30	1,377	2,12	15	14,833	Yes
185	15	0,022	30	2,974	2,419	30	13,713	Yes
186	15	0,022	30	3,295	3,002	45	12,891	Yes
187	15	0,022	30	4,555	3,485	60	12,63	Yes
188	15	0,022	30	6,085	4,522	90	11,678	Yes
189	15	0,022	30	7,612	5,644	120	11,143	Yes
190	15	0,022	30	9,527	6,95	180	9,08	Yes
191	15	0,022	30	11,242	8,386	240	8,269	Yes
192	15	0,022	30	12,62	9,392	300	6,94	Yes
193	15	0,022	30	13,803	10,37	360	6,202	Yes
194	15	0,022	30	15,364	11,373	420	5,549	Yes
195	15	0,022	30	16,854	12,193	480	4,966	Yes
196	15	0,022	30	15,887	17,872	1440	0,44	Yes
197	15	0,045	30	0,89	1,306	0	13,918	No
198	15	0,045	30	3,176	2,61	15	13,562	Yes
199	15	0,045	30	5,063	4,142	30	12,348	Yes
200	15	0,045	30	6,507	5,286	45	11,07	Yes
201	15	0,045	30	7,932	6,178	60	10,089	Yes
202	15	0,045	30	10,003	7,887	90	8,545	Yes
203	15	0,045	30	11,379	9,591	120	7,362	Yes
204	15	0,045	30	14,148	11,589	180	5,261	Yes
205	15	0,045	30	15,491	12,751	240	4,081	Yes
206	15	0,045	30	14,85	11,328	300	2,697	Yes
207	15	0,045	30	15,986	11,85	360	1,176	Yes
208	15	0,045	30	18,372	13,28	420	1,899	Yes
209	15	0,045	30	18,066	13,207	480	1,447	Yes
210	15	0,045	30	7,877	17,622	1440	0,243	No
211	15	0,011	40	0	1,101	0	15,33	Yes
212	15	0,011	40	1,561	1,879	15	14,479	Yes
213	15	0,011	40	2,615	3,119	30	13,267	Yes
214	15	0,011	40	3,404	3,711	45	12,245	Yes
215	15	0,011	40	4,279	4,665	60	11,83	Yes
216	15	0,011	40	5,184	6,497	90	10,154	Yes
217	15	0,011	40	8,757	7,296	120	7,872	Yes
218	15	0,011	40	12,159	9,509	180	6,561	Yes
219	15	0,011	40	14,866	10,903	240	5,302	Yes
220	15	0,011	40	15,731	12,337	300	4,322	Yes
221	15	0,011	40	17,154	13,291	360	3,446	Yes
222	15	0,011	40	17,179	13,794	420	2,745	Yes
223	15	0,011	40	18,29	14,661	480	2,325	Yes

Αξιολόγηση Πειραμάτων Παραγωγής Γαλακτοολιγοσακχαριτών από Τυρόγαλο με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Απόφασης

224	15	0,011	40	9,935	21,942	1440	0,273	No
225	15	0,022	40	0,761	0,688	0	14,985	Yes
226	15	0,022	40	2,716	3,615	15	13,991	Yes
227	15	0,022	40	5,924	4,98	30	12,122	Yes
228	15	0,022	40	7,196	5,76	45	10,224	Yes
229	15	0,022	40	8,741	6,743	60	9,166	Yes
230	15	0,022	40	11,434	8,629	90	7,522	Yes
231	15	0,022	40	14,216	10,54	120	6,261	Yes
232	15	0,022	40	17,461	12,763	180	4,314	Yes
233	15	0,022	40	18,563	14,195	240	3,048	No
234	15	0,022	40	19,465	15,322	300	1,574	Yes
235	15	0,022	40	19,755	15,908	360	1,529	Yes
236	15	0,022	40	20,269	17,162	420	1,21	Yes
237	15	0,022	40	19,282	17,403	480	0,963	Yes
238	15	0,022	40	6,29	22,044	1440	0,228	No
239	15	0,045	40	0,957	0,861	0	16,441	Yes
240	15	0,045	40	5,375	4,801	15	12,819	No
241	15	0,045	40	8,884	7,367	30	9,888	Yes
242	15	0,045	40	12,159	9,497	45	8,521	No
243	15	0,045	40	13,554	10,811	60	6,926	No
244	15	0,045	40	14,998	12,582	90	4,836	No
245	15	0,045	40	16,096	13,412	120	3,191	No
246	15	0,045	40	17,935	15,913	180	1,879	No
247	15	0,045	40	18,362	17,155	240	1,159	No
248	15	0,045	40	21,707	17,544	300	0,741	No
249	15	0,045	40	21,657	19,184	360	0,57	No
250	15	0,045	40	20,555	19,669	420	0,464	No
251	15	0,045	40	18,381	20,299	480	0,339	No
252	15	0,045	40	5,967	23,947	1440	0,165	No