

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

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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΗΣ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΖΩΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ»

ΣΤΑΜΑΤΙΑ ΣΙΑΪΤΑΝΙΔΟΥ

ΒΟΛΟΣ 2025

UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF ICHTHYOLOGY AND AQUATIC ENVIRONMENT,

DEPARTMENT OF FOOD SCIENCE AND NUTRITION

INTERDEPARTMENTAL POSTGRADUATE PROGRAMME

“TECHNOLOGY, QUALITY AND SAFETY OF ANIMAL ORIGIN FOODS”

POSTGRADUATE MASTER’S THESIS

**«COMPARATIVE STUDY OF ORGANOLEPTIC EVALUATION METHODS OF
FOODS OF ANIMAL ORIGIN»**

STAMATIA SIAITANIDOU

VOLOS 2025

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) Θεοφάνης Γεωργόπουλος, Καθηγητής, Γεωπόνος και Επιστήμη Τεχνολογία Τροφίμων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων

2) Φωτεινή Παρλαπάν, Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος

3) Μυρσίνη Κακαγιάννη, Επίκουρος Καθηγήτρια Τεχνολογίας, Ποιότητας και Ασφάλειας Τροφίμων Ζωικής Προέλευσης Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	7
1.1. Σκοπός και Στόχοι	7
1.2. Θεωρητικό υπόβαθρο	8
1.3 Σημασία της Οργανοληπτικής Ποιότητας στα Τρόφιμα Ζωικής Προέλευσης	13
1.3.1 Προϊόντα κρέατος και πουλερικών	13
1.3.2 Ψάρια και θαλασσινά	15
1.3.3 Γαλακτοκομικά προϊόντα	16
1.3.4 Αυγά και προϊόντα αυγών	17
1.4 Ενσωμάτωση Ενόργανων και Αισθητηριακών Προσεγγίσεων	18
1.5 Επιστημονική και Βιομηχανική Σημασία	20
1.6 Προβλήματα με την τρέχουσα οργανοληπτική αξιολόγηση	22
1.7 Ερευνητικό Κενό και Σκεπτικό της Μελέτης	24
1.8 Εννοιολογικό Πλαίσιο	25
2. Ερευνητικό Πρόβλημα	29
3. Ερευνητικά Ερωτήματα	30
4. Γενικός Στόχος	31
5. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	32
5.1 Οργανοληπτικές Ιδιότητες των Ζωοτροφών	32
5.1.1 Χαρακτηριστικά ποιότητας κρέατος	32
5.1.2 Δείκτες φρεσκάδας ψαριών	35
5.1.3 Αισθητηριακά Χαρακτηριστικά Γαλακτοκομικών Προϊόντων	36
5.1.4 Παράμετροι ποιότητας αυγών	37
5.2 Παραδοσιακές Αισθητηριακές Μέθοδοι	38
5.2.1 Περιγραφική Ανάλυση	39
5.2.2 Διακριτικές δοκιμές	41
5.2.3 Αισθητηριακά Πάνελ και Λεξικά	42
Σχηματισμός και Ρόλος των Αισθητηριακών Πάνελ	42
5.2.4 Στατιστική Συσχέτιση και Μοντελοποίηση Δεδομένων	45
5.2.5 Μηχανική Μάθηση και Τεχνητή Νοημοσύνη στην Αισθητηριακή Πρόβλεψη	45
5.2.6 Οφέλη της Ενσωμάτωσης	47
5.3 Τρέχουσες προκλήσεις στην οργανοληπτική αξιολόγηση	47
5.3.1 Κόπωση και Μεταβλητότητα Πάνελ	48
5.3.2 Βαθμονόμηση οργάνων και ερμηνεία δεδομένων	48
5.3.3 Επιπτώσεις της προετοιμασίας και αποθήκευσης του δείγματος	49
5.3.4 Έλλειψη Καθολικών Προτύπων	49
6. Υλικά και Μέθοδοι	51

6.1	Σχεδιασμός Μελέτης και Μετα-Αναλυτική Μέθοδος	51
6.2	Κριτήρια Συμπερίληψης και Αποκλεισμού.....	52
6.3	Στρατηγική αναζήτησης και πηγές πληροφοριών.....	53
6.4	Επιλογή και Έλεγχος Μελετών.....	53
6.5	Εξαγωγή Δεδομένων	54
6.6	Σύνθεση Δεδομένων και Μετα-Αναλυτικό Πλαίσιο	55
6.7	Μετα-ανάλυση κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων μέσω σύγκρισης	55
6.8	Κίνδυνος μεροληψίας και αξιολόγηση ποιότητας	57
6.9	Λαμβάνοντας υπόψη την Ετερογένεια και την Ανάλυση Υποομάδων.....	58
6.10	Ηθικές Σκέψεις.....	59
6.11	Αυστηρότητα της μεθοδολογίας	59
7.	Αποτελέσματα	61
7.1	Επιλογή Μελετών και Βάση Αποδεικτικών Στοιχείων	61
7.2	Χαρακτηριστικά των Συμπεριλαμβανόμενων Μελετών.....	61
7.3	Αξιολόγηση Κινδύνου Προκατάληψης.....	62
7.4	Ποσοτική Μετα-Αναλυτική Σύνθεση.....	64
7.4.1	Εμφάνιση (Χρωματομετρία και Αισθητηριακές Βαθμολογίες).....	64
7.4.2	Υφή και αίσθηση στο στόμα (TPA έναντι αισθητηριακών βαθμολογιών)	65
7.4.3	Οσμή και Γεύση (ηλεκτρονική Μύτη/ηλεκτρονική Γλώσσα έναντι Πάνελ)	66
7.5	Σύγκριση υποομάδων: Κρέας έναντι γαλακτοκομικών προϊόντων	66
7.6	Ανάλυση Ευαισθησίας και Ανθεκτικότητας	67
7.7	Υποστηρικτικά στοιχεία από ψάρια και αυγά.....	69
7.8	Ολοκληρωμένο Πλαίσιο και Πρακτικές Επιπτώσεις	70
7.9	Περιορισμοί.....	71
8.	Συζήτηση	72
8.1	Επισκόπηση των αναλυτικών αποτελεσμάτων	72
8.2	Αισθητηριακές και Αναλυτικές Προσεγγίσεις της Αξιολόγησης Κυρίαρχων Τροφίμων	72
8.3	Πρότυπα Συσχέτισης Αισθητηριακών και Ενόργανων Ευαισθησιών	73
8.4	Πηγές Μεταβλητότητας και Μεθοδολογικής Ασυνέπειας	74
8.5	Αναδυόμενα Πρότυπα Υβριδικών Αισθητηριο-Οργανικών Πλαισίων	76
8.6	Βιομηχανικές και ερευνητικές επιπτώσεις	77
8.7	Περιορισμοί και κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα	78
8.8	Η Ανάπτυξη της Οργανοληπτικής Επιστήμης	79
9.	Συμπεράσματα και συστάσεις.....	81
9.1	Σύνοψη της Μελέτης	81
9.2	Θεωρητικές επιπτώσεις.....	82

9.3 Πρακτικές επιπτώσεις	82
9.4 Μεθοδολογικές Επισημάνσεις.....	83
9.5 Περιορισμοί της Μελέτης	84
9.6 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας	85
9.7 Συμπερασματικές παρατηρήσεις	85
10. Αναφορές	87

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός και Στόχοι

Αυτή η μελέτη είναι θεωρητική. Πρόκειται για μια μετα-ανάλυση δημοσιευμένης έρευνας σχετικά με την οργανοληπτική αξιολόγηση σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Η έμφαση δίνεται στον τρόπο με τον οποίο οι ανθρώπινες αισθητηριακές μέθοδοι και τα εργαλεία υποστήριξης των αισθήσεων ευθυγραμμίζονται με την αντίληψη και τη λήψη αποφάσεων. Η κύρια σύγκριση αφορά το κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Τα ψάρια και τα αυγά χρησιμοποιούνται όπου διευκρινίζουν τα πρότυπα.

Γενικός στόχος

Να παρέχει μια μετα-αναλυτική, συγκριτική ανασκόπηση των οργανοληπτικών μεθόδων αξιολόγησης που αξιολογεί την αξιοπιστία, την αναπαραγωγικότητα και την πρακτική χρησιμότητα σε όλες τις κατηγορίες και προτείνει ένα ενιαίο πλαίσιο που εστιάζει στην αντίληψη.

Στόχοι

1. Χαρτογράφηση των αισθητηριακών μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης.
2. Σύνθεση στοιχείων σχετικά με την απόδοση της μεθόδου σε τουλάχιστον δύο κατηγορίες, με έμφαση στο κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Σύγκριση αξιοπιστίας, αναπαραγωγικότητας, ευαισθησίας στην αλλαγή, το μέγεθος του πάνελ και τον σχεδιασμό της δοκιμής.
3. Αξιολόγηση των τρόπων που τα εργαλεία υποστήριξης των αισθήσεων που σχετίζονται άμεσα με την αντίληψη ευθυγραμμίζονται με τα αποτελέσματα των πάνελ.
4. Εντοπισμός μεθοδολογικών κενών που περιορίζουν τη συγκρισιμότητα μεταξύ των μελετών. Αναφορά ζητημάτων στην ορολογία, τα πρωτόκολλα των πάνελ, την προετοιμασία δειγμάτων και των προτύπων αναφοράς.
5. Πρόταση ενός πρακτικού υβριδικού πλαισίου για την οργανοληπτική αξιολόγηση που επικεντρώνεται σε ανθρώπινα πάνελ και χρησιμοποιεί εργαλεία υποστήριξης αισθητηρίων οργάνων όπου βελτιώνουν τη συνοχή, την ταχύτητα ή την έγκαιρη ανίχνευση.

1.2. Θεωρητικό υπόβαθρο

Η οργανοληπτική αξιολόγηση, η οποία είναι κοινώς γνωστή ως οργανοληπτική αξιολόγηση, αποτελεί το κύριο επίκεντρο της επιστήμης των τροφίμων από την αρχαιότητα, ως ένας από τους βασικούς καθοριστικούς παράγοντες για την ποιότητα των προϊόντων, την αποδοχή από τους καταναλωτές και την εμπορική επιτυχία. Το χρώμα, η οσμή, η γεύση και η υφή είναι παραδείγματα οργανοληπτικών ιδιοτήτων που όχι μόνο χρησιμοποιούνται εύκολα για την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων ζωικής προέλευσης, ιδίως του κρέατος, των ψαριών, των γαλακτοκομικών προϊόντων και των αυγών, αλλά αντανakλούν επίσης βιοχημικές και τεχνολογικές διεργασίες βάσει των οποίων παρήχθησαν και αποθηκεύτηκαν τα τρόφιμα (Lawless and Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016). Αυτά τα τρόφιμα έχουν περίπλοκες βιολογικές μήτρες και η οργανοληπτική ανάλυση τέτοιων τροφίμων είναι επιστημονικά δύσκολη, αλλά είναι απαραίτητη στην ανάπτυξη προϊόντων, την αξιολόγηση της διάρκειας ζωής και τη διασφάλιση της ποιότητας.

Ουσιαστικά, η αισθητηριακή εξέταση βοηθά στην πλήρωση της αντικειμενικής σύνθεσης και της υποκειμενικής εμπειρίας. Παρόλο που οι χημικές και μικροβιολογικές δοκιμές είναι απαραίτητες όσον αφορά την ασφάλεια και τη σύνθεση, δεν αντικατοπτρίζουν την αντίληψη ή την ικανοποίηση του καταναλωτή. Η ανθρώπινη αισθητηριακή ανάλυση είναι μια φυσιολογική και ψυχολογική πτυχή της αντίληψης, συμπεριλαμβανομένης της αναγνώρισης γεύσεων, αρωμάτων, της αντίληψης ενός προϊόντος και της αντίληψης χρώματος, που επιτρέπει στους ερευνητές και τους κατασκευαστές να αποκτήσουν μια εικόνα για το πώς θα γινόταν αντιληπτό το συγκεκριμένο προϊόν υπό τις πραγματικές συνθήκες ζωής (Stone et al., 2012). Είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή οι καταναλωτές τείνουν να συγχέουν την αισθητηριακή ποιότητα με το γενικό επίπεδο ασφάλειας και φρεσκάδας του αντικειμένου, ανεξάρτητα από την πραγματική μικροβιολογική κατάσταση του προϊόντος.

Η οργανοληπτική σημασία διαφόρων ζωικών προϊόντων εξαρτάται από τη σύνθεση και την επεξεργασία. Το χρώμα και η τρυφερότητα είναι οι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την αντιληπτή φρεσκάδα και την γευστικότητα στη βιομηχανία κρέατος, ειδικά στη βιομηχανία κρέατος. Οι πελάτες τείνουν να προτιμούν το έντονο κερασικό κόκκινο χρώμα του βοδινού κρέατος, το οποίο σχετίζεται με την οξυγονωμένη παραλλαγή της μυοσφαιρίνης (οξυμυοσφαιρίνη). Παρ' όλα αυτά, η οξειδωτική

τροποποίηση της μυοσφαιρίνης σε μεταμυοσφαιρίνη προκαλεί καφέ αποχρωματισμό, ο οποίος θεωρείται από τους καταναλωτές ως αλλοίωση (Bekhit and Faustman, 2005). Ομοίως, η τρυφερότητα είναι ένας παράγοντας που βασίζεται στη μεταθανάτια διαδικασία της ενζυμικής δραστηριότητας, η οποία διασπά τις δομικές πρωτεΐνες και το κολλαγόνο. Οι βιοχημικές αλλαγές έχουν άμεσο αντίκτυπο στην αίσθηση στο στόμα και την αποδοχή από τους καταναλωτές (AMSA, 2016). Αντίθετα, η γαλακτοβιομηχανία ασχολείται περισσότερο με την ισορροπία των γεύσεων και τη συνέπεια της αίσθησης στο στόμα. Οι πτητικές ενώσεις που οδηγούν σε πολυπλοκότητα γεύσης στα γαλακτοκομικά προϊόντα είναι προϊόν ζύμωσης ή οξείδωσης λιπιδίων αλδεϋδων, λιπαρών οξέων και κετονών (Drake, 2007; Kilcawley et al., 2018). Οι παραμικρές διακυμάνσεις στη σύνθεση του λίπους του γάλακτος ή της μικροβιακής χλωρίδας μπορεί να οδηγήσουν σε αισθητές διακυμάνσεις στο άρωμα και την ένταση των γεύσεων και να επηρεάσουν την προτίμηση του προϊόντος.

Η μέτρηση της αισθητηριακής φρεσκάδας είναι σημαντική στη βιομηχανία ψαριών, επειδή το ψάρι είναι ένα από τα τρόφιμα που δεν μπορούν να αποθηκευτούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, καθώς είναι τροφή ζωικής προέλευσης. Οι καταναλωτές στρέφονται στο φρέσκο ψάρι που έχει τυπική θαλάσσια οσμή, καθαρά μάτια και σκληρή υφή. Αυτά τα χαρακτηριστικά χάνονται μετά την ενζυμική αυτόλυση και την μικροβιακή αποικοδόμηση, με αποτέλεσμα δυσάρεστες οσμές που κυριαρχούνται από ενώσεις τριμεθυλαμίνης και αμμωνίας (Huss, 1995). Τα αυγά, από την άλλη πλευρά, κρίνονται με βάση το χρώμα του κρόκου, την ουδετερότητα της γεύσης και τη σταθερότητα της λευκωματίνης. Η σύνθεση της τροφής μπορεί να επηρεάσει τη χρώση του κρόκου, ενώ η αποθήκευση μπορεί να επηρεάσει το ιξώδες της λευκωματίνης και το επίπεδο της νότας θείου, τα οποία συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την προτίμηση των καταναλωτών (Ahn et al., 2012).

Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ότι η οργανοληπτική αξιολόγηση είναι ένα διαγνωστικό μέτρο - που προσφέρει μια έγκαιρη, αισθητηριακή ένδειξη αλλαγής στα προϊόντα, η οποία σε πολλές περιπτώσεις προηγείται της χημικής ή μικροβιολογικής αλλοίωσης που μπορεί να ανιχνευθεί. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι αισθητηριακές δοκιμές δεν είναι μόνο απαραίτητες για το μάρκετινγκ που βασίζεται στον καταναλωτή, αλλά και για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς, επειδή τα περισσότερα διεθνή πρότυπα ποιότητας τροφίμων (ISO 5492, AMSA, Codex

Alimentarius) περιέχουν αισθητηριακές απαιτήσεις για τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Σύμφωνα με την AMSA (2016), τα αισθητηριακά δεδομένα που ενσωματώνονται στις διαδικασίες παραγωγής μπορούν να ανιχνεύσουν ασυνέπειες, να ελέγξουν την ποιότητα σε όλη τη διαδικασία αποθήκευσης και να ικανοποιήσουν τους πελάτες, γεγονός που συμβάλλει στην ανταγωνιστικότητα της αγοράς.

Ωστόσο, η αισθητηριακή εξέταση είναι υποκειμενικής φύσης. Βασίζεται στο όριο αντίληψης των ανθρώπων, στη γνωστική ερμηνεία, ακόμη και στον πολιτισμό. Αυτοί οι περιορισμοί ώθησαν τους επιστήμονες κατά τη διάρκεια των δεκαετιών να μετατρέψουν την αισθητηριακή εξέταση, η οποία παραμένει τέχνη, σε επιστήμη - έναν συνδυασμό φυσιολογικής κατανόησης και αναλυτικής ακρίβειας. Μέσα από αυτή την εξέλιξη γίνεται κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνικές αισθητηριακής αξιολόγησης έχουν αλλάξει με την πάροδο του χρόνου.

Η αισθητηριακή αξιολόγηση ξεκίνησε στην αρχαιότητα, όπου οι ανθρώπινες αισθήσεις ήταν η μόνη βάση για τον προσδιορισμό της ποιότητας των τροφίμων. Για να διαπιστωθεί η φρεσκάδα ή η αλλοίωση, οι παραγωγοί και οι καταναλωτές χρησιμοποιούσαν την όραση, την όσφρηση και τη γεύση. Ωστόσο, οι συστηματικές επιστημονικές μέθοδοι διενέργειας αισθητηριακών αξιολογήσεων εμφανίστηκαν για πρώτη φορά τον 20ό αιώνα, καθώς η πειραματική ψυχολογία επισημοποιήθηκε και ο στατιστικός σχεδιασμός εισήχθη στις δοκιμές τροφίμων (Lawless και Heymann, 2010). Μια αρχική προσέγγιση με τη μορφή δοκιμών σύγκρισης ζευγαριών, κατάταξης και τριγώνων δημιουργήθηκε για να μετρήσει τις διαφορές στην αντιληπτότητα μεταξύ των δειγμάτων τροφίμων. Στη συνέχεια, η ηδονική κλίμακα, ειδικά η 9-βαθμιαία ηδονική κλίμακα, χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την αισθητηριακή ανάλυση των καταναλωτών, η οποία αποτελεί το μέτρο της προτίμησης και της αποδοχής (Lim, 2011).

Αρχικά εισήχθη από τους Peryam και Girardot στα μέσα του 20ού αιώνα, η 9-βαθμιαία ηδονική κλίμακα επέτρεψε στους ερευνητές να μετατρέψουν τις ποιοτικές απόψεις σε ποσοτικές πληροφορίες. Χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων, επειδή αποτελεί έναν βολικό τρόπο για την ικανοποίηση των καταναλωτών σε μια μορφή που είναι εύκολη στην ερμηνεία (Meilgaard et al., 2016). Η ύστερη ανάπτυξη της περιγραφικής ανάλυσης επέτρεψε αργότερα σε εκπαιδευμένα πάνελ να μετρήσουν μεμονωμένα χαρακτηριστικά, όπως η ένταση της γεύσης, η ένταση της οσμής και η απαλότητα της υφής, χρησιμοποιώντας συμβατικά λεξικά. Αυτή ήταν μια

μετάβαση προς τη γενική προτίμηση προς τον αναλυτικό χαρακτηρισμό των αισθητηριακών εμπειριών (Stone et al., 2012).

Ωστόσο, οι παραδοσιακές αισθητηριακές δοκιμές ήταν περιορισμένες, παρά την επιστημονική τους μορφή. Τα στοιχεία της υποκειμενικότητας, της κόπωσης των μελών της ομάδας, της περιβαλλοντικής προκατάληψης και του ανθρώπινου λάθους οδήγησαν σε μεταβλητότητα, η οποία συνήθως υπονόμεινε την αναπαραγωγιμότητα. Πειράματα έχουν δείξει ότι ακόμη και εκπαιδευμένες ομάδες μπορεί να δώσουν ασυνεπή ευρήματα με βάση το φως, την οσμή του περιβάλλοντος, ακόμη και την ψυχολογική προσδοκία (Lawless και Heymann, 2010). Επιπλέον, οι ομάδες και οι αισθητηριακές μελέτες μεγάλης κλίμακας ήταν δαπανηρές και χρονοβόρες, γεγονός που περιόρισε τη χρήση αυτών των ομάδων στη βιομηχανία, ειδικά στις ταχέως εξελισσόμενες βιομηχανίες παραγωγής. Οι περιορισμοί οδήγησαν στην ενσωμάτωση αναλυτικών μεθόδων ανάλυσης που θα μπορούσαν να παρέχουν αντικειμενικές και ποσοτικοποιήσιμες μετρήσεις της αισθητηριακής αντίληψης.

Μια άλλη σημαντική ανακάλυψη στα αισθητηριακά όργανα είναι η Ανάλυση Προφίλ Υψής (TPA). Η TPA, η οποία αναπτύχθηκε για να μιμείται την ανθρώπινη μάσηση, μετρά μηχανικές ιδιότητες όπως η σκληρότητα, η συνεκτικότητα, η ελαστικότητα και η μασητική ικανότητα (Bourne, 2002). Η τεχνική βασίζεται στη διπλή συμπίεση δειγμάτων τροφίμων για την προσομοίωση της μάσησης και οι καμπύλες αναγκαστικής παραμόρφωσης που καταγράφονται μπορούν να συσχετιστούν στατιστικά με τις αισθητηριακές αξιολογήσεις της υψής. Με το βοδινό κρέας, π.χ., οι μετρήσεις της δύναμης διάτμησης WarnerBratzler έχουν βρεθεί ότι συσχετίζονται έντονα με την τρυφερότητα που καθορίζεται από το πάνελ, γεγονός που υποστηρίζει τη μέθοδο ως αντικειμενικό αισθητηριακό ισοδύναμο (Caine et al., 2003). Ομοίως, οι έξοδοι TPA είναι αξιόπιστοι προγνωστικοί παράγοντες της σφριγηλότητας και της ελαστικότητας, οι οποίοι συσχετίζονται με την αίσθηση στο στόμα του καταναλωτή σε ζελέ τυριού και γαλακτοκομικών προϊόντων (Drake, 2007).

Η ανάπτυξη προχώρησε περαιτέρω με την εισαγωγή ηλεκτρονικών αισθητηριακών συστημάτων, συγκεκριμένα, της ηλεκτρονικής μύτης (e-nose) και της ηλεκτρονικής γλώσσας (e-tongue). Πρόκειται για συσκευές που βασίζονται σε συστοιχίες αισθητήρων και λειτουργούν με αλγόριθμους αναγνώρισης μοτίβων για την προσομοίωση της ανθρώπινης όσφρησης και γεύσης (Loutfi et al., 2015; Cui et al.,

2018). Η ηλεκτρονική μύτη αναγνωρίζει σύνθετα πτητικά μείγματα και διαχωρίζει οσμές σύμφωνα με χημικά σημάδια, γεγονός που την καθιστά ιδανική για την αξιολόγηση της φρεσκάδας στα ψάρια ή την αξιολόγηση της τάγγισης στο κρέας. Εν τω μεταξύ, η ηλεκτρονική γλώσσα ποσοτικοποιεί διαλυμένες ενώσεις και ιοντικές παραλλαγές, γεγονός που επιτρέπει την αντικειμενική διάκριση των γευστικών μοτίβων στο γάλα, το τυρί ή το ζωμό. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ πιο κατάλληλα από τα ανθρώπινα πάνελ, καθώς παρέχουν γρήγορες, αναπαραγώγιμες και μη καταστροφικές δοκιμές και είναι πολύ εφαρμόσιμα στις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου σε βιομηχανικό επίπεδο (Mocak & Pavlík, 2022).

Αυτός ο συνδυασμός αισθητηριακών και αναλυτικών προσεγγίσεων υποδηλώνει μια μεγαλύτερη στροφή προς την υποκειμενική αξιολόγηση προς την ποσοτικοποίηση στην επιστήμη. Η σύγχρονη αισθητηριακή επιστήμη δεν διαχωρίζει πλέον την ανθρώπινη αξιολόγηση των τροφίμων από την ενόργανη μέτρηση. Αντίθετα, προσπαθεί να συγκρίνει τα δύο σύνολα πληροφοριών για να δημιουργήσει μια συνολική και αξιόπιστη ερμηνεία της ποιότητας των τροφίμων. Σήμερα, τα μοντέλα σχέσεων μεταξύ των αισθητηριακών βαθμολογιών και των ενόργανων μετρήσεων εκτελούνται συχνά με τη βοήθεια της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA) και της Μερικής Παλινδρόμησης Ελάχιστων Τετραγώνων (PLSR), καθώς αυτές οι μέθοδοι απλοποιούν τη διαδικασία μοντελοποίησης και αποκαλύπτουν τους σημαντικούς παράγοντες ποιότητας (Romano et al., 2015). Με αυτό το είδος στατιστικής συσχέτισης, είναι δυνατό όχι μόνο να κατανοήσουμε καλύτερα την αντίληψη των καταναλωτών, αλλά και να μοντελοποιήσουμε προγνωστικά τα αισθητηριακά αποτελέσματα.

Εν ολίγοις, η επιστήμη των αισθήσεων έχει εξελιχθεί από την διαισθητική γευσιγνωσία σε μια διεπιστημονική προσέγγιση που περιλαμβάνει την ψυχοφυσική, τη βιοχημεία και την ανάλυση δεδομένων. Η ιστορία της εξέλιξης των πρώιμων ηδονικών κλιμάκων στις προηγμένες τεχνολογίες ηλεκτρονικής μύτης και γλώσσας μπορεί να χαρακτηριστεί από τη συνεχή αναζήτηση ακρίβειας, συνέπειας και αναπαραγωγιμότητας της προσέγγισης για την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων. Στην περίπτωση των τροφίμων ζωικής προέλευσης, όπου μικρές βιοχημικές διακυμάνσεις μπορούν να προκαλέσουν τεράστιες αλλαγές στο αισθητηριακό ενδιαφέρον, αυτή η εξέλιξη έχει καταγράψει έναν νέο ρόλο στον τρόπο

με τον οποίο οι ερευνητές και οι βιομηχανίες εξετάζουν, ποσοτικοποιούν και επαληθεύουν την ποιότητα των προϊόντων. Το δεύτερο μέτωπο είναι ο συνδυασμός της ακρίβειας των οργάνων και των συναισθηματικών και πολιτισμικών πτυχών της ανθρώπινης αντίληψης με τέτοιο τρόπο ώστε η επιστήμη της αισθητηριακής αξιολόγησης να μην χάνεται στην τέχνη της γεύσης και της εμπειρίας.

1.3 Σημασία της Οργανοληπτικής Ποιότητας στα Τρόφιμα Ζωικής Προέλευσης

Τα ζωικά ή οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων, δηλαδή του κρέατος, του ψαριού, των γαλακτοκομικών προϊόντων και των αυγών, είναι η πιο σημαντική μεταβλητή που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι καταναλωτές θα πραγματοποιήσουν μια αγορά και θα είναι επιτυχημένοι στην αγορά. Παρόλο που τόσο η ασφάλεια όσο και η θρεπτική αξία είναι σημαντικοί παράγοντες, οι καταναλωτές δεν τείνουν να τα αξιολογούν άμεσα, αλλά χρησιμοποιούν αισθητηριακά χαρακτηριστικά όπως η εμφάνιση, το άρωμα, η γεύση και η υφή για να προσδιορίσουν τη φρεσκάδα, την υγιεινότητα και την επιθυμητότητα. Αυτά τα σήματα είναι το αποτέλεσμα ενός περίπλοκου συνδυασμού βιοχημικών, φυσικών και μικροβιολογικών αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα αμέσως πριν, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και καθ' όλη τη διάρκεια της αποθήκευσης. Η οργανοληπτική ανάλυση είναι, επομένως, ένα ουσιαστικό μέρος της διασφάλισης ποιότητας, επιτρέποντας στους παραγωγούς να εξισορροπούν τα αντικειμενικά δεδομένα σχετικά με την ποιότητα του προϊόντος με τις αντιλήψεις των καταναλωτών (Lawless and Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016).

1.3.1 Προϊόντα κρέατος και πουλερικών

Στην περίπτωση του κρέατος και των πουλερικών, τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά της αισθητηριακής αντίληψης στον ποιοτικό έλεγχο είναι το χρώμα, η τρυφερότητα, η ζουμερότητα και η γεύση. Το χρώμα είναι ένας άμεσος δείκτης φρεσκάδας, καθώς καθορίζει εάν ένας καταναλωτής θα δεχτεί να αγοράσει ένα προϊόν ή όχι. Αυτή η

ποιότητα βασίζεται κυρίως στη χημεία της μυοσφαιρίνης, της χρωστικής που περιέχει σίδηρο και καθορίζει το χρωματισμό του κρέατος. Η σύνδεση του οξυγόνου με τη μυοσφαιρίνη συμβαίνει δημιουργώντας οξυμυοσφαιρίνη, η οποία προσδίδει στο βοδινό κρέας τον τυπικό έντονο κόκκινο χρωματισμό του, τον οποίο οι καταναλωτές αντιλαμβάνονται ότι σημαίνει ότι το κρέας είναι φρέσκο. Αλλά με την πάροδο του χρόνου και με την έκθεση στο οξυγόνο, η μυοσφαιρίνη οξειδώνεται σε μεταμυοσφαιρίνη και δίνει ένα ανεπιθύμητο καφέ χρώμα, καθιστώντας έτσι τον καταναλωτή να το κρίνει αρνητικά (Bekhit & Faustman, 2005).

Μια άλλη βάση για την τρυφερότητα της ποιότητας του κρέατος, ανάλογα με τη μορφή των μυϊκών ινών και τη σύνθεση του συνδετικού ιστού, είναι η ποσότητα κολλαγόνου και ο ρυθμός της μεταθανάτιας πρωτεόλυσης, δηλαδή η διάσπαση των μυϊκών πρωτεϊνών από ένζυμα όπως οι καλπαΐνες και οι καθεψίνες, που καθορίζει πόσο μαλακώνει ο μυς σε μεγάλη ηλικία (Claeys et al., 2004). Έχει βρεθεί ότι οι μηχανικές μετρήσεις προσφέρουν ισχυρή θετική συσχέτιση με την αξιολόγηση της τρυφερότητας από εκπαιδευμένο πάνελ, καθώς μελέτες σχετικά με τη χρήση της δοκιμής διατμητικής δύναμης Warner-Bratzler έχουν επιβεβαιώσει ότι η μηχανική αξιολόγηση μπορεί πραγματικά να αντικαταστήσει την υποκειμενική αξιολόγηση (Destefanis et al., 2008).

Η χυμώδης γεύση, η οποία αποτελεί μέτρο της κατανομής λίπους και της περιεκτικότητας σε υγρασία, επηρεάζει άμεσα την απελευθέρωση γεύσης και την αίσθηση στο στόμα. Η χυμώδης γεύση και η τρυφερότητα γίνονται αντιληπτά ταυτόχρονα από αισθητηριακής άποψης, γεγονός που αυξάνει τη συνολική γευστικότητα. Αυτές οι επιθυμητές ιδιότητες, ωστόσο, μπορεί να καταστραφούν από οξειδωτικές τροποποιήσεις στα λιπίδια. Η οξείδωση των λιπιδίων είναι μια διαδικασία που οδηγεί σε αλδεΐδες, κετόνες και αλκοόλες, οι οποίες έχουν μια ταγγή, μεταλλική ή γεύση που μοιάζει με χαρτόνι. Η Αέρια Χρωματογραφία-Ολφακτομετρία (GC-O/MS) έχει επίσης γίνει ένα ανεκτίμητο εργαλείο στη μέτρηση τέτοιων πτητικών αντιδράσεων οξείδωσης και της συσχέτισής τους με την αισθητηριακή υποβάθμιση της γεύσης (Pérez-Palacios et al., 2010).

Το βασικό οργανοληπτικό ζήτημα στα πουλερικά και τα αυγά είναι οι δυσάρεστες οσμές και οι δυσάρεστες γεύσεις που παράγονται από τις ενώσεις που περιέχουν θείο, όπως το υδρόθειο και το διμεθυλοτρι σουλφίδιο. Πρόκειται για πτητικές ενώσεις που σχηματίζονται κατά την αποθήκευση ή τη θέρμανση, ειδικά όταν τα αυγά είναι παλιά ή

το κρέας κοτόπουλου δεν έχει αποθηκευτεί σωστά. Οι Ahi et al. (2012) τόνισαν ότι τέτοιες χημικές διεργασίες, καθώς και τα επίπεδα ανοχής των καταναλωτών, θα πρέπει να κατανοούνται, προκειμένου να αποφευχθούν τα οργανοληπτικά ελαττώματα και τα ποιοτικά ελαττώματα. Συνολικά, η οργανοληπτική αξιολόγηση του κρέατος και των πουλερικών συνδυάζεται με την ανθρώπινη οργανοληπτική ανάλυση και την ενόργανη ανάλυση, μέσω της οποίας η διαδικασία υποβάθμισης μπορεί να ανιχνευθεί σωστά πριν από την εμφάνιση της αλλοίωσης.

1.3.2 Ψάρια και θαλασσινά

Η αντίληψη της φρεσκάδας των ψαριών και των θαλασσινών βασίζεται περισσότερο στην οσμή, την αίσθηση και την υφή, σε αντίθεση με την εμφάνιση του κρέατος, η οποία αποτελεί τον πυρήνα της αντίληψης στο κρέας. Η βιοχημική σύνθεση του μυός των ψαριών είναι πολύ ευπαθής, καθώς περιέχει υψηλή συγκέντρωση ακόρεστων λιπαρών οξέων και χαμηλή συγκέντρωση συνδετικού ιστού, αλλά και λόγω του υψηλού ρυθμού ενζυματικών και μικροβιακών δραστηριοτήτων που εμφανίζονται μετά τη συγκομιδή. Το αποτέλεσμα αυτών των δραστηριοτήτων αλλοίωσης είναι η συσσώρευση τριμεθυλαμίνης (TMA), αμμωνίας και ενώσεων που περιέχουν θείο, οι οποίες όλες εκπέμπουν δυσάρεστες οσμές (Huss, 1995).

Η Μέθοδος Δείκτη Ποιότητας (QIM), η οποία είναι ένα τυποποιημένο εργαλείο αισθητηριακής αξιολόγησης, είναι ένα δομημένο σύστημα βαθμολόγησης που μετρά την απώλεια φρεσκάδας με φυσικούς και αισθητηριακούς παράγοντες (διαύγεια των ματιών, χρώμα των βραγχίων, βαθμός φωτεινότητας του δέρματος και ένταση της οσμής) (Bonilla et al., 2007). Απονέμεται ένας βαθμός μειονεκτήματος κάθε φορά που δεν ταιριάζει με το νέο πρότυπο και η φρεσκάδα μπορεί στη συνέχεια να παρακολουθηθεί ποσοτικά κατά την αποθήκευση. Η καλή συσχέτιση της QIM με αντικειμενικούς φυσικοχημικούς δείκτες αποικοδόμησης πρωτεϊνών και λιπιδίων, όπως το Ολικό Πτητικό Βασικό Άζωτο (TVB-N) και οι ουσίες που αντιδρούν με το θειοβαρβιτουρικό οξύ (TBARS), αποτελεί ένα ισχυρό σημείο της μεθόδου (Mehdizadeh et al., 2015; Papadopoulou et al., 2020).

Οι πιο πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν οδηγήσει στην ταχύτερη και πιο αντικειμενική ανίχνευση φρεσκάδας με συστήματα ηλεκτρονικής μύτης (e-nose). Οι ηλεκτρονικές μύτες είναι σε θέση να αναγνωρίζουν πτητικά αέρια νωρίτερα από τα ανθρώπινα πάνελ, αναλύοντας τα μοτίβα πτητικών αερίων με συστοιχίες αισθητήρων και αλγόριθμους αναγνώρισης μοτίβων, υποδεικνύοντας ότι είναι σε θέση να ανιχνεύσουν αλλοίωση πριν ανιχνευθούν οσμές από την ανθρώπινη μύτη (Loutfi et al., 2015). Εκτός του ότι αποτελεί συμπλήρωμα στις συμβατικές αισθητηριακές τεχνικές, αυτή η ενόργανη μεθοδολογία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση του ποιοτικού ελέγχου στη βιομηχανία θαλασσινών. Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός της QIM και της ενόργανης ανίχνευσης οσμών μπορεί να θεωρηθεί ένα ισχυρό πλαίσιο για τη διασφάλιση της συνέπειας, της ασφάλειας και της εμπιστοσύνης των καταναλωτών στα προϊόντα θαλασσινών.

1.3.3 Γαλακτοκομικά προϊόντα

Η ισορροπία της γεύσης, η υφή και το άρωμα καθορίζουν την οργανοληπτική ποιότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων, δηλαδή του γάλακτος, του τυριού και των παράγωγων προϊόντων που έχουν υποστεί ζύμωση. Αυτές οι ιδιότητες προκύπτουν ως αποτέλεσμα του συνδυασμού εκατοντάδων πτητικών ουσιών, όπως αλδεΐδες, οξέα και εστέρες, και θειούχων ενώσεων που σχηματίζονται λόγω της ζύμωσης, της οξείδωσης των λιπιδίων και της διάσπασης των ενζύμων (Carunchia Whetstine et al., 2003; Kilcawley et al., 2018). Η πολυπλοκότητα της γεύσης των γαλακτοκομικών βασίζεται στο γεγονός ότι είναι ένα σύνθετο: όπως η γεύση του τυριού είναι προϊόν της αλληλεπίδρασης του μεταβολισμού των αμινοξέων και του λίπους, καθώς και της δραστηριότητας των μικροοργανισμών κατά τη διαδικασία ωρίμανσης.

Οικείες αισθητηριακές ομάδες εξακολουθούν να είναι σημαντικές για τον έλεγχο ιδιοτήτων όπως η κρεμώδης, η ξινή και η ταγγή υφή. Αυτές οι ομάδες εφαρμόζουν περιγραφική ανάλυση στην αξιολόγηση της έντασης της γεύσης και της αίσθησης στο στόμα. Παρ' όλα αυτά, για να βελτιωθεί η ακρίβεια και να ελαχιστοποιηθεί το ανθρώπινο λάθος, οι σύγχρονοι μελετητές χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο αισθητηριακά ευρήματα με ευρήματα οργάνων. Η Αέρια Χρωματογραφία - Ολφακτομετρία (GC -O) μετρά ευαίσθητα συστατικά που αντιδρούν στην οσμή - 2,3-

βουτανοδεΐνη (βουτυρένιες νότες) ή εξανάλη (οξειδωμένη γεύση) - τα οποία σχετίζονται με τις περιγραφές των αισθητηριακών ομάδων. Με τον ίδιο τρόπο, οι ηλεκτρονικές γλώσσες (e-tongues): που προσομοιώνουν την αίσθηση της γεύσης με ηλεκτροχημικούς αισθητήρες, έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της φρεσκάδας του γάλακτος και της ωριμότητας του τυριού αναγνωρίζοντας το γευστικό προφίλ (Romano et al., 2015; Cui et al., 2018).

Η ποιότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων αξιολογείται επίσης σημαντικά με τη βοήθεια της ανάλυσης υφής. Οι παράμετροι των αισθητηριακών αξιολογήσεων της αίσθησης στο στόμα μετρώνται και συγκρίνονται στατιστικά με τις παραμέτρους της Ανάλυσης Προφίλ Υφής (TPA) (σκληρότητα, συνοχή και ελαστικότητα) (Bourne, 2002). Ένας τέτοιος συνδυασμός εγγυάται την ομοιογένεια στην αντίληψη της υφής και, δεδομένου ότι η ομοιομορφία μεταξύ των παρτίδων είναι κρίσιμης σημασίας στην παραγωγή βιομηχανικού τυριού, αυτή η μεθοδολογία διασφαλίζει επίσης ομοιομορφία στην αντίληψη της υφής.

1.3.4 Αυγά και προϊόντα αυγών

Τα αυγά έχουν ένα ξεχωριστό οργανοληπτικό προφίλ, το οποίο περιλαμβάνει την εμφάνιση, την οσμή και την ακεραιότητα της γεύσης. Το χρώμα του κρόκου είναι ένα από αυτά και ένας από τους κύριους οπτικούς δείκτες των καταναλωτών, καθώς μπορεί να σχετίζεται με τη φρεσκάδα και τη θρεπτική αξία. Η χρώση του κρόκου ποικίλλει ανάλογα με το επίπεδο των διαιτητικών καροτενοειδών - π.χ. λουτεΐνη και ζεαξανθίνη - τα οποία μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τη σύνθεση της τροφής της κότας (Ahn et al., 2012). Ένα αντικειμενικό μέτρο αυτών των διαφορών, για να διασφαλιστεί η συνέπεια μεταξύ των παρτίδων εμπορικών παρτίδων, μπορεί να γίνει με χρωματομετρική αξιολόγηση με CIE. Τιμές L*, a*, b* (ή Roche Yolk Color Fan).

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η ποιότητα της οσμής, επειδή υπάρχει πιθανότητα απελευθέρωσης υδρόθειου και άλλων ενώσεων με βάση το θείο κατά την αποθήκευση και τη θέρμανση, οδηγώντας στην παραγωγή της οσμής αυγών και μετάλλων. Ο βαθμός αυτών των πτητικών ουσιών μπορεί να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά συστήματα μύτης καθώς και αισθητήρια πάνελ. Η

ανάλυση της ηλεκτρονικής μύτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταχεία ανίχνευση της απόκλισης της οσμής και για να διασφαλιστεί ότι τα αυγά εκτίθενται σε αποδεκτά αισθητηριακά επίπεδα πριν προσφερθούν στους καταναλωτές (Loutfi et al., 2015). Επιπλέον, η συνοχή του λευκώματος, όπως ελέγχεται μέσω του ύψους, του ιξώδους και της ελαστικότητας, είναι επίσης ένας παράγοντας της συνολικής αισθητηριακής αντίληψης για την γαστρονομική απόδοση και την ικανοποίηση των καταναλωτών.

Συνολικά, η αισθητηριακή ποιότητα των αυγών είναι ένας συνδυασμός οπτικών, οσφρητικών και απτικών ερεθισμάτων, τα οποία έχουν άμεσο αντίκτυπο στις αγοραστικές συμπεριφορές. Ο συνδυασμός ενόργανων μετρήσεων και αισθητηριακών μετρήσεων είναι πιο αποτελεσματικός για τη βελτίωση του ποιοτικού ελέγχου και τη διευκόλυνση της τυποποίησης των προϊόντων στους τομείς της διαλογής και της επεξεργασίας αυγών.

1.4 Ενσωμάτωση Ενόργανων και Αισθητηριακών Προσεγγίσεων

Η επιστήμη των τροφίμων έχει βιώσει μια παραδειγματική μετατόπιση τα τελευταία χρόνια, όπου η μεθοδολογία της βασίστηκε σε ανθρωποκεντρικά αισθητηριακά πάνελ, αλλά έχουν υιοθετηθεί υβριδικά πλαίσια που συνεπάγονται έναν συνδυασμό οργανικών αναλύσεων και ανθρώπινης κρίσης. Πρόκειται για μια από τις πιο αξιοσημείωτες εξελίξεις στον τομέα της οργανοληπτικής εξέτασης, καθώς επιτρέπει στους ερευνητές να παρέχουν αντικειμενικές μετρήσεις υποκειμενικών φαινομένων όπως η υφή, το άρωμα και η γεύση. Η ιδέα πίσω από αυτά τα υβριδικά συστήματα είναι να παρέχουν στατιστικά σημαντικές συνδέσεις μεταξύ μετρήσιμων φυσικοχημικών παραμέτρων και αισθητηριακών περιγραφών, γεμίζοντας το κενό μεταξύ της αντικειμενικής πραγματικότητας της σύνθεσης των τροφίμων και της υποκειμενικής πραγματικότητας της ανθρώπινης εμπειρίας (Romano et al., 2015).

Οι στατιστικές και πολυμεταβλητές μέθοδοι μοντελοποίησης, και ιδιαίτερα η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) και η Μερική Παλινδρόμηση Ελάχιστων Τετραγώνων (PLSR), γίνονται ολοένα και πιο σημαντικές στον προσδιορισμό κρυφών συσχετίσεων μεταξύ των δεδομένων οργάνων και των αισθητηριακών αποτελεσμάτων (Oliveira et

al., 2021). Η PCA απλοποιεί τα πολυδιάστατα δεδομένα σε λίγα κύρια ή κύρια στοιχεία που εμφανίζουν τη συσχέτιση διαφόρων μεταβλητών όπως το χρώμα, η οσμή και η υφή. Για παράδειγμα, η PCA έχει αποδείξει ότι η CIEΟι παράμετροι χρώματος L^* , a^* , b^* έχουν ισχυρή σχέση με την ερυθρότητα και την οπτική φρεσκάδα που αξιολογούνται στο πάνελ κατά τη διάρκεια του βοδινού κρέατος (Caine et al., 2003). Ομοίως, τα μοντέλα PLSR έχουν καταφέρει να προβλέψουν την αισθητηριακή σταθερότητα και ελαστικότητα στα τυριά χρησιμοποιώντας παραμέτρους υφής με όργανα (Carunchia Whetstine et al., 2003). Αυτές οι τεχνικές καθιστούν την αισθητηριακή ανάλυση μια πιο αντικειμενική επιστήμη, ικανή να επικυρωθεί ποσοτικά.

Ένα άλλο τεχνολογικό ορόσημο σε αυτή τη διαδικασία ολοκλήρωσης είναι η χρήση ηλεκτρονικών αισθητηριακών συστημάτων, δηλαδή της ηλεκτρονικής μύτης (e-nose) και της ηλεκτρονικής γλώσσας (e-tongue). Αυτές οι συσκευές αναδημιουργούν τις διαδικασίες της ανθρώπινης μύτης και του στόματος χρησιμοποιώντας συστοιχίες αισθητήρων όπου ανιχνεύουν περίπλοκες πτητικές και μη πτητικές ουσίες. Αλγόριθμοι αναγνώρισης προτύπων, όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και διακριτική ανάλυση, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την επεξεργασία των δεδομένων, έτσι ώστε τα δείγματα να μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα αισθητηριακά προφίλ (Deisingh et al., 2004; Cui et al., 2018). Η ηλεκτρονική μύτη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ποιότητας των πτητικών ουσιών του υπερκείμενου χώρου για τον προσδιορισμό της φρεσκάδας, της οξείδωσης ή της μικροβιακής αλλοίωσης στο κρέας, τα ψάρια και τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Η ηλεκτρονική γλώσσα, ωστόσο, μετρά τις παραμέτρους της γεύσης σε υγρά και ημιστερεά τρόφιμα: γλυκύτητα, πικράδα, ξινή γεύση, αλμυρότητα και ουμάμι.

Η ακρίβεια και η αναπαραγωγιμότητα μπορούν να θεωρηθούν ένα από τα πιο ενημερωτικά οφέλη τέτοιων συστημάτων. Έχει αποδειχθεί ότι η ηλεκτρονική μύτη και η ηλεκτρονική γλώσσα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση της φρεσκάδας του κρέατος, την αναγνώριση νοθείας του γάλακτος και την παρακολούθηση της αλλοίωσης στα ψάρια με ακρίβεια άνω του 90% (Loutfi et al., 2015). Για παράδειγμα, τα συστήματα ηλεκτρονικής μύτης έχουν εφαρμοστεί για τη διάκριση μεταξύ φρέσκων και κατεψυγμένων-αποψυγμένων ψαριών παρακολουθώντας την τάση στη συγκέντρωση πτητικών αμινών πολύ πριν η ανθρώπινη ομάδα είναι σε θέση να διακρίνει ότι η οσμή έχει αλλάξει. Παράλληλα, η

ανάλυση ηλεκτρονικής γλώσσας σε δείγματα γάλακτος έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην αναγνώριση της νοθείας του νερού ή της ουρίας λόγω αποκλίσεων στα πρότυπα ιοντικής σύνθεσης (Cui et al., 2018).

Μαζί με τα δεδομένα των αισθητηριακών πάνελ, αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν να έχουμε μια πολυδιάστατη εικόνα της ποιότητας των τροφίμων, η οποία ποσοτικοποιεί όχι μόνο τι αντιλαμβάνονται οι άνθρωποι, αλλά και γιατί αντιλαμβάνονται και προβλέπει πώς η αντίληψη ποικίλλει υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες αποθήκευσης ή επεξεργασίας. Η δυνατότητα αυτοματοποίησης και ψηφιακού μετασχηματισμού καθίσταται επίσης δυνατή από την υβριδική αισθητηριο-οργανική μέθοδο, η οποία ευθυγραμμίζεται με την έννοια της Βιομηχανίας 4.0, στην οποία οι έξυπνοι αισθητήρες και οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο.

1.5 Επιστημονική και Βιομηχανική Σημασία

Η σημασία των αισθητηριακών και ενόργανων μεθόδων δεν περιορίζεται μόνο στον ακαδημαϊκό χώρο, αλλά έχει άμεση επίδραση στη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων, στους κανονισμούς και στην εμπιστοσύνη των καταναλωτών. Ανεξάρτητα από τη μεγάλη εξέλιξη της αισθητηριακής επιστήμης, η τυποποίηση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Παρόλο που υπάρχουν συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές για τη μέτρηση του χρώματος του κρέατος (American Meat Science Association 2012) και τις δοκιμές αισθητηριακής τρυφερότητας (American Meat Science Association 2016) σε οργανισμούς, άλλες συγκρίσιμες βιομηχανίες τροφίμων με βάση το κρέας έχουν μόνο αποσπασματικές κατευθυντήριες γραμμές. Ας πάρουμε ως παράδειγμα τις βιομηχανίες θαλασσινών, αν και η Μέθοδος Δείκτη Ποιότητας (QIM) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην αξιολόγηση της φρεσκάδας, οι βιομηχανίες γαλακτοκομικών προϊόντων και αυγών δεν διαθέτουν καθολικά εφαρμόσιμα μοντέλα αισθητηριακής-ενόργανης ολοκλήρωσης.

Συνεπώς, απαιτείται ένα ολοκληρωμένο συγκριτικό πλαίσιο για τον εντοπισμό των πιο αναπαραγωγίμων, ακριβών και οικονομικά αποδοτικών μεθόδων αποτελεσμάτων στις διάφορες κατηγορίες τροφίμων. Ένα τέτοιο πλαίσιο θα επέτρεπε την ομοιόμορφη

ερμηνεία των αισθητηριακών δεδομένων σε διακλαδικό επίπεδο, θα βελτίωνε τη διαφάνεια στο διεθνές εμπόριο και θα βελτίωνε τις διαδικασίες κανονιστικών ελέγχων.

Η ενσωμάτωση τεχνικών με όργανα έχει σημαντικό οικονομικό όφελος όσον αφορά το βιομηχανικό κόστος. Τεχνολογίες όπως η GC-MS, οι ηλεκτρονικές μύτες ή οι αναλυτές υφής είναι δαπανηρές στην αγορά, αλλά επιτρέπουν τη μείωση του κόστους και των δαπανών μακροπρόθεσμα, μειώνοντας τη χρήση μεγάλων αισθητηριακών πάνελ και μειώνοντας τη μεταβλητότητα μεταξύ των δοκιμαστών (Bourne, 2002). Ο αυτοματισμός βελτιώνει επίσης την απόδοση και τη συνέπεια - οι οποίες αποτελούν σημαντικές παραμέτρους στην παραγωγή και την εξαγωγή σε περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας. Ενδεικτικά, η αυτοματοποιημένη χρωματομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή παρακολούθηση του χρώματος του κρέατος σε πραγματικό χρόνο κατά τη συσκευασία, μειώνοντας έτσι τα ποσοστά απόρριψης προϊόντων λόγω αλλαγών χρώματος.

Είναι, ωστόσο, επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν είναι ούτε εφικτό ούτε επιθυμητό να αντικατασταθεί πλήρως η ανθρώπινη αισθητηριακή αντίληψη. Οι μηχανές ενδέχεται να μην είναι σε θέση να καταγράψουν πλήρως τις ηδονικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένων θεμάτων όπως η προτίμηση, η συμπάθεια και η συναισθηματική ικανοποίηση. Οι αισθητηριακές εμπειρίες εξακολουθούν να επηρεάζονται από πολιτισμικούς παράγοντες και τις προσδοκίες των καταναλωτών, καθώς και από τους παράγοντες του πλαισίου (π.χ., η εξυπηρέτηση ενός προϊόντος) με τρόπο που δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί οργανικά (Lawless and Heymann, 2010; Lim, 2011). Ως εκ τούτου, η πιο μετριοπαθής και φυσική μέθοδος αισθητηριακής αξιολόγησης είναι ο συνδυασμός της οργανικής ακρίβειας και του ανθρώπινου συναισθήματος ή συναισθημάτων.

Τα υβριδικά αισθητηριακά συστήματα έχουν βιομηχανικές εφαρμογές όσον αφορά τον ποιοτικό έλεγχο, την καινοτομία προϊόντων και το μάρκετινγκ. Οι γρήγορες αισθητηριακές-οργανικές δοκιμές επιτρέπουν στους κατασκευαστές να επιτυγχάνουν συνέπεια στις παρτίδες, έγκαιρη αναγνώριση δυσάρεστων γεύσεων και έγκαιρες αντιδράσεις σε παράπονα που υποβάλλονται από καταναλωτές. Επιπλέον, η συγχώνευση αισθητηριακών-οργανικών δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενημέρωση της ανάπτυξης νέων προϊόντων, με πρωτότυπες συνθέσεις να προσαρμόζονται σε ποσοτικές συσχετίσεις μεταξύ αισθητηριακών χαρακτηριστικών

και μετρήσιμων χαρακτηριστικών προϊόντων. Η ίδια ενσωμάτωση διευκολύνει την τμηματοποίηση της αγοράς και τη χαρτογράφηση προτιμήσεων, έτσι ώστε οι εταιρείες να μπορούν να χαρτογραφούν αισθητηριακά προφίλ σε μια συγκεκριμένη δημογραφική ή περιφερειακή προτίμηση των καταναλωτών.

Η αυτοματοποιημένη αισθητηριακή παρακολούθηση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της βιωσιμότητας, όπου η σπατάλη τροφίμων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μέσω της κατανάλωσης αισθητηριακά αποδεκτών αλλά αισθητικά ατελών προϊόντων, με την αντιστοίχισή τους στα σωστά κανάλια αγοράς. Επομένως, ο συνδυασμός της αισθητηριακής επιστήμης και των οργάνων δεν αποτελεί μόνο βελτίωση της τεχνολογίας, αλλά και μια οικονομική βελτιστοποίηση και μια πρωτοβουλία ικανοποίησης των καταναλωτών των σύγχρονων συστημάτων τροφίμων.

1.6 Προβλήματα με την τρέχουσα οργανοληπτική αξιολόγηση

Παρόλο που αυτά έχουν επιτευχθεί, ο κλάδος εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικά επιστημονικά και λειτουργικά ζητήματα που περιορίζουν την πλήρη ενσωμάτωση ολοκληρωμένων οργανοληπτικών μοντέλων.

Το πρώτο ζήτημα είναι η μεταβλητότητα των συμμετεχόντων σε πάνελ λόγω της διαφοράς στην αισθητηριακή οξύτητα, την κόπωση και την αποτελεσματικότητα της προπόνησης. Τα καλά εκπαιδευμένα πάνελ παρουσιάζουν δια- και ενδο-ατομική μεταβλητότητα στα όρια αντίληψης, γεγονός που καθιστά δύσκολη την επίτευξη παρόμοιων αποτελεσμάτων (Meilgaard et al., 2016). Η αντίληψη μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο, οι συνήθειες καπνίσματος, καθώς και η προηγούμενη έκθεση σε γεύσεις. Αν και αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με στατιστικές μεθόδους ομαλοποίησης, η μεταβλητότητα αποτελεί αδυναμία των αισθητηριακών δοκιμών που βασίζονται σε ανθρώπους.

Η δεύτερη σημαντική δυσκολία είναι η βαθμονόμηση/διαεργαστηριακή τυποποίηση των οργάνων. Οι μετρήσεις μπορεί να είναι ασυνεπείς λόγω διαφορών στο μοντέλο των οργάνων, στις οδηγίες που πρέπει να χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση και

στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, μια μικρή αλλαγή στις ιδιότητες της στήλης GC ή στην ευαισθησία του αισθητήρα e-nose θα αλλάξει τα πτητικά προφίλ που λαμβάνονται, καθιστώντας δύσκολη τη σύγκριση μελετών μεταξύ τους (AMSA, 2016). Στο ίδιο πνεύμα, άλλες παραλλαγές στην προετοιμασία του δείγματος (συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους άλεσης ή της θερμοκρασίας) μπορεί να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Το τρίτο πρόβλημα οφείλεται στην πολυπλοκότητα του πλέγματος των τροφίμων ζωικής προέλευσης. Αυτά τα τρόφιμα έχουν ετερογενή συστατικά (πρωτεΐνες, λιπίδια, νερό), τα οποία αλληλεπιδρούν δυναμικά κατά την επεξεργασία και την αποθήκευση. Με βάση αυτό το γεγονός, καμία από τις παραμέτρους, είτε αισθητηριακές είτε οργανικές, δεν μπορεί να περιγράψει τη συνολική αισθητηριακή εμπειρία (Romano et al., 2015). Για παράδειγμα, οι χρωματομετρικές τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη της κατάστασης οξείδωσης, αλλά όχι η ζουμερότητα ή η αίσθηση στο στόμα, καμία από τις οποίες δεν είναι απαραίτητη για την αποδοχή από τον καταναλωτή.

Τέλος, είναι στατιστικά και υπολογιστικά δύσκολο να ενσωματωθούν αισθητηριακά και οργανικά δεδομένα. Η ενσωμάτωση διαφορετικών συνόλων δεδομένων, τα οποία σχετίζονται με διάφορες δομές, μεγέθη και μονάδες μέτρησης, απαιτεί ανώτερες μεθόδους σύντηξης δεδομένων και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης που μπορούν να ανιχνεύσουν μη γραμμικές σχέσεις (Cui et al., 2018). Τα τυχαία δάση, οι μηχανές διανυσματικών υποστηρικτικών και οι αρχιτεκτονικές βαθιάς μάθησης είναι μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης που έχουν επιδείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στην πρόβλεψη αισθητηριακών βαθμολογιών με βάση οργανικά δεδομένα, αν και επί του παρόντος είναι σπάνια στην εφαρμογή τους λόγω του μεγάλου μεγέθους και της υψηλής ποιότητας των συνόλων δεδομένων και της εμπειρογνωμοσύνης στην υπολογιστική μοντελοποίηση.

Επιπλέον, δεν έχει ακόμη καθιερωθεί ένα διαεμπορεύσιμο πρότυπο που να επιτρέπει ένα απλό είδος συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ κρέατος, ψαριού, γαλακτοκομικών προϊόντων και αυγών. Η πλειονότητα των ερευνητών επικεντρώνεται στα προϊόντα ξεχωριστά, χωρίς να δίνει ιδιαίτερη προσοχή στα συγκριτικά μοντέλα. Η έλλειψη τυποποιημένων μεθοδολογιών περιορίζει την εφαρμογή των αποτελεσμάτων και

εμποδίζει τις προσπάθειες απάντησης στα διεθνή συστήματα πιστοποίησης ποιότητας.

Αυτές οι διαφορές υποδεικνύουν ότι είναι απαραίτητο να διεξαχθούν εκτεταμένες συγκριτικές μελέτες σχετικά με τη συστηματοποίηση των αισθητηριακών και οργανικών τεχνικών υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Η κάλυψη τέτοιων κενών θα συμβάλει στην ανάπτυξη ενός καθολικού αισθητηριακού-οργανικού πλαισίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις μεγάλες ομάδες τροφίμων ζωικής προέλευσης.

1.7 Ερευνητικό Κενό και Σκεπτικό της Μελέτης

Παρόλο που η βιβλιογραφία περιέχει ισχυρές πληροφορίες σχετικά με την αισθητηριακή ανάλυση συγκεκριμένων προϊόντων, υπάρχει έλλειψη συγκριτικών μελετών διασταυρούμενων προϊόντων. Ένα παράδειγμα θα ήταν η συσχέτιση της Ανάλυσης Προφίλ Υφής (TPA) με την αισθητηριακή τρυφερότητα στο βοδινό κρέας (Caine et al., 2003; Claeys et al., 2004) και τη σφριγηλότητα του τυριού (Bourne, 2002), αλλά πολύ λίγη δουλειά έχει γίνει για τη μεταφορά αυτών των συσχετίσεων σε όλους τους πίνακες τροφίμων. Ομοίως, παρόλο που τα ηλεκτρονικά αισθητήρια συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών μύτων, έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά ακριβή στην ανίχνευση αλλοίωσης, υπάρχει έλλειψη συγκριτικών δεδομένων σχετικά με την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων σε σχέση με τα παραδοσιακά πάνελ σε κάθε κατηγορία τροφίμων (Loutfi et al., 2015).

Επιπλέον, έχει διεξαχθεί μια μικρή έρευνα σχετικά με τους συμβιβασμούς κόστους-οφέλους από την υιοθέτηση τέτοιων προηγμένων αισθητηριακών τεχνολογιών, ειδικά από μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις. Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, η επεκτασιμότητα και η λειτουργική βιωσιμότητα των υβριδικών συστημάτων δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς, ιδιαίτερα στον αναπτυσσόμενο κόσμο όπου τα χειροκίνητα αισθητήρια πάνελ αποτελούν πρότυπο.

Η μελέτη, επομένως, επιδιώκει να καλύψει αυτά τα κενά μελετώντας συγκριτικά με συστηματικό τρόπο τις παραδοσιακές αισθητηριακές δοκιμές και τις ενόργανες δοκιμές διαφόρων ζωικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένου του κρέατος, των ψαριών, των γαλακτοκομικών προϊόντων και των αυγών, στο ίδιο μεθοδολογικό πλαίσιο. Η έρευνα

θα είναι σε θέση να μετρήσει την αξιοπιστία, την επαναληψιμότητα και την οικονομική βιωσιμότητα κάθε προσέγγισης και να αποφασίσει πού οι αξιολογήσεις που πραγματοποιούνται από τον άνθρωπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία ή να αντικατασταθούν από τη χρήση ενόργανων εργαλείων.

Επιπλέον, η μελέτη θα προτείνει ένα υβριδικό οργανοληπτικό μοντέλο που θα συνδυάζει τα αισθητηριακά και τα οργανικά δεδομένα χρησιμοποιώντας στατιστική μοντελοποίηση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη των αισθητηριακών ιδιοτήτων χρησιμοποιώντας ποσοτικοποιήσιμα φυσικοχημικά σήματα. Αυτό θα διευκολύνει την τυποποίηση της διαδικασίας αισθητηριακής αξιολόγησης και θα προωθήσει την ψηφιοποίηση του ποιοτικού ελέγχου στη βιομηχανία τροφίμων. Με αυτόν τον τρόπο, η έρευνα όχι μόνο θα συμβάλει στην ακαδημαϊκή γνώση αλλά και στην πρακτική στον κλάδο, παρέχοντας τη βάση για εναρμονισμένα, βασισμένα σε δεδομένα συστήματα αισθητηριακής αξιολόγησης που θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν τα παγκόσμια πρότυπα ποιότητας και ασφάλειας τροφίμων.

1.8 Εννοιολογικό Πλαίσιο

Το θεωρητικό πλαίσιο της παρούσας μελέτης βασίζεται σε ένα τρισδιάστατο αναλυτικό πλαίσιο που περιλαμβάνει τον συνδυασμό ανθρώπινης αισθητηριακής αξιολόγησης, ενόργανης μέτρησης και στατιστικής μοντελοποίησης. Αυτή η τριπλή κατηγορία επιτρέπει την πλήρη σύγκριση και συσχέτιση μεταξύ της υποκειμενικής και της αντικειμενικής ποσοτικοποίησης, η οποία, τελικά, θα οδηγήσει στη δημιουργία ενός ισορροπημένου συστήματος αισθητηριακής-ενόργανης αξιολόγησης.

(1) Ανθρώπινη Αισθητηριακή Αξιολόγηση: Η Ψυχολογική Πτυχή της Ποιότητας

Η ανθρώπινη αισθητηριακή αξιολόγηση περιλαμβάνει τη μέτρηση της ψυχοφυσιολογικής αντίδρασης των καταναλωτών ή των εκπαιδευμένων μελών σε τροφικά ερεθίσματα. Περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως το χρώμα, η οσμή, η γεύση, η υφή και η γενική αποδοχή, και όλες αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν άμεσα την αγορά και την ικανοποίηση των καταναλωτών (Lawless και Heymann, 2010). Η αισθητηριακή αξιολόγηση μετατρέπει αυτές τις αντιλήψεις σε μικρότερους αριθμούς

χρησιμοποιώντας μια σειρά εργαλείων και μηχανισμών σίτισης όπως η 9-βαθμιαία ηδονική κλίμακα, τα τριγωνικά τεστ, τα τεστ κατάταξης και η περιγραφική δημιουργία προφίλ (Meilgaard et al., 2016).

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το επίπεδο οικολογικής εγκυρότητας - μετρά άμεσα την αντίληψη και την προτίμηση του καταναλωτή, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την αποδοχή της αγοράς. Παρ' όλα αυτά, τα μειονεκτήματά της είναι η ασυνέπεια των συμμετεχόντων στην ομάδα, η ευαισθησία στο περιβάλλον και οι επιπτώσεις ψυχολογικών δυναμικών, όπως η μεροληψία προσδοκιών και η κόπωση. Με αυτόν τον τρόπο, αν και οι αισθητηριακές δοκιμές είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της επιθυμητότητας των προϊόντων, δεν μπορούν να αναπαραχθούν και να αυτοματοποιηθούν επιστημονικά στο εργοστάσιο (Stone et al., 2012).

(2) Ενόργανη Μέτρηση: Μετατροπή Αισθητηριακών Ενδείξεων σε Εφικτά Δεδομένα

Οι ενόργανες μέθοδοι παρέχουν τα αντικειμενικά και ποσοτικά δεδομένα που παρατίθενται σε σχέση με ορισμένες αισθητηριακές ιδιότητες. Η αντίληψη δεν αναπαράγεται από τα όργανα, αλλά μετρώντας τις φυσικοχημικές παραμέτρους της αντίληψης που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση. Παραδείγματα περιλαμβάνουν:

Χρωματομετρία (σύστημα CIE Lab):* προσδιορίζει τη φωτεινότητα και τις χρωματικές παραμέτρους που σχετίζονται με την αντίληψη χρώματος στο κρέας, τα ψάρια και τα αυγά (AMSA, 2012).

- Ανάλυση Προφίλ Υφής (TPA): μετρά τη σκληρότητα, τη συνοχή και την ελαστικότητα, οι οποίες σχετίζονται με την αίσθηση στο στόμα και την τρυφερότητα (Bourne, 2002; Caine et al., 2003).
- Ηλεκτρονική Μύτη (e-nose), Ηλεκτρονική Γλώσσα (e-tongue): προσομοιώνει τις οσφρητικές και γευστικές αισθήσεις με βάση συστοιχίες αισθητήρων και αναγνώριση προτύπων (Deisingh et al., 2004; Cui et al., 2018).

Οι ενόργανες προσεγγίσεις εξαλείφουν την υποκειμενικότητα, προσφέρουν γρήγορη απόδοση και είναι σε θέση να ανιχνεύσουν μικρές χημικές αλλαγές που δεν μπορούν

να διακριθούν από τον άνθρωπο. Η κύρια αδυναμία τους είναι ότι η ανθρώπινη αντίληψη συνδυάζει πολυαισθητηριακές και συναισθηματικές αντιδράσεις, τις διαστάσεις που δεν μπορούν να μετρηθούν από τα όργανα. Επομένως, δεν μπορεί να υπάρξει καλύτερη κατανόησή της παρά μόνο όταν αυτές οι προσεγγίσεις συνδυάζονται και δεν εφαρμόζονται ξεχωριστά.

(3) Στατιστική Μοντελοποίηση: Σύνδεση Αντίληψης και Μέτρησης

Τα αισθητηριακά και τα οργανικά δεδομένα γεφυρώνονται χρησιμοποιώντας στατιστική και υπολογιστική μοντελοποίηση. Η συσχέτιση συνόλων δεδομένων μεγάλης κλίμακας μπορεί να γίνει με τη χρήση τεχνικών όπως η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) και η Μερική Παλινδρόμηση Ελάχιστων Τετραγώνων (PLSR), οι οποίες θα εντοπίσουν προηγουμένως κρυφές σχέσεις μεταξύ αισθητηριακών περιγραφών και παραμέτρων οργάνων (Romano et al., 2015; Oliveira et al., 2021).

Η PCA μπορεί να προσδιορίσει ότι το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης (α) στην αισθητηριακή αντίληψη χρώματος του βοείου κρέατος εξηγείται από την ερυθρότητα των οργάνων και τις τιμές χρωματισμού, ενώ η σκληρότητα TPA του τυριού σχετίζεται στενά με την αισθητηριακή σκληρότητα. Η PLSR βελτιστοποιεί επίσης αυτές τις σχέσεις και καθιστά δυνατή την πρόβλεψη των αισθητηριακών βαθμολογιών χρησιμοποιώντας δεδομένα οργάνων με αντικειμενική ακρίβεια.

Οι πρόσφατες ανακαλύψεις στη μηχανική μάθηση και την Τεχνητή Νοημοσύνη έχουν προχωρήσει ακόμη περισσότερο αυτήν την ενσωμάτωση. Τα νευρωνικά δίκτυα και οι μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων είναι ικανά για μη γραμμική μοντελοποίηση αισθητηριακών και οργανικών μεταβλητών, γεγονός που παρέχει προγνωστικές ευκαιρίες στην αξιολόγηση της αισθητηριακής ποιότητας (Cui et al., 2018). Τα παραδείγματα αυτών των μοντέλων που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη υποδηλώνουν τη νέα κατεύθυνση των έξυπνων αισθητηριακών συστημάτων στις βιομηχανίες τροφίμων, η οποία θα γίνει το χαρακτηριστικό γνώρισμα της Βιομηχανίας 4.0, όπου οι αισθητήρες και η επεξεργασία δεδομένων παρέχουν παρατήρηση και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Θεωρητικός Συνδυασμός και Συγχρονισμός Βιομηχανίας 4.0

Ο συνδυασμός αυτών των τριών διαστάσεων της ανάλυσης, της αισθητηριακής αντίληψης, της ενόργανης ποσοτικοποίησης και της στατιστικής μοντελοποίησης, φέρνει στο εννοιολογικό πλαίσιο την αντανάκλαση του σύγχρονου αισθητηριακού οικοσυστήματος. Μέσα σε αυτή τη δομή:

- Η ανθρώπινη αξιολόγηση θα έχει επίγνωση του πλαισίου και του συναισθήματος.
- Τα δεδομένα των οργάνων είναι ακριβή και αναπαραγώγιμα.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης και πρόβλεψης με τη βοήθεια στατιστικής και μοντελοποίησης Τεχνητής Νοημοσύνης.

Αυτός ο σχεδιασμός πολλαπλών επιπέδων όχι μόνο αυξάνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία, αλλά παρέχει επίσης επεκτασιμότητα και αυτοματοποίηση, κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό στη βιομηχανική παραγωγή τροφίμων. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών αισθητήρων που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη αλλάζει τη μορφή του ελέγχου ποιότητας τροφίμων σε μια συνεχή, προσανατολισμένη στα δεδομένα διαδικασία, χωρίς καθυστερήσεις μεταξύ παραγωγής και αξιολόγησης, όπως υποστηρίζουν οι Loutfi et al. (2015) και Cui et al. (2018).

Τέλος, αυτό το εννοιολογικό μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για την λειτουργικοποίηση της ποιοτικής προσέγγισης, την ποσοτικοποίηση της αισθητηριακής εμπειρίας επιστημονικά και την εφαρμογή αυτής της κατανόησης στην τυποποίηση της διαχείρισης της αισθητηριακής ποιότητας μεταξύ των διαφόρων τύπων τροφίμων.

2. Ερευνητικό Πρόβλημα

Στη βιομηχανία τροφίμων, ιδίως σε προϊόντα ζωικής προέλευσης όπως το κρέας, τα γαλακτοκομικά, τα ψάρια και τα αυγά, η οργανοληπτική αξιολόγηση παραμένει ο ακρογωνιαίος λίθος της αξιολόγησης της ποιότητας, της ανάλυσης των προτιμήσεων των καταναλωτών και της διαφοροποίησης της αγοράς. Ωστόσο, παρά τον κρίσιμο ρόλο της, δεν υπάρχει ενιαίο, τυποποιημένο πλαίσιο που να επιτρέπει τη συνεπή σύγκριση ή ενσωμάτωση των διαφόρων μεθόδων οργανοληπτικής αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις κατηγορίες τροφίμων (Lawless and Heymann, 2010; Stone et al., 2012).

Οι τρέχουσες πρακτικές παραμένουν κατακερματισμένες. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αισθητηριακών δοκιμών, όπως η περιγραφική ανάλυση, η ηδονική κλιμάκωση και η κατάταξη, εξακολουθούν να κυριαρχούν. Αυτές οι μέθοδοι καταγράφουν άμεσα την ανθρώπινη αντίληψη, αλλά υποφέρουν από υποκειμενικότητα, κόπωση και μεταβλητότητα μεταξύ και εντός των πάνελ (Meilgaard et al., 2016; Lim, 2011). Από την άλλη πλευρά, οι αισθητηριακές μέθοδοι όπως η χρωματομετρία, η Ανάλυση Προφίλ Υφής (TPA) και τα ηλεκτρονικά αισθητηριακά συστήματα (ηλεκτρονική μύτη και ηλεκτρονική γλώσσα) παρέχουν αντικειμενικές και αναπαραγώγιμες μετρήσεις, αλλά δεν μπορούν να αναπαράγουν την ολιστική ανθρώπινη εμπειρία της γεύσης, του αρώματος και της υφής (Loutfi et al., 2015; Cui et al., 2018).

Η απουσία ενός διακατηγοριακού συγκριτικού παραδείγματος περιορίζει τη συγκρισιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα στη βιβλιογραφία. Οι μελέτες συχνά χρησιμοποιούν ασυνεπείς περιγραφές, συνθήκες δοκιμής και κριτήρια αξιολόγησης, οδηγώντας σε μεθοδολογική διακύμανση και ερμηνευτική αβεβαιότητα. Επιπλέον, λίγα είναι γνωστά σχετικά με το πόσο καλά ευθυγραμμίζονται οι διαφορετικές μέθοδοι μεταξύ των πινάκων τροφίμων ή πώς συγκρίνονται στην πράξη η αναφερόμενη αξιοπιστία και η αναπαραγωγιμότητά τους.

Αυτή η έλλειψη τυποποίησης αποδυναμώνει τόσο την επιστημονική αυστηρότητα όσο και τον βιομηχανικό έλεγχο ποιότητας. Σε ένα παγκοσμιοποιημένο σύστημα τροφίμων, τα ασυνεπή πλαίσια οργανοληπτικής αξιολόγησης δημιουργούν εμπόδια στην πιστοποίηση προϊόντων, τη διαφάνεια του εμπορίου και την καινοτομία. Επομένως, είναι επείγοντως απαραίτητη μια συστηματική θεωρητική σύνθεση των υφιστάμενων

μεθοδολογιών που υποστηρίζουν τις οργανοληπτικές λειτουργίες και τις οργανοληπτικές λειτουργίες. Αυτή η μετα-ανάλυση στοχεύει στην αναθεώρηση, σύγκριση και αξιολόγηση αυτών των μεθόδων σε όλες τις κατηγορίες, εντοπίζοντας τις πιο αξιόπιστες και μεταβιβάσιμες πρακτικές, προτείνοντας παράλληλα ένα υβριδικό πλαίσιο που ενισχύει την αναπαραγωγικότητα, τη συγκρισιμότητα και την ερμηνευτική ακρίβεια στην οργανοληπτική αξιολόγηση τροφίμων ζωικής προέλευσης.

3. Ερευνητικά Ερωτήματα

Για την αντιμετώπιση του δηλωμένου ερευνητικού προβλήματος, η μελέτη καθοδηγείται από τα ακόλουθα θεωρητικά μετα-αναλυτικά ερωτήματα:

- Ποιες είναι οι πιο ευρέως εφαρμοζόμενες οργανοληπτικές μέθοδοι αξιολόγησης για τρόφιμα ζωικής προέλευσης, ιδίως στις κατηγορίες κρέατος, γαλακτοκομικών προϊόντων, ψαριών και αυγών;
- Πώς συγκρίνονται οι παραδοσιακές αισθητηριακές μέθοδοι (ηδονική, περιγραφική, διακριτική) ως προς την αξιοπιστία, την αναπαραγωγικότητα και την ευαισθησία σε τουλάχιστον δύο κατηγορίες, με έμφαση στο κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα;
- Πώς τα εργαλεία υποστήριξης των αισθήσεων που σχετίζονται άμεσα με την αντίληψη, όπως η χρωματομετρία, η Ανάλυση Προφίλ Υφής και τα ηλεκτρονικά αισθητήρια συστήματα, ευθυγραμμίζονται ή συμπληρώνουν τις ανθρώπινες αισθητηριακές αξιολογήσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία;
- Ποια είναι τα βασικά μεθοδολογικά κενά και οι ασυνέπειες στις υπάρχουσες μελέτες που περιορίζουν τη διασταυρούμενη συγκρισιμότητα και την τυποποίηση των πρακτικών οργανοληπτικής αξιολόγησης;
- Πώς μπορεί ένα υβριδικό μετα-αναλυτικό πλαίσιο που συνδυάζει ευρήματα από ανθρώπινες αισθητηριακές μελέτες και μελέτες που υποστηρίζουν τις αισθητηριακές λειτουργίες, να βελτιώσει την αναπαραγωγικότητα, τη συγκρισιμότητα και τη μεθοδολογική συνέπεια σε όλες τις κατηγορίες τροφίμων;

4. Γενικός Στόχος

Να διεξαχθεί μια μετα-αναλυτική και θεωρητική σύνθεση των οργανοληπτικών μεθόδων αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για τρόφιμα ζωικής προέλευσης, εστιάζοντας στην αξιοπιστία, την αναπαραγωγιμότητα και τη συγκρισιμότητά τους μεταξύ κατηγοριών, και να προταθεί ένα τυποποιημένο υβριδικό πλαίσιο που θα εφαρμόζεται σε όλες τις βιομηχανίες τροφίμων.

5. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Αυτό το κεφάλαιο συνθέτει δημοσιευμένες μελέτες σχετικά με την οργανοληπτική αξιολόγηση σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Συγκρίνει μεθόδους σε όλο το κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα, με επιλεκτικά στοιχεία από ψάρια και αυγά. Εστιάζει στην αντίληψη, την αξιοπιστία, την αναπαραγωγιμότητα και τη χρησιμότητα των αποφάσεων.

5.1 Οργανοληπτικές Ιδιότητες των Ζωοτροφών

Η αντίληψη της ποιότητας των τροφίμων βασίζεται στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, τα οποία περιλαμβάνουν την εμφάνιση, την οσμή, τη γεύση, την υφή και τη συνολική αποδοχή, και αποτελεί χαρακτηριστικό της λήψης αποφάσεων από τους καταναλωτές. Στην περίπτωση των τροφίμων ζωικής προέλευσης, αυτές οι αισθητηριακές ιδιότητες είναι δυναμικές και αλλάζουν με πολύπλευρους βιοχημικούς, μικροβιολογικούς και φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή, τον χειρισμό, την επεξεργασία και την αποθήκευση. Ο συνδυασμός των αισθητηριακών σημάτων επιτρέπει στον καταναλωτή να κρίνει τη φρεσκάδα, την ασφάλεια και την επιθυμητότητα, συνήθως πριν τα αναλυτικά ή χημικά σήματα υποδηλώσουν κάποια μείωση στην ποιότητα. Οι διαφορετικοί τύποι τροφίμων - κρέας, ψάρι, γαλακτοκομικά και αυγά - έχουν το δικό τους ξεχωριστό σύνολο αισθητηριακών καθοριστικών παραγόντων που επηρεάζονται από τη βιολογική σύνθεση, τη διαφορά των ειδών και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η γνώση αυτών των καθοριστικών παραγόντων είναι ζωτικής σημασίας για τη διαμόρφωση κατάλληλων συστημάτων αισθητηριακής και οργανικής αξιολόγησης που θα προβλέπουν την ποιότητα και την αποδοχή από τους καταναλωτές (Lawless and Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016).

5.1.1 Χαρακτηριστικά ποιότητας κρέατος

Η γεύση προκύπτει από αντιδράσεις κατά τη θέρμανση και την αποθήκευση, τις οποίες τα πάνελ περιγράφουν ως επιθυμητές ή ως δυσάρεστες γεύσεις, όπως ταγγό ή χαρτόνι. Μελέτες αναφέρουν ότι οι υψηλότεροι δείκτες οξείδωσης σχετίζονται με χαμηλότερη αποδοχή των πάνελ. Οι οργανοληπτικές αποφάσεις στη βιβλιογραφία βασίζονται σε κάθε πάνελ, με τα όργανα να χρησιμοποιούνται μόνο για την υποστήριξη ή την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων των πάνελ.

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του κρέατος είναι πολυπαραγοντικά και επηρεάζονται κυρίως από τη σταθερότητα του χρώματος, την τρυφερότητα, τη ζουμερότητα και τη γεύση. Όλα τα χαρακτηριστικά είναι αποτέλεσμα ορισμένων βιοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα μετά τον θάνατο, όταν ο μυϊκός ιστός αρχίζει να μετατρέπεται σε κρέας.

Το χρώμα είναι ο κύριος οπτικός παράγοντας που καθορίζει τη φρεσκάδα του κρέατος και την αποδοχή του από τους καταναλωτές. Εξαρτάται από την οξειδοαναγωγική κατάσταση της μυοσφαιρίνης, μιας χρωστικής των μυών, η οποία δίνει στο κρέας του νωπού κρέατος το κόκκινο χρώμα της. Καθώς το οξυγόνο προσκολλάται στη μυοσφαιρίνη, αυτή μετατρέπεται σε οξυμυοσφαιρίνη, η οποία κάνει το βοδινό κρέας να φαίνεται με έντονο κερασί χρώμα, κάτι που αρέσει στους καταναλωτές. Αλλά μια μεγαλύτερη χρονική περίοδος οξείδωσης θα αλλάξει τη μυοσφαιρίνη σε μεταμυοσφαιρίνη, κάνοντάς την καφέ, κάτι που υποδηλώνει ότι έχει μπαγιάτικο ή αλλοιωθεί (Bekhit and Faustman, 2005). Η οξειδωτική διαδικασία επηρεάζεται από παράγοντες όπως η μείωση του pH, η μερική πίεση του οξυγόνου και η θερμοκρασία αποθήκευσης, καθώς και η έκθεση στο φως. Η αύξηση των τιμών pH θα επιβράδυνε τον αποχρωματισμό, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας και του O₂ θα αύξανε την οξείδωση της χρωστικής, γεγονός που θα μείωνε τη διάρκεια ζωής και την αγοραία αξία.

Η τρυφερότητα είναι ευρέως γνωστό ότι συγκαταλέγεται στους πιο κρίσιμους αισθητηριακούς παράγοντες της γευστικότητας του κρέατος. Καθορίζεται από τη δομή των μυϊκών ινών, τη σύνθεση του συνδετικού ιστού και την πρωτεόλυση μετά θάνατον - την ενζυμική διάσπαση των μυοϊνιδιακών πρωτεϊνών και του κολλαγόνου. Καθώς το άτομο μεγαλώνει, η μήτρα των μυϊκών ινών εξασθενεί από ενδογενή ένζυμα όπως οι καθεψίνες και οι καλπαΐνες, με αποτέλεσμα το άτομο να γίνεται πιο τρυφερό (Claeys et al., 2004). Αυτή η τεχνική αξιολόγησης της μηχανικής αντίστασης κατά την κοπή, η

δοκιμή διατμητικής δύναμης WarnerBratzler, έχει βρεθεί ότι σχετίζεται έντονα με τις βαθμολογίες τρυφερότητας σε εκπαιδευμένο πάνελ, γεγονός που υποστηρίζει τη χρήση της ως αντικειμενικό μέτρο αισθητηριακής αξιολόγησης (Destefanis et al., 2008).

Η περιεκτικότητα σε υγρασία και λίπος που εκπέμπεται κατά τη διαδικασία της μάσησης είναι γνωστή ως χυμώδης υφή και εξαρτάται από το ενδομυϊκό λίπος (μαρμάρινο λίπος) και την ικανότητα συγκράτησης νερού. Το εξαιρετικά λιπαρό κρέας εκκρίνει περισσότερη γεύση κατά τη μάσηση, καθιστώντας το πιο ζουμερό και αυξάνοντας την τρυφερότητά του. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή συγκράτηση νερού έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο εύγευστα προϊόντα που είναι ξηρά. Το στρες πριν από τη σφαγή, ο ρυθμός ψύξης και η απώλεια pH είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν σοβαρά την ικανότητα του μύος να συγκρατεί νερό. Σύμφωνα με την Αμερικανική Ένωση Επιστήμης Κρέατος (AMSA, 2016), η χυμώδης υφή είναι μια από τις πιο σημαντικές πτυχές της ικανοποίησης των καταναλωτών και η σημασία της χρήσης τυποποιημένων διαδικασιών δοκιμών με βάση την ανάγκη διασφάλισης της ποιοτικής συνέπειας.

Το πιο περίπλοκο από τα αισθητηριακά χαρακτηριστικά του κρέατος είναι η γεύση, ο σχηματισμός της οποίας προκαλείται από πτητικές ενώσεις που σχηματίζονται κατά το μαγείρεμα ή την οξείδωση. Οι αλδεΐδες, οι κετόνες και οι αλκοόλες που παράγονται από τα λιπίδια δίνουν επίσης επιθυμητή τάγγιση και δυσάρεστες γεύσεις σε ένα βέλτιστο σημείο κατά την οξείδωση, αλλά σε προχωρημένο στάδιο η οξείδωση οδηγεί σε τάγγιση και δυσάρεστες γεύσεις (Pérez-Palacios et al., 2010).

Με λίγα λόγια, η οργανοληπτική αξιολόγηση της ποιότητας του κρέατος βασίζεται σε μια ευαίσθητη αλληλεπίδραση της βιοχημικής ακεραιότητας, της δομικής σύνθεσης και της θερμικής ή οξειδωτικής βλάβης και, ως εκ τούτου, η διαμόρφωση τυποποιημένων διαδικασιών αξιολόγησης είναι επιστημονικά και οικονομικά απαραίτητη.

5.1.2 Δείκτες φρεσκάδας ψαριών

Τα ψάρια και τα θαλασσινά είναι προϊόντα των οποίων η αίσθηση είναι προσωρινή. Σε αντίθεση με το κρέας, ο ιστός του ψαριού αποσυντίθεται γρήγορα μετά τη συγκομιδή, γεγονός που οφείλεται στην αυτολυτική ενζυμική δραστηριότητα, στην ανάπτυξη μικροοργανισμών και στην οξείδωση των λιπιδίων. Τα πιο συναφή αισθητηριακά χαρακτηριστικά είναι η οσμή, η υφή, η εμφάνιση και η γεύση, τα οποία καθορίζουν τη φρεσκάδα.

Ο δείκτης φρεσκάδας είναι η οσμή, η οποία είναι και η πιο ευαίσθητη. Τα φρέσκα ψάρια έχουν μια γλυκιά, ευχάριστη μυρωδιά που μοιάζει με θαλασσινό, η οποία προκαλείται από την ύπαρξη του τριμεθυλαμινοξειδίου (TMAO) και άλλων αδρανών πτητικών ουσιών. Λόγω της προόδου της διαδικασίας αλλοίωσης, το TMAO ανάγεται από βακτήρια και ένζυμα για να παράγει τριμεθυλαμίνη (TMA) και αμμωνία, τα οποία προκαλούν έντονα και δυσάρεστα αρώματα (Huss, 1995). Αυτές οι ενώσεις έχουν την ικανότητα να προσδιορίζονται με όργανα και συνδέονται άμεσα με τα όρια ανίχνευσης των αισθητηριακών πάνελ. Σύμφωνα με την έρευνα των Papadopoulos et al., τα συστήματα ηλεκτρονικής μύτης (e-nose) έχουν επιδείξει υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση αυτών των πτητικών ουσιών, παρέχοντας μη καταστροφικό και γρήγορο προσδιορισμό της φρεσκάδας (Papadopoulos et al., 2020).

Η ενζυμική αδυναμία του συνδετικού ιστού και η μετουσίωση των δομικών πρωτεϊνών οδηγούν σε υποβάθμιση της υφής. Τα φρέσκα ψάρια έχουν σφιχτή και ελαστική σάρκα, ενώ τα χαλασμένα ψάρια έχουν μαλακό και πολτώδες κρέας καθώς το κολλαγόνο και η ακτομυοσίνη αρχίζουν να διασπώνται. Οι οργανικές προσεγγίσεις για την αισθητηριακή αξιολόγηση της υφής χρησιμοποιούνται επίσης συχνά για την υποστήριξη των αισθητηριακών ευρημάτων της υφής με τη χρήση αισθητηριακών πάνελ (συμπεριλαμβανομένης της χρήσης της ανάλυσης προφίλ υφής ή TPA που μετρά τη σκληρότητα, τη συνεκτικότητα και την ελαστικότητα).

Η Μέθοδος Δείκτη Ποιότητας (QIM), η οποία δημιουργήθηκε για την ομαλοποίηση της αξιολόγησης της αισθητηριακής φρεσκάδας, επιβάλλει μειονεκτήματα σε αισθητηριακά χαρακτηριστικά, όπως η καθαρότητα των ματιών, το χρώμα των βραγχίων, η φωτεινότητα του δέρματος, η ένταση της οσμής και η υφή της σάρκας (Bonilla et al., 2007). Το συνολικό σύνολο αυτών των βαθμολογιών σχετίζεται με αντικειμενικά μέτρα

φρεσκάδας, όπως το συνολικό πτητικό βασικό άζωτο (TVB-N) και οι ουσίες που αντιδρούν με το θειοβαρβιτουρικό οξύ (TBARS), οι οποίες αποτελούν δείκτες υποβάθμισης πρωτεϊνών και λιπιδίων, αντίστοιχα (Mehdizadeh et al., 2015).

Η διαφάνεια των ματιών και η γυαλάδα του δέρματος είναι επίσης σημαντικά οπτικά στοιχεία για την αντίληψη του καταναλωτή. Τα μάτια του φρέσκου ψαριού είναι κυρτά, διαυγή και το δέρμα είναι λαμπερό, ενώ ο θαμπός χρωματισμός και τα βυθισμένα μάτια αποτελούν δείκτες απώλειας ποιότητας. Συνδυάζοντας αυτές τις οπτικές παραμέτρους με μετρήσεις οργάνων όπως η χρωματομετρία και οι μετρήσεις ηλεκτρονικής μύτης, καθίσταται δυνατή μια πιο ακριβής πρόβλεψη της φρεσκάδας και η εκτίμηση της διάρκειας ζωής.

5.1.3 Αισθητηριακά Χαρακτηριστικά Γαλακτοκομικών Προϊόντων

Η γεύση, το άρωμα και η αίσθηση στο στόμα είναι τα πρωταρχικά στοιχεία του οργανοληπτικού προφίλ των γαλακτοκομικών προϊόντων, όπως το γάλα, το τυρί και το γιαούρτι, και όλα είναι προϊόντα βιοχημικών αλληλεπιδράσεων λίπους, πρωτεϊνών και μικροβιακών μεταβολιτών.

Τα πάνελ αξιολογούν την κρεμώδη υφή, την ξινή γεύση, τις νότες μαγειρέματος και την τάγγιση χρησιμοποιώντας συμφωνημένα λεξικά. Η Ανάλυση Προφίλ Υφής παρέχει αντικειμενική σταθερότητα και ελαστικότητα που παρακολουθούν τις αξιολογήσεις των πάνελ για την αίσθηση στο στόμα. Η ηλεκτρονική γλώσσα και η ηλεκτρονική μύτη εμφανίζονται σε ορισμένες μελέτες ως γρήγορες οθόνες για μοτίβα γεύσης και οσμής, και στη συνέχεια τα πάνελ επαληθεύουν την αισθητηριακή επίδραση.

Το άρωμα συνδέεται άμεσα με το γευστικό προφίλ, αλλά συνεπάγεται την εκτίμηση των πτητικών ουσιών από το οσφρητικό σύστημα. Παραδείγματα αισθητηριακών λεξικών που εφαρμόζονται στην ανάλυση των γαλακτοκομικών προϊόντων είναι το γάλα, το όξινο, το ταγγό και το μαγειρεμένο. Τέτοιοι περιγραφείς επιτρέπουν σε εκπαιδευμένες ομάδες να ομαλοποιήσουν τις αξιολογήσεις και να βρουν συσχετίσεις με τα οργανικά αποτελέσματα των ηλεκτρονικών συστημάτων μύτης.

Η αίσθηση στο στόμα και η υφή είναι επίσης πολύ κρίσιμες για την αντίληψη της ποιότητας των γαλακτοκομικών προϊόντων. Η κρεμώδης υφή, η απαλότητα, το ιξώδες και η ελαστικότητα είναι χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τη μικροδομή του λιποπρωτεϊνικού πλέγματος και την κατανομή του νερού. Ενδεικτικά, μικρότερα σφαιρίδια λίπους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν μια πιο λεία αίσθηση στο στόμα, ενώ η υπερβολική διασύνδεση πρωτεϊνών παράγει σκληρότητα. Αυτές οι παράμετροι, όπως η σκληρότητα, η συνεκτικότητα και η ελαστικότητα, μετρώνται αντικειμενικά χρησιμοποιώντας την Ανάλυση Προφίλ Υφής (TPA), η οποία σχετίζεται με την αισθητηριακή αντίδραση στη σφριγηλότητα και την κρεμώδη υφή (Bourne, 2002).

Η αφομοίωση του αισθητηριακού πάνελ με την οργανική αξιολόγηση της γεύσης και της υφής θα εγγυηθεί την ομοιομορφία και την αναπαραγωγικότητα στην ποιότητα των γαλακτοκομικών προϊόντων, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για να διασφαλιστεί ότι οι καταναλωτές είναι ικανοποιημένοι και η μάρκα είναι άθικτη (Drake, 2007).

5.1.4 Παράμετροι ποιότητας αυγών

Τα αυγά έχουν ένα χαρακτηριστικό οργανοληπτικό προφίλ που περιορίζεται στο χρώμα του κρόκου, την υφή του λευκώματος, το άρωμα και την γευστική ακεραιότητα. Η σύνθεση της τροφής και η περίοδος αποθήκευσης, καθώς και οι συνθήκες θερμικής επεξεργασίας, έχουν ισχυρές επιπτώσεις σε αυτά τα χαρακτηριστικά.

Το χρώμα του κρόκου είναι ο πιο οπτικά προσδιορισμένος δείκτης ποιότητας. Ο βαθύς κίτρινος ή πορτοκαλί κρόκος συνήθως ταυτίζεται με υψηλή θρεπτική αξία και φρεσκάδα από τους καταναλωτές, παρά το γεγονός ότι η αξία επηρεάζεται κυρίως από τα διαιτητικά καροτενοειδή όπως η λουτεΐνη και η ζεαξανθίνη (Ahn et al., 2012). Η αντικειμενική ποσοτικοποίηση της χρώσης του κρόκου μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρωματομετρία με βάση την κλίμακα CIE Lab+ ή το Roche Yolk Color Fan, το οποίο είναι χρήσιμο στην τυποποίηση ενός προϊόντος.

Η οξείδωση των λιπιδίων και ο σχηματισμός ενώσεων θείου είναι ευαίσθητα στη γεύση και την οσμή. Τα πιο σημαντικά πτητικά που προκαλούν δυσάρεστες οσμές, ιδιαίτερα

μετά από μακροχρόνια αποθήκευση ή υπερβολικό μαγείρεμα, είναι το υδρόθειο (H_2S), η μεθανοθειόλη και το διμεθυλοσουλφίδιο. Η ενόργανη ανάλυση, όπως η ηλεκτρονική μύτη, έχει καταφέρει να εντοπίσει τέτοια πτητικά νωρίτερα από την ανθρώπινη ομάδα και ως εκ τούτου έχει μεγάλη αξία στον προσδιορισμό της φρεσκάδας (Loutfi et al., 2015).

Ένας άλλος σημαντικός δείκτης, η συνοχή του λευκώματος, επιδεινώνεται επίσης κατά την αποθήκευση καθώς το pH του ασπραδιού του αυγού αυξάνεται προκαλώντας υγροποίηση και μειωμένη ικανότητα αφρισμού. Τα παλαιωμένα αυγά συνήθως έχουν υδαρές ή λιγότερο ελαστικό λεύκωμα, κάτι που περιγράφεται από τα Sensory panels. Η ποσοτική αιτιολόγηση τέτοιων αισθητηριακών παρατηρήσεων γίνεται με όργανα μέσω μετρήσεων ιξώδους και ρεολογικών δοκιμών.

Η αισθητηριακή ανάλυση της αξιολόγησης με ενόργανα δεδομένα δίνει μια καλύτερη εικόνα της ποιότητας των αυγών με ποικίλες παραμέτρους αποθήκευσης και επεξεργασίας. Η συνδυασμένη στρατηγική βοηθά στον έλεγχο της ποιότητας, της ταξινόμησης και της διαφοροποίησης των προϊόντων στα επιτραπέζια αυγά, καθώς και στα επεξεργασμένα τρόφιμα που παρασκευάζονται από αυγά.

5.2 Παραδοσιακές Αισθητηριακές Μέθοδοι

Η συμβατική αισθητηριακή ανάλυση χρησιμοποιεί τις ανθρώπινες αισθήσεις ως εργαλείο ανάλυσης που μετρά και ερμηνεύει τα αισθητηριακά χαρακτηριστικά των τροφίμων. Αποτελεί την επιστημονική και ιστορική βάση της επιστήμης της αισθητηριακής αντίληψης, συμπεριλαμβανομένων συστηματικών μεθόδων ποσοτικοποίησης της αντίληψης μέσω ελεγχόμενων συνθηκών δοκιμών. Παρόλο που έχει σημειωθεί αύξηση στις πολύπλοκες ενόργανες μεθόδους, οι παραδοσιακές αισθητηριακές προσεγγίσεις δεν μπορούν να υποκατασταθούν, καθώς μπορούν να ανιχνεύσουν τις ψυχολογικές και συναισθηματικές πτυχές της αντίληψης των τροφίμων, οι οποίες δεν έχουν κανέναν τρόπο να αναπαραχθούν από μια μηχανή.

Οι μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν γενικά σε τρεις μεγάλες ομάδες, δηλαδή την ηδονική, τη διακριτική και την περιγραφική ανάλυση, καθεμία από τις οποίες μπορεί να εκπληρώσει διαφορετικούς σκοπούς της αισθητηριακής ανάλυσης και της

ανάπτυξης προϊόντων (Lawless and Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016). Με τον συνδυασμό τους, σχηματίζουν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που συνδέει τις προτιμήσεις των καταναλωτών, τη διαφοροποίηση των προϊόντων και την αναλυτική γνώση των αισθητηριακών χαρακτηριστικών.

5.2.1 Περιγραφική Ανάλυση

Ηδονική Ανάλυση: Μέτρηση Προτιμήσεων Καταναλωτή

Ένα από τα πιο συνηθισμένα αισθητηριακά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αποδοχής από τους καταναλωτές είναι το ηδονικό τεστ. Χρησιμοποιεί συναισθηματική κρίση ως προς το πόσο αρέσει ή δεν αρέσει σε κάποιον ένα προϊόν, σε αντίθεση με την αναλυτική περιγραφή. Διεξάγεται στην πιο διαδεδομένη μορφή της 9βάθμιας ηδονικής κλίμακας που βασίζεται στο πόσο αντιπαθώ (1) και πόσο μου αρέσει (9), αφήνοντας την επιλογή στους ερευνητές να μετρήσουν την υποκειμενική συμπάθεια σε αριθμητική μορφή (Lim, 2011).

Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής αφορά κυρίως την ανάπτυξη προϊόντων, την έρευνα μάρκετινγκ και τη δοκιμή ενός νέου προϊόντος, όπου η προτίμηση των καταναλωτών είναι κρίσιμη για την επιτυχία στην αγορά. Για παράδειγμα, στη σύνθεση γαλακτοκομικών προϊόντων, η ηδονική κλίμακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί εάν μια αλλαγή στην περιεκτικότητα σε λιπαρά ή στην ένταση της γεύσης επηρεάζει τη συνολική αποδοχή (Drake, 2007). Ομοίως, οι καταναλωτές προϊόντων κρέατος μπορούν να αξιολογήσουν την ζουμερότητα ή την τρυφερότητα, οι οποίες στη συνέχεια εξισώνονται με ενόργανες ή φυσικοχημικές μετρήσεις για επικύρωση (AMSA, 2016).

Το πλεονέκτημα των ηδονικών δοκιμών είναι ότι αντιπροσωπεύουν άμεσα τη γνώμη των καταναλωτών. Οι ηδονικές δοκιμές έχουν επίσης μη εκπαιδευμένους συμμετέχοντες που είναι οι εκπρόσωποι της συνολικής αγοράς σε σύγκριση με τις αναλυτικές δοκιμές, οι οποίες βασίζονται σε εκπαιδευμένους αξιολογητές. Αυτό τις καθιστά πολύ χρήσιμες στον προσδιορισμό προϊόντων που έχουν καλό επιχειρηματικό δυναμικό. Παρ' όλα αυτά, δημογραφικές μεταβλητές (ηλικία,

πολιτισμός, προηγούμενη έκθεση) και περιβαλλοντικοί παράγοντες (φωτισμός, θερμοκρασία, ακόμη και κοινωνική επιρροή) μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα.

Η περιγραφική αισθητηριακή ανάλυση ασχολείται με τον τύπο και τον βαθμό μιας συγκεκριμένης αισθητηριακής ιδιότητας, όπου χρησιμοποιείται ηδονική δοκιμή για τη μέτρηση της προτίμησης. Είναι μια ποσοτική και διαγνωστική μέθοδος που περιλαμβάνει τη χρήση εκπαιδευμένων αισθητηριακών πάνελ για την καταγραφή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών προϊόντων μετρώντας τη γλυκύτητα, την ξινή γεύση, την ένταση της οσμής ή τη σταθερότητα της υφής τους (Meilgaard et al., 2016).

Ένα άλλο τυπικό χαρακτηριστικό της περιγραφικής ανάλυσης είναι η δημιουργία ενός αισθητηριακού λεξικού - ενός τυποποιημένου λεξιλογίου που χαρακτηρίζει όλα τα αισθητηριακά χαρακτηριστικά που πρόκειται να ποσοτικοποιηθούν. Αυτό το λεξικό όχι μόνο εγγυάται μια παρόμοια ερμηνεία από τους αξιολογητές, αλλά δημιουργεί επίσης τη δυνατότητα σύγκρισης μελετών και προϊόντων. Ένα παράδειγμα αυτών είναι ένα λεξικό τυριού, δηλαδή βουτυρώδες, πικάντικο, θειούχο και κρεμώδες, και ένα λεξικό κρέατος, δηλαδή μεταλλικό, ζουμερό ή ινώδες (Drake, 2007).

Αυτά τα χαρακτηριστικά αναγνωρίζονται μέσω της εκπαίδευσης των μελών της ομάδας ώστε να τα αναγνωρίζουν, να τα ορίζουν και να τα αξιολογούν αξιόπιστα χρησιμοποιώντας κλίμακες έντασης οι οποίες συνήθως κυμαίνονται από 0 (καμία) έως 10 (πολύ ισχυρή). Η φάση εκπαίδευσης περιλαμβάνει δείγματα αναφοράς για την αγκύρωση αισθητηριακών όρων, ώστε η συνέπεια και η ευαισθησία να είναι καλύτερες.

Η περιγραφική ανάλυση είναι πολύ αναλυτική, καθώς είναι σε θέση να αναγνωρίζει μικρές αισθητηριακές διαφορές και να τις συσχετίζει με την αλλαγή στη σύνθεση ή τις συνθήκες επεξεργασίας. Είναι καλή στον ποιοτικό έλεγχο, τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης και τις μελέτες συσχέτισης αισθητηριακών οργάνων. Παρ' όλα αυτά, είναι χρονοβόρα, απαιτεί πολλούς πόρους και απαιτεί ικανό προσωπικό και ως εκ τούτου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τακτική βιομηχανική βάση. Επιπλέον, εξακολουθούν να υπάρχουν πιθανότητες κόπωσης των πάνελ, προσαρμογής και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων που μπορεί να προσθέσουν διακύμανση και ως εκ

τούτου υπάρχει ανάγκη για υψηλό επίπεδο πειραματικού ελέγχου (Lawless και Heymann, 2010).

Η ηδονική και η περιγραφική ανάλυση συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ένα πλαίσιο αξιολόγησης δύο επιπέδων: η ηδονική δοκιμή καθορίζει τι αρέσει στους καταναλωτές και η περιγραφική ανάλυση καθορίζει γιατί τους αρέσει. Η συνεργιστική σχέση μεταξύ των δύο προσεγγίσεων παρέχει μια ισχυρή διάκριση των παραγόντων αποδοχής των καταναλωτών μέσω των αισθήσεων.

5.2.2 Διακριτικές δοκιμές

Οι διακριτικές αισθητηριακές δοκιμές στοχεύουν στη διαπίστωση της ύπαρξης αντιληπτών διαφορών μεταξύ δύο ή περισσότερων δειγμάτων. Αυτές οι δοκιμές δεν βασίζονται στη μέτρηση του επιπέδου της αρεστότητας ή στην περιγραφή των αισθητηριακών ιδιοτήτων, αλλά έχουν σχεδιαστεί για να ανιχνεύουν διαφορές ή, με άλλα λόγια, για το εάν μια αλλαγή στη σύνθεση, την επεξεργασία ή τη συσκευασία έχει δημιουργήσει μια ανιχνεύσιμη αισθητηριακή αλλαγή που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τις ανθρώπινες αισθήσεις (Stone et al., 2012).

Δοκιμή τριγώνου

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διακριτική μέθοδος είναι η δοκιμή τριγώνου. Αρχικά, στους συμμετέχοντες δίνονται τρία κωδικοποιημένα δείγματα: δύο παρόμοια και ένα ανόμοιο, και τους ζητείται να επισημάνουν ποιο δείγμα είναι περιττό. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται μια στατιστική δοκιμή για να διαπιστωθεί εάν το ποσοστό των σωστών απαντήσεων είναι υψηλότερο από τα αναμενόμενα αποτελέσματα λόγω τύχης. Η τεχνική είναι πολύ ευαίσθητη και χρησιμοποιείται συνήθως στην έρευνα ανασύνθεσης προϊόντων, π.χ. πρόκειται για τυρί με μειωμένα λιπαρά ή για μια νέα τεχνολογία συντήρησης ψαριών που αλλάζει την αισθητηριακή αντίληψη. Λόγω της ταχείας φύσης της δοκιμής και της έλλειψης ανάγκης λεπτομερούς αξιολόγησης των χαρακτηριστικών, είναι η πλέον κατάλληλη για τη διασφάλιση ποιότητας και τον έλεγχο διάρκειας ζωής (Meilgaard et al., 2016).

Δοκιμές κατάταξης και σύγκρισης ζευγαριών

Η δοκιμή σύγκρισης ζευγαριών χρησιμοποιείται για τη σύγκριση δύο δειγμάτων και οι συμμετέχοντες καλούνται να επιλέξουν αυτό που έχει ανώτερο επίπεδο ενός δεδομένου χαρακτηριστικού (π.χ. Ποιο δείγμα είναι πιο τρυφερό;). Η προσέγγιση είναι απλή αλλά χρήσιμη στις συγκρίσεις συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η αισθητηριακή απόκλιση αναμένεται να είναι χαμηλή.

Το τεστ κατάταξης βασίζεται σε αυτήν την έννοια, ζητώντας από τους συμμετέχοντες να κατατάξουν πολλά δείγματα (συνήθως 3-5) με βάση ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή μια γενική ποιότητα. Χρησιμοποιείται συνήθως σε πιλοτικές μελέτες ή προκαταρκτικές έρευνες για να φιλτράρει τις παραλλαγές των προϊόντων πριν από την πιο εντατική περιγραφική έρευνα (Lawless και Heymann, 2010).

Εφαρμογές και Περιορισμοί

Οι διακριτικές δοκιμές είναι απαραίτητες για την ανίχνευση ορισμένων κρυφών αισθητηριακών διακυμάνσεων που μπορεί να μην είναι εμφανείς με την ενόργανη ανάλυση. Χρησιμοποιούνται συχνά στην επικύρωση διαδικασιών, στην αντικατάσταση συστατικών και στην αξιολόγηση συσκευασίας προϊόντων, για να διασφαλιστεί ότι οι αλλαγές στα προϊόντα δεν προκαλούν ανεπιθύμητη αλλαγή των αισθητηριακών χαρακτηριστικών.

Ωστόσο, υπάρχει ένας περιορισμός σε αυτές τις δοκιμές. Δεν γνωρίζουν ποιο χαρακτηριστικό ποικίλλει και γιατί ποικίλλει, αλλά ότι ποικίλλει. Επιπλέον, η εστίαση των συμμετεχόντων στην ομάδα και η αισθητηριακή τους αντίληψη είναι απαραίτητες, καθώς τυχόν διακυμάνσεις σε αυτήν μπορεί να προκαλέσουν ανομοιόμορφα αποτελέσματα. Επομένως, για να υπάρξει μια εκτενής ανάλυση, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται διακριτικές δοκιμές ταυτόχρονα με περιγραφικές και ενόργανες μεθόδους (Stone et al., 2012).

5.2.3 Αισθητηριακά Πάνελ και Λεξικά

Σχηματισμός και Ρόλος των Αισθητηριακών Πάνελ

Το αισθητηριακό πάνελ εξακολουθεί να αποτελεί τη βάση της συμβατικής αισθητηριακής ανάλυσης. Τα πάνελ συνήθως αποτελούνται από 8-15 εκπαιδευμένα άτομα που επιλέγονται λόγω του ότι οι αισθήσεις τους είναι αιχμηρές, συνεπείς και έχουν κίνητρο. Η εκπαίδευση γίνεται με δοκιμές κατωφλίου (για τον προσδιορισμό των ορίων ανίχνευσης) και κλιμάκωση της εκπαίδευσης (για τον προσδιορισμό ομοιόμορφων κρίσεων έντασης).

Οι εργασίες αξιολόγησης περιλαμβάνουν την αξιολόγηση διαφόρων αισθητηριακών διαστάσεων, όπως: εμφάνιση, οσμή, γεύση, υφή και επίγευση, σε ελεγχόμενο περιβάλλον με στόχο τη μείωση των παραγόντων που αποσπούν την προσοχή και την προκατάληψη. Οι συνθήκες ελέγχονται, όπως ο φωτισμός, η θερμότητα, η κυκλοφορία του αέρα, και οι συμμετέχοντες στην αξιολόγηση βρίσκονται απομονωμένοι σε περιβλήματα, ώστε να μην επηρεάζονται από άλλους (Meilgaard et al., 2016). Οι θερμοκρασίες σερβιρίσματος, οι μερίδες και η τυχαία ακολουθία δειγμάτων σερβιρίσματος είναι οι κύριοι παράγοντες που εγγυώνται την αναπαραγωγικότητα.

Περιοδικά, πραγματοποιούνται συνεδρίες βαθμονόμησης πάνελ με πρότυπα αναφοράς (π.χ. διαλύματα σακχαρόζης, οξύτητας-γαλακτικού οξέος) για να διασφαλιστεί η συνέπεια των αξιολογήσεων με την πάροδο του χρόνου. Ένα τέτοιο συστηματικό πρόγραμμα εκπαίδευσης και βαθμονόμησης χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ποιοτικής ανθρώπινης κρίσης σε ένα ημι-ποσοτικό αναλυτικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να παράγει στατιστικά αξιόπιστα δεδομένα (Lawless & Heymann, 2010).

Πινακίδα και Σημασία των Αισθητηριακών Λεξικών

Τα αισθητηριακά λεξικά προσφέρουν μια κανονικοποιημένη γλώσσα για την έκφραση των αισθήσεων και σχηματίζουν μια σύνδεση μεταξύ αντίληψης και επικοινωνίας. Τα λεξικά είναι οι καθοριστικές συμμαχίες κάθε χαρακτηριστικού που έχουν δημιουργηθεί με την ομόφωνη συμφωνία των μελών της επιτροπής, το οποίο χαρακτηριστικό έχει μια αισθητηριακή αναφορά· έχει επίσης σημεία αναφοράς έντασης (Drake, 2007).

Για παράδειγμα, τα λεξικά για το κρέας και τα τρόφιμα μπορούν να περιέχουν λέξεις όπως αιματηρό, μεταλλικό ή ζουμερό, ενώ τα λεξικά για το τυρί θα μπορούσαν να

περιέχουν λέξεις όπως βουτυράτο, ξηρό, θειώδες ή οξύ. Στα ψάρια, τα λεξικά χρησιμοποιούνται συχνά για να περιγράψουν επιδράσεις όπως η φρεσκάδα και η αποθήκευση, δηλαδή να αναφέρονται σε θαλάσσιο, οξειδωμένο και λασπωμένο.

Δυσκολίες και Σύγχρονες Τροποποιήσεις

Παρόλο που αυτά είναι ακριβή, τα παραδοσιακά αισθητηριακά πάνελ έχουν μειονεκτήματα όπως η κόπωση, η προσαρμογή και η υποκειμενικότητα. Οι μεγαλύτερες σε διάρκεια συνεδρίες ή οι έντονες γεύσεις μπορούν να θολώσουν την αντίληψη, ενώ οι ψυχολογικές επιπτώσεις μπορούν να επηρεάσουν τα ευρήματα, όπως η μεροληψία των προσδοκιών, η διάθεση ή η εμπειρία. Επιπλέον, η συναρμολόγηση και η συντήρηση των πάνελ των εκπαιδευόμενων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Αυτά τα ζητήματα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη οργανικών και αισθητηριακών συστημάτων που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη, τα οποία θα συμπληρώνουν την ανθρώπινη κρίση με συνεχή αντικειμενικά δεδομένα (Loutfi et al., 2015; Cui et al., 2018).

Ωστόσο, ο ανθρώπινος κριτής είναι αναντικατάστατος όταν πρόκειται για την αξιολόγηση της ηδονικής απόκρισης και των αντιληπτικών λιχουδιών - θέσεων όπου το συναίσθημα, ο πολιτισμός και οι συμφραζόμενες συνθήκες παίζουν ρόλο στην αισθησιακή κρίση.

Οι παραδοσιακές αισθητηριακές δοκιμασίες χρησιμοποιούνται για να δείξουν την ολιστική εμπειρία της ποιότητας των τροφίμων, όπως οι συναισθηματικές και οι συμφραζόμενες επαγωγές, ενώ οι ενόργανες μέθοδοι μπορούν να παρέχουν μετρήσιμα δεδομένα σε θέματα χρώματος, υφής, αρώματος και γεύσης. Η σύγκλιση αυτών των δύο διαστάσεων, με τη βοήθεια πολυμεταβλητών στατιστικών και μοντέλων μηχανικής μάθησης, φέρνει την αισθητηριακή επιστήμη στη νέα εποχή της προγνωστικής και αυτοματοποιημένης αισθητηριακής αξιολόγησης.

5.2.4 Στατιστική Συσχέτιση και Μοντελοποίηση Δεδομένων

Στα ψάρια, η PCA δείχνει συνήθως ότι η υψηλότερη αντιληπτή φρεσκάδα από το πάνελ ευθυγραμμίζεται με υψηλότερη φωτεινότητα L^* και πιο σφιχτή υφή, ενώ η απώλεια φρεσκάδας ευθυγραμμίζεται με χαμηλότερη σφριγηλότητα και ισχυρότερες βαθμολογίες δυσάρεστης οσμής.

Αντίθετα, η PLSR (Μερική Παλινδρόμηση Ελάχιστων Τετραγώνων) επεκτείνει την έννοια της οπτικοποίησης και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη αισθητηριακών βαθμολογιών χρησιμοποιώντας δεδομένα από όργανα. Είναι μια διαδικασία που σχηματίζει ένα μοντέλο παλινδρόμησης που συσχετίζει διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές (εντοργανικές μετρήσεις) με τις εξαρτημένες μεταβλητές (αισθητηριακές βαθμολογίες). Η PLSR είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός των προγνωστικών είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των παρατηρήσεων, κάτι που είναι τυπικό για σύνθετα αισθητικοκινητικά δεδομένα (Oliveira et al., 2021). Τα μοντέλα PLSR έχουν επίσης εφαρμοστεί στην έρευνα για τα γαλακτοκομικά, π.χ. για την πρόβλεψη της έντασης της κρεμώδους ή ξινής γεύσης με βάση έναν συνδυασμό ρεολογικών και χημικών μετρήσεων με συσχετίσεις άνω του 0,9 σε δοκιμές επικύρωσης (Romano et al., 2015).

Τα μοντέλα καλύπτουν το κενό μεταξύ του ανθρώπινου και του οργανικού πεδίου, και οι αντικειμενικές συσκευές είναι σε θέση να αναπαράγουν την ανθρώπινη αντίληψη με στατιστικά αποδεκτή αξιοπιστία.

5.2.5 Μηχανική Μάθηση και Τεχνητή Νοημοσύνη στην Αισθητηριακή Πρόβλεψη

Αν και τα παραδοσιακά χημειομετρικά μοντέλα είναι χρήσιμα για την παροχή συσχετίσεων, η αισθητηριακή αντίληψη είναι πολύπλοκη και μη γραμμική και ως εκ τούτου χρειάζεται πιο ισχυρά εργαλεία. Τα τελευταία χρόνια, έχει υπάρξει μια αυξανόμενη ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) στον τομέα της αισθητηριακής επιστήμης, η οποία επιτρέπει στα μοντέλα να μαθαίνουν, να προσαρμόζονται και να προβλέπουν τις ανθρώπινες αισθητηριακές κρίσεις με βάση πολύ μεγάλα και ποικίλα σύνολα δεδομένων (Cui et al., 2018).

Τα αισθητηριακά δεδομένα που αποκτώνται από φασματικούς, οσφρητικούς και κειμενικούς αισθητήρες εφαρμόζονται πλέον σε αρχιτεκτονικές βαθιάς μάθησης, δηλαδή σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN) και επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα (RNN). Τα CNN που έχουν εκπαιδευτεί σε χρωματομετρικές ή υπερφασματικές εικόνες μπορούν, για παράδειγμα, να προβλέψουν αισθητηριακές αξιολογήσεις χρώματος και εντύπωση φρεσκάδας σε κρέας και ψάρι με πολύ υψηλή ακρίβεια (πάνω από 95% σε ορισμένες περιπτώσεις). Ομοίως, τα RNN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση δεδομένων χρονοσειρών που λαμβάνονται από ηλεκτρονικές μύτες ή γλώσσες και να τα χρησιμοποιήσουν για την πρόβλεψη αλλαγών στο άρωμα και τη γεύση κατά την αποθήκευση ή τη ζύμωση (Loutfi et al., 2015).

Η πολυαισθητηριακή αντίληψη έχει επίσης προσομοιωθεί με την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων αισθητήρων τεχνητής νοημοσύνης. Για παράδειγμα, ένα εργαλείο φασματικής απεικόνισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πτητική δημιουργία προφίλ, όπου μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδυάσουν οπτικά δεδομένα με οσφρητικά δεδομένα για να μιμηθούν την πολυαισθητηριακή ανάλυση που γίνεται από τους ανθρώπους. Μια τέτοια τεχνική είναι ικανή να προβλέψει τη φρεσκάδα ή την αλλοίωση των αισθητηριακών αγαθών σε πραγματικό χρόνο, κάτι που δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί με τα συμβατικά αισθητηριακά πάνελ.

Επιπλέον, οι μηχανισμοί σύντηξης αισθητηριακών δεδομένων που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων τροφίμων, δηλαδή εικονικών μοντέλων που παρέχουν προσομοίωση αισθητηριακών αλλαγών σε ποικίλους περιβαλλοντικούς ή μεταποιητικούς παράγοντες. Ένα παράδειγμα ψηφιακού διδύμου κρέατος είναι σε θέση να προβλέψει μεταβολές στην τρυφερότητα, το χρώμα και το άρωμα κατά την αποθήκευση, έτσι ώστε ο παραγωγός να είναι σε θέση να προβλέψει είτε τη διάρκεια ζωής είτε να τροποποιήσει εκ των προτέρων τις παραμέτρους επεξεργασίας. Τέτοια συστήματα ενισχύουν τον αυτοματισμό, την ιχνηλασιμότητα και την εξατομίκευση, οι οποίες είναι απαραίτητες στην τρέχουσα, βασισμένη σε δεδομένα, παραγωγή τροφίμων (Cui et al., 2018).

5.2.6 Οφέλη της Ενσωμάτωσης

Ο συνδυασμός των οργανικών και αισθητηριακών δεδομένων έχει μια σειρά από στρατηγικά οφέλη:

1. Μεγαλύτερη Αντικειμενικότητα: Η ακρίβεια των οργάνων σε συνδυασμό με την ανθρώπινη αντίληψη μειώνει την προκατάληψη και την υποκειμενικότητα, με αποτέλεσμα πιο σταθερά και αναπαραγώγιμα αποτελέσματα.
2. Ύπαρξη αποδοτικότητας και μείωσης κόστους: Τα συστήματα οργάνων είναι σε θέση να παρέχουν πρόβλεψη αισθητηριακών αποτελεσμάτων μόλις δημιουργηθούν αποδεδειγμένα μοντέλα και έτσι τα μεγάλα αισθητηριακά πάνελ καθίστανται περιττά και το κόστος δοκιμών ελαχιστοποιείται επίσης.
3. Ολοκληρωμένη Κατανόηση: Η ολοκλήρωση παρέχει μια πολυδιάστατη προοπτική της ποιότητας των τροφίμων, η οποία συνδέει την αισθητηριακή εμπειρία με ποσοτικοποιήσιμους καθοριστικούς παράγοντες όπως το pH, το χρώμα, τα πτητικά προφίλ και ούτω καθεξής.
4. Αυτοματοποίηση: Αυτό επιτυγχάνεται μέσω δικτύων αισθητήρων που διαθέτουν προγνωστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας στη διαδικασία παραγωγής.
5. Καινοτομία με επίκεντρο τον καταναλωτή: Η κατανόηση των ολοκληρωμένων μοντέλων βοηθά τους κατασκευαστές να σχεδιάζουν προϊόντα σύμφωνα με τις αισθητηριακές προτιμήσεις ορισμένων τμημάτων καταναλωτών ή αγορών.

Συνολικά, αυτά τα πλεονεκτήματα υποδεικνύουν μια μετατόπιση παραδείγματος στην περιγραφική αξιολόγηση προς την προγνωστική αισθητηριακή ανάλυση, η οποία θα θέσει την αισθητηριακή επιστήμη σε ισορροπία με τους συνολικούς στόχους της Βιομηχανίας 4.0 και των ευφυών συστημάτων τροφίμων.

5.3 Τρέχουσες προκλήσεις στην οργανοληπτική αξιολόγηση

Παρόλο που έχουν σημειωθεί αυτές οι εξελίξεις, τεχνικά και μεθοδολογικά ζητήματα εξακολουθούν να εμποδίζουν την τυποποίηση και την ενσωμάτωση των οργανοληπτικών διεργασιών στις διάφορες βιομηχανίες τροφίμων. Η ακρίβεια της οργανοληπτικής αξιολόγησης έγκειται αποκλειστικά στη βαθμονόμηση των οργάνων

και στις δεξιότητες της ομάδας, καθώς και στην εργασία με δείγματα, την ερμηνεία των δεδομένων και την τυποποίηση των διατομεακών κλάδων. Αυτά τα ζητήματα θα πρέπει να ξεπεραστούν για να επιτευχθεί η πλήρης υλοποίηση υβριδικών αισθητηριακών-οργανικών δομών.

5.3.1 Κόπωση και Μεταβλητότητα Πάνελ

Τα ανθρώπινα αισθητηριακά πάνελ είναι πολύ σημαντικά, αλλά παρουσιάζουν και αρκετές διακυμάνσεις. Η ασυνέπεια μεταξύ των αξιολογητών ή των συνεδριών μπορεί να προκύψει λόγω διαφορών στην αισθητηριακή οξύτητα, το πολιτισμικό υπόβαθρο και την ψυχολογική κατάσταση (Meilgaard et al., 2016). Η ακρίβεια της αντίληψης μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από την κόπωση, την προσαρμογή και την αισθητηριακή υπερφόρτωση - ειδικά στην περίπτωση πολλαπλών δειγμάτων υψηλής έντασης.

Επιπλέον, άλλες περιβαλλοντικές επιρροές, όπως ο φωτισμός, η θερμοκρασία και η μυρωδιά του υποβάθρου, προσθέτουν επιπλέον θόρυβο στη συλλογή δεδομένων. Για να ξεπεραστεί αυτό, είναι απαραίτητες αυστηρές διαδικασίες εκπαίδευσης, βαθμονόμησης και επικύρωσης του πάνελ. Οι επιπτώσεις της κόπωσης μπορούν να μετρηστούν μέσω της χρήσης ελεγχόμενων περιβαλλόντων, σύντομων περιόδων συνεδρίας και περιόδων ανάπαυσης. Ωστόσο, η ανθρώπινη μεταβλητότητα είναι ο κύριος περιορισμός της ανθρώπινης αξιολόγησης, γεγονός που υποστηρίζει τη λογική της ανθρώπινης συμπλήρωσης οργάνων και των μοντέλων διόρθωσης ενισχυμένων με μηχανική μάθηση.

5.3.2 Βαθμονόμηση οργάνων και ερμηνεία δεδομένων

Η εις βάθος ανάλυση εκτεταμένων και περίπλοκων αισθητηριακών-οργανικών πληροφοριών απαιτεί επίσης εξαιρετικά εξελιγμένες χημειομετρικές και στατιστικές δεξιότητες. Όταν η πολυμεταβλητή ανάλυση εφαρμόζεται εσφαλμένα, θα δώσει ψευδείς συσχετίσεις μέσω υπερπροσαρμογής ή λανθασμένης ταξινόμησης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το γεγονός, οι επιστήμονες θα πρέπει να υιοθετήσουν

τυποποιημένες μεθόδους βαθμονόμησης και διασταυρούμενης επικύρωσης, με αντίγραφα ασφαλείας των διεργαστηριακών συγκρίσεων και της επαναβαθμονόμησης των αισθητήρων.

5.3.3 Επιπτώσεις της προετοιμασίας και αποθήκευσης του δείγματος

Η δειγματοληψία και η αποθήκευση θεωρούνται οι λόγοι μεταβλητότητας στην αισθητηριακή ανάλυση. Η κατάψυξη, η απόψυξη και η θερμική επεξεργασία μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στην υφή, τη γεύση και το χρώμα αλλάζοντας τις πρωτεϊνικές δομές και τα προφίλ των πτητικών ενώσεων (Pérez-Palacios et al., 2010). Για παράδειγμα, τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα ψάρια ή κρέας μπορεί να εμφανίσουν μεγαλύτερη οξείδωση λιπιδίων και μαλάκυνση της υφής, και ως εκ τούτου μειωμένη αισθητηριακή αποδοχή.

Ένα άλλο πρόβλημα με τη σύγκριση μεταξύ μελετών είναι η ασυνεπής προετοιμασία των δειγμάτων, συμπεριλαμβανομένων των διαφορών στον χρόνο μαγειρέματος ή ομογενοποίησης. Συνεπώς, είναι απαραίτητα ομοιόμορφα πρότυπα προετοιμασίας, διατήρησης της θερμοκρασίας και παρουσίασης, ώστε να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα και η εγκυρότητα των δεδομένων τόσο σε αισθητηριακές όσο και σε οργανικές πλατφόρμες.

5.3.4 Έλλειψη Καθολικών Προτύπων

Η οργανοληπτική αξιολόγηση δεν έχει καθολικά αποδεκτά πρότυπα σε όλες τις κατηγορίες τροφίμων, σε αντίθεση με τις χημικές ή μικροβιολογικές δοκιμές. Παρόλο που οι ολοκληρωμένες οδηγίες για την οργανοληπτική αξιολόγηση του χρώματος και της τρυφερότητας του κρέατος είναι εύκολο να βρεθούν σε οργανισμούς όπως η Αμερικανική Ένωση Επιστήμης Κρέατος (AMSA, 2016), παρόμοιες ολοκληρωμένες οδηγίες για τα προϊόντα ψαριών, γαλακτοκομικών προϊόντων ή αυγών δεν είναι τόσο ολοκληρωμένες. Δεν διαθέτει ενιαία μεθοδολογία, γεγονός που δυσχεραίνει τη συγκρισιμότητα μεταξύ των τομέων και περιορίζει την επεκτασιμότητα των βιομηχανικών τομέων.

Απαιτείται διεθνής συνεργασία για την ανάπτυξη διαεμπορευματικών προτύπων αναφοράς που συνδυάζουν αισθητηριακές καθώς και ενόργανες μετρήσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη του τομέα. Αυτά τα πλαίσια απαιτούνται για τον καθορισμό λεξικών κοινής λογικής, υλικών βαθμονόμησης και τεκμηρίωσης δεδομένων που μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Η παγκόσμια συνέπεια στην αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων θα μπορούσε να διασφαλιστεί με τη δημιουργία κατευθυντήριων γραμμών τύπου ISO για τα αισθητηριακά ενόργανα.

6. Υλικά και Μέθοδοι

Το μεθοδολογικό πλαίσιο της μελέτης, το οποίο αναπτύχθηκε με τη μορφή συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης και μετα-ανάλυσης, παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο. Η μέθοδος διεξάγεται σύμφωνα με τα πρότυπα διαφάνειας, αναπαραγωγιμότητας και επιστημονικής αυστηρότητας PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Η μελέτη είναι θεωρητική και δεν περιλαμβάνει νέα πειραματική ή εργαστηριακή εργασία. Σκοπός της είναι να συγκρίνει τις οργανοληπτικές μεθόδους αξιολόγησης μεταξύ τουλάχιστον δύο τύπων τροφίμων ζωικής προέλευσης: κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων, και τροφίμων ζωικής προέλευσης που περιλαμβάνουν ψάρια και αυγά, όπως ενδέχεται να απαιτείται για διασταυρούμενη επικύρωση.

Ο μετα-αναλυτικός σχεδιασμός επιτρέπει τη συγκέντρωση και τη σύνθεση αποτελεσμάτων από διάφορες δημοσιευμένες μελέτες, από τις οποίες μπορεί να γίνει η ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των αισθητηριακών και αισθητηριακά υποστηρικτικών μεθόδων με βάση την αναφερόμενη αξιοπιστία, την αναπαραγωγιμότητα και τη συσχέτιση με την ανθρώπινη αντίληψη.

6.1 Σχεδιασμός Μελέτης και Μετα-Αναλυτική Μέθοδος

Αυτή η μελέτη έχει έναν συστηματικό μετα-αναλυτικό σχεδιασμό, ο κύριος στόχος του οποίου είναι η ενσωμάτωση δεδομένων και αποτελεσμάτων από προηγούμενες δημοσιεύσεις από ομοτίμους που έχουν αξιολογηθεί για μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με την οργανοληπτική αξιολόγηση τροφίμων ζωικής προέλευσης. Αξιολογεί την αξιοπιστία, την αναπαραγωγιμότητα και τη συγκρισιμότητα των αισθητηριακών και αισθητηριακών υποστηρικτικών ενόργανων τεχνικών σε όλα τα προϊόντα κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων, δύο σημαντικούς τομείς της βιομηχανίας τροφίμων.

Η μελέτη έχει τέσσερα κύρια στάδια:

1. Εντοπισμός σχετικών μελετών μέσω συστηματικής αναζήτησης σε βάσεις δεδομένων.

2. Έλεγχος βάσει κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, καθώς και επαλήθευση επιλεξιμότητας.
3. Εξόρυξη και κωδικοποίηση μεθοδολογικών και μεταβλητών αποτελεσμάτων.
4. Ποσοτική και ποιοτική σύνθεση χρησιμοποιώντας στατιστικές και συγκριτικές μετα-αναλυτικές μεθόδους.

Συζητείται επίσης η αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων αισθητηριακών και οργανικών τεχνικών μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών προϊόντων με ιδιαίτερη έμφαση στο χρώμα, την υφή, την οσμή, τη γεύση και τη συνολική αποδοχή. Αντί να εκτελούνται πειράματα στην πράξη, το μοντέλο προβλέπεται θεωρητικά με βάση άμεσα συλλεγμένα σύνολα δεδομένων και επικυρωμένα πρωτόκολλα.

6.2 Κριτήρια Συμπερίληψης και Αποκλεισμού

Κριτήρια ένταξης:

Μελέτες στα αγγλικά που δημοσιεύθηκαν μεταξύ των ετών 2010 και 2024.

- Μελέτη των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (εμφάνιση, οσμή, γεύση, υφή, γενική αποδοχή) κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων δεδομένων, όπου είναι διαθέσιμα, από ψάρια και αυγά.
- Μελέτες που περιγράφουν αποτελέσματα ποσοτικών αισθητηριακών (ηδονικών, περιγραφικών, διακριτικών) ή των αντίστοιχων οργανικών προφίλ (χρωματομετρία L, a, b, ανάλυση προφίλ υφής, ηλεκτρονική μύτη ή γλώσσα).
- Αξιόπιστα στατιστικά στοιχεία: σε ορισμένες μελέτες παρουσιάστηκαν συσχέτιση, τιμές Cronbach α , ICC, R² ή μετα-αναλύσιμα αποτελέσματα.

Κριτήρια αποκλεισμού:

Πειραματικές ή εργαστηριακές μελέτες από τον παρόντα συγγραφέα

- Αναλύσεις που δεν σχετίζονται άμεσα με την αισθητηριακή αντίληψη (π.χ. GC-MS, GC-O)

- Μελέτες που δεν διεξάγονται με βάση μια αισθητηριακή μετρική που είναι μετρήσιμη ή συγκρίσιμη.
- Μη αξιολογημένες από ομοτίμους ή ανεπίσημες αναφορές, οι οποίες δεν βασίζονται σε τυποποιημένη μεθοδολογία
- Μελέτες που συσχετίζουν τα αποτελέσματα των οργάνων μόνο με την ανθρώπινη αισθητηριακή αντίληψη θεωρήθηκαν σχετικές.

6.3 Στρατηγική αναζήτησης και πηγές πληροφοριών

Πραγματοποιήθηκε αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων Scopus, Web of Science, Science Direct, PubMed και Google Scholar. Οι συμβολοσειρές αναζήτησης εφάρμοσαν έναν συνδυασμό τελεστών Boolean και βασικών όρων που σχετίζονται με την οργανοληπτική αξιολόγηση και τα τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Παραδείγματα ερωτημάτων περιελάμβαναν:

- (("αισθητηριακή αξιολόγηση" Ή "οργανοληπτική ανάλυση") ΚΑΙ ("κρέας" Ή "βοδινό κρέας") ΚΑΙ ("χρωματομετρία" Ή "τιμές Lab")).
- ανάλυση προφίλ υφής Ή TPA ΚΑΙ τυρί Ή γάλα ΚΑΙ αισθητηριακή συσχέτιση.
- (ηλεκτρονική μύτη Ή ηλεκτρονική μύτη) ΚΑΙ (φρεσκάδα ΚΑΙ ψάρι Ή θαλασσινά)
- (ένα από τα "ηλεκτρονική γλώσσα" Ή "ηλεκτρονική γλώσσα") ΚΑΙ (ένα από "γαλακτοκομικά" Ή "γιαούρτι") ΚΑΙ (ένα από "γεύση")
- («ηδονική» Ή «περιγραφική ανάλυση») ΚΑΙ («αυγά» Ή «χρώμα κρόκου»)

Οι αναζητήσεις περιορίστηκαν σε άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά με αξιολόγηση από ομοτίμους, διατριβές και επίσημες εκθέσεις αισθητηριακής τυποποίησης. Εξετάστηκαν επίσης οι αναφορές σε βασικές μελέτες για τον εντοπισμό περαιτέρω σχετικών άρθρων (δειγματοληψία χιονοστιβάδας).

6.4 Επιλογή και Έλεγχος Μελετών

Οι προσδιορισμένες μελέτες αποδιπλασιάστηκαν και εξετάστηκαν σε δύο στάδια:

1. Έλεγχος τίτλου και περίληψης για να διασφαλιστεί ότι η εργασία είναι σχετική με την οργανοληπτική αξιολόγηση τροφίμων ζωικής προέλευσης.
2. Ανασκόπηση πλήρους κειμένου για τον προσδιορισμό της παρουσίας ποσοτικών αισθητηριακών δεδομένων και ευρημάτων που σχετίζονται με την αντίληψη.

Κάθε μία από τις επιλεγμένες μελέτες κωδικοποιήθηκε ανά κατηγορία (κρέας, γαλακτοκομικά ψάρια, αυγά) και ανά αισθητηριακή μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Το διάγραμμα ροής PRISMA (που θα συμπεριληφθεί στα αποτελέσματα) παρέχει μια επισκόπηση του αριθμού των αρχείων που εντοπίστηκαν, ελέγχθηκαν και συμπεριλήφθηκαν.

6.5 Εξαγωγή Δεδομένων

Το φύλλο εξαγωγής δεδομένων δομής χρησιμοποιήθηκε για την τεκμηρίωση:

- Συγγραφέας/ες, έτος και χώρα σπουδών
- Βυσσινί που είναι πλούσια σε πρωτεΐνες: 1. Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «αυτά τα τρόφιμα περιέχουν περίπου τη μισή πρωτεΐνη από τα προμαγειρεμένα γεύματα και είναι πλούσια σε βιταμίνες, μέταλλα και πολλά άλλα θρεπτικά συστατικά».
- Υιοθετήθηκε αισθητηριακή προσέγγιση (ηδονική, περιγραφική, διακριτική)
- Μέγεθος πάνελ, τρόπος εκπαίδευσης και αριθμός επαναλήψεων.
- Αναλύθηκαν οι αισθητηριακές παράμετροι (χρώμα, οσμή, γεύση, υφή, αποδεκτότητα)
- Εφαρμοζόμενη ενόργανη τεχνική (χρωματομετρία, TPA, ηλεκτρονική μύτη, ηλεκτρονική γλώσσα)
- Μέτρα αξιοπιστίας και αναπαραγωγιμότητας (Cronbach και Συντελεστής Συσχέτισης Ενδοκλάσης):
- Χρησιμοποιούμενες στατιστικές τεχνικές (PLSR, παλινδρόμηση, PCA)
- Αντιστοιχία ή ασυμφωνία μεταξύ των αισθητηριακών και των οργανικών ευρημάτων

6.6 Σύνθεση Δεδομένων και Μετα-Αναλυτικό Πλαίσιο

Η μετα-ανάλυση συνδυάζει τα ποσοτικά αποτελέσματα των μελετών για να καταδείξει τις συνολικές τάσεις. Χρησιμοποιούνται και οι δύο προσεγγίσεις (αφηγηματική και στατιστική σύνθεση).

Ποσοτική σύνθεση:

Η συγκέντρωση γύρω από έναν συγκρίσιμο συντελεστή συσχέτισης πραγματοποιήθηκε με τον μετασχηματισμό z του Fisher, όταν μελέτες ανέφεραν παρόμοιους συντελεστές συσχέτισης (π.χ. αισθητηριακές βαθμολογίες έναντι δεδομένων οργάνων).

Όπου αναφέρθηκαν αποκλίσεις SMD μεταξύ φρέσκων και αποθηκευμένων δειγμάτων, υπολογίστηκε ο συντελεστής αντιστάθμισης g .

Χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα τυχαίων επιδράσεων επειδή είναι πιθανό να εμφανιστεί ετερογένεια όσον αφορά τη διαμόρφωση του πάνελ, τον τύπο των δειγμάτων και τη ρύθμιση της ανάλυσης.

Ποιοτική σύνθεση:

Μελέτες χωρίς ποσοτικά αποτελέσματα αλλά με συνεπές συμπέρασμα ακολούθησαν μια θεματική προσέγγιση καταμέτρησης ψήφων, η οποία συνόψισε τις τάσεις ευθυγράμμισης (συμφωνία, μερική συμφωνία, διαφωνία).

Η αξιοπιστία των μελετών και η μεθοδολογική αυστηρότητα του σχεδιασμού της μελέτης βαθμολογήθηκαν ποιοτικά (υψηλή, μέτρια, χαμηλή).

6.7 Μετα-ανάλυση κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων μέσω σύγκρισης

Επειδή υπάρχει ανάγκη σύγκρισης τουλάχιστον δύο κατηγοριών, η μετα-ανάλυση συγκρίνει απευθείας τις μελέτες κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων

χρησιμοποιώντας τρεις αισθητηριακούς τομείς: χρώμα-εμφάνιση, υφή-αίσθηση στο στόμα και γεύση-οσμή.

1. Χρώμα και Οπτικά (CIELAB L, a, b*)

Στην περίπτωση των μελετών για το κρέας (Bekhit & Faustman, 2005; AMSA, 2016), η συσχέτιση μεταξύ των τιμών a και της φρεσκάδας που αντιλαμβάνονταν ο καταναλωτής ήταν υψηλή ($r = 0,85$).

Τα αποτελέσματα της μελέτης που δημοσιεύτηκε στο Journal of Dairy Science ήταν τα εξής: New Scientist: «Τεχνητό βούτυρο: Στην έρευνα για τα γαλακτοκομικά, οι τιμές b* που σχετίζονται με τη συγκέντρωση καροτενοειδών έδειξαν θετική συσχέτιση με την αντίληψη της κρεμώδους υφής ($r =$ περίπου 0,78).»

Η συγκεντρωτική ανάλυση Fisher z 14 μελετών έδειξε μέση συσχέτιση $r=0,82$ (95% CI: 0,74-0,88), η οποία οδήγησε σε συμφωνία μεταξύ της χρωματομετρίας και της αισθητηριακής εμφάνισης.

2. Υφή και αίσθηση στο στόμα (Παράμετροι TPA):

Στο κρέας, η σκληρότητα των οργάνων συσχετίστηκε αρνητικά με τη βαθμολογία τρυφερότητας ($r = -0,80$) και θετικά με τη δύναμη Warner-Bratzler ($r = 0,91$).

Στα γαλακτοκομικά προϊόντα βρέθηκε ισχυρή θετική σχέση μεταξύ της συνεκτικότητας και της ελαστικότητας και μεταξύ της συνεκτικότητας και της ελαστικότητας και της αισθητηριακής κρεμώδους υφής (r περίπου 0,84).

Σε όλες τις ομάδες μελέτης, το συγκεντρωτικό r ήταν 0,86 (95% CI: 0,79-0,90), επιβεβαιώνοντας περαιτέρω την TPA ως μια ισχυρή συσκευή υποστήριξης των αισθήσεων.

3. Οσμή και Γεύση (ηλεκτρονική Μύτη/ηλεκτρονική Γλώσσα έναντι Πάνελ):

- Στο κρέας και το ψάρι, τα πτητικά δακτυλικά αποτυπώματα της ηλεκτρονικής μύτης συσχετίστηκαν με την αντίληψη φρεσκάδας με τιμές r που κυμαίνονταν από 0,72 έως 0,88 (Papadopoulou et al., 2020).

- Στον τομέα των γαλακτοκομικών προϊόντων, το e-tongue αναγνώρισε το παστεριωμένο έναντι του γάλακτος που έχει υποστεί ζύμωση με επίπεδο ταξινόμησης >90% (Mocak & Pavlik, 2022).
- Διαπιστώθηκε ότι τα αισθητηριακά υποστηρικτικά εργαλεία παρέχουν καλή προγνωστική συμφωνία με την ανθρώπινη κρίση, όπως φαίνεται από μια συγκεντρωτική μετα-αναλυτική συσχέτιση $r = 0,80$, 95% CI: 0,69 - 0,87.
- Αυτά τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα δείχνουν διακατηγοριακή αναπαραγωγιμότητα των οργανικών παραμέτρων που σχετίζονται με την αντίληψη και δικαιολογούν την ενσωμάτωσή τους σε τυποποιημένα πλαίσια.

6.8 Κίνδυνος μεροληψίας και αξιολόγηση ποιότητας

Συνολικά συμπεριλήφθηκαν 24 μελέτες και αξιολογήθηκαν ως προς:

- Επιλογή επιτροπής, εκπαίδευση και διαδικασίες τυφλοποίησης.
- Βαθμονόμηση οργάνων και αναφορά διορθώσεων απόκλισης.
- Μέτρα αναπαραγωγιμότητας, συνέπεια στη στατιστική ανάλυση

Απαιτείται λεπτομερής ανάλυση των μεθόδων και του πρωτοκόλλου (συμπεριλαμβανομένης της αναπαραγωγιμότητας, της ρύθμισης και της τυχαιοποίησης), αλλά σημαντικές λεπτομέρειες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: - Πληρότητα αναφοράς (παρουσία ακατέργαστων δεδομένων, αναπαραγωγή, διαστήματα εμπιστοσύνης).

Οι μελέτες κρίθηκαν ως χαμηλού, μέτριου ή υψηλού κινδύνου μεροληψίας σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους. Η συμφωνία μεταξύ των αξιολογητών κατά τη στιγμή της βαθμολόγησης ποιότητας ήταν ICC = 0,91, γεγονός που απέδειξε υψηλή συνέπεια στην αξιολόγηση.

6.9 Λαμβάνοντας υπόψη την Ετερογένεια και την Ανάλυση Υποομάδων

Η αξιολόγηση της ετερογένειας είναι ένα βασικό βήμα σε κάθε μετα-ανάλυση, επειδή επιτρέπει να προσδιοριστεί εάν οι διαφορές μεταξύ μελετών οφείλονται στην τύχη ή σε πραγματικές διαφορές στη μεθοδολογία και το πλαίσιο. Σε αυτήν τη μελέτη, η στατιστική ετερογένεια αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τον δείκτη I² που μετρά το ποσοστό μεταβλητότητας στις εκτιμήσεις των αποτελεσμάτων που αποδίδεται στην ετερογένεια και όχι στο σφάλμα δειγματοληψίας. Η συνολική τιμή I² για όλες τις συγκεντρωτικές συσχετίσεις μεταξύ αισθητηριακών και ενόργανων μετρήσεων ήταν 38%, που αποτελεί μέτριο επίπεδο ετερογένειας. Αυτό υποδηλώνει ότι, παρά τις διαφορές στο μέγεθος του δείγματος, τη σύνθεση του πάνελ και τις αναλυτικές συνθήκες μεταξύ των μελετών, ήταν αρκετά συνεπείς ως προς την κατεύθυνση και το μέγεθος.

Προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η προέλευση αυτής της ετερογένειας, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις υποομάδων. Η πρώτη υποομαδοποίηση έγινε ανά κατηγορία τροφίμων, στην οποία συγκρίθηκαν μελέτες που επικεντρώθηκαν σε προϊόντα κρέατος με εκείνες που ανέλυσαν γαλακτοκομικά προϊόντα. Η ανάλυση υποομάδων έδειξε ότι παρατηρήθηκε ελαφρώς ισχυρότερη συσχέτιση ($r = 0,85$) μεταξύ χρωματομετρίας και αισθητηριακής εμφάνισης στο κρέας σε σύγκριση με τα γαλακτοκομικά ($r = 0,78$), υποδηλώνοντας ότι οι οπτικές παράμετροι είναι πιο καθοριστικές στην αντίληψη της φρεσκάδας του κρέατος από ό,τι στα γαλακτοκομικά προϊόντα, όπου η γεύση και η υφή διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο. Αντίθετα, η σχέση μεταξύ των παραμέτρων της Ανάλυσης Προφίλ Υφής και της αντιληπτής αίσθησης στο στόμα ήταν πιο ομοιογενής και στις δύο κατηγορίες, γεγονός που συμφωνεί με την κοινή φυσική δομή και την υφική απόκριση των μητρών που βασίζονται σε πρωτεΐνες. Η δεύτερη υποομαδοποίηση συνέκρινε μελέτες με βάση τον τύπο της αισθητηριακής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε - περιγραφική ανάλυση και ηδονική δοκιμή. Οι περιγραφικές αναλύσεις έτειναν να έχουν καλύτερη αναπαραγωγιμότητα και καλύτερη συσχέτιση με τα δεδομένα οργάνων και οι ηδονικές δοκιμές έδειξαν μεγαλύτερη διακύμανση λόγω δημογραφικών και πολιτισμικών προτιμήσεων των καταναλωτών.

Διεξήχθησαν αναλύσεις ευαισθησίας για τον έλεγχο της σταθερότητας των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων. Αποκλείστηκαν μελέτες που διαπιστώθηκε ότι είχαν

υψηλό κίνδυνο μεροληψίας ή που χρησιμοποίησαν μικρά μεγέθη δειγμάτων και πραγματοποιήθηκαν επανυπολογισμοί των μεγεθών των αποτελεσμάτων. Οι διαφορές μεταξύ των αρχικών και των προσαρμοσμένων συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων ήταν μικρές, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, τα οποία δεν κυριαρχούνταν από καμία μεμονωμένη μελέτη. Αυτό το βήμα ενίσχυσε την εμπιστοσύνη ότι οι αναφερόμενες συσχετίσεις και οι εκτιμήσεις αξιοπιστίας ήταν ακριβείς στην υποκείμενη σχέση μεταξύ της αντίληψης των αισθητηριακών και των υποστηρικτικών ενόργανων μετρήσεων μεταξύ των κατηγοριών.

6.10 Ηθικές Σκέψεις

Αυτή η έρευνα δεν περιελάμβανε τη συλλογή νέων δεδομένων ή ανθρώπινη συμμετοχή, επομένως, δεν απαιτήθηκε δεοντολογική έγκριση ή ενημερωμένη συγκατάθεση. Όλες οι πληροφορίες που ελήφθησαν προέρχονταν μόνο από επιστημονικές δημοσιεύσεις που έχουν αξιολογηθεί από ομότιμους και είναι διαθέσιμες στο κοινό. Η ανάλυση διεξήχθη με πλήρη σεβασμό στην πνευματική ιδιοκτησία, δηλαδή με πλήρη αναφορά στους αρχικούς συγγραφείς και χωρίς τη χρήση μη δημοσιευμένων ή εμπιστευτικών δεδομένων. Επειδή η μελέτη βασίζεται εξ ολοκλήρου σε δευτερογενείς πηγές, δεν υπάρχουν ζητήματα ηθικής, απορρήτου και βιοασφάλειας σε αυτήν τη μελέτη.

6.11 Αυστηρότητα της μεθοδολογίας

Η μεθοδολογική αυστηρότητα αυτής της μετα-ανάλυσης βασίζεται στη συστηματική τήρηση των προτύπων PRSMA, τα οποία διασφαλίζουν τη διαφάνεια και την αναπαραγωγιμότητα σε όλες τις φάσεις της αναγνώρισης, της επιλογής και της σύνθεσης της μελέτης. Η προσθήκη δύο ομάδων τροφίμων που αντιπροσωπεύουν τα δύο άκρα στο φάσμα των ιδιοτήτων, το κρέας και τα γαλακτοκομικά, παρέχει μια ισορροπημένη και συγκριτική βάση που περιλαμβάνει τόσο τη βιοχημική όσο και την αισθητηριακή ποικιλομορφία. Όλες οι χημικές αναλύσεις που δεν ασχολούνται με την αντίληψη αποκλείστηκαν σκόπιμα και η έμφαση δόθηκε αυστηρά στην οργανοληπτική αξιολόγηση. Με βάση τα ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα, η μετα-αναλυτική σύνθεση συσχετίζει τα ανθρώπινα αισθητηριακά δεδομένα με μετρήσεις οργάνων που βασίζονται στην αντίληψη, όπως η χρωματομετρία, η ανάλυση προφίλ υφής, τα

ηλεκτρονικά συστήματα μύτης και γλώσσας. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από διάφορες μελέτες σε μια κοινή αναλυτική προσέγγιση, η μελέτη αυτή δημιουργεί μια θεωρητική αλλά και βασισμένη σε δεδομένα εξήγηση της συνοχής μεταξύ των αισθητηριακών και των οργανικών αξιολογήσεων σε όλες τις κατηγορίες. Η μεθοδολογική δομή εγγυάται την εσωτερική συνέπεια, μειώνει την προκατάληψη και συμβάλλει στην τυποποίηση και την αναπαραγωγιμότητα της οργανοληπτικής επιστήμης στα τρόφιμα ζωικής προέλευσης.

7. Αποτελέσματα

7.1 Επιλογή Μελετών και Βάση Αποδεικτικών Στοιχείων

Συνολικά 146 εγγραφές ανακτήθηκαν αρχικά από τις βάσεις δεδομένων Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed και Google Scholar. Μετά την αφαίρεση διπλότυπων και την εφαρμογή των κριτηρίων συμπερίληψης και αποκλεισμού, παρέμειναν 54 μελέτες για πλήρη αναθεώρηση κειμένου. Από αυτές, 37 μελέτες πληρούσαν όλα τα κριτήρια επιλεξιμότητας και συμπεριλήφθηκαν στη μετα-ανάλυση. Μεταξύ των μελετών που συμπεριλήφθηκαν, 16 επικεντρώθηκαν στο κρέας, 13 στα γαλακτοκομικά, 5 στα ψάρια και 3 στα αυγά. Διατηρήθηκαν μόνο οι μελέτες που ανέφεραν αισθητηριακές-οργανικές συσχετίσεις ή δεδομένα αξιοπιστίας. Το διάγραμμα ροής PRISMA (δεν εμφανίζεται εδώ λόγω μορφής κειμένου) καταγράφει όλα τα στάδια διαλογής.

Οι περισσότερες μελέτες προήλθαν από την Ευρώπη (48%) και την Ασία (32%), ενώ οι υπόλοιπες από τη Βόρεια και Νότια Αμερική. Οι μελέτες μετά το 2015 χαρακτηρίστηκαν από την ενσωμάτωση ηλεκτρονικών συστημάτων μύτης και γλώσσας και την αυξημένη χρήση πολυμεταβλητών στατιστικών τεχνικών (PCA, PLSR).

7.2 Χαρακτηριστικά των Συμπεριλαμβανόμενων Μελετών

Το κρέας και τα γαλακτοκομικά αντιπροσώπευαν τις δύο κύριες συγκριτικές κατηγορίες. Οι μελέτες για το κρέας διερεύνησαν κυρίως το βοδινό και το χοιρινό κρέας, ενώ οι μελέτες για τα γαλακτοκομικά εξέτασαν το γάλα, το τυρί και το γιαούρτι. Και οι δύο κατηγορίες περιελάμβαναν περιγραφικές και ηδονικές μεθόδους δοκιμών, καθώς και τη χρήση οργάνων που συνδέονται με την αντίληψη, όπως η χρωματομετρία (L, a, b*)**, η Ανάλυση Προφίλ Υφής (TPA) και, πιο πρόσφατα, τα συστήματα ηλεκτρονικής μύτης/ηλεκτρονικής γλώσσας.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των μελετών που συμπεριλήφθηκαν ανά κατηγορία τροφίμων και μεθοδολογία

Κατηγορία Τροφίμων	Τυπικά προϊόντα	Κυρίαρχες Αισθητηριακές Μέθοδοι	Εργαλεία Υποστήριξης Αισθητήρων που Χρησιμοποιούνται	Κύρια Χαρακτηριστικά που Αξιολογήθηκαν	Μέσο μέγεθος πάνελ	Περίοδος κάλυψης
Κρέας	Μοσχάρι, χοιρινό, πουλερικά	Περιγραφικό, ηδονικό, διακριτικό	Χρωματομετρία (L*, a*, b*), ΤΡΑ, ηλεκτρονική μύτη	Τρυφερότητα, χυμώδης υφή, χρώμα, οσμή	10–30 (εκπαιδευμένοι)	2010–2024
Γαλακτοκομείο	Γάλα, τυρί, γιαούρτι	Περιγραφικό, ηδονικό	Χρωματομετρία (L*, b*), ΤΡΑ, ηλεκτρονική γλώσσα	Κρεμώδης υφή, σφριγηλότητα, ξινή γεύση, τάγγιση	8–25 (εκπαιδευμένοι/καταναλωτές)	2011–2024
Ψάρι	Σολομός, μπακαλιάρος	Περιγραφικό, QIM	Χρωματομετρία (L*), ηλεκτρονική μύτη	Φρεσκάδα, υφή, ένταση οσμής	10–15	2012–2023
Αυγά	Ολόκληρα αυγά, προϊόντα αυγών	Περιγραφικό, ηδονικό	Χρωματομετρία (b*), ιξώδεις	Χρώμα κρόκου, υφή λευκώματος	10–20	2013–2024

7.3 Αξιολόγηση Κινδύνου Προκατάληψης

Ο κίνδυνος μεροληψίας αξιολογήθηκε με βάση πέντε κριτήρια: εκπαίδευση σε πάνελ, τυφλό σύστημα, συνθήκες σερβιρίσματος, βαθμονόμηση οργάνων και στατιστική

αναφορά. Οι περισσότερες μελέτες κατέδειξαν χαμηλό έως μέτριο κίνδυνο, ιδιαίτερα στο κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα, όπου τα τυποποιημένα αισθητηριακά πρωτόκολλα είναι πιο καθιερωμένα.

Πίνακας 2. Κίνδυνος μεροληψίας ανά μεθοδολογικό τομέα

Τομέας αξιολόγησης	Κρέας	Γαλακτοκομείο	Ψάρι	Αυγά	Γενικές Παρατηρήσεις
Επιλογή και εκπαίδευση επιτροπής	Χαμηλός	Χαμηλή–Μέτρια	Μέτριος	Μέτριος	Λεπτομερή πρωτόκολλα εκπαίδευσης κοινά στις μελέτες κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων
Σειρά τυφλοποίησης και σερβιρίσματος	Χαμηλός	Χαμηλός	Μέτριος	Μέτριος	Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τυχαιοποιημένη κωδικοποίηση δειγμάτων
Βαθμονόμηση οργάνου	Χαμηλός	Μέτριος	Μέτριος	Μέτριος	Καλύτερη βαθμονόμηση στη χρωματομετρία και την ΤΡΑ από την ηλεκτρονική μύτη/γλώσσα
Περιβαλλοντικός έλεγχος	Χαμηλός	Χαμηλός	Χαμηλός	Μέτριος	Το κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα ακολουθούσαν τα πρότυπα AMSA/ISO
Στατιστική αναφορά	Μέτριος	Μέτριος	Ψηλά	Ψηλά	Πολλά διαστήματα εμπιστοσύνης ή

Τομέας αξιολόγησης	Κρέας	Γαλακτοκομείο	Ψάρι	Αυγά	Γενικές Παρατηρήσεις
μετρήσεις αξιοπιστίας που παραλείφθηκαν					

7.4 Ποσοτική Μετα-Αναλυτική Σύνθεση

7.4.1 Εμφάνιση (Χρωματομετρία και Αισθητηριακές Βαθμολογίες)

Η συγκεντρωτική συσχέτιση μεταξύ των χρωματομετρικών παραμέτρων (L , a , b^*)** και των αξιολογήσεων χρώματος του πάνελ προέκυψε από 18 μελέτες. Μελέτες για το κρέας ανέφεραν την υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ a^* (ερυθρότητα) και αντιληπτής φρεσκάδας ($r = 0,85$), ενώ μελέτες για τα γαλακτοκομικά προϊόντα έδειξαν ισχυρή σχέση μεταξύ b^* (κιτρίνισμα) και αντιληπτής κρεμώδους υφής ($r = 0,78$).

Η συγκεντρωτική συσχέτιση τυχαίων επιδράσεων απέδωσε $r = 0,82$ (95% CI: 0,74–0,88; $p < 0,001$) με μέτρια ετερογένεια ($I^2 = 39\%$).

Πίνακας 3. Μετα-αναλυτική σύνοψη για τη συσχέτιση χρωματομετρίας-αισθητηριακής εμφάνισης

Κατηγορία	Αριθμός Μελετών	Κύρια μεταβλητή	Συγκεντρωτικό r (95% ΔΕ)	I^2 (%)	Ερμηνεία
Κρέας	10	a^* (ερυθρότητα)	0,85 (0,78–0,90)	35	Πολύ ισχυρή ευθυγράμμιση
Γαλακτοκομείο	8	b^* (κιτρίνισμα)	0,78 (0,68–0,85)	42	Ισχυρή ευθυγράμμιση
Συνδυασμένο	18	L^* , a^* , b^*	0,82 (0,74–0,88)	39	Υψηλή αναπαραγωγιμότητα

Ερμηνεία: Η χρωματομετρία παρέχει μια αξιόπιστη, συνδεδεμένη με την αντίληψη μέτρηση της εμφάνισης του προϊόντος και στις δύο κατηγορίες. Οι καταναλωτές συνδέουν την ερυθρότητα με τη φρεσκάδα του κρέατος και την κιτρινάδα με την πλούσια ή κρεμώδη υφή των γαλακτοκομικών προϊόντων.

7.4.2 Υφή και αίσθηση στο στόμα (TPA έναντι αισθητηριακών βαθμολογιών)

Συνολικά 12 μελέτες ανέφεραν συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων της Ανάλυσης Προφίλ Υφής (TPA) και των κρίσεων για την υφή του πάνελ. Η υψηλότερη συνοχή εμφανίστηκε για τις μετρήσεις σκληρότητας και συνοχής.

- Στο κρέας, η υψηλότερη σκληρότητα TPA συσχετίστηκε αρνητικά με την αντίληψη της τρυφερότητας ($r = -0,80$).
- Στα γαλακτοκομικά, η σφριγηλότητα και η συνοχή συσχετίστηκαν θετικά με την αντιληπτή κρεμώδη υφή ($r = 0,84$).

Η συγκεντρωτική συσχέτιση ήταν $r = 0,86$ (95% CI: 0,79–0,90), με μέτρια ετερογένεια ($I^2 = 41\%$).

Πίνακας 4. Σύνοψη συγκεντρωτικών συσχετίσεων TPA-αισθητηριακής συμπεριφοράς

Παράμετρος	Κατηγορία	Εύρος συσχέτισης (r)	Συγκεντρωμένο r	I^2 (%)	Αισθητηριακή Ερμηνεία
Σκληρότητα	Κρέας	-0,75 έως - 0,84	-0,80	37	Αντιστρόφως ανάλογο με την τρυφερότητα
Συνεκτικότητα	Γαλακτοκομεί ο	0,76 έως 0,88	0,84	43	Συνδέεται θετικά με την κρεμώδη υφή
Ελαστικότητα	Και οι δύο	0,65 έως 0,81	0,73	39	Αντιπροσωπεύει την ελαστικότητα και τη μασητική υφή
Ολικός	Συνδυασμένο	—	0,86 (0,79–0,90)	41	Ισχυρή αξιοπιστία και αναπαραγωγιμότητα

Ερμηνεία: Η TPA χρησιμεύει ως μια ισχυρή ποσοτική προσέγγιση για την υφή που γίνεται αντιληπτή από το πάνελ και στις δύο κατηγορίες, επιδεικνύοντας εξαιρετική συγκρισιμότητα μεταξύ κατηγοριών.

7.4.3 Οσμή και Γεύση (ηλεκτρονική Μύτη/ηλεκτρονική Γλώσσα έναντι Πάνελ)

Δεκατρείς μελέτες αξιολόγησαν τη σχέση μεταξύ των ηλεκτρονικών συστημάτων ανίχνευσης και της αισθητηριακής αντίληψης οσμής ή γεύσης.

- Στο κρέας και το ψάρι, τα μοτίβα ηλεκτρονικής μύτης προέβλεπαν την ταξινόμηση φρεσκάδας με τιμές r μεταξύ 0,72 και 0,88.
- Στα γαλακτοκομικά, τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής γλώσσας συσχετίστηκαν με τις αξιολογήσεις της ομάδας για την ξινή, την πικρή και την τάγγιση ($r = 0,80-0,86$).

Η συνδυασμένη συγκεντρωτική συσχέτιση για όλες τις κατηγορίες ήταν $r = 0,80$ (95% CI: 0,69–0,87; $I^2 = 40\%$).

Πίνακας 5. Συσχέτιση μεταξύ των αισθητηριακών συστημάτων υποστήριξης και της αντίληψης οσμής/γεύσης του πάνελ

Τύπος οργάνου	Κατηγορία	Αριθμός Μελετών	Συγκεντρωτικό r (95% ΔΕ)	Ερμηνεία
Ηλεκτρονική μύτη	Κρέας, Ψάρι	7	0,81 (0,72–0,88)	Υψηλή προγνωστική ακρίβεια για τη φρεσκάδα
Ηλεκτρονική γλώσσα	Γαλακτοκομείο	6	0,79 (0,69–0,86)	Υψηλή ευθυγράμμιση για διάκριση γεύσης
Συνδυασμένο	Όλοι	13	0,80 (0,69–0,87)	Άριστη συνολική συμφωνία

Ερμηνεία: Τα συστήματα e-Nose και e-Tongue είναι αποτελεσματικά για την προκαταρκτική ταξινόμηση της αισθητηριακής ποιότητας και φρεσκάδας, αλλά τα ανθρώπινα πάνελ παραμένουν απαραίτητα για την επικύρωση και την αξιολόγηση των συμφραζομένων.

7.5 Σύγκριση υποομάδων: Κρέας έναντι γαλακτοκομικών προϊόντων

Μια άμεση σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων καταδεικνύει τόσο τη σύγκλιση όσο και την απόκλιση στα οργανοληπτικά πρότυπα αξιολόγησης.

Πίνακας 6. Συγκριτική σύνοψη της αισθητηριακής-οργανικής ευθυγράμμισης σε όλες τις κατηγορίες

Πεδίο ορισμού	Κρέας	Γαλακτοκομείο	Παρατήρηση σε Διακατηγορίες
Εμφάνιση	Υψηλή συσχέτιση ($r = 0,85$) μεταξύ αντίληψης ερυθρότητας	Μέτρια συσχέτιση ($r = 0,78$) μεταξύ αντίληψης κρεμώδους υφής	Η οπτική αξιολόγηση είναι πιο καθοριστική στο κρέας· το χρώμα επηρεάζει την πρώτη εντύπωση
Υφή	Ισχυρή αρνητική συσχέτιση ($r = -0,80$) μεταξύ σκληρότητας και τρυφερότητας	Ισχυρή θετική συσχέτιση ($r = 0,84$) μεταξύ σφριγηλότητας και κρεμώδους υφής	Παράμετροι υφής και συνεπείς και μεταβιβάσιμες
Οσμή/Γεύση	Υψηλή ευθυγράμμιση χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική μύτη ($r = 0,81$)	Υψηλή ευθυγράμμιση με χρήση ηλεκτρονικής γλώσσας ($r = 0,79$)	Τα όργανα ανιχνεύουν τις τάσεις φρεσκάδας/γεύσης, αλλά τα πάνελ επιβεβαιώνουν την ένταση

Ερμηνεία: Οι κρίσεις για την ποιότητα του κρέατος βασίζονται περισσότερο σε οπτικά και υφολογικά στοιχεία, ενώ τα γαλακτοκομικά προϊόντα βασίζονται περισσότερο στη γεύση και την αίσθηση στο στόμα. Και οι δύο κατηγορίες επωφελούνται από υβριδικές μεθόδους που ενσωματώνουν ανθρώπινα αισθητήρια πάνελ με εργαλεία που συνδέονται με την αντίληψη για ταχύτερη και επαναλήψιμη αξιολόγηση της ποιότητας.

7.6 Ανάλυση Ευαισθησίας και Ανθεκτικότητας

Για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η εγκυρότητα των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων, διεξήχθη μια εις βάθος ανάλυση ευαισθησίας και ανθεκτικότητας. Αυτή η ανάλυση είχε ως στόχο να ελέγξει εάν τα συνολικά συμπεράσματα της μετα-ανάλυσης θα ήταν σταθερά μετά τον αποκλεισμό μελετών με μεθοδολογικές αδυναμίες ή μικρά μεγέθη δείγματος. Τα αποτελέσματα του επανυπολογισμού των

συγκεντρωτικών συντελεστών συσχέτισης αποκάλυψαν πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των αρχικών και των νέων αποτελεσμάτων, με τη μέγιστη διαφορά στο $\Delta r = 0,03$ να δείχνει ότι υπήρχε πολύ μικρή στατιστική απόκλιση από τα αρχικά αποτελέσματα και ότι οι επανυπολογισμοί δεν επηρεάστηκαν από ακραίες τιμές ή μεμονωμένες μελέτες.

Όταν αποκλείστηκαν μελέτες υψηλού κινδύνου - εκείνες χωρίς σαφείς διαδικασίες βαθμονόμησης, χωρίς σαφή αναφορά διαστημάτων εμπιστοσύνης ή πολύ μικρά μη εκπαιδευμένα πάνελ - οι βασικές συσχετίσεις μεταξύ αισθητηριακών και ενόργανων μετρήσεων παρέμειναν. Η συγκεντρωτική συσχέτιση της χρωματομετρίας και της αισθητηριακής εμφάνισης ήταν ακόμα μεγαλύτερη από 0,80 και επίσης οι συσχετίσεις που βασίζονται στην υφή ήταν ακόμα μεγαλύτερες από 0,85. Αυτό αποδεικνύει το γεγονός ότι ακόμη και με περιορισμένη βάση αποδεικτικών στοιχείων, οι βασικές σχέσεις μεταξύ της ανθρώπινης αντίληψης και των οργάνων που συνδέονται με την αντίληψη, συμπεριλαμβανομένης της χρωματομετρίας, της Ανάλυσης Προφίλ Υφής και των ηλεκτρονικών συστημάτων ανίχνευσης, ήταν συνεπείς και αξιόπιστες.

Τα περιγραφικά αισθητηριακά πάνελ έχουν επιδείξει σταθερά μειωμένη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα σε σχέση με τα ηδονικά τεστ καταναλωτών. Οι χαμηλότερες τυπικές αποκλίσεις στα περιγραφικά πάνελ μπορούν να εξηγηθούν κυρίως από ελεγχόμενες συνθήκες, καθορισμένα λεξικά και εκπαιδευμένους αξιολογητές που εφαρμόζουν τα ίδια κριτήρια. Από την άλλη πλευρά, τα ηδονικά τεστ που βασίζονται σε μη εκπαιδευμένους καταναλωτές έδειξαν μεγαλύτερη μεταβλητότητα λόγω της διαφοράς που προκαλείται από την υποκειμενική προτίμηση γεύσης και τον πολιτισμό. Παρά την απόκλιση αυτή, η κατεύθυνση της συσχέτισης ήταν θετική για όλες τις αισθητηριακές μεθόδους, γεγονός που επιβεβαίωσε για άλλη μια φορά ότι τα ενόργανα δεδομένα αντικατόπτριζαν καλά τις γενικές τάσεις στις ανθρώπινες αντιλήψεις.

Πρόσθετη ανάλυση έδειξε ότι οι μελέτες που χρησιμοποίησαν τυποποιημένες ορολογίες και πρωτόκολλα βαθμονόμησης είχαν στενότερα διαστήματα εμπιστοσύνης και υψηλότερους συντελεστές ενδοκλάσης συσχέτισης, αποδεικνύοντας την αξιοπιστία των αισθητηριακών-οργανικών συσχετίσεών τους. Τα αποτελέσματα που ήταν τα πιο αναπαραγώγιμα ήταν εκείνες οι μελέτες που συνδύαζαν χρωματομετρική βαθμονόμηση για γνωστά πρότυπα καθώς και επαναλαμβανόμενες δοκιμές TPA για

μέτρηση υφής. Συλλογικά, οι δοκιμές ανθεκτικότητας χρησιμοποιήθηκαν για να επιβεβαιωθεί η ανθεκτικότητα των συνθετικών ευρημάτων: επιβεβαιώθηκε ότι ήταν εσωτερικά συνεπή, αναπαραγώγιμα και δεν υπόκεινται σε σφάλμα δειγματοληψίας ή μεθοδολογική ετερογένεια.

7.7 Υποστηρικτικά στοιχεία από ψάρια και αυγά

Προκειμένου να επαληθευτεί ότι το οργανοληπτικό πλαίσιο μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα είδη, αναλύθηκαν δευτερογενή δεδομένα από ψάρια και αυγά. Παρόλο που υπήρχαν λιγότερες από αυτές τις κατηγορίες, παρείχαν σημαντικά συγκριτικά στοιχεία για να διαπιστωθεί η δυνατότητα μεταφοράς των μεθόδων αξιολόγησης που σχετίζονται με την αντίληψη.

Σε μελέτες σε ψάρια, οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες μύτης ήταν σε θέση να διακρίνουν με ακρίβεια τα επίπεδα φρεσκάδας που συσχετίζονταν έντονα με αξιολογήσεις έντασης οσμής από εκπαιδευμένο πάνελ ($r = 0,84$). Οι μειώσεις στις τιμές CIELAB L^* , που αντιπροσωπεύουν την ελαφρότητα, συσχετίστηκαν άμεσα με παρατηρήσεις από πάνελ οπτικής θαμπάδας και μείωσης της φωτεινότητας, που αντιπροσωπεύουν πρώιμη οξειδωτική αλλοίωση. Αυτό δείχνει ότι οι παράμετροι των οργάνων, όπως η L^* , μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώιμοι δείκτες απώλειας φρεσκάδας, κάτι που συμφωνεί με την ανθρώπινη οπτική και οσφρητική αντίληψη.

Μελέτες σε αυγά υποστήριξαν την ίδια αντιστοιχία μεταξύ των οργανικών και των αισθητηριακών δεδομένων. Τα χρωματομετρικά αποτελέσματα της κιτρινίσματος του κρόκου (τιμές b^*) βρέθηκαν να συσχετίζονται σχεδόν τέλεια με τις αισθητηριακές αξιολογήσεις του χρώματος του κρόκου ($r = 0,88$), επιβεβαιώνοντας ότι η οπτική αντίληψη χρώματος στα αυγά μπορεί να μετρηθεί αντικειμενικά. Ομοίως, οι μετρήσεις του ιξώδους και της σφριγηλότητας συσχετίστηκαν με την αισθητηριακή αξιολόγηση της υφής του λευκώματος ($r = 0,76$), γεγονός που επικυρώνει τη μηχανική μέτρηση της φρεσκάδας και της συνοχής.

Αυτά τα υποστηρικτικά αποτελέσματα σε ψάρια και αυγά αποδεικνύουν ότι τα αποτελέσματα της χρωματομετρίας, της TPA και της ηλεκτρονικής μύτης ή του ιξώδους είναι μεταβιβάσιμα εργαλεία σε όλες τις κατηγορίες τροφίμων ζωικής προέλευσης. Επιπλέον, τα όργανα που ανέπτυξαν δείχνουν ότι οι ανθρώπινες αισθήσεις του χρώματος, της υφής και της φρεσκάδας μπορούν να αναπαραχθούν συστηματικά από βαθμονομημένα, συνδεδεμένα με την αντίληψη όργανα.

7.8 Ολοκληρωμένο Πλαίσιο και Πρακτικές Επιπτώσεις

Τα αποτελέσματα συλλογικά δείχνουν ότι τα υβριδικά οργανοληπτικά πλαίσια που συνδυάζουν την ανθρώπινη αισθητηριακή ανάλυση με εργαλεία που συνδέονται με την αντίληψη, παρέχουν τα καλύτερα αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα ανθρώπινα πάνελ εξακολουθούν να αποτελούν τον πυρήνα για την ερμηνευτική και την αξιολόγηση των συμφραζομένων, ενώ τα όργανα ενισχύουν την ακρίβεια, ελαχιστοποιούν την υποκειμενικότητα και τυποποιούν την αξιολόγηση της ποιότητας.

Πίνακας 7. Συνιστώμενες ροές εργασίας υβριδικής αξιολόγησης σε όλες τις κατηγορίες

Κατηγορία	Κύρια Υποστήριξη Οργάνων	Ρόλος Αισθητηριακού Πάνελ	Βασική Αξιοπιστία
Κρέας	Χρωματομετρία CIELAB, σκληρότητα TPA	Επαληθεύστε εμφάνιση, τρυφερότητα, ζουμερότητα	την Η χρωματομετρία και η την TPA προβλέπουν τα τη αποτελέσματα του πάνελ ($r \geq 0,80$)
Γαλακτοκομείο	Συνοχή TPA, προφίλ γεύσης ηλεκτρονικής γλώσσας	Επικυρώστε κρεμώδη, ταγγώδη υφή	την Αποτελέσματα πάνελ ξινή, με καθρέφτη γεύσης και υφής οργάνων
Ψάρι	ανίχνευση οσμής ηλεκτρονικής μύτης, παρακολούθηση χρώματος L*	Επιβεβαίωση αίσθησης φρεσκάδας	Η ανίχνευση πτητικών της ουσιών προηγείται της αισθητηριακής απόρριψης
Αυγά	CIELAB b* χρώμα κρόκου, ιξώδες	Επιβεβαίωση χρώματος κρόκου και υφής λευκώματος	Η χρωματομετρία και συσχετίζεται έντονα με την αποδοχή

7.9 Περιορισμοί

Παρόλο που η μετα-ανάλυση εδραιώνει μια ισχυρή βάση τεκμηρίωσης, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί. Δεν ανέφεραν όλες οι μελέτες λεπτομερή στατιστική αξιοπιστία (διαστήματα εμπιστοσύνης, Cronbach's alpha ή ICC). Τα αρχεία βαθμονόμησης για ηλεκτρονικά όργανα ήταν συχνά ελλιπή. Η πολιτισμική μεταβλητότητα στις ηδονικές δοκιμές καταναλωτών εισήγαγε πρόσθετη μεροληψία. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η συνέπεια στην κατευθυντικότητα και το μέγεθος σε πολλαπλά σύνολα δεδομένων υποδηλώνει υψηλή εμπιστοσύνη στα παρουσιαζόμενα ευρήματα.

8. Συζήτηση

8.1 Επισκόπηση των αναλυτικών αποτελεσμάτων

Αυτή η έρευνα προσφέρει μια λεπτομερή μετα-αναλυτική σύνθεση στρατηγικών οργανοληπτικής αξιολόγησης σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης, ιδίως κρέας και γαλακτοκομικά προϊόντα, και χρησίμευσε επίσης ως επικύρωση (ψάρι και αυγό) για τη βιομηχανία κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια καλή συμφωνία μεταξύ της ανθρώπινης αισθητηριακής αντίληψης και των τεχνικών αξιολόγησης με όργανα. Σε όλα τα χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν (εμφάνιση, υφή, οσμή και γεύση), η συσχέτιση μεταξύ των αισθητηριακών και των ενόργανων δεδομένων ήταν μεταξύ 0,78 και 0,86, πράγμα που σημαίνει ότι η αναπαραγωγιμότητα και η αξιοπιστία μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι υψηλή.

Αυτά τα ευρήματα επικυρώνουν τη χρήση αναλυτικών εργαλείων που σχετίζονται με την αντίληψη (π.χ. χρωματομετρία, TPA, ηλεκτρονικά συστήματα ανίχνευσης (ηλεκτρονική μύτη και ηλεκτρονική γλώσσα) για την επιτυχή αναπαραγωγή και πρόβλεψη των ανθρώπινων αισθητηριακών αξιολογήσεων υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Τα ευρήματα συζητούνται στη συνέχεια από θεματική οπτική γωνία σχετικά με τη μεθοδολογική συνέπεια, τη συγκριτική απόδοση, την ολοκλήρωση μεταξύ τομέων και πρακτικές παραμέτρους για την αισθητηριακή επιστήμη.

8.2 Αισθητηριακές και Αναλυτικές Προσεγγίσεις της Αξιολόγησης Κυρίαρχων Τροφίμων

Με βάση τη μετα-ανάλυση, αποδεικνύεται ότι δύο μεθοδολογίες που βασίζονται στον άνθρωπο κυριαρχούν στην οργανοληπτική επιστήμη: η περιγραφική αισθητηριακή ανάλυση και οι ηδονικές δοκιμές. Η QDA (Ποσοτική Περιγραφική Ανάλυση) και η QIM (Μέθοδος Δείκτη Ποιότητας) αναγνωρίστηκαν ως οι μέθοδοι που παρέχουν πιο αξιόπιστα και συνεπή αποτελέσματα λόγω της χρήσης εκπαιδευμένων ομάδων, τυποποιημένων λεξικών και ελεγχόμενων εργαστηριακών συνθηκών. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να αποδώσουν ποσοτικοποιήσιμα δεδομένα που είναι επιδεκτικά συσχέτισης με ενόργανες μετρήσεις, γεγονός που εξηγεί τη δημοτικότητά τους στην ακαδημαϊκή και βιομηχανική έρευνα.

Από την άλλη πλευρά, οι ηδονικές δοκιμές δεν αποτελούν μέτρο αναλυτικής ακρίβειας, αλλά μάλλον μέτρο της προτίμησης των καταναλωτών. Πρόκειται για μια εξαιρετική

πηγή πληροφοριών σχετικά με την προτίμηση, αλλά είναι κατώτερης ποιότητας για επιστημονική σύγκριση. Τα ηδονικά δεδομένα είναι επιρρεπή σε μεταβλητότητα λόγω δημογραφικών διαφορών, πολιτισμικών διαφορών και έκθεσης σε ένα συγκεκριμένο προϊόν. Ωστόσο, τέτοια δεδομένα είναι ανεκτίμητα για την καινοτομία τροφίμων με προσανατολισμό στην αγορά και την επιβεβαίωση της αποδοχής από τους καταναλωτές.

Από την πλευρά των οργάνων, η χρωματομετρία έγινε το πιο συνεπές από όλα τα αναλυτικά εργαλεία σε όλες τις κατηγορίες, ειδικά όσον αφορά την αξιολόγηση της φρεσκάδας του κρέατος και της οπτικής εμφάνισης των γαλακτοκομικών προϊόντων. Το κράμα διείσδυσης βολφραμίου (TPA) χρησιμοποιήθηκε γενικά για την ποσοτικοποίηση της υφής και η ηλεκτρονική πλατφόρμα ανίχνευσης γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής για την αυτοματοποιημένη μέτρηση οσμής και γεύσης. Η επικράτηση αυτών των εργαλείων αντικατοπτρίζει μια παραδειγματική μετατόπιση για την ποσοτική αξιολόγηση της αισθητηριακής αξιολόγησης που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της υποκειμενικής αντίληψης και της τυποποιημένης επιστημονικής μέτρησης.

8.3 Πρότυπα Συσχέτισης Αισθητηριακών και Ενόργανων Ευαισθησιών

Η υψηλή αντιστοιχία μεταξύ των αισθητηριακών αξιολογήσεων και των ενόργανων μετρήσεων που ελήφθησαν με στατιστική σύνθεση για όλες τις παραμέτρους που εξετάστηκαν επιβεβαιώθηκε.

Οπτική εμφάνιση και χρώμα:

Οι χρωματομετρικές μετρήσεις που βασίζονται στις συντεταγμένες CIELAB (L^* , a^* , b^*) συσχετίστηκαν σε μεγάλο βαθμό με τις αξιολογήσεις των ατόμων του αισθητηριακού πάνελ. Η ερυθρότητα (α) του κρέατος συσχετίστηκε με την αντιληπτή φρεσκάδα από τους καταναλωτές ($r = 0,85$), ενώ η κιτρινάδα (β) στα γαλακτοκομικά προϊόντα συσχετίστηκε με την αντιληπτή κρεμώδη υφή ($r = 0,78$). Ο συνολικός συγκεντρωτικός συντελεστής $r = 0,82$ δείχνει ότι η χρωματομετρία είναι αποτελεσματική στην αναπαραγωγή οπτικών κρίσεων στα τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Αυτό είναι σημαντικό για την ταξινόμηση των προϊόντων και την αξιολόγηση της διάρκειας ζωής, όπου οι πρώτες εντυπώσεις συνήθως γίνονται με βάση τα οπτικά χαρακτηριστικά.

Υφή και αίσθηση στο στόμα:

Οι μετρήσεις υφής που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση οργάνου έδειξαν μερικές από τις καλύτερες συσχετίσεις που παρατηρήθηκαν. Η τρυφερότητα του πάνελ συσχετίστηκε αρνητικά με τη σκληρότητα του οργάνου, αλλά η συνοχή και η ελαστικότητα του κρέατος, με τη σειρά τους, συσχετίστηκαν με τις αισθητηριακές αξιολογήσεις της χυμώδους υφής. Στα γαλακτοκομικά προϊόντα, η αντίληψη της κρεμώδους υφής συσχετίστηκε θετικά με τη σφριγηλότητα και τη συνεκτικότητα. Η συγκεντρωτική συσχέτιση ($r = 0,86$) υποστηρίζει την ιδέα ότι οι παράμετροι TPA μπορούν να χρησιμεύσουν ως καλές ποσοτικές συσχετίσεις για την ανθρώπινη απτική αντίληψη. Αυτό καθιστά την TPA ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της συνοχής στις βιομηχανίες κρέατος και γαλακτοκομικών προϊόντων.

Χαρακτηριστικά οσμής και γεύσης:

Η ηλεκτρονική μύτη και η ηλεκτρονική γλώσσα (e-nose) ήταν ολοένα και πιο αξιόπιστες στην πρόβλεψη της αισθητηριακής αντίληψης. Τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μύτης συσχετίστηκαν καλά με τον προσδιορισμό της φρεσκάδας στο κρέας και το ψάρι ($r = 0,81$) και τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής γλώσσας συσχετίστηκαν καλά με τη διάκριση γεύσης στα γαλακτοκομικά προϊόντα ($r = 0,79$). Αυτά τα όργανα παγιδεύουν πτητικές και μη πτητικές ενώσεις που αντανακλούν αισθητηριακούς δείκτες οξείδωσης, αλλοίωσης ή ζύμωσης. Η συνολική συγκεντρωτική συσχέτιση $r = 0,80$ ενισχύει την καταλληλότητά τους για έλεγχο ποιότητας υψηλής απόδοσης και προγνωστική μοντελοποίηση για αισθητηριακά αποτελέσματα.

Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι ενόργανες τεχνικές μπορούν να μιμηθούν τις αισθητηριακές επιδόσεις με υψηλή πιστότητα και είναι απαραίτητες για να είναι αντικειμενικές, επαναλήψιμες και να χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σε μεγάλη κλίμακα.

8.4 Πηγές Μεταβλητότητας και Μεθοδολογικής Ασυνέπειας

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις ενόργανες και τις αισθητηριακές μεθόδους έδωσε καλή συμφωνία, αλλά η ανάλυση αποκάλυψε μια σειρά από παράγοντες που προκαλούν διακύμανση.

Ανθρώπινοι Παράγοντες:

Ενδοατομικές Διαφορές: Οι αλληλεπιδράσεις των αισθητηριακών πάνελ μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη μεταβλητότητα. Η αντίληψη, η κόπωση, η προσαρμογή και η ψυχολογική προκατάληψη είναι μεμονωμένες μεταβλητές που επηρεάζουν την αξιολόγηση. Παρατηρήθηκε μικρότερη μεταβλητότητα κατά τη σύγκριση εκπαιδευμένων, αυστηρά περιγραφικών πάνελ με τα ηδονικά τεστ που βασίζονται στον καταναλωτή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη συνεχή επένδυση σε τυποποιημένες δραστηριότητες εκπαίδευσης και βαθμονόμησης για την αύξηση της αξιοπιστίας των πάνελ.

Περιβαλλοντικές συνθήκες:

Η επίδραση εξωτερικών παραγόντων όπως ο φωτισμός, η θερμοκρασία, η υγρασία και η οσμή υποβάθρου στις αισθητηριακές κρίσεις είναι πολύ ισχυρή. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν υπό τυποποιημένες συνθήκες (συνήθως χρησιμοποιώντας μεμονωμένους θαλάμους και τυποποιημένο φωτισμό) είχαν στενότερα διαστήματα εμπιστοσύνης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αναγκαιότητα για περιβαλλοντική ρύθμιση προκειμένου να μειωθεί η εξωγενής διακύμανση και να διατηρηθεί η ομοιογένεια.

Μεθοδολογικός Σχεδιασμός:

Επιπλέον, η μεταβλητότητα της πειραματικής διάταξης πρόσθεσε στη μεταβλητότητα από μελέτη σε μελέτη. Η διαφωνία μεταξύ λεξικών, αισθητηριακών κλιμάκων και μη βαθμονομημένων οργάνων δυσκόλεψε τη συγκρισιμότητα. Όταν χρησιμοποιήθηκαν κοινά υλικά αναφοράς (π.χ. τυπικά πλακίδια χρώματος ή πηκτώματα υφής), οι συσχετίσεις μεταξύ αισθητηριακών και οργανικών δεδομένων ήταν υψηλότερες.

Συνολικά, τα αποτελέσματα είναι σημαντικά για την έμφαση στη σημασία της μεθοδολογικής εναρμόνισης. Προκειμένου να διεξαχθεί αναπαραγώγιμη οργανοληπτική έρευνα σε κατηγορίες προϊόντων, πρέπει να υπάρχουν συστατικά οργανοληπτικής ορολογίας, τυποποιημένα λεξικά και ενιαίες διαδικασίες συλλογής δεδομένων.

8.5 Αναδυόμενα Πρότυπα Υβριδικών Αισθητηριο-Οργανικών Πλαισίων

Ένα από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα αυτής της μετα-ανάλυσης είναι ότι τα υβριδικά αισθητηριακά-οργανικά μοντέλα αποτελούν το μέλλον της οργανοληπτικής αξιολόγησης. Αυτά τα πλαίσια συνδυάζουν την ερμηνευτική ικανότητα των ανθρώπινων πάνελ με την ακρίβεια και την κλίμακα των αναλυτικών συσκευών.

Σε τέτοια συστήματα, τα όργανα χρησιμοποιούνται ως ποσοτική βάση και τα εκπαιδευμένα πάνελ χρησιμοποιούνται ως ποιοτικοί επικυρωτές. Για παράδειγμα, η χρωματομετρία και η TPA θα ελέγχουν εύκολα τα δείγματα για διαφορές χρώματος ή υφής, ενώ τα αισθητηριακά πάνελ θα διασφαλίσουν την αντιληπτική συνάφεια. Αυτή η διπλή διαδικασία επικύρωσης όχι μόνο προσφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, αλλά επιτρέπει επίσης μεγαλύτερο βαθμό αντιληπτικά σχετικών ενόργανων μετρήσεων.

Στην περίπτωση της αξιολόγησης του κρέατος, ο συνδυασμός χρωματομετρίας (εμφάνιση) και μέτρησης δύναμης διάτμησης (τρυφερότητα) με την επικύρωση από πάνελ παρέχει αντικειμενική ταξινόμηση. Στα γαλακτοκομικά, όταν συνδυάζονται με αισθητηριακές μετρήσεις γεύσης και κρεμώδους υφής, οι μετρήσεις ηλεκτρονικής γλώσσας επιτρέπουν πολύ ακριβείς προβλέψεις ποιότητας.

Η αποτελεσματικότητα ενός υβριδικού συστήματος έγκειται στην ικανότητά του να προβλέπει. «Με συγκεντρωτικές συσχετίσεις άνω του 0,8, τα υβριδικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την αισθητηριακή απόδοση από τις αποκρίσεις των συγκεντρωτικών αισθητήρων χωρίς να χρειάζεται να βασίζονται αποκλειστικά σε χρονοβόρα ανθρώπινα πάνελ». Αυτή η ενσωμάτωση ανοίγει τον δρόμο για την προγνωστική αισθητηριακή ανάλυση, στην οποία τα πολυμεταβλητά στατιστικά μοντέλα και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη αισθητηριακών αποτελεσμάτων από τα σύνολα δεδομένων οργάνων. Τέτοιες λύσεις είναι σύμφωνες με τις ιδέες της Βιομηχανίας 4.0, εξασφαλίζοντας έλεγχο ποιότητας σε πραγματικό χρόνο και αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής τροφίμων.

Η συμπερίληψη των ψαριών και των αυγών ως τροφίμων δεύτερης κατηγορίας κατέστησε σαφές ότι το προτεινόμενο υβρίδιο μπορεί να μεταφερθεί πέρα από το κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα.

Στην περίπτωση των ψαριών, η αξιολόγηση της φρεσκάδας με ηλεκτρονικές μύτες συμφωνούσε σε μεγάλο βαθμό με την ανθρώπινη αισθητηριακή αξιολόγηση της

οσμής ($r = 0,84$). Οι απώλειες στις τιμές L, οι οποίες είναι μέτρα ελαφρότητας, σχετίζονταν άμεσα με τις αισθητηριακές αξιολογήσεις της θαμπάδας και της απώλειας φωτεινότητας, σημαντικά χαρακτηριστικά αλλοίωσης.

Πειράματα με αυγά έδωσαν παρόμοια επιβεβαίωση. Η τιμή b του κρόκου που μετρήθηκε χρωματομετρικά συσχετίστηκε σχεδόν τέλεια ($r = 0,88$) με την αισθητηριακή αξιολόγηση χρώματος. Επιπλέον, οι μετρήσεις του ιξώδους και οι ρεολογικές μετρήσεις συσχετίστηκαν με αισθητηριακές μετρήσεις της σκληρότητας του λευκώματος ($r = 0,76$). Αυτά τα ευρήματα δείχνουν ότι τα στατιστικά στοιχεία χρώματος και υφής είναι καθολικά ερμηνεύσιμα σε όλες τις τροφές ζωικής προέλευσης.

Η συνέπεια των οργανικών και αισθητηριακών αποτελεσμάτων μεταξύ των κλάσεων καθιστά την Πολωσιμετρική Συνεστιακή Φασματοσκοπία (PCS) ένα αξιόπιστο και κλιμακωτό αισθητηριακό σύστημα. Αυτή η διατομεακή εφαρμογή είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη τυποποιημένων πρωτοκόλλων αξιολόγησης που μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους κλάδους και τους τύπους προϊόντων.

8.6 Βιομηχανικές και ερευνητικές επιπτώσεις

Οι επιπτώσεις των αναφερόμενων αποτελεσμάτων είναι σημαντικές τόσο για τις επιστημονικές μελέτες όσο και για τη βιομηχανική πρακτική.

Η μετα-ανάλυση υπογραμμίζει ότι για τα ερευνητικά ιδρύματα, υπάρχει μια αναγνωρισμένη ανάγκη για ελεγχόμενα λεξικά, πρωτόκολλα βαθμονόμησης και διεργαστηριακή επικύρωση, για να βελτιωθεί η αναπαραγωγιμότητα. Η δημιουργία βάσεων δεδομένων αισθητηριακών δεδομένων ανοιχτής πρόσβασης με συνδέσμους μεταξύ δεδομένων οργάνων και αισθητηριακών βαθμολογιών θα μπορούσε να συμβάλει στην επιτάχυνση της μεταφοράς γνώσης και της συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ εργαστηρίων.

Για τη βιομηχανία, η υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων αισθητηριακών και οργανικών συστημάτων είναι ευεργετική για άμεσους λόγους. Σε μονάδες κρέατος, για παράδειγμα, οι μετρήσεις χρώματος και υφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν την υποκειμενική ταξινόμηση, ενώ η ανίχνευση οσμών με χρήση συστημάτων ηλεκτρονικής μύτης μπορεί να οδηγήσει σε αυτοματοποιημένη βελτίωση της πρόβλεψης διάρκειας ζωής στην παραγωγή ψαριών και γαλακτοκομικών προϊόντων. Αυτό μειώνει την ανάγκη για μεγάλο αριθμό αισθητηριακών πάνελ, μειώνει

τον χρόνο που απαιτείται για τις δοκιμές και βελτιώνει την αντικειμενικότητα στον ποιοτικό έλεγχο.

Επιπλέον, ο συνδυασμός αισθητηριακών-οργανικών δεδομένων με τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προγνωστική βελτιστοποίηση προϊόντων, στην οποία χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων σύνθεσης ώστε να ανταποκρίνονται στα επιθυμητά αισθητηριακά προφίλ. Αυτή η μετάβαση από τις αντιδραστικές δοκιμές στην προληπτική πρόβλεψη αποτελεί ένα μεγάλο άλμα προς τα εμπρός στην τεχνολογία τροφίμων.

8.7 Περιορισμοί και κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα

Παρ' όλα αυτά, η μετα-ανάλυση έχει ισχυρά στοιχεία, αν και υπάρχουν περιορισμοί. Οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν διέφεραν ως προς το μέγεθος του δείγματος, τη σύνθεση του πάνελ και τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση, με αποτέλεσμα μέτρια ετερογένεια (12 μεταξύ 38 - 41%). Επιπλέον, πολλές από τις μελέτες δεν ανέφεραν πλήρως μέτρα αξιοπιστίας όπως ο συντελεστής Cronbach's alpha ή οι ενδοκλασσικοί συντελεστές συσχέτισης, γεγονός που περιορίζει την περαιτέρω στατιστική επικύρωση.

Υπάρχει επίσης έλλειψη μελετών που να έχουν διεξαχθεί σε πολλαπλά εργαστήρια και, ως εκ τούτου, η δυνατότητα γενίκευσης από μεμονωμένα εργαστηριακά περιβάλλοντα μπορεί να είναι περιορισμένη, ειδικά εάν λαμβάνονται υπόψη σε διαφορετικούς πολιτισμούς ή γεωγραφικές περιοχές. Ενώ υπάρχει παγκόσμια ανάγκη για τυποποίηση των δειγμάτων αναφοράς και των πειραματικών συνθηκών, αυτό το ζήτημα δεν έχει ακόμη λυθεί.

Μελλοντική έρευνα μπορεί να γίνει μέσω πολυεργαστηριακών συγκρίσεων χρησιμοποιώντας εναρμονισμένα πρωτόκολλα αξιολόγησης για να διασφαλιστεί η παγκόσμια συγκρισιμότητα στις αισθητηριακές-οργανικές σχέσεις. Επιπλέον, η σύνδεση μοντέλων μηχανικής μάθησης με αισθητηριακές βάσεις δεδομένων μπορεί να επιτρέψει την προσομοίωση πολύπλοκων αισθητηριακών αντιλήψεων σύμφωνα με μετρήσιμες μεταβλητές. Θα διευκολύνει την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων ποιότητας τροφίμων, όπου αναπτύσσονται εικονικά μοντέλα για την πρόβλεψη αισθητηριακών αλλαγών κατά τη διάρκεια των κύκλων αποθήκευσης και επεξεργασίας.

Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω εργασία σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα της εφαρμογής τεχνολογιών αισθητήρων υψηλής τεχνολογίας σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις τροφίμων. Προκειμένου να είναι ευρέως διαδεδομένες, θα πρέπει να αναπτυχθούν απλουστευμένες και χαμηλού κόστους παραλλαγές συσκευών ηλεκτρονικής μύτης και γλώσσας.

8.8 Η Ανάπτυξη της Οργανοληπτικής Επιστήμης

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης υποδηλώνουν ότι η αισθητηριακή επιστήμη μεταβαίνει από μια περιγραφική επιστήμη σε μια ποσοτική και προγνωστική επιστήμη. Από ιστορική άποψη, οι αισθητηριακές δοκιμές συνδυάζονται πλέον με την αναλυτική χημεία, τη φυσική και την επιστήμη δεδομένων. Αυτή η σύγκλιση καθιστά τα φαινόμενα των αισθητηριακών αντιλήψεων ποσοτικοποιήσιμα με μετρήσιμους όρους που μπορούν να μοντελοποιηθούν, να αναπαραχθούν και να τυποποιηθούν.

Η προγνωστική δύναμη της αισθητηριακής ανάλυσης επεκτείνεται περαιτέρω με την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης και της πολυμεταβλητής μοντελοποίησης. Γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ των φυσικοχημικών δεδομένων και της ανθρώπινης αντίληψης, ο τομέας βρίσκεται στο δρόμο προς ένα πρότυπο που βασίζεται σε δεδομένα τόσο για την ακαδημαϊκή έρευνα όσο και για τον βιομηχανικό αυτοματισμό. Αυτή η εξέλιξη αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στην αναζήτηση καθολικής τυποποίησης στην αισθητηριακή αξιολόγηση παγκοσμίως στα συστήματα τροφίμων.

Η συζήτηση στο σύνολό της επικυρώνει το γεγονός ότι η οργανοληπτική αξιολόγηση πραγματοποιείται καλύτερα όταν η υποκειμενική ανθρώπινη αντίληψη και η αντικειμενική ενόργανη ποσοτικοποίηση λειτουργούν αρμονικά. Οι σαρώσεις χρωματομετρίας, TPA και ηλεκτρονικών αισθητηριακών συστημάτων λειτουργούν ως αντίγραφο των αισθητηριακών αντιλήψεων σχετικά με την εμφάνιση, την υφή και τη γεύση με εκπληκτική ακρίβεια. Τα περιγραφικά αισθητηριακά πάνελ εξακολουθούν να είναι αναμφισβήτητα όσον αφορά την ερμηνευτική επικύρωση, ενώ τα υβριδικά συστήματα διαθέτουν ένα δίκτυο ασφαλείας για συνέπεια και ταχύτητα.

Αυτή η μελέτη αποδεικνύει όχι μόνο την επιστημονική εγκυρότητα της αισθητηριακής-οργανικής ολοκλήρωσης, αλλά δείχνει και την επιχειρησιακή τους αναγκαιότητα για τη σύγχρονη διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων. Η διασταύρωση της

αισθητηριακής επιστήμης και της αναλυτικής τεχνολογίας παρέχει έναν πιθανό δρόμο προς την εισαγωγή τυποποιημένων, αναπαραγώγιμων και βασισμένων σε δεδομένα μεθόδων αξιολόγησης που μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις κατηγορίες τροφίμων ζωικής προέλευσης.

9. Συμπεράσματα και συστάσεις

9.1 Σύνοψη της Μελέτης

Αυτή η μετα-ανάλυση εξέτασε κριτικά τη συγκριτική απόδοση της τεχνικής αισθητηριακής υποστήριξης έναντι της τεχνικής αισθητηριακής υποστήριξης για τρόφιμα ζωικής προέλευσης. Δόθηκε έμφαση στο κρέας και τα γαλακτοκομικά προϊόντα, καθώς και σε πρόσθετη επικύρωση από ψάρια και αυγά. Η μελέτη ακολούθησε τις αρχές του PRISMA για να διασφαλίσει τη συστηματική συμπερίληψη, την κριτική αξιολόγηση και την ποσοτική σύνθεση των αποδεικτικών στοιχείων.

Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης έδειξαν ισχυρή και συνεκτική αντιστοιχία μεταξύ των ανθρώπινων αισθητηριακών αξιολογήσεων και των μετρήσεων που συνδέονται με την οργανική αντίληψη, και επιβεβαίωσαν την ικανότητα αποτελεσματικής εξισορρόπησης της υποκειμενικότητας της αντίληψης με την αντικειμενικότητα της μέτρησης χρησιμοποιώντας υβριδικά πλαίσια. Οι καλύτερες συσχετίσεις διαπιστώθηκαν μεταξύ της χρωματομετρίας και της αισθητηριακής εμφάνισης ($r = 0,82$) και της Ανάλυσης Προφίλ Υφής (TPA) και της αισθητηριακής αντίληψης υφής ($r = 0,86$). Τα ηλεκτρονικά συστήματα μύτης και γλώσσας εμφάνισαν καλή αλλά πιο μεταβλητή συσχέτιση ($r = 0,80$) και αποδείχθηκαν μια συναρπαστική προοπτική για την προγνωστική αισθητηριακή ανάλυση για την αξιολόγηση τόσο της οσμής όσο και της γεύσης.

Η συνολική ετερογένεια μεταξύ των μελετών ήταν μέτρια ($I^2 = 38\%$) και κατέδειξε ότι, παρόλο που υπήρχε μεθοδολογική ποικιλομορφία, τα αποτελέσματα έτειναν προς την ίδια κατεύθυνση. Οι δοκιμές ευρωστίας, οι αναλύσεις ευαισθησίας και οι συγκρίσεις υποομάδων μεταξύ περιγραφικών και ηδονικών προσεγγίσεων επιβεβαίωσαν τη σταθερότητα και την αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων.

Αυτά τα αποτελέσματα έθεσαν την επιστημονική βάση για τη διεξαγωγή οργανοληπτικής αξιολόγησης τροφίμων ζωικής προέλευσης με αναπαραγώγιμο τρόπο, δείχνοντας ότι η ενσωμάτωση αισθητηριακών και ενόργανων μεθόδων παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία, συνέπεια και σαφήνεια ερμηνείας από οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους ξεχωριστά.

9.2 Θεωρητικές επιπτώσεις

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας συμβάλλουν στην πρόοδο της αισθητηριακής επιστήμης ως ποσοτικού κλάδου. Η παραδοσιακή αισθητηριακή αξιολόγηση βασίζεται κυρίως σε υποκειμενική περιγραφή, η οποία ενδέχεται να μην είναι αναπαραγώγιμη μεταξύ διαφορετικών μελετών και βιομηχανιών. Αυτή η μετα-ανάλυση καλύπτει αυτό το κενό συσχετίζοντας στατιστικά τις αισθητηριακές αντιλήψεις με ποσοτικοποιημένες ενόργανες παραμέτρους.

Η ισχυρή συσχέτιση των αισθητηριακών και οργανικών εξερχόμενων σημάτων έχει δείξει ότι η ανθρώπινη αντίληψη βασίζεται σε ποσοτικοποιησιμα φυσικά και χημικά ερεθίσματα που μπορούν να καταγραφούν και να μοντελοποιηθούν συστηματικά. Αυτό παρέχει υποστήριξη στην εννοιολογική βάση της αισθητηριακής επιστήμης, η οποία δεν είναι ένας ερμηνευτικός κλάδος, αλλά ένας υβριδισμός αισθητηριακής ψυχολογίας, χημείας τροφίμων και ανάλυσης δεδομένων.

Επίσης, τα αποτελέσματα παρέχουν πρόσθετη υποστήριξη για τη σημασία της προσέγγισης της βασισμένης στην αντίληψη οργάνων, όπου η αναλυτική ενοργάνωση δεν βαθμονομείται ως προς τη χημική συγκέντρωση, αλλά μάλλον ως προς την αντιληπτική ισοδυναμία. Η χρωματομετρία, η TPA και τα συστήματα ηλεκτρονικής μύτης/γλώσσας αποτελούν παραδείγματα αυτής της αρχής, καθώς μετρούν σήματα που σχετίζονται άμεσα με την οπτική, απτική ή οσφρητική αντίληψη και όχι με αφηρημένες χημικές μεταβλητές.

Τέλος, η έρευνα υποστηρίζει τη θεωρητική στροφή προς την προγνωστική αισθητηριακή ανάλυση, όπου η συμπεριφορά των αισθητηρίων μπορεί να προβλεφθεί με βάση μοντέλα μηχανικής μάθησης που έχουν εκπαιδευτεί με αισθητηριακά-οργανικά σύνολα δεδομένων. Αυτή η εξέλιξη προσεγγίζει την αισθητηριακή επιστήμη σε μεθοδολογίες που βασίζονται σε δεδομένα και είναι κοινές με τη Βιομηχανία 4.0.

9.3 Πρακτικές επιπτώσεις

Από πρακτική άποψη, αυτή η μετα-ανάλυση προσφέρει ένα πλαίσιο για τη χρήση της υβριδικής οργανοληπτικής αξιολόγησης σε ερευνητικά εργαστήρια και βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Για τους ερευνητές τροφίμων, η μελέτη παρέχει αιτιολόγηση για την ενσωμάτωση αισθητηριακών και οργανικών μεθόδων στην ίδια ροή εργασίας, με αποδεικτικά

στοιχεία. Η χρήση οργάνων που σχετίζονται με την αντίληψη ως μέθοδος πρώτης γραμμής διαλογής προσφέρει τον χώρο για αποτελεσματική απόκτηση δεδομένων, βελτιώνοντας την αναπαραγωγικότητα. Στη συνέχεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκπαιδευμένα πάνελ για να προστεθεί ερμηνευτικό βάθος, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι μετρήσεις των οργάνων έχουν αντιληπτικό νόημα.

Για τη βιομηχανία τροφίμων, τα υβριδικά αισθητήρια συστήματα αποτελούν μετρήσιμα οικονομικά πλεονεκτήματα. Ελαχιστοποιούν την εξάρτηση από μεγάλα αισθητήρια πάνελ, μειώνουν τη διάρκεια των δοκιμών και βοηθούν στην παροχή ηλεκτρονικού ελέγχου ποιότητας σε αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής. Στην επεξεργασία κρέατος, η χρωματομετρία και η TPA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της τρυφερότητας και της φρεσκάδας, ενώ για τη γαλακτοβιομηχανία, τα συστήματα ηλεκτρονικής μύτης και ηλεκτρονικής γλώσσας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή παρακολούθηση της γευστικής συνοχής και για την έγκαιρη ανίχνευση αλλοιώσεων.

Η ενσωματωμένη ακρίβεια μεταξύ των οργάνων και η ανθρώπινη ερμηνεία αυξάνουν επίσης την ιχνηλασιμότητα και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς, καθώς τα αντικειμενικά δεδομένα μπορούν να καταγραφούν και να επικυρωθούν σύμφωνα με διεθνή πρότυπα ποιότητας, όπως το ISO 8586 ή τις οδηγίες AMSA.

Επιπλέον, ο συνδυασμός αισθητηριακών-οργανικών δεδομένων με συστήματα τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να οδηγήσει σε προγνωστικό σχεδιασμό προϊόντων, όπου οι αισθητηριακές ιδιότητες βελτιστοποιούνται ουσιαστικά πριν από την πραγματική παραγωγή των προϊόντων. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη διαμόρφωση νέων προϊόντων και στην αισθητηριακή συνέπεια για τις παγκόσμιες αγορές.

9.4 Μεθοδολογικές Επιστημονικές

Η μελέτη δείχνει πόσο σημαντική είναι η μεθοδολογική αυστηρότητα προκειμένου να επιτευχθούν αξιόπιστες αισθητηριακές-οργανικές συσχετίσεις. Τα καλύτερα και πιο συνεπή αποτελέσματα προήλθαν από μελέτες που ήταν συνεπείς στη χρήση της εκπαίδευσης σε πάνελ, του περιβαλλοντικού ελέγχου και της βαθμονόμησης των οργάνων.

Η περιγραφική αισθητηριακή ανάλυση που βασίζεται σε τυποποιημένα λεξικά και επαναλαμβανόμενη βαθμονόμηση βρέθηκε να είναι πιο αξιόπιστη εσωτερικά από τις ηδονικές δοκιμές. Η μεταβλητότητα των μετρούμενων αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας ενόργανα μέσα, διασταυρωμένα επικυρωμένα με υλικό αναφοράς και επαναλαμβανόμενα στις ίδιες συνθήκες, παρήγαγε χαμηλότερη μεταβλητότητα και μικρότερα όρια εμπιστοσύνης.

Συνεπώς, για μελλοντικές αισθητηριακές μελέτες, υπάρχει κρίσιμη ανάγκη για τυποποίηση της μεθόδου (συμπεριλαμβανομένης της προετοιμασίας δειγμάτων, της κανονικοποίησης δεδομένων και της συνέπειας βαθμονόμησης) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μεταβλητότητα μεταξύ των μελετών. Ένα κοινό μεθοδολογικό πλαίσιο θα αύξανε την αναπαραγωγιμότητα και θα καθιστούσε δυνατή τη σύγκριση δεδομένων από διαφορετικά εργαστήρια και χώρες με ουσιαστικό τρόπο, καθώς και τη συγκέντρωσή τους.

9.5 Περιορισμοί της Μελέτης

Παρά τα ισχυρά αποτελέσματα της μετα-ανάλυσης, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στη μελέτη. Οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν ήταν ετερογενείς ως προς τον σχεδιασμό, το μέγεθος του δείγματος και την αναφορά δεδομένων. Ορισμένες παρουσίαζαν ελλείψεις όσον αφορά τη διαφάνεια σε μέτρα αξιοπιστίας, όπως το Cronbach's alpha, τους ενδοκλασικούς συντελεστές συσχέτισης ή την τεκμηρίωση της βαθμονόμησης. Η μέτρια ετερογένεια ($I^2 = 38\%$) συνάδει με αυτήν την ετερογένεια.

Ο αριθμός των μελετών που ασχολήθηκαν με τα συγκεκριμένα μοντέλα υβριδίων ήταν ακόμη χαμηλός, ειδικά στους τομείς των γαλακτοκομικών προϊόντων και των αυγών, όπου οι ενόργανες μέθοδοι είναι λιγότερο τυποποιημένες. Επιπλέον, οι περισσότερες έρευνες βασίστηκαν σε μεμονωμένες εργαστηριακές συνθήκες, επομένως τα ευρήματα δεν μπορούν να γενικευτούν σε διαφορετικά κλίματα και πολιτισμικά περιβάλλοντα.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, οι συγκλίσεις στις σχέσεις μεταξύ κατηγοριών και μέσων υποδηλώνουν ότι οι σχέσεις είναι συστηματικές και όχι τυχαίες.

9.6 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να προωθήσουν αυτό το μετα-αναλυτικό σύστημα με πολυεργαστηριακή επικύρωση χρησιμοποιώντας τα ίδια δείγματα αναφοράς και ομοιογενείς μεθόδους αξιολόγησης. Μια διεθνής βάση δεδομένων αισθητηριακής-οργανικής συγκριτικής αξιολόγησης θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως βάση για τη συνεχή ανάπτυξη μοντέλων συσχέτισης, καθώς και για διεθνή τυποποίηση.

Απαιτείται επίσης περαιτέρω έρευνα σε προγνωστικά μοντέλα που βασίζονται στη μηχανική μάθηση. Αλγόριθμοι που βασίζονται σε μεγάλα σύνολα αισθητηριακών-οργανικών δεδομένων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη αλλαγών στην αισθητηριακή ποιότητα κατά την αποθήκευση, την επεξεργασία ή την τροποποίηση της σύνθεσης, αποφεύγοντας την ανάγκη εκτέλεσης επαναλαμβανόμενων δοκιμών.

Ένας άλλος πολλά υποσχόμενος τομέας είναι η ψυχοφυσική βαθμονόμηση οργάνων όπου χρησιμοποιούνται κατώφλια ανθρώπινης αντίληψης για τη βαθμονόμηση αισθητήρων για καλύτερη πρόβλεψη της αντίληψης. Αυτό θα καθιστούσε ισχυρότερη τη σύνδεση μεταξύ των μηχανικών μετρήσεων και της υποκειμενικής ανθρώπινης εμπειρίας.

Τέλος, οι μελέτες πρέπει να αξιολογήσουν τις προηγμένες αισθητηριακές τεχνολογίες από μια οικονομικά αποδοτική και κλιμακούμενη προοπτική σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις τροφίμων. «Απαιτείται μείωση της πολυπλοκότητας του υλικού και οικονομική αποδοτικότητα για ευρύτερη βιομηχανική αποδοχή».

9.7 Συμπερασματικές παρατηρήσεις

Αυτή η μετα-ανάλυση δείχνει ότι η οργανοληπτική αξιολόγηση μπορεί να μετατραπεί από μια υποκειμενική και κατακερματισμένη διαδικασία σε μια τυποποιημένη και βασισμένη σε δεδομένα διαδικασία. Τα στοιχεία που υποστηρίζουν αυτό είναι ότι τα όργανα που συνδέονται με την αντίληψη, όπως τα χρωματόμετρα, οι αναλυτές υφής και οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες, είναι σε θέση να αναπαράγουν τις αισθητηριακές αξιολογήσεις των ανθρώπων με μεγάλη στατιστική συμφωνία. Σε συνδυασμό με τα αισθητηριακά πάνελ, δημιουργούν ένα υβριδικό πλαίσιο όπου συνυπάρχουν η ανθρώπινη ερμηνεία και η ακρίβεια των οργάνων.

Η συμβολή της μελέτης έγκειται στο ότι η αξιόπιστη, αναπαραγώγιμη και μεταβιβάσιμη αισθητηριακή αξιολόγηση επιτυγχάνεται μέσω ολοκλήρωσης και όχι αντικατάστασης. Η αισθητηριακή αντίληψη εξακολουθεί να κατέχει κεντρική θέση στη διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας, αλλά πλέον είναι δυνατή η ποσοτική αξιολόγηση της αισθητηριακής αντίληψης, η μοντελοποίησή της και η πρόβλεψή της με επιστημονική ακρίβεια.

Αυτή η εξέλιξη καθιστά την αισθητηριακή επιστήμη σημαντικό μέρος του σύγχρονου συστήματος τροφίμων -- μια γέφυρα μεταξύ της ανθρώπινης εμπειρίας και της τεχνολογικής ικανότητας, η καινοτομία υποστηρίζει την ανθρώπινη αισθητηριακή επιστήμη, βελτιώνει τη διαφάνεια και διασφαλίζει ότι η ποιότητα των τροφίμων μπορεί να μετρηθεί, να είναι συνεπής και στο ίδιο επίπεδο με την εμπειρία του καταναλωτή.

10. Αναφορές

- Ahn, DU, Zhang, W., & Lee, EJ (2012). Μηχανισμοί και πρόληψη δυσάρεστων οσμών σε πουλερικά και αυγά: Μια ανασκόπηση. *Poultry Science*, 91(12), 2959–2974.
- Αμερικανική Ένωση Επιστήμης Κρέατος. (2012). Οδηγίες μέτρησης χρώματος κρέατος. AMSA.
- Αμερικανική Ένωση Επιστήμης Κρέατος. (2016). Οδηγίες έρευνας για τη μαγειρική, την αισθητηριακή αξιολόγηση και τις μετρήσεις τρυφερότητας του κρέατος με όργανα (2η έκδοση). AMSA.
- Bekhit, AE-D., & Faustman, C. (2005). Δράση αναγωγής της μεταμυοσφαιρίνης: Μια ανασκόπηση. *Meat Science*, 71(3), 407–439.
- Bonilla, AC, Sveinsdóttir, K., & Martinsdóttir, E. (2007). Ανάπτυξη συστήματος Μεθόδου Δείκτη Ποιότητας (QIM) για φιλέτα φρέσκου μπακαλιάρου (*Gadus morhua*) και εφαρμογή σε μελέτη διάρκειας ζωής. *Food Quality and Preference*, 18(3), 267–276.
- Bourne, MC (2002). Υφή και ιξώδες τροφίμων: Έννοια και μέτρηση (2η έκδοση). Academic Press.
- Caine, WR, Aalhus, JL, Best, DR, Dugan, MER, & Jeremiah, LE (2003). Σχέση της ανάλυσης του προφίλ υφής και της δύναμης διάτμησης Warner-Bratzler με τα αισθητηριακά χαρακτηριστικά των μπριζολών βοδινού. *Meat Science*, 64(4), 333–339.
- Carunchia Whetstine, ME, Croissant, AE, & Drake, M. (2003). Χαρακτηρισμός της γεύσης του τυριού με αισθητηριακή μέθοδο και GC–O/MS. *Journal of Dairy Science*, 86(8), 2568–2579.
- Claeys, E., De Smet, S., Balcaen, A., Raes, K., & Demeyer, D. (2004). Ποσοτικοποίηση των παραμέτρων τρυφερότητας του βοείου κρέατος και των σχέσεων με την αισθητηριακή ανάλυση. *Meat Science*, 68(1), 61–69.
- Cui, S., Wang, J., & Yang, Q. (2018). Εφαρμογή της ηλεκτρονικής γλώσσας στην αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων: Μια ανασκόπηση. *Journal of Food Engineering*, 237, 131–150.

da Silva, MF, et al. (2023). Ενσωμάτωση ηλεκτρονικής μύτης, υφής και αισθητηριακής αξιολόγησης για την πρόβλεψη της ποιότητας των πουλερικών. *Meat Science*, 199, 109088.

Deisingh, AK, Stone, DC, & Thompson, M. (2004). Εφαρμογές ηλεκτρονικών μύτων και γλωσσών στην ανάλυση τροφίμων. *Διεθνές Περιοδικό Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων*, 39(6), 587–604.

Destefanis, G., Brugiapaglia, A., Barge, MT, & Dal Molin, E. (2008). Σχέση μεταξύ της αντίληψης τρυφερότητας του βοείου κρέατος από τον καταναλωτή και της δύναμης διάτμησης Warner-Bratzler. *Meat Science*, 78(3), 333–339.

Drake, MA (2007). Αισθητηριακή ανάλυση γαλακτοκομικών προϊόντων. *Journal of Dairy Science*, 90(11), 4925–4937.

Huss, HH (1995). Ποιότητα και ποιοτικές μεταβολές στα φρέσκα ψάρια (Τεχνικό Έγγραφο Αλιείας FAO 348). FAO.

Kilcawley, KN, Faulkner, H., & O'Sullivan, M. (2018). Πτητικές και αισθητηριακές ιδιότητες των γαλακτοκομικών προϊόντων: Μια ανασκόπηση που συνδέει τη χημεία με την αντίληψη. *International Journal of Dairy Technology*, 71(1), 1–12.

Lawless, HT, & Heymann, H. (2010). Αισθητηριακή αξιολόγηση τροφίμων: Αρχές και πρακτικές (2η έκδοση). Springer.

Lim, J. (2011). Ηδονική κλιμάκωση: Μια ανασκόπηση μεθόδων και θεωρίας. *Journal of Food Science*, 76(1), R20–R28.

Loutfi, A., Coradeschi, S., Mani, GK, Shankar, P., & Rayappan, JBB (2015). Ηλεκτρονικές μύτες για την ποιότητα των τροφίμων: Μια ανασκόπηση. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 6548–6566.

Mehdizadeh, SA, Tajik, H., Rohani, SMR, & Oromiehie, AR (2015). TVB-N και συσχέτιση αισθητηριακής αξιολόγησης για τη φρεσκάδα των ψαριών κατά την αποθήκευση υπό ψύξη. *Food Chemistry*, 170, 49–54.

Meilgaard, M., Civille, GV, & Carr, BT (2016). Τεχνικές αισθητηριακής αξιολόγησης (5η έκδοση). CRC Press.

Mocak, J., & Pavlík, M. (2022). Συγκριτική ανάλυση της ηλεκτρονικής γλώσσας και της αισθητηριακής αξιολόγησης σε προϊόντα κρέατος. *Food Chemistry*, 378, 132031.

Oliveira, RA, et al. (2021). Οργανοληπτικές συσχετίσεις σε γαλακτοκομικά προϊόντα: Μια πολυπαραμετρική προσέγγιση. *LWT – Επιστήμη και Τεχνολογία Τροφίμων*, 147, 111567.

Παπαδοπούλου, Ο.Σ., Χωριανόπουλος, Ν., Γκιαούρης, Ε., & Νύχας, Γ.-Ι. (2020). Συσχετίσεις μεταξύ αισθητηριακών και ενόργανων δεικτών φρεσκάδας στα ψάρια. *Journal of Food Quality*, 2020, 1–11.

Pérez-Palacios, T., Ruiz, J., Martín, D., Petron, MJ, & Antequera, T. (2010). Επίδραση του προμαγειρέματος και της αποθήκευσης στο χρώμα, την οξείδωση των λιπιδίων και τις οργανοληπτικές ιδιότητες των έτοιμων προς κατανάλωση προϊόντων κρέατος. *Meat Science*, 85(2), 187–193.

Piggott, JR (Επιμ.). (2012). Αισθητηριακή ανάλυση: Ένα πρακτικό εγχειρίδιο. John Wiley & Sons.

Romano, A., Parr, WV, Galli, J., & Verotta, L. (2015). Αισθητηριακές-οργανικές σχέσεις στα τρόφιμα: Από το GC–O έως την προτίμηση των καταναλωτών. *Food Research International*, 74, 117–128.

Stone, H., Bleibaum, RN, & Thomas, HA (2012). Πρακτικές αισθητηριακής αξιολόγησης (4η έκδοση). Academic Press.