

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

«ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ ΛΙΑΝΕΜΠΟΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ

ΕΠΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΛΛΟΙΩΣΗ ΝΩΠΩΝ ΚΡΕΑΤΩΝ»

ΑΝΤΩΝΗΣ ΜΑΚΡΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΒΟΛΟΣ, 2025

UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 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

**“RECORDING OF COLD CHAIN IN RETAILERS AND STUDY OF
IMPACT ON QUALITY AND SPOILAGE OF FRESH MEAT”**

ANTONIS MAKROGIANNIS

VOLOS, 2025

**«Καταγραφή ψυκτικής αλυσίδας λιανεμπορίου και μελέτη επιπτώσεων στην ποιότητα
και την αλλοίωση νωπών κρεάτων»**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) **Γιαβάσης Ιωάννης**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής, Π.Θ., Επιβλέπων.

Γνωστικό Αντικείμενο: Μικροβιολογία Τροφίμων και Μικροβιακές Ζυμώσεις για παραγωγή βιοπολυμερών.

2) **Μποζιάρης Σ. Ιωάννης**, Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος Π.Θ., Μέλος.

Γνωστικό Αντικείμενο: Υγιεινή και Συντήρηση Ιχθυηρών

3) **Κακαγιάννη Ν. Μυρσίνη**, Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής, Π.Θ., Μέλος.

Γνωστικό Αντικείμενο: Τεχνολογία, Ποιότητα, Ασφάλεια Τροφίμων Ζωικής Προέλευσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της εργασίας αυτής, κ. Γιαβάση Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθειά του και τη διαρκή υποστήριξή του, τόσο κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, όσο και κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την εταιρεία ΑΒ Βασιλόπουλος και τους συναδέλφους από το Τμήμα Διασφάλισης Ποιότητας για την υποστήριξή τους στο πείραμα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατήρηση της ψυκτικής αλυσίδας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφάλεια, την ποιότητα και τη διατηρησιμότητα των νωπών προϊόντων ζωικής προέλευσης. Ωστόσο, οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις που καταγράφονται κατά τη μεταφορά, την αποθήκευση και τη διανομή τροφίμων ενδέχεται να επιταχύνουν την ανάπτυξη αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών, προκαλώντας ποιοτική υποβάθμιση, απώλειες τροφίμων και ενδεχόμενους κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην καταγραφή της ψυκτικής αλυσίδας στο λιανεμπόριο και στη διερεύνηση των επιπτώσεων των θερμοκρασιακών διαταραχών, όπως ορίζονται από τα επίπεδα ανίχνευσης των Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI) που χρησιμοποιήθηκαν, σε συσχέτιση με την ποιότητα και την αλλοίωση νωπού χοιρινού κρέατος.

Η έρευνα βασίστηκε στη χρήση Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (Time- Temperature Indicators - TTI) και ασύρματων καταγραφικών θερμοκρασίας για τη συνεχή παρακολούθηση της ψυκτικής αλυσίδας από το στάδιο της διανομής έως την αποθήκευση στα σημεία λιανικής πώλησης. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν μικροβιολογικές και φυσικοχημικές αναλύσεις στα δείγματα χοιρινού κρέατος, με στόχο την αξιολόγηση των μεταβολών σε κρίσιμες παραμέτρους, όπως η μικροβιακή ανάπτυξη (*Pseudomonas spp.*, *Enterobacteriaceae*, οξυγαλακτικών βακτηρίων), το pH, η απώλεια βάρους και οι αλλαγές στο χρώμα, την οσμή και την υφή. Επιπλέον, διερευνήθηκε η συσχέτιση των θερμοκρασιακών αποκλίσεων με την επιτάχυνση της αλλοίωσης των προϊόντων και η αποτελεσματικότητα των TTI ως εργαλείων δυναμικής ιχνηλασιμότητας της φρεσκότητας, σε σύγκριση με τις στατικές ημερομηνίες λήξης. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η μεταβολή του χρώματος των Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε σχέση με το χρονικό διάστημα έκθεσης των προϊόντων, είχαν άμεση συσχέτιση με την αύξηση του μικροβιακού φορτίου και την αλλοίωση των δειγμάτων. Η ανάπτυξη αλλοιογόνων βακτηρίων οδήγησε σε εμφανείς ποιοτικές

μεταβολές, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των προϊόντων και αυξάνοντας την πιθανότητα απόρριψής τους πριν την κατανάλωση. Η χρήση των TTI επέτρεψε την ακριβέστερη εκτίμηση της κατάστασης των τροφίμων σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας μια πιο αξιόπιστη μέθοδο ελέγχου έναντι των παραδοσιακών συστημάτων που βασίζονται αποκλειστικά στην ημερομηνία λήξης. Επιπλέον, αναδείχθηκε η ανάγκη ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας, όπως οι Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες (TTI), το Internet of Things (IoT) και το blockchain, με στόχο τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας, την έγκαιρη ανίχνευση θερμοκρασιακών διαταραχών, καθώς και τη μείωση των οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις απώλειες τροφίμων.

Οι απώλειες τροφίμων λόγω θερμοκρασιακών αποκλίσεων δεν επηρεάζουν μόνο τους παραγωγούς και το λιανεμπόριο, αλλά έχουν επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η απόρριψη τροφίμων συνεπάγεται σπατάλη πολύτιμων φυσικών πόρων, όπως νερό και ενέργεια, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή, επεξεργασία και μεταφορά τους. Παράλληλα, οι απορριπτόμενες ποσότητες συμβάλλουν στην αύξηση των οργανικών αποβλήτων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, επιβαρύνοντας περαιτέρω το περιβάλλον. Συνεπώς, η βελτίωση της διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας δεν αποτελεί μόνο εμπορική αναγκαιότητα, αλλά και κρίσιμο παράγοντα για την αειφορία της παγκόσμιας εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων.

Συνολικά, η παρούσα μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της συνεχούς διατήρησης των βέλτιστων συνθηκών ψύξης σε κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας νωπών προϊόντων ζωικής προέλευσης. Η αξιοποίηση τεχνολογιών όπως οι Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες, το Internet of Things (IoT) και το blockchain, προσφέρει δυνατότητες δυναμικής ιχνηλασιμότητας και έγκαιρης ανίχνευσης θερμοκρασιακών αποκλίσεων. Μέσω της εφαρμογής αυτών των καινοτόμων εργαλείων, καθίσταται εφικτή η ακριβέστερη αξιολόγηση της φρεσκότητας, η ενίσχυση της ασφάλειας των τροφίμων και η αποτελεσματικότερη διαχείριση της ψυκτικής

αλυσίδας. Τα ευρήματα της μελέτης μπορούν να συμβάλουν στην ενίσχυση της ποιότητας και της ασφάλειας τροφίμων και στη διαμόρφωση αποδοτικότερων στρατηγικών για τη μείωση απωλειών τροφίμων και την υιοθέτηση πιο βιώσιμων πρακτικών στην εφοδιαστική αλυσίδα.

Λέξεις-Κλειδιά: Ψυκτική αλυσίδα, Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες (TTI), αλλοίωση κρέατος, μικροβιολογία τροφίμων, ποιότητα κρέατος, σπατάλη τροφίμων, ασφάλεια τροφίμων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.1. Ασφάλεια και ποιότητα τροφίμων – Σημασία της Ψυκτικής Αλυσίδας	- 1 -
1.2. Παράμετροι Ποιότητας και Υγιεινής του Κρέατος	- 2 -
1.2.1. Παράμετροι Ποιότητας του Κρέατος	- 2 -
1.2.2. Παράμετροι Υγιεινής του Κρέατος.....	- 5 -
1.3. Αλλοίωση Νωπών Κρεάτων: Μικροβιολογικοί και Χημικοί Παράγοντες	- 7 -
1.3.1. Βιοχημικές Αλλοιώσεις	- 8 -
1.3.2 Μικροβιολογικές Αλλοιώσεις.....	- 9 -
1.4. Νομοθετικό Πλαίσιο και Κριτήρια Ασφάλειας και Υγιεινής του Κρέατος	- 10 -
1.5. Μέθοδοι συσκευασίας για τη συντήρηση του κρέατος και των προϊόντων του.....	- 11 -
1.6 Προηγμένη τεχνολογία στον έλεγχο της ψυκτικής αλυσίδας.....	- 12 -
1.7. Σπατάλη τροφίμων: Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις - Σύγχρονες στρατηγικές μείωσης σπατάλης τροφίμων	- 14 -
1.8 Ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι της μελέτης	- 19 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	- 21 -
2.1 Σχεδιασμός μελέτης και πειραματική διαδικασία.....	- 21 -
2.2 Όργανα και Εξοπλισμός	- 24 -
2.3 Πειραματική Προσομοίωση Διαταραχής της Ψυκτικής Αλυσίδας	- 27 -
2.3.1 Παρακολούθηση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη μεταφορά.....	- 28 -
2.3.2 Χαμένες Αποστολές & Απόρριψη Δεικτών TTI	- 34 -
2.4 Ανάλυση και Επεξεργασία Δεδομένων	- 37 -

2.4.1 Επεξεργασία Δεδομένων Θερμοκρασίας	37 -
2.4.2 Ανάλυση των Δεικτών TTI WarmMark	37 -
2.4.3 Ανάλυση Μικροβιολογικών και Φυσικοχημικών Δεδομένων	38 -
2.4.4 Επεξεργασία των Δεδομένων	39 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	40 -
3.1 Θερμοκρασιακές Αποκλίσεις στην Ψυκτική Αλυσίδα	40 -
3.2 Μεταβολή Δεικτών TTI, Μικροβιολογικές Αναλύσεις και Αποτύπωση Αλλοίωσης Κρέατος	45 -
3.3 Συσχέτιση με την Ελαχιστοποίηση Σπατάλης Τροφίμων.....	65 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	67 -
4.1 Ερμηνεία Θερμοκρασιακών Δεδομένων και Ψυκτική Αλυσίδα	67 -
4.2 Επίδραση των Θερμοκρασιακών Διακυμάνσεων στην Αλλοίωση του Κρέατος.....	68 -
4.3 Αξιολόγηση της Αποτελεσματικότητας των Δεικτών TTI	70 -
4.4 Επιπτώσεις στη Μείωση της Σπατάλης Τροφίμων.....	71 -
4.5 Περιορισμοί της Μελέτης και Πιθανά Σφάλματα	71 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	73 -
5.1 Κύρια Συμπεράσματα	73 -
5.2 Προτάσεις Βελτίωσης.....	76 -
5.3 Συνολική Εκτίμηση και Μελλοντικές Προοπτικές	78 -
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80 -
ABSTRACT	84 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ασφάλεια και ποιότητα τροφίμων – Σημασία της Ψυκτικής Αλυσίδας

Η ασφάλεια των τροφίμων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη δημόσια υγεία, ενώ η ποιότητά τους επηρεάζει καθοριστικά την αποδοχή και την αξία τους στην αγορά. Τα προϊόντα ζωικής προέλευσης, και ιδιαίτερα το κρέας, είναι ευάλωτα σε μικροβιακή ανάπτυξη και χημικές μεταβολές, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο επιμόλυνσης και αλλοίωσης. Η φύση του προϊόντος, σε συνδυασμό με τις συνθήκες διακίνησης και αποθήκευσης, απαιτεί αυστηρούς ελέγχους και κατάλληλες στρατηγικές συντήρησης, ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια και να διατηρηθεί η ποιότητά του μέχρι την κατανάλωση.

Η ψυκτική αλυσίδα αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες διατήρησης της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων ζωικής προέλευσης. Η αδιάλειπτη διατήρηση των κατάλληλων θερμοκρασιών κατά τη μεταφορά, την αποθήκευση και τη διανομή των προϊόντων κρέατος συμβάλλει στην πρόληψη της ανάπτυξης αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών (James & James, 2014). Η παραβίαση της ψυκτικής αλυσίδας οδηγεί σε αλλοίωση των προϊόντων, μεταβολές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, καθώς και σε αυξημένο κίνδυνο τροφιμογενών λοιμώξεων (Zhu et al., 2020). Η αποτελεσματική λειτουργία της ψυκτικής αλυσίδας προϋποθέτει την τήρηση αυστηρών υγειονομικών πρωτοκόλλων και τη συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα, όπως αυτά που ορίζει η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA, 2021). Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό (ΕΚ) 853/2004, το νωπό κρέας πρέπει να διατηρείται σε θερμοκρασία $\leq 7^{\circ}\text{C}$, ενώ το κρέας πουλερικών σε $\leq 4^{\circ}\text{C}$. Παρά τις θεσμοθετημένες προδιαγραφές, μελέτες έχουν δείξει ότι οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις είναι συχνές στην ψυκτική αλυσίδα, με αποτέλεσμα την αυξημένη απόρριψη προϊόντων και τη σπατάλη τροφίμων (FAO, 2019). Παράγοντες όπως η διακοπή ρεύματος, η ακατάλληλη μεταφορά, οι ανεπαρκείς υποδομές ψύξης και η κακή διαχείριση αποθεμάτων μπορούν να επηρεάσουν τη σταθερότητα της αλυσίδας (Montanari, 2008). Επιπλέον, οι συμβατικές μέθοδοι

ιχθυηλασιμότητας βασίζονται στην ημερομηνία λήξης, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές συνθήκες συντήρησης των προϊόντων.

1.2. Παράμετροι Ποιότητας και Υγιεινής του Κρέατος

Η ποιότητα του κρέατος αξιολογείται μέσω φυσικοχημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν τόσο την οργανοληπτική αποδοχή του προϊόντος όσο και τη διάρκεια ζωής του. Οι φυσικοχημικοί παράγοντες καθορίζουν την εμφάνιση, τη γεύση, την υφή και τη συνολική καταλληλότητα του κρέατος προς κατανάλωση, ενώ οι μικροβιολογικές παράμετροι σχετίζονται με την παρουσία αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών, οι οποίοι επηρεάζουν τη σταθερότητα και την ασφάλειά του.

1.2.1. Παράμετροι Ποιότητας του Κρέατος

Φυσικοχημικές Παράμετροι

To pH

Το pH του κρέατος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους φυσικοχημικούς παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τη μικροβιακή σταθερότητα όσο και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος. Σε φυσιολογικές συνθήκες, το pH του νωπού κρέατος κυμαίνεται μεταξύ 5,4 και 5,7 λίγες ώρες μετά τη σφαγή. Η τιμή του pH εξαρτάται από τον μεταθανάτιο μεταβολισμό της γλυκόζης στους μυς, όπου το γλυκογόνο μετατρέπεται σε γαλακτικό οξύ, προκαλώντας τη φυσιολογική πτώση του pH. Ωστόσο, διάφοροι παράγοντες, όπως το στρες των ζώων πριν από τη σφαγή, μπορούν να επηρεάσουν τη μεταβολική αυτή διαδικασία, οδηγώντας σε αποκλίσεις από το φυσιολογικό εύρος του pH και επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα του κρέατος.

- **PSE (Pale, Soft, Exudative) κρέας:** Πρόκειται για ένα ποιοτικό ελάττωμα που χαρακτηρίζεται από ανοιχτόχρωμη, μαλακή και εξιδρωματική υφή. Εμφανίζεται όταν το pH μειώνεται ταχέως μετά τη σφαγή και φτάνει σε επίπεδα κάτω του 5,4 μέσα στην

πρώτη ώρα. Αυτό συμβαίνει λόγω υπερβολικού στρες πριν από τη σφαγή, το οποίο προκαλεί υπερδιέγερση του μεταβολισμού και έντονη συσσώρευση γαλακτικού οξέος. Η απότομη μείωση του pH, σε συνδυασμό με υψηλή θερμοκρασία σφαγής, προκαλεί πρωτεϊνικές αλλοιώσεις που οδηγούν σε χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού (WHC), με αποτέλεσμα την απώλεια χυμών, την ξηρότητα και την κακή εμφάνιση του προϊόντος. Το PSE κρέας είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητο στις βιομηχανίες παραγωγής αλλαντικών και προϊόντων με βάση το κρέας, καθώς δεν συγκρατεί καλά την άλμη και αλλοιώνει την τελική υφή (Adzitey & Huda, 2011).

- **DFD (Dark, Firm, Dry) κρέας:** Αντίθετα με το PSE, το DFD κρέας χαρακτηρίζεται από σκούρο χρώμα, σφιχτή υφή και ξηρή επιφάνεια. Προκύπτει όταν, λόγω μακροχρόνιου στρες πριν από τη σφαγή, τα αποθέματα γλυκογόνου στους μυς εξαντλούνται, με αποτέλεσμα να μην παραχθεί επαρκής ποσότητα γαλακτικού οξέος μετά τη σφαγή. Αυτό οδηγεί σε υψηλό τελικό pH (>6,0), γεγονός που ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών και μειώνει τη διάρκεια ζωής του κρέατος. Η χαμηλή οξύτητα εμποδίζει τη φυσιολογική πρωτεϊνική αποικοδόμηση και τη μετανάστευση υγρών, με αποτέλεσμα το κρέας να είναι σκληρό και λιγότερο ελκυστικό για τον καταναλωτή (Belcher, 2006). Παρά την ανεπιθύμητη εμφάνισή του, το DFD κρέας έχει υψηλή WHC και συχνά θεωρείται καταλληλότερο για προϊόντα όπως λουκάνικα και καπνιστά αλλαντικά, όπου η συγκράτηση υγρασίας είναι επιθυμητή.

Χρώμα

Το χρώμα του κρέατος αποτελεί βασικό κριτήριο αποδοχής από τον καταναλωτή και εξαρτάται από τη συγκέντρωση της μυοσφαιρίνης και την κατάστασή της. Η οξυμυοσφαιρίνη (ένωση με οξυγόνο) προσδίδει το έντονο κόκκινο χρώμα, ενώ η μεθαιμοσφαιρίνη (οξειδωμένη μορφή) οδηγεί σε καφέ αποχρώσεις, ένδειξη υποβάθμισης του προϊόντος. Η συσκευασία του κρέατος

και η διαχείριση της ατμόσφαιρας κατά την αποθήκευση παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση του επιθυμητού χρωματισμού (Mancini & Hunt, 2005).

Ικανότητα Συγκράτησης Νερού (WHC – Water Holding Capacity)

Η WHC επηρεάζει άμεσα την ικανότητα συγκράτησης υγρών και την τρυφερότητα του κρέατος. Κρέας με χαμηλή WHC (π.χ. PSE) εμφανίζει αυξημένες απώλειες υγρών, με αρνητικές επιπτώσεις στην εμφάνιση και την τεχνολογική του επεξεργασία, ενώ κρέας με υψηλή WHC (π.χ. DFD) συγκρατεί υπερβολικά υγρά, γεγονός που μπορεί να μειώσει τη σταθερότητα του προϊόντος (Belcher, 2006).

Ενδομυϊκό Λίπος (Μαρμαρώδης Υφή)

Η κατανομή του λίπους εντός των μυϊκών ινών επηρεάζει τη γεύση, την ικανότητα συγκράτησης υγρών και τη γενική αποδοχή του κρέατος από τους καταναλωτές. Το υψηλό επίπεδο ενδομυϊκού λίπους σχετίζεται με ανώτερη ποιότητα, ιδιαίτερα σε κομμάτια κρέατος που προορίζονται για υψηλής αξίας προϊόντα (Wood et al., 2008).

Μικροβιολογικές Παράμετροι Ποιότητας

Η μικροβιολογική κατάσταση του κρέατος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διάρκεια ζωής και την ασφάλειά του. Το μικροβιακό φορτίο αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και υπό ακατάλληλες συνθήκες αποθήκευσης, οδηγώντας σε αλλοίωση του προϊόντος. Οι σημαντικότεροι αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί περιλαμβάνουν:

- ***Pseudomonas spp.***: Κυριότερος αλλοιογόνος μικροοργανισμός σε αερόβιες συνθήκες, οι οποίοι αναπτύσσονται σε χαμηλές θερμοκρασίες και προκαλούν δυσάρεστη οσμή και σχηματισμό βλέννας στην επιφάνεια του κρέατος (Jay et al., 2005).

- ***Enterobacteriaceae***: Η παρουσία αυτών των βακτηρίων αποτελεί ένδειξη ανεπαρκούς υγιεινής χειρισμού, καθώς βρίσκονται κυρίως στο γαστρεντερικό σύστημα των ζώων και μπορούν να μεταφερθούν στο κρέας μέσω διασταυρούμενης επιμόλυνσης κατά τη σφαγή ή την επεξεργασία (Gill, 2007).
- **Οξυγαλακτικά βακτήρια (LAB)**: Αυτοί οι μικροοργανισμοί κυριαρχούν σε αναερόβιες συνθήκες (όπως σε προϊόντα συσκευασμένα υπό κενό) και συνήθως δεν είναι παθογόνοι. Ωστόσο, σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να προκαλέσουν ξινή οσμή και αλλοιώσεις γεύσης, επηρεάζοντας την εμπορική αξία του προϊόντος (Leistner & Gorris, 1995).

1.2.2. Παράμετροι Υγιεινής του Κρέατος

Η υγιεινή του κρέατος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια των τροφίμων και την προστασία της δημόσιας υγείας. Οι παράμετροι υγιεινής περιλαμβάνουν τη μικροβιολογική και χημική αξιολόγηση του κρέατος, με στόχο την ανίχνευση επιμολύνσεων, την τήρηση των νομοθετικών ορίων και τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα διεθνή πρότυπα ασφάλειας τροφίμων. Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΚ) 2073/2005, καθορίζονται ανώτατα επιτρεπτά όρια για συγκεκριμένους μικροοργανισμούς, ενώ οι επιχειρήσεις τροφίμων υποχρεούνται να πραγματοποιούν τακτικούς ελέγχους για την επιβεβαίωση της συμμόρφωσης (European Commission, 2005). Οι βασικές μικροβιολογικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της υγιεινής κατάστασης του κρέατος περιλαμβάνουν:

Συνολικός Αριθμός Αερόβιων Μεσόφιλων Μικροοργανισμών

Η καταμέτρηση των αερόβιων μεσόφιλων βακτηρίων αποτελεί έναν από τους κύριους δείκτες της μικροβιακής κατάστασης του κρέατος. Ο αριθμός τους παρέχει μια συνολική εικόνα της μικροβιακής φόρτισης του τροφίμου και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της υγιεινής των

διαδικασιών σφαγής, επεξεργασίας και αποθήκευσης. Υψηλές τιμές αυτού του δείκτη υποδηλώνουν ανεπαρκή ψύξη, κακές συνθήκες συντήρησης ή διασταυρούμενη επιμόλυνση κατά τη διάρκεια του χειρισμού του κρέατος (Jay et al., 2005).

Enterobacteriaceae

Τα βακτήρια της οικογένειας *Enterobacteriaceae* περιλαμβάνουν μικροοργανισμούς όπως η *Salmonella spp.* και η *Escherichia coli*, που αποτελούν βασικούς δείκτες ορθής υγιεινής πρακτικής στη σφαγή και στον χειρισμό του κρέατος. Η παρουσία τους στο νωπό κρέας μπορεί να υποδεικνύει ανεπαρκείς συνθήκες καθαρισμού και απολύμανσης στον εξοπλισμό και στις επιφάνειες εργασίας (Gill, 2007). Ο έλεγχος της συγκέντρωσης των *Enterobacteriaceae* χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των προληπτικών μέτρων και των διαδικασιών παραγωγής.

***Escherichia coli* (Κολοβακτηρίδιο) ως Δείκτης Κοπρανώδους Επιμόλυνσης**

Η παρουσία της *Escherichia coli* στο νωπό κρέας αποτελεί δείκτη κοπρανώδους επιμόλυνσης, γεγονός που μπορεί να σχετίζεται με ανεπαρκή απομάκρυνση του εντερικού περιεχομένου κατά τη σφαγή ή με κακές πρακτικές υγιεινής στον χειρισμό του κρέατος (Tompkin, 2002). Υψηλά επίπεδα *E. coli* μπορεί να καταστήσουν το προϊόν μη ασφαλές για κατανάλωση, καθώς ορισμένα στελέχη (π.χ. *E. coli* O157:H7) είναι παθογόνα και μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές τροφιμογενείς λοιμώξεις (Mead et al., 1999).

***Salmonella spp.*: Παθογόνος Μικροοργανισμός Υψηλής Επικινδυνότητας**

Η *Salmonella spp.* είναι ένας από τους σημαντικότερους παθογόνους μικροοργανισμούς που ελέγχονται στη βιομηχανία τροφίμων. Η παρουσία της στο κρέας θεωρείται μη αποδεκτή, καθώς σχετίζεται με σοβαρές τροφιμογενείς λοιμώξεις (EFSA, 2021). Σύμφωνα με την

ευρωπαϊκή νομοθεσία, τα δείγματα νωπού κρέατος πρέπει να είναι απαλλαγμένα από *Salmonella* σε συγκεκριμένα όρια ανάλυσης, διαφορετικά το προϊόν αποσύρεται από την αγορά (European Commission, 2005).

***Listeria monocytogenes*: Κίνδυνος σε Χαμηλές Θερμοκρασίες**

Η *Listeria monocytogenes* είναι ένα εν δυνάμει παθογόνο βακτήριο που μπορεί να επιβιώσει και να αναπτυχθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας το επικίνδυνο ακόμα και σε προϊόντα που διατηρούνται στη συντήρηση (Farber & Peterkin, 1991). Για τα νωπά κρέατα, ο έλεγχος επικεντρώνεται στη διασφάλιση ότι το βακτήριο δεν αναπτύσσεται σε επίπεδα >100 CFU/g κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.

1.3. Αλλοίωση Νωπών Κρεάτων: Μικροβιολογικοί και Χημικοί Παράγοντες

Η αλλοίωση του νωπού κρέατος είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που οφείλεται σε μικροβιολογικές και χημικές διεργασίες, οι οποίες δρουν ταυτόχρονα και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, οδηγώντας στη σταδιακή ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Αυτές οι αλλοιώσεις μπορεί να μειώσουν τη διάρκεια ζωής του κρέατος, να το καταστήσουν μη αποδεκτό για τον καταναλωτή ή ακόμα και μη ασφαλές προς κατανάλωση.

Είναι σημαντικό να διακρίνουμε τις παραμέτρους ποιότητας από τις παραμέτρους υγιεινής. Οι πρώτες σχετίζονται με χαρακτηριστικά όπως η εμφάνιση, η γεύση και η διάρκεια ζωής του κρέατος, ενώ οι δεύτερες αφορούν την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και τη συμμόρφωση με τα νομοθετικά όρια ασφάλειας τροφίμων (European Commission, 2005).

Οι μηχανισμοί αλλοίωσης του κρέατος περιλαμβάνουν:

- Βιοχημικές διεργασίες, όπως η οξείδωση λιπιδίων και η πρωτεόλυση, που αλλοιώνουν τη γεύση, το χρώμα και την υφή του προϊόντος.

- Μικροβιολογικές διεργασίες, όπως ο πολλαπλασιασμός βακτηρίων που προκαλούν δυσάρεστες οσμές και μεταβολές στη σύσταση του κρέατος.

Ο έλεγχος αυτών των διεργασιών μέσω σωστής διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας είναι κρίσιμος για τη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας του κρέατος.

1.3.1. Βιοχημικές Αλλοιώσεις

Οι βιοχημικές αλλοιώσεις του κρέατος σχετίζονται με ενδογενείς μεταβολικές διεργασίες και χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη συντήρηση και αποθήκευσή του. Οι κύριες βιοχημικές αλλοιώσεις περιλαμβάνουν:

- **Οξείδωση των λιπιδίων:** Πρόκειται για μια αυτοκαταλυτική διαδικασία κατά την οποία τα ακόρεστα λιπαρά οξέα οξειδώνονται, οδηγώντας στο σχηματισμό υπεροξειδίων λιπιδίων και δευτερογενών προϊόντων οξείδωσης, όπως αλδεϋδες και κετόνες, τα οποία είναι υπεύθυνα για το τάγγισμα και τη δημιουργία δυσάρεστων οσμών (Ladikos & Lougonois, 1990). Η οξείδωση των λιπιδίων επιταχύνεται από παράγοντες όπως το οξυγόνο, το φως και η αυξημένη θερμοκρασία αποθήκευσης, καθιστώντας την ψύξη και τη σωστή συσκευασία απαραίτητες για την επιβράδυνση της διαδικασίας.
- **Αποδόμηση πρωτεϊνών:** Οι πρωτεΐνες του κρέατος υφίστανται υδρόλυση και αποδόμηση από πρωτεολυτικά ένζυμα και βακτήρια, με αποτέλεσμα την παραγωγή πτητικών αζωτούχων ενώσεων, όπως αμμωνία, σουλφίδια και αμίνες, που προκαλούν έντονη, δυσάρεστη οσμή (Shahidi, 1994). Ο ρυθμός αυτής της αποδόμησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη μικροβιακή επιμόλυνση.

1.3.2 Μικροβιολογικές Αλλοιώσεις

Οι μικροβιολογικές αλλοιώσεις του νωπού κρέατος προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό αλλοιογόνων βακτηρίων, τα οποία μεταβολίζουν θρεπτικά συστατικά και παράγουν προϊόντα που αλλοιώνουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου. Οι κυριότερες μορφές μικροβιακής αλλοίωσης περιλαμβάνουν:

- **Αερόβια αλλοίωση:** Η αερόβια αλλοίωση του κρέατος προκαλείται κυρίως από βακτήρια του γένους *Pseudomonas spp.*, τα οποία επικρατούν σε περιβάλλοντα με υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου, όπως στα νωπά κρέατα που αποθηκεύονται υπό ψύξη σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (Ercolini et al., 2006). Τα βακτήρια αυτά διαθέτουν ένζυμα που διασπούν πρωτεΐνες και λιπίδια, οδηγώντας στη συσσώρευση πτητικών ενώσεων, οι οποίες συμβάλλουν στην ανάπτυξη δυσάρεστων οσμών και στον σχηματισμό βλέννας στην επιφάνεια του προϊόντος (Doulgeraki et al., 2012). Επιπλέον, η αποικοδόμηση της μυοσφαιρίνης και η οξείδωση των λιπιδίων ευθύνονται για την αλλοίωση του χρώματος του κρέατος, μετατρέποντάς το από έντονο κόκκινο σε καφέ-γκρι (Casaburi et al., 2015). Παρότι ορισμένα είδη, όπως το *Pseudomonas fluorescens* και το *Pseudomonas aeruginosa*, είναι γνωστά για την παραγωγή χρωστικών ουσιών (π.χ. πυοκυανίνη, πυοβερδίνη), η παρουσία τους στο αλλοιωμένο κρέας δεν αποτελεί τη βασική αιτία αλλαγής του χρώματος, καθώς αυτή αποδίδεται κυρίως σε βιοχημικές μεταβολές της μυοσφαιρίνης και των λιπιδίων (Doulgeraki et al., 2012).
- **Αναερόβια αλλοίωση:** Παρατηρείται σε προϊόντα που έχουν υποστεί συσκευασία υπό κενό ή σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα (Modified Atmosphere Packaging - MAP), όπου το οξυγόνο είναι περιορισμένο. Σε αυτές τις συνθήκες, κυριαρχούν βακτήρια όπως οι γαλακτοβάκิลλοι (*Lactic Acid Bacteria - LAB*), καθώς και το *Brochothrix thermosphacta*, που παράγουν οργανικά οξέα, αιθανόλη και άλλες πτητικές ενώσεις, οδηγώντας στην ανάπτυξη όξινης ή αλλοιωμένης οσμής (Koutsoumanis et al., 2006;

Casaburi et al., 2015). Αν και τα LAB δεν θεωρούνται παθογόνα, η ανάπτυξη αναερόβιων βακτηρίων όπως το *Clostridium spp.* μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια του τροφίμου, ιδιαίτερα όταν δεν τηρούνται οι βέλτιστες συνθήκες ψύξης (Doulgeraki et al., 2012).

- **Αλλοίωση από προαιρετικά αναερόβια βακτήρια:** Ορισμένα βακτήρια, όπως το *Enterobacteriaceae* και το *Brochothrix thermosphacta*, μπορούν να αναπτυχθούν τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες συνθήκες, επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα του κρέατος. Το *Brochothrix thermosphacta* παράγει πτητικές ενώσεις όπως διακυλικά κετόνες και αιθανόλη, συμβάλλοντας στην εμφάνιση δυσάρεστης οσμής και στη μείωση της καταλληλότητας του προϊόντος (Casaburi et al., 2015).

Η μικροβιακή αλλοίωση του κρέατος δεν αποτελεί απαραίτητα ένδειξη επικινδυνότητας, καθώς τα αλλοιογόνα βακτήρια επηρεάζουν κυρίως τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής του (Ercolini et al., 2006).

1.4. Νομοθετικό Πλαίσιο και Κριτήρια Ασφάλειας και Υγιεινής του Κρέατος

Η ασφάλεια και η υγιεινή του κρέατος ρυθμίζονται από διεθνείς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς, με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και τη διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων.

Ο Κανονισμός (ΕΚ) 2073/2005 ορίζει τα μικροβιολογικά κριτήρια για το κρέας, τα οποία διακρίνονται σε:

1. **Κριτήρια Ασφάλειας Τροφίμων:** Αφορούν παθογόνους μικροοργανισμούς που δεν πρέπει να ανιχνεύονται ή πρέπει να βρίσκονται κάτω από συγκεκριμένα όρια στα τελικά προϊόντα πριν από τη διάθεσή τους στην αγορά. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes* και οι τοξινογόνες μορφές *Escherichia coli* (EFSA, 2021).

2. **Κριτήρια Υγιεινής της Διαδικασίας:** Επικεντρώνονται στην αξιολόγηση των υγειονομικών πρακτικών κατά την παραγωγή και επεξεργασία του κρέατος, χωρίς να σχετίζονται άμεσα με την ασφάλεια του τελικού προϊόντος. Βακτήρια όπως *Escherichia coli*, *Enterobacteriaceae* και ο συνολικός αριθμός αερόβιων μικροοργανισμών χρησιμοποιούνται ως δείκτες υγιεινής για τον έλεγχο των διαδικασιών σφαγής, μεταφοράς και αποθήκευσης (Tompkin, 2002; Gill, 2007).

Η συμμόρφωση με αυτά τα κριτήρια είναι νομικά δεσμευτική και προϋπόθεση για τη διάθεση του κρέατος στην αγορά, διασφαλίζοντας τόσο την καταλληλότητά του για κατανάλωση όσο και την εφαρμογή ορθών πρακτικών επεξεργασίας και διανομής (European Commission, 2005).

1.5. Μέθοδοι συσκευασίας για τη συντήρηση του κρέατος και των προϊόντων του

Η συσκευασία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ποιότητας, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής του κρέατος, ελαχιστοποιώντας τους παράγοντες που συμβάλλουν στην αλλοίωσή του. Οι κυριότερες τεχνικές συσκευασίας περιλαμβάνουν την έξυπνη και ενεργή συσκευασία, τη συσκευασία υπό κενό και τη συσκευασία σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP).

- **Έξυπνη συσκευασία (Intelligent Packaging):** Περιλαμβάνει αισθητήρες και δείκτες που παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του προϊόντος, όπως αλλαγές στη θερμοκρασία ή την ποιότητα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της διαχείρισης της ψυκτικής αλυσίδας (Han et al., 2018).
- **Ενεργή συσκευασία (Active Packaging):** Περιλαμβάνει υλικά που αλληλεπιδρούν με το προϊόν ή το περιβάλλον της συσκευασίας, π.χ. απορροφητές οξυγόνου που επιβραδύνουν την οξείδωση και αντιμικροβιακές επικαλύψεις που μειώνουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών (Ahvenainen, 2003).

- **Συσκευασία υπό κενό (Vacuum Packaging):** Με την απομάκρυνση του αέρα, η μέθοδος αυτή περιορίζει την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών και μειώνει την οξείδωση των λιπιδίων, συμβάλλοντας στη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος (Sperber & Doyle, 2009).
- **Συσκευασία σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP):** Αντικαθιστά τον αέρα εντός της συσκευασίας με ελεγχόμενα μείγματα αερίων, όπως διοξείδιο του άνθρακα και άζωτο, προσαρμοσμένα στο εκάστοτε προϊόν για τη διατήρηση του χρώματος και τη μείωση της ανάπτυξης αλλοιογόνων βακτηρίων (Jakobsen & Bertelsen, 2002).

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το είδος του κρέατος και τις απαιτήσεις συντήρησής του, ενώ η συνδυαστική εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.

1.6 Προηγμένη τεχνολογία στον έλεγχο της ψυκτικής αλυσίδας

Η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών στη διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας των προϊόντων κατά τη μεταφορά και αποθήκευσή τους. Οι κύριες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό περιλαμβάνουν: Χρόνοθερμοκρασιακούς Δείκτες (TTIs), Internet of Things (IoT), Blockchain και Radio Frequency Identification (RFID).

➤ Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες (TTIs)

Οι TTIs είναι χημικοί ή ενζυμικοί αισθητήρες που μεταβάλλουν το χρώμα ή τη δομή τους ανάλογα με την έκθεση σε θερμοκρασία και χρόνο. Χρησιμοποιούνται ως οπτικοί δείκτες φρεσκότητας και παρέχουν πληροφορίες για τυχόν θερμικές καταπονήσεις των προϊόντων

(Taoukis & Labuza, 2003). Η χρήση τους μειώνει τις απορρίψεις και ενισχύει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας (Koutsoumanis et al., 2016).

➤ **Internet of things (IoT)**

Το IoT επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της ψυκτικής αλυσίδας μέσω αισθητήρων που μετρούν και μεταδίδουν δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας σε πραγματικό χρόνο (Zhang et al., 2021). Η τεχνολογία αυτή παρέχει αυτοματοποιημένη ανάλυση κινδύνων, διευκολύνοντας την άμεση παρέμβαση σε περιπτώσεις αποκλίσεων (Badia-Melis et al., 2018).

➤ **Τεχνολογία Blockchain**

Η τεχνολογία Blockchain επιτρέπει ασφαλή, αδιάβλητη και διαφανή καταγραφή δεδομένων για κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας, βελτιώνοντας την ιχνηλασιμότητα και την εμπιστοσύνη μεταξύ των εμπλεκόμενων (Tian, 2017). Επιπλέον, η σύνδεση Blockchain και IoT επιτρέπει την αυτόματη καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, περιορίζοντας τις περιπτώσεις απάτης ή λαθών.

➤ **Radio Frequency Identification (RFID)**

Τα συστήματα RFID χρησιμοποιούν ετικέτες με ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές για την αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση προϊόντων σε όλη τη διάρκεια της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η τεχνολογία RFID μειώνει τα ανθρώπινα λάθη και βελτιώνει την ακρίβεια στον έλεγχο των αποθεμάτων, ειδικά όταν συνδυάζεται με Blockchain για πλήρη ιχνηλασιμότητα (Abad et al., 2009).

Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών βελτιώνει την ασφάλεια των προϊόντων, αυξάνει τη διαφάνεια της εφοδιαστικής αλυσίδας και μειώνει τις απώλειες λόγω θερμοκρασιακών αποκλίσεων. Καθώς η βιομηχανία τροφίμων και φαρμάκων προσαρμόζεται στις νέες

απαιτήσεις της παγκόσμιας αγοράς, η υιοθέτηση καινοτόμων λύσεων στην ψυκτική αλυσίδα καθίσταται επιτακτική.

1.7. Σπατάλη τροφίμων: Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις - Σύγχρονες στρατηγικές μείωσης σπατάλης τροφίμων

Η σπατάλη τροφίμων αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα παγκόσμια προβλήματα, με σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας του ΟΗΕ (FAO), περίπου 1,3 δισεκατομμύρια τόνοι τροφίμων χάνονται ή σπαταλώνται κάθε χρόνο, αντιπροσωπεύοντας το 30% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής (FAO, 2021).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της σπατάλης τροφίμων περιλαμβάνουν την επιβάρυνση του κλίματος, καθώς εκτιμάται ότι ευθύνεται για το 8-10% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2022). Ιδιαίτερα οι απώλειες προϊόντων ζωικής προέλευσης, όπως το κρέας, έχουν υψηλότερο περιβαλλοντικό κόστος, καθώς απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες νερού, ενέργειας και ζωοτροφών για την παραγωγή τους.

Από οικονομική άποψη, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η συνολική σπατάλη τροφίμων ανέρχεται σε 58,5 εκατομμύρια τόνους ετησίως, με το οικονομικό κόστος να υπολογίζεται στα 143 δισεκατομμύρια ευρώ (Eurostat, 2022). Το λιανεμπόριο και οι καταναλωτές είναι υπεύθυνοι για περισσότερο από το 50% της σπατάλης, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για αποτελεσματικότερη διαχείριση των αποθεμάτων και καλύτερη ενημέρωση των καταναλωτών.

Σύγχρονες Στρατηγικές Μείωσης της Σπατάλης

Η μείωση της σπατάλης τροφίμων αποτελεί προτεραιότητα για την αειφορία του παγκόσμιου συστήματος τροφίμων. Στρατηγικές που εστιάζουν στη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής

αλυσίδας, την εφαρμογή τεχνολογιών ιχνηλασιμότητας και τη δυναμική διαχείριση των αποθεμάτων έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές (Koutsoumanis et al., 2016).

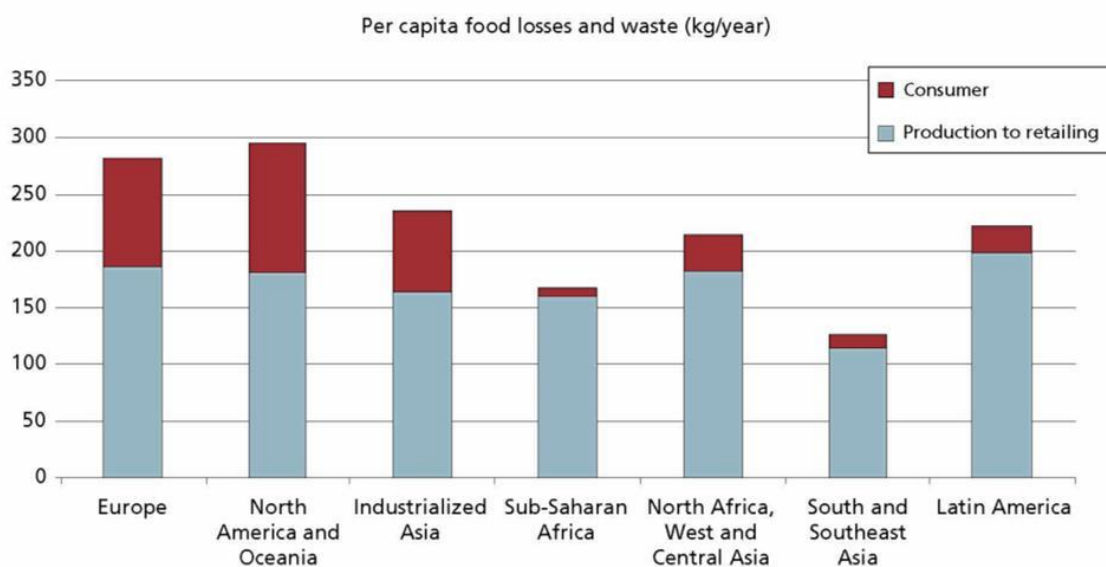
Έξυπνες τεχνολογίες ψυκτικής αλυσίδας: Η χρήση Δεικτών Χρόνου-Θερμοκρασίας (TTI), αισθητήρων IoT και Blockchain βελτιώνει την παρακολούθηση των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο και αποτρέπει απώλειες λόγω θερμοκρασιακών αποκλίσεων (Tian, 2017).

Δυναμική τιμολόγηση: Η προσαρμογή των τιμών βάσει της φρεσκότητας των προϊόντων μπορεί να μειώσει τη σπατάλη, επιτρέποντας την πώληση προϊόντων με μικρότερη διάρκεια ζωής σε χαμηλότερη τιμή (Badia-Melis et al., 2018).

Δωρεά τροφίμων: Τα πλεονάζοντα προϊόντα μπορούν να διατίθενται σε τράπεζες τροφίμων μέσω συστημάτων ιχνηλασιμότητας, προλαμβάνοντας τη σπατάλη και ενισχύοντας την κοινωνική αλληλεγγύη (FAO, 2022).

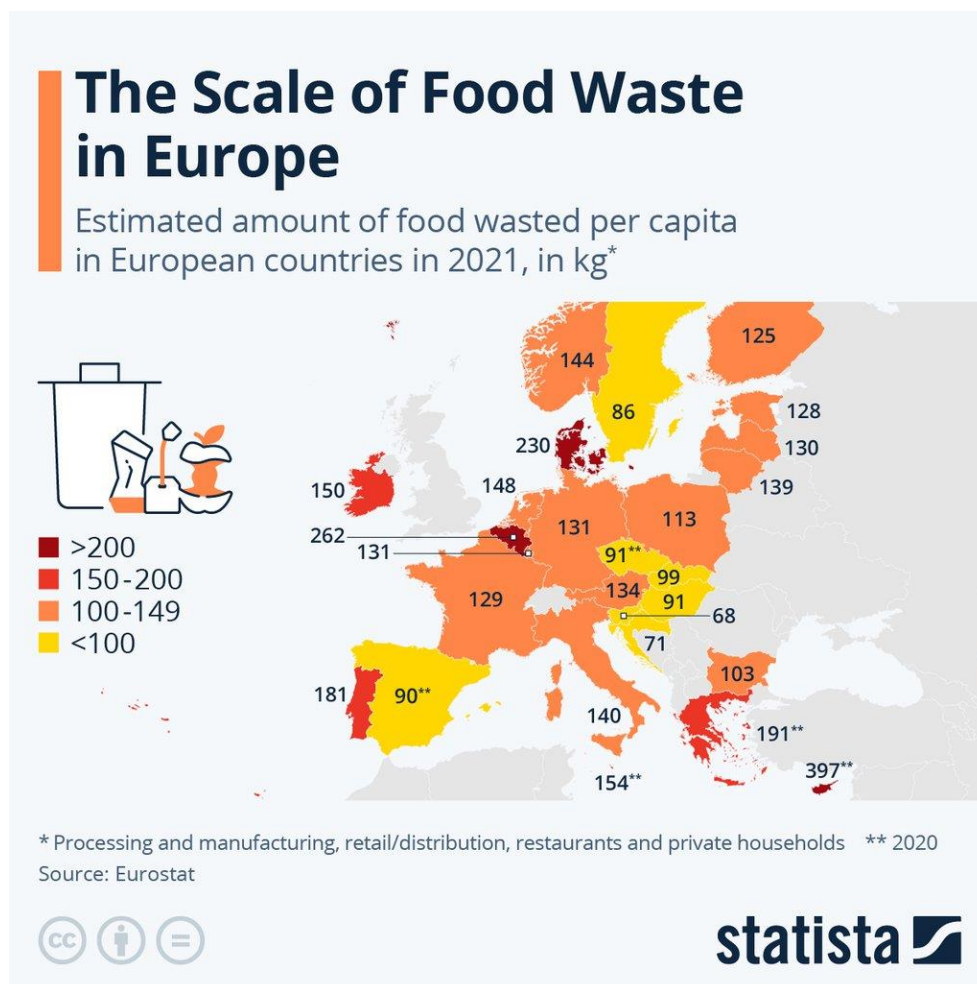
Εκπαίδευση καταναλωτών: Η ενημέρωση για την ορθή αποθήκευση και κατανάλωση τροφίμων μπορεί να περιορίσει τη σπατάλη στο επίπεδο των νοικοκυριών (WRAP, 2021).

Ανάλυση Δεδομένων Σπατάλης Τροφίμων



Σχήμα 1: Διάγραμμα απώλειας και σπατάλης τροφίμων κατά κεφαλήν παγκοσμίως στο στάδιο της κατανάλωσης και στο στάδιο πριν την κατανάλωση. (Πηγή: FAO, 2013)

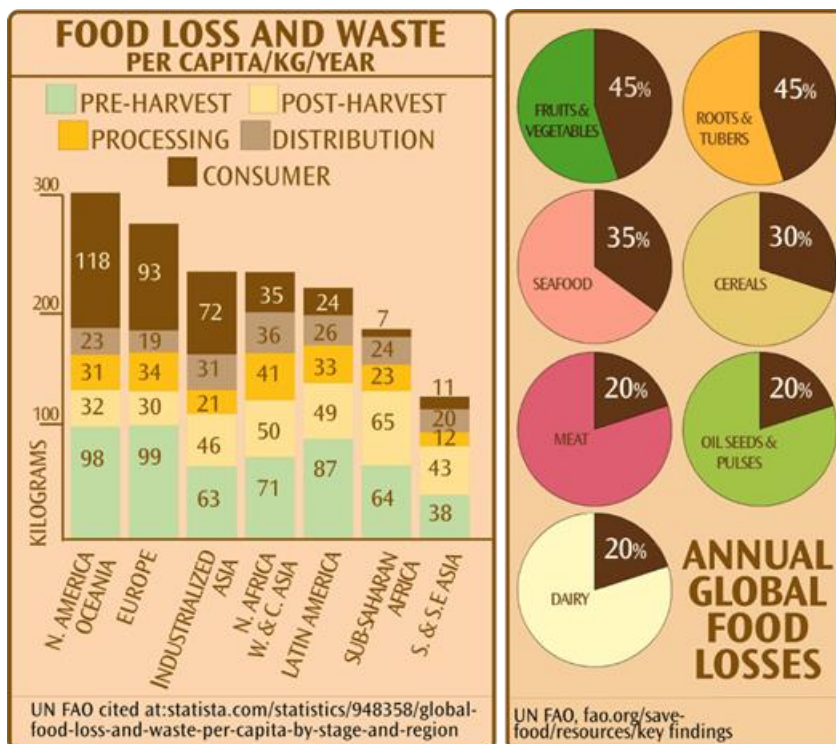
Σύμφωνα με το Σχήμα 1, η παγκόσμια σπατάλη τροφίμων κατανέμεται ανομοιόμορφα μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων περιοχών. Στις ανεπτυγμένες χώρες, το μεγαλύτερο ποσοστό της σπατάλης προέρχεται από το στάδιο της κατανάλωσης, ενώ στις αναπτυσσόμενες περιοχές οι απώλειες καταγράφονται κυρίως κατά την παραγωγή και μεταποίηση (FAO, 2021).



Σχήμα 2: Χάρτης σπατάλης τροφίμων στην Ευρώπη (Πηγή: Eurostat, μέσω Statista)

Σύμφωνα με το Σχήμα 2, οι διαφορές στη σπατάλη τροφίμων στην Ευρώπη είναι εμφανείς τόσο γεωγραφικά όσο και πολιτισμικά. Οι χώρες της Βόρειας και Δυτικής Ευρώπης παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές (>200 kg/άτομο), πιθανώς λόγω διαφορετικών καταναλωτικών συνηθειών, υψηλών επιπέδων υπερκατανάλωσης και διαφορετικών μοντέλων λιανεμπορίου. Αντίθετα, στις χώρες της Ανατολικής και Νότιας Ευρώπης, όπου η παραδοσιακή αποθήκευση

και η μικρότερη εξάρτηση από προϊόντα βραχείας διάρκειας ζωής είναι συνηθέστερα, τα επίπεδα σπατάλης είναι χαμηλότερα (Eurostat, 2021).



Σχήμα 3: Σπατάλη τροφίμων κατά κεφαλήν (kg/έτος) ανά στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας και περιοχή σπατάλης τροφίμων στην Ευρώπη. Πηγή: FAO (2011) και Statista (2017)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, η σπατάλη κρέατος αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής σπατάλης τροφίμων. Οι ανεπτυγμένες περιοχές, όπως η Βόρεια Αμερική, η Ευρώπη και η Βιομηχανική Ασία, καταγράφουν τα υψηλότερα επίπεδα, γεγονός που πιθανώς οφείλεται σε υπερκατανάλωση, υψηλά ποσοστά απόρριψης προϊόντων λόγω οργανοληπτικών αποκλίσεων και αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας στη λιανική αγορά (FAO, 2011, Statista, 2017). Στις αναπτυσσόμενες περιοχές, οι μεγαλύτερες απώλειες σημειώνονται στα πρώτα στάδια της παραγωγής και της εφοδιαστικής αλυσίδας, εξαιτίας περιορισμένων δυνατοτήτων συντήρησης και μεταφοράς, καθώς και ανεπαρκών υποδομών ψύξης.

Σχέση της Σπατάλης Τροφίμων με την Ψυκτική Αλυσίδα

Η σπατάλη τροφίμων συνδέεται άμεσα με την αποτελεσματικότητα της ψυκτικής αλυσίδας, ιδιαίτερα στην περίπτωση των ευπαθών προϊόντων, όπως το κρέας. Η διατήρηση σταθερών θερμοκρασιακών συνθηκών κατά τη μεταφορά και αποθήκευση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Koutsoumanis et al., 2010). Οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών, επιταχύνοντας την ποιοτική υποβάθμιση και συμβάλλοντας στην απόρριψη τροφίμων πριν από την κατανάλωση (Taoukis & Labuza, 2003).

Μία από τις πλέον καινοτόμες λύσεις για τη μείωση των απωλειών στην ψυκτική αλυσίδα είναι η χρήση Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI), οι οποίοι παρέχουν μια δυναμική ένδειξη της ποιοτικής κατάστασης των τροφίμων με βάση την αθροιστική επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου (SMAS, 2005). Οι TTI αποτελούν μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση έναντι της στατικής ημερομηνίας λήξης, καθώς αντικατοπτρίζουν πιο ακριβώς την πραγματική κατάσταση του προϊόντος, επιτρέποντας την πρόληψη πρόωρων απορρίψεων ασφαλών τροφίμων (Koutsoumanis et al., 2016).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Waldhans et al. (2024), η ενσωμάτωση των TTI σε συστήματα διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας που αξιοποιούν τεχνολογίες Blockchain και Internet of Things (IoT) επιτρέπει την αυτοματοποιημένη ανίχνευση θερμοκρασιακών αποκλίσεων και τη βελτίωση της πρόβλεψης της διάρκειας ζωής των προϊόντων. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ακρίβεια της παρακολούθησης των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τόσο τις περιπτώσεις τροφίμων που απορρίπτονται αδικαιολόγητα όσο και τις περιπτώσεις όπου καταναλώνονται προϊόντα που δεν πληρούν τις προδιαγραφές ασφαλείας (Tian, 2017).

Επιπλέον, οι TTI συμβάλλουν στη δυναμική τιμολόγηση των τροφίμων, δίνοντας τη δυνατότητα στο λιανεμπόριο να προσαρμόζει τις τιμές βάσει της εναπομένουσας φρεσκότητας των προϊόντων. Αυτή η πρακτική έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στη μείωση της σπατάλης

τροφίμων στο στάδιο της λιανικής πώλησης, καθώς παρέχει κίνητρα στους καταναλωτές να επιλέξουν προϊόντα που πλησιάζουν στη λήξη τους σε χαμηλότερη τιμή (Badia-Melis et al., 2018).

Συνολικά, η βελτίωση της ψυκτικής αλυσίδας μέσω της χρήσης των TTI και των έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης αποτελεί μια από τις πιο υποσχόμενες στρατηγικές για τη μείωση της σπατάλης τροφίμων. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν μια πιο ευέλικτη και προσαρμοστική προσέγγιση στη διαχείριση των αποθεμάτων, συμβάλλοντας τόσο στη διατήρηση της ποιότητας των τροφίμων όσο και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας του εφοδιαστικού συστήματος (Waldhans et al., 2024).

1.8 Ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι της μελέτης

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη χαρτογράφηση της ψυκτικής αλυσίδας του λιανεμπορίου και στην αξιολόγηση της επίδρασης των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην ποιότητα και την αλλοίωση των νωπών κρεάτων. Ο στόχος της έρευνας είναι να αξιολογηθεί η ευαισθησία των Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI) στην ανίχνευση θερμοκρασιακών αποκλίσεων κατά τη διανομή και αποθήκευση και πώς αυτές επηρεάζουν τη μικροβιολογική και φυσικοχημική ποιότητα των νωπών κρεάτων..

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που διαμορφώνονται είναι τα εξής:

- Πώς επηρεάζουν οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, όπως ανιχνεύονται από τους TTI, την ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών στο κρέας και ποιες είναι οι κρίσιμες τιμές που επιταχύνουν την αλλοίωση;
- Ποιος είναι ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των ενδείξεων των TTI και των αποτελεσμάτων των μικροβιολογικών και φυσικοχημικών αναλύσεων στην αξιολόγηση της ποιότητας του κρέατος;

- Σε ποιο βαθμό μπορεί η χρήση των TTI, λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία τους, να συμβάλει στη βελτίωση της διαχείρισης των αποθεμάτων και στη μείωση της σπατάλης τροφίμων στον τομέα του λιανεμπορίου;

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η μελέτη βασίζεται στη συστηματική παρακολούθηση της ψυκτικής αλυσίδας μέσω της χρήσης καταγραφικών θερμοκρασίας και Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI). Τα δεδομένα συλλέγονται από το κέντρο διανομής έως τα σημεία πώλησης, με στόχο τη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των ενδείξεων των TTI και των θερμοκρασιακών αποκλίσεων, καθώς και της σύνδεσής τους με μικροβιολογικές και φυσικοχημικές αλλοιώσεις στα προϊόντα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Σχεδιασμός μελέτης και πειραματική διαδικασία

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στη χαρτογράφηση της ψυκτικής αλυσίδας του λιανεμπορίου και στην αξιολόγηση της επίδρασης των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην ποιότητα και την αλλοίωση νωπών χοιρινών κρεάτων. Εξετάστηκε η διαδρομή των προϊόντων από το κέντρο διανομής προς τα τελικά σημεία διάθεσης, με παράλληλη προσομοίωση θερμοκρασιακών αποκλίσεων στο εργαστήριο, βάσει των ενδείξεων ευαισθησίας των Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI), οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των προϊόντων.

Για την παρακολούθηση των συνθηκών μεταφοράς και αποθήκευσης, χρησιμοποιήθηκαν Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες (TTI) και ασύρματα καταγραφικά θερμοκρασίας, τα οποία κατέγραψαν τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Στη μελέτη εξετάστηκαν διαφορετικοί τύποι TTI, με στόχο την επιλογή του καταλληλότερου ως εργαλείο ανίχνευσης κρίσιμων θερμοκρασιακών αποκλίσεων και καθορισμού των σημείων αξιολόγησης της αλλοίωσης των προϊόντων.

Τα προϊόντα παραλήφθηκαν από το κέντρο διανομής στα Οινόφυτα Βοιωτίας κι έγινε διανομή σε καταστήματα λιανεμπορίου στο Ηράκλειο και στο Ρέθυμνο της Κρήτης, ενώ το εργαστήριο ανάλυσης βρισκόταν επίσης στην ίδια περιοχή. Η Κρήτη επιλέχθηκε ως περιοχή δοκιμής, καθώς καταγράφει τις υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες στην Ελλάδα κατά τη θερινή περίοδο, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο θερμοκρασιακών αποκλίσεων κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση των προϊόντων.

Πριν την αποστολή, τα προϊόντα θερμομετρήθηκαν στο κέντρο διανομής με τη χρήση θερμομέτρου ακίδας, διακριβωμένου σύμφωνα με τα προβλεπόμενα πρότυπα, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι πληρούσαν τις προδιαγραφές συντήρησης της ψυκτικής αλυσίδας.

Τα προϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρία διαφορετικά είδη χοιρινού κρέατος, όλα εισαγόμενα από την Ολλανδία:

- Κεφάλι Φιλέτου Χοιρινού: Συσκευασμένο σε κενό αέρος (vacuum).
- Πανσέτα Deli A/O A/Δ: Αρχικά συσκευασμένη σε vacuum, αλλά μεταφέρθηκε σε αποστειρωμένες σακούλες δειγματοληψίας μετά την επεξεργασία στο κατάστημα.
- Χοιρινή Σπάλα 4D: Αρχικά συσκευασμένη σε vacuum, αλλά μεταφέρθηκε σε αποστειρωμένες σακούλες δειγματοληψίας μετά την επεξεργασία στο κατάστημα.

Η επιλογή των συγκεκριμένων τύπων προϊόντων έγινε με βάση την επάρκειά τους τη χρονική στιγμή της μελέτης, καθώς και τη σύνθεση και το προφίλ αλλοίωσης. Η πανσέτα και η χοιρινή σπάλα επιλέχθηκαν λόγω ομοιότητας στη συσκευασία και στη μικροβιολογική και φυσικοχημική τους συμπεριφορά, επιτρέποντας τη συγκριτική ανάλυσή τους υπό διαφορετικές συνθήκες αποθήκευσης.

Οι αποστολές των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στις 6/12/24, 12/12/24 & 14/2/25, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αποστολές απέτυχαν λόγω προβλημάτων στη διαχείριση των TTI. Τα δείγματα αυτά δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση, καθώς δεν πληρούσαν τα κριτήρια αξιολόγησης.

Τα δείγματα ακολούθησαν την τυπική διαδικασία διανομής, ενώ στο εργαστήριο προσομοιώθηκαν διαταραχές της ψυκτικής αλυσίδας, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών στην ποιότητα του προϊόντος. Η μελέτη στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των αποθεμάτων και στη μείωση των απωλειών λόγω αλλοίωσης, αξιοποιώντας τους Δείκτες Χρόνου-Θερμοκρασίας (TTI) όχι μόνο ως εργαλείο παρακολούθησης, αλλά και ως σημείο αναφοράς για την ενεργοποίηση των μικροβιολογικών, φυσικοχημικών και μακροσκοπικών αξιολογήσεων, ανάλογα με τη χρωματική τους μεταβολή και τη θερμοκρασιακή επιβάρυνση που κατέγραψαν.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, λήφθηκαν φωτογραφίες των προϊόντων και των δεικτών TTI σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας, προκειμένου να καταγραφούν οι αλλαγές στην

κατάστασή τους. Οι φωτογραφίες αυτές θα συμπεριληφθούν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων για την οπτική τεκμηρίωση της επίδρασης των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην ποιότητα των προϊόντων. Οι χρονικές στιγμές λήψης βασίστηκαν στη μεταβολή των TTI, ώστε να τεκμηριωθεί η αλληλουχία θερμικής επιβάρυνσης και η οπτική αλλοίωση των προϊόντων.

Η μικροβιολογική και φυσικοχημική ανάλυση, καθώς και η μακροσκοπική αξιολόγηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της συντήρησής τους, μέχρι την ημερομηνία λήξης τους.

Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν τα εξής σενάρια:

- Σενάριο 1^ο : Ανάλυση απευθείας με την παραλαβή του δείγματος από το κατάστημα.
- Σενάριο 2^ο : Ανάλυση 2 μέρες μετά την παραλαβή του δείγματος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα.
- Σενάριο 3^ο : Ανάλυση 3 μέρες πριν την ημερομηνία λήξης του προϊόντος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα.
- Σενάριο 4^ο : Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα.
- Σενάριο 5^ο : Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον δεν προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος αλλά συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C.
- Σενάριο 6^ο : Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα.

2.2 Όργανα και Εξοπλισμός

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο οργάνων και συστημάτων παρακολούθησης της ψυκτικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένων καταγραφικών θερμοκρασίας, δεικτών χρόνου-θερμοκρασίας (TTI) και θερμομέτρου ακίδας. Ο εξοπλισμός αυτός επιλέχθηκε βάσει της αξιοπιστίας, της ακρίβειας των μετρήσεων και της δυνατότητας εφαρμογής σε εμπορικές συνθήκες διανομής και αποθήκευσης τροφίμων.

Καταγραφικά θερμοκρασίας

Για τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκαν καταγραφικά θερμοκρασίας Testo Saveris 2-H1. Το συγκεκριμένο μοντέλο διαθέτει αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, επιτρέποντας την καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα καταγραφικά τοποθετήθηκαν εντός των κιβωτίων μεταφοράς, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το εσωτερικό των συσκευασιών, προκειμένου να καταγραφεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος των προϊόντων.

Τεχνικά χαρακτηριστικά Testo Saveris 2-H1:

- Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: -30°C έως +50°C
- Ακρίβεια: $\pm 0.5^\circ\text{C}$
- Δυνατότητα καταγραφής υγρασίας: 0-100% RH
- Ρυθμός καταγραφής: Ανά 15 λεπτά
- Δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης μέσω cloud

Η χρήση των καταγραφικών αυτών επέτρεψε την αποτύπωση τυχόν θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη μεταφορά των δειγμάτων από το κέντρο διανομής στα καταστήματα στην Κρήτη.



Εικόνα 2.1: Testo Saveris 2-H1 (Πηγή: Testo.com)

Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες (TTI)

Για την αξιολόγηση της έκθεσης των προϊόντων σε ανεπιθύμητες θερμοκρασίες, χρησιμοποιήθηκαν οι WarmMark 5°C, οι οποίοι παρέχουν οπτική, μη αναστρέψιμη ένδειξη θερμοκρασιακής απόκλισης. Οι δείκτες αυτοί ενεργοποιούνται χειροκίνητα μέσω της αφαίρεσης του προστατευτικού τους τμήματος και λειτουργούν ως ποιοτικό κριτήριο διαχείρισης των προϊόντων.

Τεχνικά χαρακτηριστικά WarmMark 5°C:

- Θερμοκρασία ενεργοποίησης: 5°C
- Ακρίβεια: $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Χρόνος αντίδρασης:

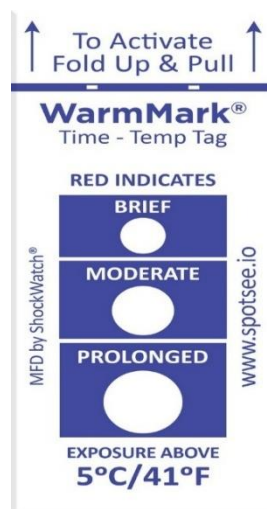
- Σύντομη υπέρβαση (Brief): 30 λεπτά
- Μέτρια υπέρβαση (Moderate): 2 ώρες
- Παρατεταμένη υπέρβαση (Prolonged): 8 ώρες
- Αλλαγή χρώματος: Από λευκό σε κόκκινο
- Μέθοδος στερέωσης: Αυτοκόλλητη επιφάνεια πίεσης

Η επιλογή των WarmMark 5°C βασίστηκε σε παράγοντες διαθεσιμότητας και χαμηλού κόστους, καθιστώντας τους κατάλληλους για εμπορικές εφαρμογές στη διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας.

Άλλοι TTI και IoT συσκευές που εξετάστηκαν από διαφορετικούς κατασκευαστές, όπως:

- Delta Track (ΗΠΑ)
- Evigense (ΗΠΑ)
- 3M (Ηνωμένο Βασίλειο)
- Varcode Smart Tags Barcode TTI (ΗΠΑ)
- Williot IoT Pixel (ΗΠΑ)

Ωστόσο, οι παραπάνω επιλογές απορρίφθηκαν, κυρίως λόγω υψηλού κόστους, περιορισμένης διαθεσιμότητας στην ελληνική αγορά και πολύπλοκων απαιτήσεων ενεργοποίησης ή ανάλυσης δεδομένων.



Εικόνα 2.2: WarmMark 5°C (Πηγή: <https://shop.spotsee.io>)

Θερμόμετρο ακίδας

Για την επιβεβαίωση της θερμοκρασίας των προϊόντων κατά την έξοδό τους από το κέντρο διανομής, χρησιμοποιήθηκε το διακριβωμένο θερμόμετρο ακίδας Testo 106.

Τεχνικά χαρακτηριστικά Testo 106:

- Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας: -50°C έως $+275^{\circ}\text{C}$
- Ακρίβεια: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (σε εύρος -30°C έως $+99.9^{\circ}\text{C}$)
- Διακρίβωση: Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα μέτρησης θερμοκρασίας
- Χρόνος απόκρισης: $< 3 \text{ sec}$
- Οπτικοακουστική ειδοποίηση για υπέρβαση θερμοκρασίας

Το θερμόμετρο χρησιμοποιήθηκε στο κέντρο διανομής στα Οινόφυτα, πριν την αποστολή των δειγμάτων, προκειμένου να επαληθευτούν οι αρχικές θερμοκρασίες των προϊόντων και να διασφαλιστεί ότι τηρούσαν τις συνθήκες ψύξης πριν από τη μεταφορά.



Εικόνα 2.3: Testo 106 (Πηγή: Testo.com)

2.3 Πειραματική Προσομοίωση Διαταραχής της Ψυκτικής Αλυσίδας

Η αξιολόγηση της ψυκτικής αλυσίδας και η εκτίμηση της επίδρασης των θερμοκρασιακών αποκλίσεων στην ποιότητα του κρέατος πραγματοποιήθηκε μέσω καταγραφής δεδομένων

μεταφοράς και εργαστηριακής προσομοίωσης θερμοκρασιακών διαταραχών. Για τον σκοπό αυτό, τα δείγματα ακολούθησαν τη συνήθη διαδικασία διανομής και στη συνέχεια υπέστησαν ελεγχόμενες θερμοκρασιακές εκθέσεις προκειμένου να μελετηθούν οι επιπτώσεις στο προϊόν.

2.3.1 Παρακολούθηση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη μεταφορά

Τα δείγματα μεταφέρθηκαν από το κέντρο διανομής στα Οινόφυτα προς καταστήματα λιανικής και χονδρικής πώλησης στην Κρήτη (Ηράκλειο και Ρέθυμνο). Η περιοχή επιλέχθηκε λόγω του θερμού κλίματος, το οποίο ενδέχεται να επηρεάζει τη σταθερότητα της ψυκτικής αλυσίδας.

Τα δείγματα που αναλύθηκαν περιλάμβαναν τρία διαφορετικά είδη κρέατος. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δείγματα από πανσέτα (4 τεμάχια), χοιρινό φιλέτο (8 τεμάχια) και σπάλα (4 τεμάχια). Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε έλεγχο θερμοκρασίας, καθώς και σε ανίχνευση πιθανών αποκλίσεων, τόσο πριν από την αποστολή τους στο κέντρο διανομής όσο και μετά την άφιξή τους στον τερματικό σταθμό (καταστήματα Κρήτης).

Για την καταγραφή της θερμοκρασίας ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Πριν από την αποστολή, η θερμοκρασία των δειγμάτων μετρήθηκε με διακριβωμένο θερμόμετρο ακίδας Testo 106
- Κατά τη μεταφορά, τοποθετήθηκαν καταγραφικά θερμοκρασίας Testo Saveris 2-H1 εντός των κιβωτίων, με ρυθμό καταγραφής ανά 15 λεπτά.
- Για την ανίχνευση πιθανών αποκλίσεων $>5^{\circ}\text{C}$, χρησιμοποιήθηκαν Δείκτες TTI WarmMark 5°C , οι οποίοι τοποθετήθηκαν στις συσκευασίες.

Η διαδικασία αποστολής και παραλαβής των δειγμάτων περιλάμβανε δύο διαφορετικές αποστολές σε διαφορετικές ημερομηνίες.

➤ Αποστολή 1:

- 06/12/2024 → Αναχώρηση από το κέντρο διανομής (Δείγματα: Πανσέτα με Ημ. Παραγωγής:03/12/24 – Ημ. Λήξης:20/12/24 & Ψαρονέφρι με Ημ. Παραγωγής 03/12/24 – Ημ. Λήξης:20/12/24).
- 07/12/2024 → Άφιξη στα καταστήματα στην Κρήτη.
- 10/12/2024 → Παραλαβή από το εργαστήριο. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε ισοθερμικά δοχεία με παγοκύστες και καταγράφηκε εκ νέου η θερμοκρασία τους.
- 10/12/24 με 15/12/24 → Έναρξη και περάτωση 1^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (ανάλυση απευθείας με την παραλαβή)
- 20/12/24 με 25/12/24→ Έναρξη και περάτωση 2^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον δεν προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος αλλά συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C)
- 20/12/24 με 25/12/24→ Έναρξη και περάτωση 3^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα)
- 20/12/24 με 25/12/24→ Έναρξη και περάτωση 4^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα)

➤ Αποστολή 2:

- 14/02/2025 → Αναχώρηση από το κέντρο διανομής (Δείγματα: Σπάλα με Ημ. Παραγωγής 11/02/25 – Ημ. Λήξης 28/02/25 & Ψαρονέφρι με Ημ. Παραγωγής 06/02/25 – Ημ. Λήξης 23/02/25).

- 15/02/2025 → Άφιξη στα καταστήματα στην Κρήτη.
- 17/02/2025→ Παραλαβή από το εργαστήριο. Τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε ισοθερμικά δοχεία με παγοκύστες και καταγράφηκε εκ νέου η θερμοκρασία τους.
- 18/02/2025 με 21/02/25→ Έναρξη και περάτωση 1^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (ανάλυση απευθείας με την παραλαβή).
- 20/02/2025 με 23/02/25→ Έναρξη και περάτωση 2^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (Ανάλυση 2 μέρες μετά την παραλαβή του δείγματος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα).
- 20/02/2025 με 23/02/25→ Έναρξη και περάτωση 3^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (Ανάλυση 3 μέρες πριν τη λήξη του δείγματος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα).
- 20/02/2025 με 23/02/25→ Έναρξη και περάτωση 4^{ου} σετ αναλύσεων αντίστοιχα (Ανάλυση στη λήξη του προϊόντος κι εφόσον προηγήθηκε διατάραξη του δείγματος για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και συντήρηση υπό ψύξη στους 4°C έπειτα).

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζεται η καταγραφή της θερμοκρασίας των δειγμάτων, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των προαναφερθέντων εργαλείων. Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας διεξήχθη καθ' όλη τη διάρκεια της παραμονής των δειγμάτων στο κέντρο διανομής, προκειμένου να διασφαλιστεί η τήρηση των προβλεπόμενων συνθηκών αποθήκευσης, πριν από την αποστολή τους στον τελικό προορισμό.



Εικόνα 2.4: Θερμομέτρηση δειγμάτων Πανσέτας με το θερμόμετρο ακίδας Testo 106 και ο ενεργοποιημένος TTI.



Εικόνα 2.5: Καταγραφικό θερμοκρασίας σε δείγμα Πανσέτας και ο ενεργοποιημένος TTI.



Εικόνα 2.6: Θερμομέτρηση δειγμάτων Χοιρινού Φιλέτου με το θερμόμετρο ακίδας Testo 106 και ο ενεργοποιημένος TTI.



Εικόνα 2.7: Ενεργοποιημένος TTI σε Χοιρινό Φιλέτο στο κέντρο διανομής.



Εικόνα 2.8: Ενεργοποιημένος TTI σε Χοιρινό Φιλέτο σε διαφορετική αποστολή στο κέντρο διανομής.



Εικόνα 2.9: Θερμομέτρηση δειγμάτων Σπάλας με το θερμόμετρο Testo 106 και ο ενεργοποιημένος TTI.



Εικόνα 2.10: Καταγραφικό θερμοκρασίας δειγμάτων Σπάλας στο κέντρο διανομής και ο ενεργοποιημένος TTI.

2.3.2 Χαμένες Αποστολές & Απόρριψη Δεικτών TTI

Κατά τη διάρκεια της μελέτης, σημειώθηκαν περιπτώσεις στις οποίες τα δεδομένα θερμοκρασιακής παρακολούθησης δεν ήταν διαθέσιμα, καθώς οι δείκτες TTI απορρίφθηκαν λόγω ανθρώπινου λάθους.

Πρόβλημα που προέκυψε:

- Οι δείκτες απορρίφθηκαν πριν την ανάλυση.
- Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν δεδομένα θερμοκρασιακής παρακολούθησης για τα συγκεκριμένα δείγματα.
- Δεδομένου ότι η μελέτη στηρίζεται στη συσχέτιση της θερμοκρασιακής καταγραφής με την ποιότητα των προϊόντων, τα συγκεκριμένα δείγματα αποκλείστηκαν από την τελική ανάλυση.

Οι Εικόνες 2.11 και 2.12 αποτυπώνουν περιπτώσεις αστοχιών στη διαδικασία ανάλυσης, καθώς παρουσιάζονται δείκτες TTI σε δείγματα χοιρινού λαιμού και χοιρινής μπριζόλας κόντρα, αντίστοιχα, τα οποία απορρίφθηκαν πριν από την ανάλυση. Η απόρριψη των δειγμάτων κατέστησε αδύνατη την αξιολόγηση της θερμοκρασιακής διακύμανσης, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της ακεραιότητας των δεικτών για την αξιόπιστη καταγραφή και ερμηνεία των δεδομένων θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και διακίνησης των προϊόντων.



Εικόνα 2.11: Δείκτης TTI σε χοιρινό λαιμό που απορρίφθηκε πριν από την ανάλυση.



Εικόνα 2.12: Δείκτης TTI σε χοιρινή μπριζόλα κόντρα που απορρίφθηκε πριν από την ανάλυση.

Επιπλέον δείγματα που απορρίφθηκαν πριν την ανάλυση είναι αυτά στις εικόνες 2.13, 2.14 και 2.15, όπου απεικονίζονται δείκτες TTI σε δείγματα μπιφτεκιού, χοιρινού λαιμού και χοιρινής σπάλας, αντίστοιχα, τα οποία επίσης απορρίφθηκαν πριν από την ανάλυση, καθιστώντας αδύνατη την αξιολόγηση της θερμοκρασιακής διακύμανσης.



Εικόνα 2.13: Δείκτης ΤΤΙ σε μπιφτέκι ανάμικτο σε δισκάκι, που απορρίφθηκε πριν την ανάλυση



Εικόνα 2.14: Δείκτης ΤΤΙ σε χοιρινό λαιμό που απορρίφθηκε πριν από την ανάλυση.



Εικόνα 2.15: Δείκτης ΤΤΙ σε χοιρινή σπάλα που απορρίφθηκε πριν από την ανάλυση.

2.4 Ανάλυση και Επεξεργασία Δεδομένων

Η ανάλυση των δεδομένων της μελέτης περιλάμβανε την επεξεργασία των καταγραφών της θερμοκρασίας, την αξιολόγηση της ένδειξης των TTI WarmMark, καθώς και την ανάλυση των μικροβιολογικών, φυσικοχημικών και μακροσκοπικών παραμέτρων των δειγμάτων. Οι ενδείξεις των TTI χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς για την έναρξη των αναλύσεων, επιτρέποντας τη συσχέτιση της ευαισθησίας τους με πραγματικές ποιοτικές μεταβολές των προϊόντων. Τα αποτελέσματα συσχετίστηκαν με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην ποιότητα και τη διάρκεια ζωής των δειγμάτων.

2.4.1 Επεξεργασία Δεδομένων Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία των δειγμάτων καταγράφηκε μέσω του Testo Saveris 2-H1 σε χρονικά διαστήματα των 15 λεπτών καθ' όλη τη διάρκεια της μεταφοράς. Τα δεδομένα εξήχθησαν και αναλύθηκαν με σκοπό:

- ✓ Τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας αποθήκευσης και μεταφοράς.
- ✓ Την ανίχνευση θερμοκρασιακών αποκλίσεων και τη διάρκειά τους.
- ✓ Τη συσχέτιση των δεδομένων θερμοκρασίας με την ενεργοποίηση των TTI WarmMark.

2.4.2 Ανάλυση των Δεικτών TTI WarmMark

Οι δείκτες TTI WarmMark 5°C χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της έκθεσης των δειγμάτων σε μη επιθυμητές θερμοκρασίες, αξιοποιούμενοι ως εργαλείο ανίχνευσης αποκλίσεων και χρονικής τοποθέτησης της αλλοίωσης. Κάθε δείκτης αξιολογήθηκε βάσει του χρονικού διαστήματος αλλαγής χρώματος, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

Για κάθε δείγμα καταγράφηκε:

1. Η αλλαγή χρώματος του δείκτη TTI, καθώς και ο χρόνος που παρέμεινε σε θερμοκρασίες άνω των 5°C, σύμφωνα με τις κατηγορίες ενεργοποίησης των δεικτών (30 λεπτά, 2 ώρες ή 8 ώρες).
2. Η επίδραση της ενεργοποίησης των TTI στη μικροβιολογική και μακροσκοπική κατάσταση των προϊόντων.

Τα χρονικά διαστήματα μεταβολής χρώματος των δεικτών είναι:

- ✓ Window 1 – Brief Exposure (30 λεπτά σε >5°C): Ήπια υπέρβαση θερμοκρασίας.
- ✓ Window 2 – Moderate Exposure (2 ώρες σε >5°C): Μέτρια υπέρβαση θερμοκρασίας, πιθανή επιτάχυνση αλλοίωσης.
- ✓ Window 3 – Prolonged Exposure (8 ώρες σε >5°C): Σημαντική υπέρβαση θερμοκρασίας, αυξημένος κίνδυνος μικροβιακής ανάπτυξης.

2.4.3 Ανάλυση Μικροβιολογικών και Φυσικοχημικών Δεδομένων

Για τη μελέτη της ποιότητας και της αλλοίωσης των προϊόντων, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες αναλύσεις σε κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας:

A. Μικροβιολογικές Αναλύσεις

- ✓ *Pseudomonas spp.* – Κύριοι αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί στο νωπό κρέας υπό ψύξη.
- ✓ *Enterobacteriaceae* – Δείκτης υγιεινής και δυνητικών παθογόνων μικροοργανισμών.
- ✓ Οξυγαλακτικά βακτήρια 30°C (LAB) – Επικρατούν σε αναερόβιες συνθήκες και επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής.
- ✓ Ολική Μεσόφιλη Χλωρίδα (OMX) – Γενικός δείκτης μικροβιακής ανάπτυξης.
- ✓ Ζύμες & Μύκητες – Εκτίμηση παρουσίας και ρυθμού ανάπτυξης μυκητολογικών αλλοιώσεων.

B. Φυσικοχημικές και Ποιοτικές Αναλύσεις

- ✓ pH – Παράμετρος που επηρεάζει τη μικροβιακή ανάπτυξη και τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.
- ✓ Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά (χρώμα, οσμή, υφή) – Οργανοληπτική αξιολόγηση.
- ✓ Απώλεια βάρους – Ποσοτική εκτίμηση απώλειας οπού κατά την αποθήκευση.

2.4.4 Επεξεργασία των Δεδομένων

Η παρούσα ανάλυση επικεντρώθηκε στη σύγκριση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων και αποστολών, καθώς και στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της ενεργοποίησης των Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI) και της μικροβιολογικής αλλοίωσης, ως εργαλείο δυναμικής ιχνηλασιμότητας και ποιοτικής αξιολόγησης. Για την αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων, υπολογίστηκαν μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις, επιτρέποντας τη σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας και των μικροβιολογικών δεδομένων με ακρίβεια. Η μεταβολή του χρώματος στους TTI ερμηνεύτηκε ως ένδειξη έκθεσης σε κρίσιμες θερμοκρασίες και αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τη χρονική τοποθέτηση των μικροβιολογικών μετρήσεων, με στόχο τη συσχέτιση των καταγραφών με πραγματικά ποιοτικά δεδομένα.

Παράλληλα, η χρήση γραφικών αναπαραστάσεων συνέβαλε στην οπτικοποίηση των θερμοκρασιακών μεταβολών και της πορείας της αλλοίωσης των δειγμάτων, διευκολύνοντας την κατανόηση των συσχετίσεων μεταξύ αυτών των παραγόντων. Ο συνδυασμός στατιστικής ανάλυσης και γραφικής απεικόνισης προσέφερε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την εκτίμηση της επίδρασης των θερμοκρασιακών συνθηκών στη μικροβιολογική σταθερότητα και την ποιότητα των δειγμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Θερμοκρασιακές Αποκλίσεις στην Ψυκτική Αλυσίδα

Στο πλαίσιο της μελέτης, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά τη μεταφορά των προϊόντων από το κέντρο διανομής στα καταστήματα. Οι μετρήσεις συλλέχθηκαν μέσω καταγραφικών θερμοκρασίας, τα οποία καταχωρούσαν δεδομένα ανά 15 λεπτά, εξασφαλίζοντας ακριβή παρακολούθηση των συνθηκών περιβάλλοντος.

Οι μέσες τιμές θερμοκρασίας για τις αποστολές στις 06-07/12/24 και 14-15/02/25 διατηρήθηκαν εντός των προβλεπόμενων ορίων ($0-4^{\circ}\text{C}$), με μέση θερμοκρασία $2,5^{\circ}\text{C}$ και $2,4^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Αντίστοιχα, η μέση σχετική υγρασία παρέμεινε σε 70,5% και 62,8% για τις δύο αποστολές, αντίστοιχα.

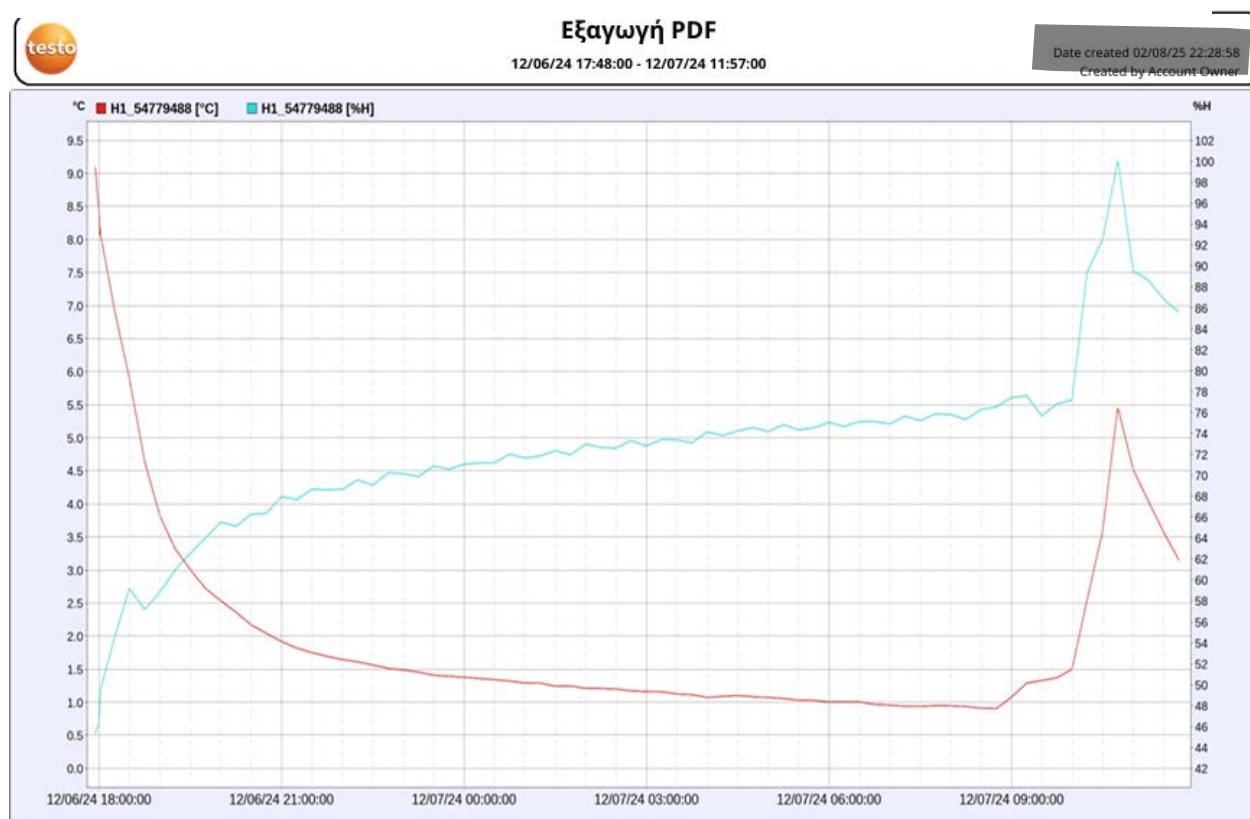
Τα δεδομένα αποτυπώνονται στα ακόλουθα διαγράμματα και πίνακες, όπου:

- Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά τη θερμοκρασία,
- Η μπλε γραμμή αναπαριστά τη σχετική υγρασία.

Κατά την έναρξη των καταγραφών, παρατηρούνται αρχικές θερμοκρασιακές αυξήσεις, οι οποίες οφείλονται στη διαδικασία βαθμονόμησης των καταγραφικών, μέχρι την πλήρη προσαρμογή τους στις πραγματικές συνθήκες ψύξης. Παρόμοια, αύξηση της θερμοκρασίας στο τέλος της διαδρομής αποδίδεται στη διαδικασία παράδοσης των προϊόντων, καθώς τα δείγματα εκτίθενται σε διαφορετικές συνθήκες κατά τη μεταφορά τους από το όχημα ψύξης στους χώρους αποθήκευσης των καταστημάτων.

Η ανάλυση των δεδομένων που ακολουθεί εστιάζει στην αξιολόγηση της θερμοκρασιακής σταθερότητας, της επίδρασης των αποκλίσεων στη διατηρησιμότητα των προϊόντων και της σχέσης μεταξύ υγρασίας και ποιότητας του κρέατος.

Σχήμα 5: Γράφημα αποστολής δειγμάτων στις 06/12/24 από το κέντρο διανομής στο κατάστημα.



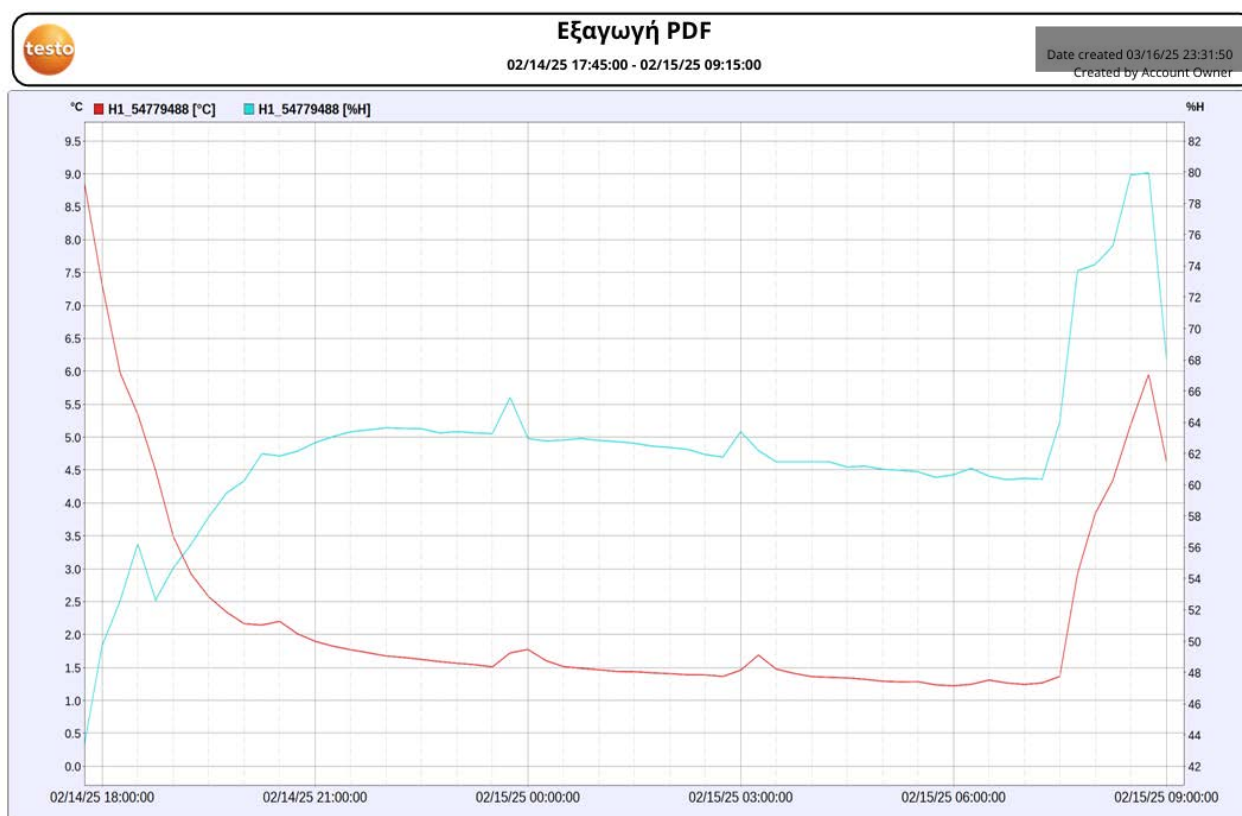
Πίνακας 1: Πίνακας μετρήσεων καταγραφικού 06-07/12/24

Παράμετροι	H1 [°C]	H1 [%H]
Μέση τιμή	2,5	70,5
Ελάχιστη τιμή	0,9	45,2
Μέγιστη τιμή	9,1	100
12/6/2024 17:55:56	9,1	45,2
12/6/2024 17:55:57	9,1	45,3
12/6/2024 18:00:00	8,4	46,1
12/6/2024 18:00:48	8,1	47,6
12/6/2024 18:01:03	8,2	48,4
12/6/2024 18:01:14	8	48,7
12/6/2024 18:01:46	8	49,6
12/6/2024 18:01:47	8	49,6
12/6/2024 18:15:00	6,9	54,3
12/6/2024 18:30:00	5,9	59,2
12/6/2024 18:45:00	4,6	57,1
12/6/2024 19:00:00	3,8	58,8
12/6/2024 19:15:00	3,3	60,9
12/6/2024 19:30:00	3	62,6
12/6/2024 19:45:00	2,7	64
12/6/2024 20:00:00	2,5	65,5
12/6/2024 20:15:00	2,4	65,1

Παράμετροι		H1 [°C]	H1 [%H]
12/6/2024	20:30:00	2,2	66,2
12/6/2024	20:45:00	2	66,3
12/6/2024	21:00:00	1,9	67,9
12/6/2024	21:15:00	1,8	67,6
12/6/2024	21:30:00	1,7	68,6
12/6/2024	21:45:00	1,7	68,6
12/6/2024	22:00:00	1,6	68,6
12/6/2024	22:15:00	1,6	69,5
12/6/2024	22:30:00	1,6	69
12/6/2024	22:45:00	1,5	70,2
12/6/2024	23:00:00	1,5	70,1
12/6/2024	23:15:00	1,5	69,9
12/6/2024	23:30:00	1,4	70,9
12/6/2024	23:45:00	1,4	70,6
12/7/2024	0:00:00	1,4	71
12/7/2024	0:15:00	1,4	71,2
12/7/2024	0:30:00	1,3	71,2
12/7/2024	0:45:00	1,3	72
12/7/2024	1:00:00	1,3	71,6
12/7/2024	1:15:00	1,3	71,8
12/7/2024	1:30:00	1,2	72,3
12/7/2024	1:45:00	1,2	71,9
12/7/2024	2:00:00	1,2	73
12/7/2024	2:15:00	1,2	72,6
12/7/2024	2:30:00	1,2	72,6
12/7/2024	2:45:00	1,2	73,3
12/7/2024	3:00:00	1,2	72,8
12/7/2024	3:15:00	1,2	73,4
12/7/2024	3:30:00	1,1	73,4
12/7/2024	3:45:00	1,1	73,1
12/7/2024	4:00:00	1,1	74,1
12/7/2024	4:15:00	1,1	73,8
12/7/2024	4:30:00	1,1	74,2
12/7/2024	4:45:00	1,1	74,5
12/7/2024	5:00:00	1,1	74,1
12/7/2024	5:15:00	1,1	74,8
12/7/2024	5:30:00	1	74,3
12/7/2024	5:45:00	1	74,5
12/7/2024	6:00:00	1	75
12/7/2024	6:15:00	1	74,6
12/7/2024	6:30:00	1	75,1
12/7/2024	6:45:00	1	75,1
12/7/2024	7:00:00	1	74,9
12/7/2024	7:15:00	0,9	75,6
12/7/2024	7:30:00	0,9	75,2
12/7/2024	7:45:00	0,9	75,8
12/7/2024	8:00:00	0,9	75,8

Παράμετροι		H1 [°C]	H1 [%H]
12/7/2024	8:15:00	0,9	75,3
12/7/2024	8:30:00	0,9	76,2
12/7/2024	8:45:00	0,9	76,5
12/7/2024	9:00:00	1,1	77,4
12/7/2024	9:15:00	1,3	77,6
12/7/2024	9:30:00	1,3	75,7
12/7/2024	9:45:00	1,4	76,8
12/7/2024	10:00:00	1,5	77,2
12/7/2024	10:15:00	2,6	89,5
12/7/2024	10:30:00	3,6	92,5
12/7/2024	10:45:00	5,4	100
12/7/2024	11:00:00	4,5	89,5
12/7/2024	11:15:00	4	88,6
12/7/2024	11:30:00	3,6	86,8
12/7/2024	11:45:00	3,1	85,6

Σχήμα 6: Γράφημα αποστολής δειγμάτων στις 14/02/25 από το κέντρο διανομής στο κατάστημα.



Πίνακας 2: Πίνακας μετρήσεων καταγραφικού 14-15/02/25

Παράμετροι		H1 [°C]	H1 [%H]
Μέση τιμή		2,4	62,8
Ελάχιστη τιμή		1,2	43,4
Μέγιστη τιμή		9,2	100
02/14/25	17:45:00	8,8	43,4
02/14/25	18:00:00	7,3	49,7
02/14/25	18:15:00	6	52,5
02/14/25	18:30:00	5,3	56,2
02/14/25	18:45:00	4,5	52,6
02/14/25	19:00:00	3,5	54,7
02/14/25	19:15:00	2,9	56,2
02/14/25	19:30:00	2,6	57,9
02/14/25	19:45:00	2,3	59,4
02/14/25	20:00:00	2,2	60,2
02/14/25	20:15:00	2,1	62
02/14/25	20:30:00	2,2	61,8
02/14/25	20:45:00	2	62,1
02/14/25	21:00:00	1,9	62,7
02/14/25	21:15:00	1,8	63,1
02/14/25	21:30:00	1,8	63,4
02/14/25	21:45:00	1,7	63,5
02/14/25	22:00:00	1,7	63,6
02/14/25	22:15:00	1,6	63,6
02/14/25	22:30:00	1,6	63,6
02/14/25	22:45:00	1,6	63,3
02/14/25	23:00:00	1,6	63,4
02/14/25	23:15:00	1,5	63,3
02/14/25	23:30:00	1,5	63,3
02/14/25	23:45:00	1,7	65,6
02/15/25	0:00:00	1,8	62,9
02/15/25	0:15:00	1,6	62,8
02/15/25	0:30:00	1,5	62,8
02/15/25	0:45:00	1,5	63
02/15/25	1:00:00	1,5	62,8
02/15/25	1:15:00	1,4	62,7
02/15/25	1:30:00	1,4	62,6
02/15/25	1:45:00	1,4	62,5
02/15/25	2:00:00	1,4	62,4
02/15/25	2:15:00	1,4	62,3
02/15/25	2:30:00	1,4	61,9
02/15/25	2:45:00	1,4	61,8
02/15/25	3:00:00	1,5	63,4
02/15/25	3:15:00	1,7	62,2
02/15/25	3:30:00	1,5	61,5
02/15/25	3:45:00	1,4	61,5
02/15/25	4:00:00	1,4	61,5

Παράμετροι		H1 [°C]	H1 [%H]
02/15/25	4:15:00	1,3	61,5
02/15/25	4:30:00	1,3	61,1
02/15/25	4:45:00	1,3	61,2
02/15/25	5:00:00	1,3	61
02/15/25	5:15:00	1,3	60,9
02/15/25	5:30:00	1,3	60,8
02/15/25	5:45:00	1,2	60,5
02/15/25	6:00:00	1,2	60,6
02/15/25	6:15:00	1,2	61
02/15/25	6:30:00	1,3	60,5
02/15/25	6:45:00	1,3	60,3
02/15/25	7:00:00	1,2	60,4
02/15/25	7:15:00	1,3	60,3
02/15/25	7:30:00	1,4	64
02/15/25	7:45:00	2,9	73,7
02/15/25	8:00:00	3,8	74,1
02/15/25	8:15:00	4,3	75,3
02/15/25	8:30:00	5,2	79,8
02/15/25	8:45:00	5,9	79,9
02/15/25	9:00:00	4,6	68,1
02/15/25	9:15:00	9,2	100

3.2 Μεταβολή Δεικτών TTI, Μικροβιολογικές Αναλύσεις και Αποτύπωση Αλλοίωσης Κρέατος

Στην παρούσα ενότητα παρατίθεται φωτογραφικό υλικό των δειγμάτων χοιρινού κρέατος που εστάλησαν για ανάλυση, με σκοπό την τεκμηρίωση των μεταβολών στους Χρονοθερμοκρασιακούς Δείκτες (TTI) και των ενδεχόμενων μακροσκοπικών ενδείξεων αλλοίωσης. Οι εικόνες προέρχονται από τη δεύτερη αποστολή δειγμάτων και αφορούν συγκεκριμένα τη χοιρινή σπάλα και το φιλέτο, καθώς κατά την πρώτη αποστολή δεν κατέστη δυνατή η συλλογή επαρκούς φωτογραφικού υλικού. Η απεικόνιση των TTI και των δειγμάτων σε διαδοχικά στάδια αποθήκευσης και επεξεργασίας προσφέρει μια δυναμική οπτική αναπαράσταση της εξέλιξης των ποιοτικών παραμέτρων και της επιδείνωσης της κατάστασης του προϊόντος υπό την επίδραση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων.



Εικόνα 3.1: Ψαρονέφρι κατά την ημέρα έναρξης αναλύσεων- Δείκτης χωρίς χρωματική αλλαγή (18/02/25)



Εικόνα 3.2: Σπάλα κατά την ημέρα έναρξης αναλύσεων - Δείκτης χωρίς χρωματική αλλαγή (18/02/25)



Εικόνα 3.3: Ψαρονέφρι με 2 ώρες έκθεσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 2^ο επίπεδο (18/02/25)



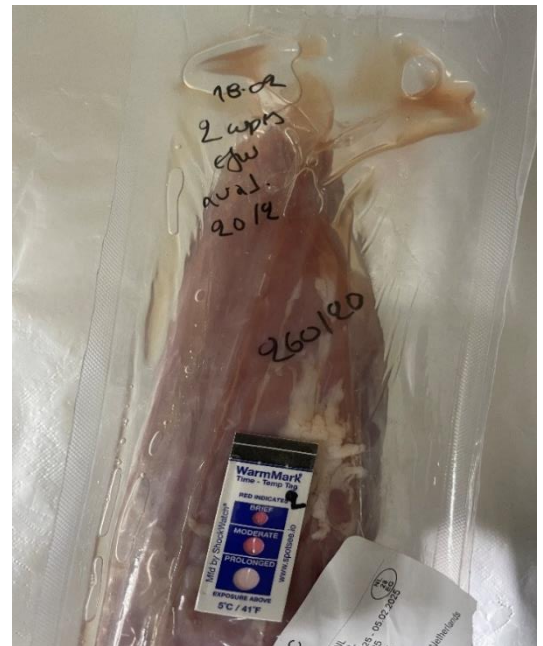
Εικόνα 3.4: Σπάλα με 2 ώρες έκθεσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 2^ο επίπεδο (18/02/25)



Εικόνα 3.5: Ψαρονέφρι με 8 ώρες έκθεσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 3^ο επίπεδο (18/02/25)



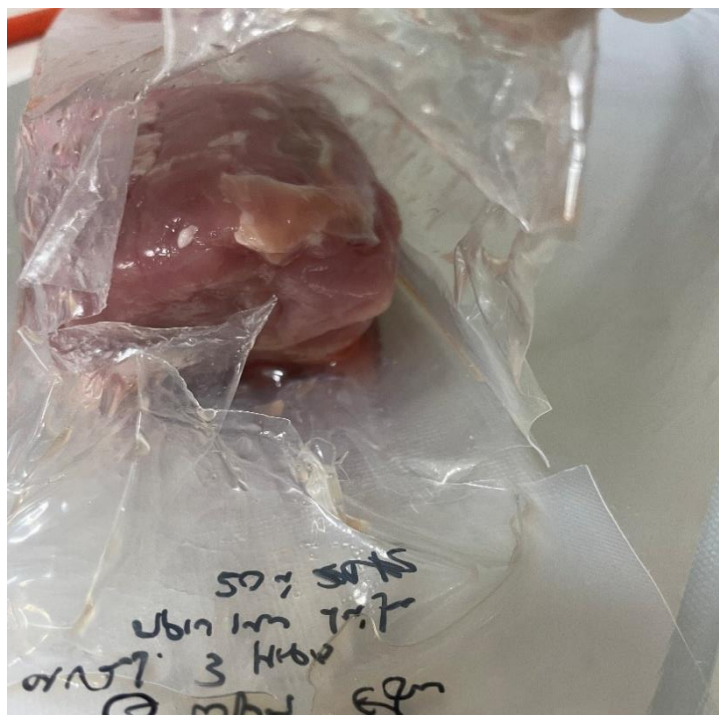
Εικόνα 3.6: Σπάλα με 8 ώρες έκθεσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 3ο επίπεδο (18/02/25)



Εικόνα 3.7: Ψαρονέφρι που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 2ο επίπεδο- Αρχή μακροσκοπικών αλλαγών (20/02/25)



Εικόνα 3.8 και 3.9: Σπάλα που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 3ο επίπεδο - Αρχή μακροσκοπικών αλλαγών (20/02/25)



Εικόνα 3.10: Ψαρονέφρι που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος- Μακροσκοπικές αλλαγές (20/02/25)



Εικόνα 3.11 και 3.12: Ψαρονέφρι στην ημερομηνία λήξης του, που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 2ο επίπεδο- Μακροσκοπικές αλλαγές (23/02/25)



Εικόνα 3.13: Σπάλα που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Μακροσκοπικές αλλαγές (25/02/25)



Εικόνα 3.14: Σπάλα που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 3ο επίπεδο - Μακροσκοπικές αλλαγές (25/02/25)



Εικόνα 3.14: Σπάλα στην ημερομηνία λήξης της, που είχε εκτεθεί στις 18/02/25 για 2 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος - Δείκτης με χρωματική αλλαγή στο 3ο επίπεδο - Μακροσκοπικές αλλαγές (28/02/25)



Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες για κάθε τύπο κρέατος (σπάλα, ψαρονέφρι και πανσέτα), στους οποίους παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μικροβιακού φορτίου, όπως αυτή καταγράφηκε από το μικροβιολογικό εργαστήριο. Παράλληλα, περιγράφονται οι μακροσκοπικές ενδείξεις αλλοίωσης, με βάση τις μεταβολές στο χρώμα, την οσμή, την υφή και την ποσότητα οπού του κάθε δείγματος, καθώς και οι αλλαγές στο χρώμα των δεικτών TTI. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταδεικνύουν ότι η μικροβιολογική εξέλιξη των προϊόντων επηρεάστηκε σημαντικά από τη διάρκεια έκθεσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και την επάρκεια διατήρησης της ψυκτικής αλυσίδας.

Ανάλυση Μικροβιολογικών και Μακροσκοπικών Αποτελεσμάτων για την Πανσέτα (1^η αποστολή)

Μικροβιολογική Ανάλυση και Εξέλιξη

Πίνακας 3: Προσδιορισμός Μικροβιακού Φορτίου στο Δείγμα Πανσέτας (1^η αποστολή)

Πανσέτα (Ημ Παραγωγής 03/12/24, Ημ Λήξης 20/12/24)						
Κωδικός Δείγματος	Ημερομηνία Έναρξης - Περάτωσης Αναλύσεων	Συνθήκες-Χρόνος Αποθήκευσης	Enterobacteriaceae (cfu/g)	Pseudomonas spp (cfu/g)	Ζύμες / Yeasts (cfu/g)	Μύκητες / Moulds (cfu/g)
249959	10/12-15/12/24	Ανάλυση με την παραλαβή	2.2×10^3	8.0×10^2	7.5×10^2	<10
251273	20/12-25/12/24	Ανάλυση στη λήξη, υπό ψύξη στους 4°C συνεχώς	1.5×10^5	1.3×10^6	6.6×10^5	<10
251274	20/12-25/12/25	Ανάλυση στη λήξη, υπό ψύξη στους 4°C, 2 ώρες παραμονή στους 20°C	3.0×10^4	3.8×10^5	8.6×10^4	<10
251275	20/12-25/12/26	Ανάλυση στη λήξη, υπό ψύξη στους 4°C, 8 ώρες παραμονή στους 20°C	4.4×10^5	8.6×10^5	2.6×10^5	<10

Παρατηρήσεις:

- Σταθερότητα στην αρχή: Τα αρχικά επίπεδα των *Enterobacteriaceae* και *Pseudomonas spp* ήταν εντός αποδεκτών ορίων, ενώ οι μύκητες δεν ανιχνεύθηκαν.
- Αύξηση μικροοργανισμών κατά τη συντήρηση: Παρά τη συνεχή διατήρηση στους 4°C, τα επίπεδα των *Enterobacteriaceae* αυξήθηκαν κατά δύο τάξεις μεγέθους (από 2.2×10^3 σε 1.5×10^5 cfu/g), γεγονός που υποδηλώνει σταδιακή αλλοίωση του προϊόντος.
- Θερμοκρασιακή διαταραχή 2 ωρών: Η αύξηση των *Pseudomonas spp* στα 3.8×10^5 cfu/g καταδεικνύει ότι ακόμα και μικρή θερμοκρασιακή διαταραχή μπορεί να επιταχύνει τη μικροβιακή ανάπτυξη.
- Θερμοκρασιακή διαταραχή 8 ωρών: Παρατηρείται δραματική αύξηση του μικροβιακού φορτίου, ιδιαίτερα στα *Enterobacteriaceae* και τις ζύμες, υποδεικνύοντας επιταχυνόμενη αλλοίωση.

Μακροσκοπική Αξιολόγηση και Αλλοίωση

Η οπτική εξέταση των δειγμάτων ανέδειξε διαφορές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με τη θερμοκρασιακή έκθεση.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα οπτικής εξέτασης στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στην Πανσέτα

Ημερομηνία	Δείγμα	Χρώμα	Οσμή	Υφή	Δείκτης Χρώματος
10/12/24	1 – Αρχική Ανάλυση	Κανονικό	Αποδεκτή	Ελαστική	Χωρίς αλλαγή
20/12/24	2 – Συντήρηση στους 4°C	Κανονικό	Ελαφρά υπόξινη	Λιγότερο ελαστική	Χωρίς αλλαγή

20/12/24	3 – 2 ώρες σε 20°C	Ελαφρώς ωχρό	Ελαφρά υπόξινη	Λιγότερο ελαστική	Έναρξη αλλαγής- 2° επίπεδο
20/12/24	4 – 8 ώρες σε 20°C	Ωχρό	Υποψία αλλοίωσης	Όχι ελαστική	Πλήρης αλλαγή-3° επίπεδο

Παρατηρήσεις:

- Το χρώμα διατηρήθηκε σταθερό μέχρι την ημέρα λήξης στα δείγματα που δεν υπέστησαν θερμοκρασιακή διαταραχή. Ωστόσο, στα δείγματα που υπέστησαν θερμοκρασιακή διαταραχή, εμφανίστηκε ωχρότητα.
- Στην ημερομηνία λήξης, παρατηρήθηκε υπόξινη οσμή
- Η έκθεση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος οδήγησε σε απώλεια υγρασίας και μείωση της ελαστικότητας, υποδεικνύοντας αλλοίωση της δομής του προϊόντος.
- Ο χρωματικός δείκτης παρουσίασε σημαντική αλλαγή στα δείγματα που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 8 ώρες, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασιακή διαταραχή επηρεάζει ορατά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος.

Ανάλυση Μικροβιολογικών και Μακροσκοπικών Αποτελεσμάτων για το Ψαρονέφρι (1^η αποστολή)

Πίνακας 5: Προσδιορισμός Μικροβιακού Φορτίου στο Δείγμα Ψαρονέφρι

Ψαρονέφρι (Ημ Παραγωγής 03/12/24, Ημ Λήξης 20/12/24)						
Κωδικός Δείγματος	Ημερομηνία Έναρξης - Περάτωσης Αναλύσεων	Συνθήκες-Χρόνος Αποθήκευσης	Enterobacteriaceae (cfu/g)	Pseudomonas spp (cfu/g)	Ζύμες / Yeasts (cfu/g)	Μύκητες / Moulds (cfu/g)
249958	10/12-15/12/24	Ανάλυση με την παραλαβή	1.4×10^3	1.6×10^3	1.5×10^2	<10
251270	20/12-25/12/24	Ανάλυση στη λήξη, υπό ψύξη στους 4°C συνεχώς	1.1×10^6	6.7×10^5	3.0×10^3	4.5×10^3
251271	20/12-25/12/25	Ανάλυση στη λήξη, υπό ψύξη στους 4°C, 2 ώρες παραμονή στους 20°C	6.3×10^5	7.6×10^5	2.6×10^4	8.0×10^3
251272	20/12-25/12/26	Ανάλυση στη λήξη, υπό ψύξη στους 4°C, 8 ώρες παραμονή στους 20°C	$>1.5 \times 10^7$	$>1.5 \times 10^6$	1.7×10^4	<10

Παρατηρήσεις:

- Η μεγαλύτερη αύξηση των βακτηρίων καταγράφεται στα δείγματα που εκτέθηκαν για 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Λόγω της εκθετικής αύξησης των αλλοιωτικών μικροοργανισμών (των εντεροβακτηριοειδών και των ζυμών) παρατηρείται μία μείωση στους πληθυσμούς των μυκήτων καθώς τα αλλοιωτικά βακτήρια και οι αλλοιωτικές ζύμες δρουν ανταγωνιστικά έναντι των υπολοίπων με συνέπεια εργαστηριακά να μην μπορούν να αναπτυχθούν.

Μακροσκοπική Αξιολόγηση και Αλλοίωση

Πίνακας 6: Αποτελέσματα οπτικής εξέτασης στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στο Ψαρονέφρι

Ημερομηνία	Δείγμα	Χρώμα	Οσμή	Υφή	Δείκτης Χρώματος
10/12/24	1 – Αρχική Ανάλυση	Κανονικό	Αποδεκτή	Ελαστική	Χωρίς αλλαγή
20/12/24	2 – Συντήρηση στους 4°C	Κανονικό	Ελαφρώς υπόξινη	Λιγότερο ελαστική	Χωρίς αλλαγή
20/12/24	3 – 2 ώρες σε 20°C	Κανονικό	Ελαφρώς υπόξινη	Λιγότερο ελαστική	Έναρξη αλλαγής- 2° επίπεδο
20/12/24	4 – 8 ώρες σε 20°C	Ωχρό	Υποψία αλλοίωσης	Όχι ελαστική	Πλήρης αλλαγή- 3° επίπεδο

- Η οσμή ήταν ελαφρώς υπόξινη σε όλα τα δείγματα στην ημερομηνία λήξης, ανεξάρτητα από τη μέθοδο αποθήκευσης.
- Η υφή επηρεάστηκε στα δείγματα που εκτέθηκαν στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα μειωμένη ελαστικότητα και πιθανή απώλεια υγρασίας.
- Η πλήρης αλλαγή του δείκτη χρώματος παρατηρήθηκε στα δείγματα που παρέμειναν εκτός ψύξης για 8 ώρες.

Ανάλυση Μικροβιολογικών και Μακροσκοπικών Αποτελεσμάτων για το Ψαρονέφρι (2^η αποστολή)

Μικροβιολογική Ανάλυση και Εξέλιξη

Πίνακας 7: Προσδιορισμός Μικροβιακού Φορτίου και pH στο Δείγμα Ψαρονέφρι

Ψαρονέφρι (Ημ Παραγωγής 06/02/25, Ημ Λήξης 23/02/25)							
Κωδικός Δείγματος	Ημερομηνία Έναρξης - Περάτωσης Αναλύσεων	Συνθήκες-Χρόνος Αποθήκευσης	Enterobacteriaceae (cfu/g)	Pseudomonas spp (cfu/g)	Μεσόφιλα Οξυγαλακτικά Βακτήρια (cfu/g)	OMX 30 C / TVC 30 C (cfu/g)	pH
259469	18/02-21/02/25	Ψυγείο - 1η Ανάλυση	2.3x10 ⁵	<1	3.9x10 ³	2.6x10 ⁶	5.78
260120	20/02-23/02/25	Μετά από 2 ώρες διατάραξης στους 20°C και συντήρηση στους 4°C	1.2x10 ³	<1	5.3x10 ⁴	7.3x10 ⁵	5.53
260121	20/02-23/02/25	Μετά από 8 ώρες διατάραξης στους 20°C και συντήρηση στους 4°C	3.5x10 ⁴	<1	2.9x10 ⁶	2.8x10 ⁶	5.61
260520	23/02-26/02/25	Στη λήξη, μετά από 2 ώρες διατάραξης στους 20°C και συντήρηση στους 4°C	3.2x10 ⁴	<10	3.3x10 ⁶	3.3x10 ⁶	5.53

Παρατηρήσεις:

- Η αρχική ανάλυση έδειξε χαμηλά επίπεδα μικροβιακής ανάπτυξης, με αποδεκτές τιμές σε όλα τα μικροβιολογικά χαρακτηριστικά.
- Η θερμοκρασιακή διαταραχή επηρέασε κυρίως τα *Οξυγαλακτικά βακτήρια*.

Μακροσκοπική Αξιολόγηση και Αλλοίωση

Πίνακας 8: Αποτελέσματα οπτικής εξέτασης στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στο Ψαρονέφρι

Ημερομηνία	Δείγμα	Χρώμα	Οσμή	Υφή	Δείκτης Χρώματος
18/02/25	1 – Αρχική Ανάλυση	Κανονικό	Αποδεκτή	Ελαστική	Χωρίς αλλαγή
20/02/25	2 – 2 ώρες σε 20°C	Κανονικό	Αποδεκτή	Ελαστική	Έναρξη αλλαγής- 2° επίπεδο
20/02/25	3 – 8 ώρες σε 20°C	Ελαφρώς ωχρό	Ελαφρώς υπόξινη	Ελαστική	Αλλαγή 3° επίπεδο
23/02/25	4 – Στη Λήξη (έχοντας προηγηθεί – 2 ώρες σε 20°C)	Ελαφρώς ωχρό	Ελαφρώς υπόξινη	Ελαστική	Χωρίς αλλαγή

Παρατηρήσεις:

- Το χρώμα εμφάνισε διαφοροποίηση στο δείγμα των 8 ωρών θερμοκρασιακής διαταραχής καθώς και στη λήξη του δείγματος των 2 ωρών θερμοκρασιακής διαταραχής. Υπήρξε παράλληλα αλλαγή του χρωματικού δείκτη στα δείγματα που εκτέθηκαν για 2 και 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Η οσμή ήταν αποδεκτή μέχρι την ημερομηνία λήξης, χωρίς έντονες ενδείξεις αλλοίωσης. Ελαφρώς υπόξινη ήταν στο δείγμα με θερμοκρασιακή διαταραχή στις 8 ώρες καθώς και στη λήξη του δείγματος των 2 ωρών.

- Η υφή παρέμεινε ελαστική και συνεκτική, χωρίς ορατές αλλοιώσεις, ακόμα και στα δείγματα που εκτέθηκαν σε θερμοκρασιακή διαταραχή.

Ανάλυση Μικροβιολογικών και Μακροσκοπικών Αποτελεσμάτων για Σπάλα (2^η αποστολή)

Μικροβιολογική Ανάλυση και Εξέλιξη

Πίνακας 9: Προσδιορισμός Μικροβιακού Φορτίου και pH στο Δείγμα Σπάλα

Σπάλα (Ημ Παραγωγής 11/02/25, Ημ Λήξης 28/02/25)							
Κωδικός Δείγματος	Ημερομηνία Έναρξης - Περάτωσης Αναλύσεων	Συνθήκες-Χρόνος Αποθήκευσης	Enterobacteriaceae (cfu/g)	Pseudomonas spp (cfu/g)	Μεσόφιλα Οξυγαλακτικά Βακτήρια (cfu/g)	OMX 30 C / TVC 30 C (cfu/g)	pH
259470	18/02-21/02/25	1η Ανάλυση	40	<1	40	4.2x10 ³	6.00
260122	20/02-23/02/25	Μετά από 2 ώρες διατάραξης στους 20°C και συντήρηση στους 4°C	<10	<1	1.2x10 ³	4.5x10 ⁵	6.00
260803	25/02-28/02/25	Μετά από 8 ώρες διατάραξης στους 20°C και συντήρηση στους 4°C	2.9x10 ⁵	<10	3.5x10 ⁴	5.9x10 ⁷	5.75
261123	28/02-03/03/25	Στη λήξη, μετά από 2 ώρες διατάραξης στους 20°C και συντήρηση στους 4°C	3.0x10 ⁵	50	3.7x10 ⁴	5.1x10 ⁷	5.78

Παρατηρήσεις:

- Η θερμοκρασιακή διαταραχή 2 ωρών δεν επηρέασε σημαντικά τη μικροβιακή ανάπτυξη, καθώς τα *Enterobacteriaceae* παρέμειναν κάτω από 10 cfu/g.
- Μετά από 8 ώρες σε 20°C, καταγράφηκε σημαντική αύξηση των *Enterobacteriaceae*, γεγονός που συνδέεται με έναρξη αλλοίωσης του προϊόντος.

- Οι *Pseudomonas spp.* παρέμειναν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αλλοίωση του προϊόντος βασίζεται περισσότερο στην ανάπτυξη των *Enterobacteriaceae* και των οξυγαλακτικών βακτηρίων.

Μακροσκοπική Αξιολόγηση και Αλλοίωση

Πίνακας 10: Αποτελέσματα οπτικής εξέτασης στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στη Σπάλα

Ημερομηνία	Δείγμα	Χρώμα	Οσμή	Υφή	Δείκτης Χρώματος
18/02/25	1 – Αρχική Ανάλυση	Κανονικό	Αποδεκτή	Ελαστική	Χωρίς αλλαγή
20/02/25	2 – 2 ώρες σε 20°C	Κανονικό	Αποδεκτή	Ελαστική	Αλλαγή 2° επίπεδο
25/02/25	3 – 8 ώρες σε 20°C	Ελαφρώς ωχρό	Ελαφρώς υπόξινη	Ελαστική	Αλλαγή 3° επίπεδο
28/02/25	4 – Στη Λήξη (έχοντας προηγηθεί – 2 ώρες σε 20°C)	Ελαφρώς ωχρό	Ελαφρώς υπόξινη	Ελαστική	Αλλαγή 3° επίπεδο

Παρατηρήσεις:

- Το χρώμα εμφάνισε διαφοροποίηση στο δείγμα των 8 ωρών θερμοκρασιακής διαταραχής καθώς και στη λήξη του δείγματος των 2 ωρών θερμοκρασιακής διαταραχής. Υπήρξε αλλαγή του χρωματικού δείκτη στα δείγματα που εκτέθηκαν για 2 και 8 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον παρατηρήθηκε χρωματική αλλαγή στο δείκτη των 2 ωρών στην ανάλυση στη λήξη να είναι στο 3° επίπεδο.

- Η οσμή ήταν αποδεκτή μέχρι την ημερομηνία λήξης, χωρίς έντονες ενδείξεις αλλοίωσης. Ελαφρώς υπόξινη ήταν στο δείγμα με θερμοκρασιακή διαταραχή στις 8 ώρες καθώς και στη λήξη του δείγματος των 2 ωρών.
- Η υφή παρέμεινε ελαστική και συνεκτική, χωρίς ορατές αλλοιώσεις, ακόμα και στα δείγματα που εκτέθηκαν σε θερμοκρασιακή διαταραχή.

Απώλεια οπού

Η απώλεια υγρών ήταν πιο έντονη στα δείγματα του χοιρινού φιλέτου, γεγονός που σχετίζεται με τη συσκευασία σε κενό αέρος (vacuum). Η αποβολή υγρών εντός της συσκευασίας ήταν αυξημένη, ιδιαίτερα στα δείγματα που εκτέθηκαν σε θερμοκρασιακή διαταραχή, γεγονός που υποδηλώνει επιτάχυνση της πρωτεϊνικής αποδόμησης και μεταβολές στη δομή του κρέατος. Αντίθετα, τα δείγματα της πανσέτας και της σπάλας εμφάνισαν μικρότερη απώλεια υγρών, υποδηλώνοντας διαφορετική δομή ιστού και ικανότητα συγκράτησης υγρασίας.

Πίνακας 11: Συγκεντρωτική παρουσίαση των κυριότερων πληθυσμών *Pseudomonas spp.*, της οργανοληπτικής αξιολόγησης και των τιμών pH σε δείγματα χοιρινού κρέατος

Δείγμα	Συσκευασία	Χρόνος διατάραξης	Ημέρες πριν τη λήξη του προϊόντος	cfu/g	Ένδειξη TTI	Οργανοληπτική αξιολόγηση	pH
Ψαρονέφρι	Vacuum	-	6	<1	Καμία αλλαγή 	Κανονική	5.78
Ψαρονέφρι	Vacuum	8h	3	<1	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.61
Ψαρονέφρι	Vacuum	2h	0	<10	2 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.53
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	-	6	<1	Καμία αλλαγή 	Κανονική	6.00
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	8h	3	<10	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.75
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	2h	0	50	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.78

Πίνακας 12: Συγκεντρωτική παρουσίαση των κυριότερων πληθυσμών Μεσόφιλων Οξυγαλακτικών Βακτηρίων, της οργανοληπτικής αξιολόγησης και των τιμών pH σε δείγματα χοιρινού κρέατος

Δείγμα	Συσκευασία	Χρόνος διατάραξης	Ημέρες πριν τη λήξη του προϊόντος	cfu/g	Ένδειξη TTI	Οργανοληπτική αξιολόγηση	pH
Ψαρονέφρι	Vacuum	-	6	3.9×10^3	Καμία αλλαγή 	Κανονική	5.78
Ψαρονέφρι	Vacuum	8h	3	2.9×10^6	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.61
Ψαρονέφρι	Vacuum	2h	0	3.3×10^6	2 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.53
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	-	6	1.2×10^3	Καμία αλλαγή 	Κανονική	6.00
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	8h	3	3.5×10^4	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.75
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	2h	0	3.7×10^4	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.78

Πίνακας 13: Συγκεντρωτική παρουσίαση των κυριότερων πληθυσμών *Enterobacteriaceae*, της οργανοληπτικής αξιολόγησης και των τιμών pH σε δείγματα χοιρινού κρέατος

Δείγμα	Συσκευασία	Χρόνος διατάραξης	Ημέρες πριν τη λήξη του προϊόντος	cfu/g	Ένδειξη TTI	Οργανοληπτική αξιολόγηση	pH
Ψαρονέφρι	Vacuum	-	6	2.3×10^5	Καμία αλλαγή 	Κανονική	5.78
Ψαρονέφρι	Vacuum	8h	3	3.5×10^4	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.61
Ψαρονέφρι	Vacuum	2h	0	3.2×10^4	2 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.53
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	-	6	40	Καμία αλλαγή 	Κανονική	6.00
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	8h	3	2.9×10^5	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.75
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	2h	0	3.0×10^5	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.78

Πίνακας 14: Συγκεντρωτική παρουσίαση των κυριότερων πληθυσμών Ολικής Μεσόφιλης Χλωρίδας, της οργανοληπτικής αξιολόγησης και των τιμών pH σε δείγματα χοιρινού κρέατος

Δείγμα	Συσκευασία	Χρόνος διατάραξης	Ημέρες πριν τη λήξη του προϊόντος	cfu/g	Ένδειξη TTI	Οργανοληπτική αξιολόγηση	pH
Ψαρονέφρι	Vacuum	-	6	2.6×10^6	Καμία αλλαγή 	Κανονική	5.78
Ψαρονέφρι	Vacuum	8h	3	2.8×10^6	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.61
Ψαρονέφρι	Vacuum	2h	0	3.3×10^6	2 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.53
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	-	6	4.2×10^3	Καμία αλλαγή 	Κανονική	6.00
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	8h	3	5.9×10^7	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.75
Σπάλα	Σακούλα δειγματοληψίας	2h	0	5.1×10^7	3 ^ο επίπεδο 	Αποχρωματισμός, υπόξινη οσμή	5.78

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι στα δείγματα που συσκευάστηκαν υπό κενό (vacuum) παρατηρείται σταδιακή αύξηση της παρουσίας οξυγαλακτικών βακτηρίων. Το φαινόμενο αυτό συνοδεύεται από αλλοιώσεις στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ιδίως με τη μορφή αποχρωματισμού και την εμφάνιση υπόξινης οσμής, καθώς και από σταδιακή μείωση του pH. Παράλληλα, σημειώνεται μεταβολή στην απόχρωση του δείκτη TTI, γεγονός που συνδέεται με τις μικροβιακές μεταβολές του προϊόντος κατά την αποθήκευση.

Αντίθετα, στα δείγματα που συσκευάστηκαν σε απλή σακούλα δειγματοληψίας, διαπιστώθηκε σημαντική αύξηση στους πληθυσμούς *Enterobacteriaceae*, καθώς και στην Ολική Μεσόφιλη Χλωρίδα, γεγονός που υποδηλώνει εντονότερη μικροβιακή δραστηριότητα υπό τις εν λόγω συνθήκες. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι, σε ορισμένες αναλύσεις της δεύτερης αποστολής, δεν καταγράφηκε ουσιαστική αύξηση των πληθυσμών *Pseudomonas spp.*, σε αντίθεση με την αυξημένη Ολική Μεσόφιλη Χλωρίδα (OMX), αλλά και σε σύγκριση με τις τιμές που παρατηρήθηκαν στην πρώτη αποστολή. Η ασυμφωνία αυτή ενδέχεται να αποδίδεται σε πιθανή εργαστηριακή απόκλιση ή χρήση διαφορετικής μεθόδου για τον εντοπισμό *Pseudomonas spp.* αποτελεί σημαντικό μέρος της OMX και βάσει βιβλιογραφίας, αναμένεται να κυριαρχεί σε περιβάλλοντα συντήρησης με αυξημένο φορτίο.

Τα παραπάνω ευρήματα καταδεικνύουν τη διαφοροποίηση του μικροβιακού φορτίου και των αλλοιώσεων ανάλογα με τον τύπο συσκευασίας και θα αποτελέσουν αντικείμενο διεξοδικότερης ανάλυσης στο επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Συσχέτιση με την Ελαχιστοποίηση Σπατάλης Τροφίμων

Η ανάλυση έδειξε ότι η εφαρμογή των TTI μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της διαχείρισης του αποθέματος και τη μείωση της σπατάλης τροφίμων. Συγκεκριμένα:

- Σε δείγματα με σταθερή ψύξη: Τα προϊόντα παρέμειναν κατάλληλα έως την ημερομηνία λήξης, υποδεικνύοντας ορθές πρακτικές αποθήκευσης.

- Σε δείγματα με θερμοκρασιακή απόκλιση: Τα προϊόντα παρουσίασαν αλλοίωση πριν την τυπική ημερομηνία λήξης, υποδεικνύοντας ότι εάν δεν εφαρμόζοταν έγκαιρη παρέμβαση, θα είχαν απορριφθεί ως ακατάλληλα.

Προκλήσεις στη χρήση των TTI παρά τη χρησιμότητά τους, καταγράφηκαν περιπτώσεις όπου οι TTI δεν διαχειρίστηκαν σωστά από τα καταστήματα, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη εκπαίδευσης του προσωπικού στην ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την ενσωμάτωσή τους στις διαδικασίες διαχείρισης προϊόντων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε την επίδραση των θερμοκρασιακών αποκλίσεων στη διατήρηση της ποιότητας του νωπού χοιρινού κρέατος κατά τη διάρκεια της ψυκτικής αλυσίδας, αξιολογώντας παράλληλα τη χρησιμότητα των Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI) ως εργαλείων δυναμικής ιχνηλασιμότητας φρεσκότητας και εκτίμησης της αλλοίωσης. Ο πειραματικός σχεδιασμός περιλάμβανε ελεγχόμενη έκθεση των δειγμάτων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με στόχο όχι απλώς την επιβεβαίωση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην αλλοίωση, αλλά κυρίως τη συσχέτιση των ενδείξεων ευαισθησίας των TTI με τις πραγματικές μεταβολές στα μικροβιολογικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η διάρκεια και το επίπεδο της θερμικής επιβάρυνσης, όπως αποτυπώνεται από τους TTI, επηρεάζουν καθοριστικά την πορεία της αλλοίωσης.

4.1 Ερμηνεία Θερμοκρασιακών Δεδομένων και Ψυκτική Αλυσίδα

Οι καταγραφές θερμοκρασίας επιβεβαίωσαν ότι η ψύξη διατηρήθηκε σταθερά εντός των προβλεπόμενων ορίων κατά την αποθήκευση στο κέντρο διανομής (3-3,7°C). Η ομοιομορφία των θερμοκρασιών σε αυτό το στάδιο δείχνει την επάρκεια των συνθηκών ψύξης πριν από τη μεταφορά.

Ωστόσο, ο σχεδιασμός του πειράματος περιλάμβανε ελεγχόμενες εργαστηριακές προσομοιώσεις θερμοκρασιακών αποκλίσεων, σύμφωνα με τα επίπεδα ευαισθησίας των Δεικτών Χρόνου-Θερμοκρασίας (TTI). Τα δείγματα εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες άνω των 5°C και συγκεκριμένα στους 20°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) για 2 ώρες και 8 ώρες, σε επιλεγμένες ημέρες με βάση τη διάρκεια ζωής τους. Η ένδειξη των TTI αποτέλεσε το βασικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των προϊόντων, σε μικροβιολογικό, φυσικοχημικό και μακροσκοπικό επίπεδο.

Οι προσομοιώσεις αυτές επέτρεψαν την απομόνωση της επίδρασης των θερμοκρασιακών αποκλίσεων στην ποιότητα του προϊόντος, χωρίς την επίδραση άλλων αστάθμητων παραμέτρων που εμφανίζονται σε πραγματικές συνθήκες μεταφοράς και αποθήκευσης.

Η παρούσα μελέτη επιβεβαιώνει προηγούμενα ερευνητικά ευρήματα, όπως αυτά των Waldhans et al. (2024), που αναδεικνύουν ότι ακόμη και συγκεκριμένα σενάρια έκθεσης σε αυξημένες θερμοκρασίες, σε συνάρτηση με τη χρονική διάρκεια, μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στη διάρκεια ζωής των τροφίμων.

Επιπλέον, υπογραμμίζεται η σημασία της συνεχούς παρακολούθησης της ψυκτικής αλυσίδας μέσω καταγραφικών, όπως το Testo Saveris 2-H1, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα και η ασφάλεια των προϊόντων σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας.

4.2 Επίδραση των Θερμοκρασιακών Διακυμάνσεων στην Αλλοίωση του Κρέατος

Η μικροβιολογική ανάλυση των δειγμάτων επιβεβαίωσε την αρνητική επίδραση των θερμοκρασιακών αποκλίσεων στη διατηρησιμότητα του κρέατος.

Οι μικροβιολογικές αναλύσεις των δειγμάτων έδειξαν ότι η παραμονή εκτός ψύξης οδήγησε σε αύξηση των *Enterobacteriaceae* ειδικότερα σε αερόβιες συνθήκες αποθήκευσης. Παράλληλα όσο μειώνονταν η εναπομένουσα διάρκεια ζωής του προϊόντος, υπήρχε αύξηση *Pseudomonas spp.*, με τους δύο αυτούς δείκτες να αποτελούν τους κυριότερους αλλοιογόνους μικροοργανισμούς.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των *οξυγαλακτικών βακτηρίων* στα δείγματα που συσκευάστηκαν υπό κενό, καθώς και της Ολικής Μεσόφιλης Χλωρίδας σε δείγματα με παρουσία οξυγόνου, γεγονός που επιβεβαιώνει την έντονη μικροβιακή δραστηριότητα υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες αποθήκευσης.

Αντίθετα, οι Ζύμες και οι Μύκητες δεν εμφάνισαν συνεχή αύξηση και δεν επηρέασαν σημαντικά την κατάσταση των δειγμάτων.

Οι φυσικοχημικές αναλύσεις έδειξαν πτώση του pH στα αλλοιωμένα δείγματα, καθώς και αλλοιώσεις στο χρώμα και την υφή του κρέατος. Τα ευρήματα αυτά είναι σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Koutsoumanis & Taoukis, 2005), που καταδεικνύουν ότι οι μικροβιολογικές και φυσικοχημικές αλλαγές επιταχύνονται υπό συνθήκες θερμοκρασιακής κατάχρησης.

Παρόμοια ευρήματα καταγράφονται και από τις μελέτες (Giannakourou & Taoukis, 2003) και (Koutsoumanis & Nychas, 2000), οι οποίοι αξιοποίησαν δείκτες TTI για την εκτίμηση θερμικής καταπόνησης σε νωπά κρέατα, επισημαίνοντας την ανάπτυξη *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae* και οξυγαλακτικών βακτηρίων ως κύριους αλλοιογόνους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, η πρόσφατη μελέτη (Waldhans et al. 2024), επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των TTI στον εντοπισμό θερμικής καταπόνησης και τη συσχέτισή τους με τη μικροβιακή αλλοίωση σε πραγματικές συνθήκες εφοδιαστικής αλυσίδας

Οι μακροσκοπικές αλλαγές που καταγράφηκαν στις φωτογραφίες επιβεβαιώνουν την έναρξη αλλοίωσης, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τη διάρκεια και την ένταση της θερμοκρασιακής καταπόνησης που υπέστη κάθε δείγμα.

Τέλος, η αλλαγή στην απόχρωση των θερμοκρασιακών δεικτών TTI παρατηρήθηκε να εξελίσσεται σταδιακά, σε συνάρτηση με την έκθεση των δειγμάτων. Η οπτική μεταβολή των δεικτών συνδυάστηκε χρονικά με την αύξηση των αλλοιογόνων μικροοργανισμών και τη μεταβολή των φυσικοχημικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητά τους να αντανακλούν την πραγματική πορεία της αλλοίωσης.

Τα αποτελέσματα (Πίνακες 12-14) του οργανοληπτικού ελέγχου και του πληθυσμού των βέλτιστων μικροοργανισμών δεικτών (οξυγαλακτικά βακτήρια για συσκευασίες κενού και OMX, *Enterobacteriaceae* για αερόβια συσκευασία) φανερώνουν ότι σε συσκευασία κενού η συντήρηση (θερμοκρασιακή καταπόνηση) για 8h σε 20°C μειώνει τον χρόνο ζωής των

προϊόντων κατά τα 3 ημέρες, σε σχέση με την αναγραφόμενη ημερομηνία λήξης και τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε δείγματα χωρίς θερμοκρασιακή καταπόνηση (μάρτυρας). Αντίστοιχα, σε δείγματα με αερόβια συσκευασία (σε απλή σακούλα), η συντήρηση (θερμοκρασιακή καταπόνηση) για 8h σε 20°C μειώνει τον χρόνο ζωής των προϊόντων κατά τα 3 ημέρες σε σχέση με την μικρότερη θερμοκρασιακή καταπόνηση για 2h σε 20°C και κατά περισσότερο από 6 ημέρες σε σχέση με τον μάρτυρα που συντηρήθηκε εντός των προβλεπόμενων θερμοκρασιακών ορίων, ενώ η θερμοκρασιακή καταπόνηση για 2h σε 20°C μειώνει από μόνη της συντηρησιμότητα κατά τουλάχιστον 3 μέρες σε σχέση με τον μάρτυρα σε αερόβια συσκευασία. Η ανταπόκριση των TTI με ανάλογη αλλαγή χρώματος σε αυτές τις θερμοκρασιακές καταπονήσεις ήταν πολύ ακριβής σε ότι αφορά την καταπόνηση είτε των 2h σε 20°C, είτε των 8h σε 20°C. Αυτό σημαίνει ότι, ανάλογα με το επίπεδο της θερμοκρασιακής καταπόνησης που μπορεί να συμβεί και τη χρωματική εμφάνιση του δείκτη (TTI) η εταιρία μπορεί κρίνει εγκαίρως ότι το προϊόν πρόκειται να έχει μειωμένη διάρκεια ζωής (π.χ. κατά 3 ημέρες υπό κενό ή κατά τουλάχιστον 6 ημέρες σε αερόβια συσκευασία), ώστε να διαχειριστεί αναλόγως το προϊόν, προτού φτάσει στο σημείο να απορριφθεί κατά την αναγραφόμενη ημερομηνία λήξης.

4.3 Αξιολόγηση της Αποτελεσματικότητας των Δεικτών TTI

Οι θερμοκρασιακοί δείκτες TTI τύπου WarmMark 5°C αποδείχθηκαν λειτουργικοί στην ανίχνευση αποκλίσεων από το απαιτούμενο εύρος, παρέχοντας άμεσες οπτικές ενδείξεις για την έκθεση των προϊόντων σε θερμοκρασίες άνω του επιθυμητού ορίου. Στα δείγματα που διατηρήθηκαν εντός του εύρους ασφαλούς αποθήκευσης (<4°C), οι δείκτες διατήρησαν το αρχικό τους χρώμα, υποδηλώνοντας την ακεραιότητα της ψυκτικής αλυσίδας. Αντίθετα, σε περιπτώσεις παρατεταμένης έκθεσης σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 5°C, παρατηρήθηκε έντονη χρωματική μεταβολή στα πεδία Window 2 και Window 3 των TTI, ένδειξη σοβαρής

θερμικής καταπόνησης. Οι ενδείξεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αξιολόγησης για τη μελέτη της επίδρασης της θερμικής καταπόνησης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Η συσχέτιση της αλλαγής χρώματος με τα μικροβιολογικά και φυσικοχημικά ευρήματα των αντίστοιχων δειγμάτων ενισχύει την αξιοπιστία των δεικτών ως εργαλείο καταγραφής της αλυσίδας ψύξης του προϊόντος. Η ενσωμάτωσή τους στην εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στην έγκαιρη αναγνώριση ακατάλληλων συνθηκών μεταφοράς ή αποθήκευσης, παρέχοντας τη δυνατότητα για πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την ποιότητα και ασφάλεια του προϊόντος.

4.4 Επιπτώσεις στη Μείωση της Σπατάλης Τροφίμων

Η διατήρηση της ψυκτικής αλυσίδας είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση της σπατάλης τροφίμων. Σύμφωνα με τον FAO (2011), η ακατάλληλη ψύξη ευθύνεται για απώλειες που υπερβαίνουν το 13% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν ότι προϊόντα με ανεπαρκή ψύξη παρουσίασαν αλλοίωση πριν από την ημερομηνία λήξης, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε πρόωρες απορρίψεις.

Η ενσωμάτωση των ΤΤΙ στη διαχείριση των αποθεμάτων μπορεί να επιτρέψει δυναμικό προσδιορισμό της ποιότητας, μειώνοντας τις περιττές απορρίψεις και βελτιώνοντας την οικονομική αποδοτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας.

4.5 Περιορισμοί της Μελέτης και Πιθανά Σφάλματα

Οι περιορισμοί της παρούσας έρευνας περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα και τον αριθμό των δειγμάτων, το κόστος των δεικτών, το κόστος των αναλώσιμων για τις αναλύσεις, καθώς και πιθανά σφάλματα που μπορεί να επηρεάσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παράγοντες όπως οι συνθήκες μεταφοράς και αποθήκευσης, οι αποκλίσεις στη μεθοδολογία ανάλυσης και η χαμηλή ή ανεπαρκής επαναληψιμότητα των μετρήσεων μπορεί να εισάγουν αστάθεια στα

δεδομένα. Ενδεικτικά, σε επιμέρους μικροβιολογικές μετρήσεις (π.χ. *Pseudomonas spp.*), εντοπίστηκαν ασυνήθιστες τιμές που ενδέχεται να οφείλονται σε διαφοροποιήσεις της μεθοδολογίας ή σε σφάλμα κατά την απομόνωση και καταμέτρηση του συγκεκριμένου μικροοργανισμού.

Επιπλέον, ο ανθρώπινος παράγοντας, είτε μέσω υποκειμενικότητας κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είτε λόγω πιθανών λαθών κατά τη διεξαγωγή των αναλύσεων, αποτελεί έναν ακόμα περιορισμό. Συνολικά, τα ευρήματα της μελέτης θα πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες, ώστε να διασφαλιστεί η επιστημονική τους εγκυρότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο τον έλεγχο της ψυκτικής αλυσίδας νωπού κρέατος σε συνθήκες αερόβιας συσκευασίας και συσκευασίας υπό κενό (vacuum), μέσω της χρήσης Χρονοθερμοκρασιακών Δεικτών (TTI), καθώς και τη συσχέτιση των θερμοκρασιακών δεδομένων με το μικροβιακό φορτίο και τη συνολική διάρκεια ζωής των προϊόντων.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη σημασία της διατήρησης σταθερών θερμοκρασιών ψύξης, καθώς η ελεγχόμενη έκθεση των δειγμάτων σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, στο πλαίσιο της ενεργοποίησης των TTI, επέφερε σημαντική μικροβιολογική και οργανοληπτική αλλοίωση των προϊόντων. Επιπλέον, η χρονική διάρκεια της έκθεσης αποδείχθηκε καθοριστική, καθώς προκάλεσε σαφείς διαφοροποιήσεις στη διάρκεια ζωής των δειγμάτων.

Παράλληλα, οι TTI αποδείχθηκαν αποτελεσματικοί όχι μόνο στην έγκαιρη ανίχνευση θερμοκρασιακής κατάχρησης, αλλά και ως σημείο αξιολόγησης της ποιότητας, ενισχύοντας τις δυνατότητες ελέγχου, διαχείρισης αποθεμάτων και μείωσης της σπατάλης τροφίμων.

5.1 Κύρια Συμπεράσματα

Από τη μελέτη προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

1. Η διατήρηση σταθερής ψύξης και ο περιορισμός της διάρκειας θερμοκρασιακής απόκλισης καθορίζουν την ποιότητα του κρέατος

- ❖ Τα προϊόντα που διατηρήθηκαν σε θερμοκρασίες 0-4°C παρουσίασαν περιορισμένες αλλοιώσεις μέχρι την ημερομηνία λήξης τους.
- ❖ Αντίθετα, θερμοκρασιακές αποκλίσεις (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) επιτάχυναν την ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών, όπως *Pseudomonas spp.*, *Enterobacteriaceae* και οξυγαλακτικά βακτήρια, οδηγώντας σε πρόωρη αλλοίωση. Η συσχέτιση αυτών των αλλαγών με τις μεταβολές χρώματος στους TTI ενισχύει την αξία

των δεικτών ως εργαλεία για τη παρακολούθηση της ψυκτικής αλυσίδας και τη μελέτη της θερμοκρασιακής κατάχρησης σε πραγματικές συνθήκες.

- ❖ Σε αερόβιες συνθήκες επικράτησαν *Enterobacteriaceae* και *Pseudomonas spp.*, ενώ στη συσκευασία υπό κενό κυριάρχησαν τα οξυγαλακτικά βακτήρια. Σημαντική αύξηση της Ολικής Μεσόφιλης Χλωρίδας (OMX) καταγράφηκε επίσης σε δείγματα με παρουσία οξυγόνου.
- ❖ Επιπλέον, μελέτες όπως αυτές των Giannakourou & Taoukis (2003) και Koutsoumanis & Nychas (2000) ενισχύουν τα παραπάνω ευρήματα, καταδεικνύοντας την άμεση συσχέτιση μεταξύ θερμικής καταπόνησης και ανάπτυξης αλλοιογόνων βακτηρίων, με κυριότερους μικροοργανισμούς τις *Pseudomonas spp.*, τα *Enterobacteriaceae*, την Ολική Μεσόφιλη Χλωρίδα και τα οξυγαλακτικά βακτήρια. Παρόμοια ευρήματα κατέγραψε και η Waldhans et al. (2024) σε χοιρινό κρέας υπό πραγματικές συνθήκες, επιβεβαιώνοντας τη μικροβιακή συμπεριφορά που καταγράφηκε και στην παρούσα εργασία.
- ❖ Η διάρκεια παραμονής των δειγμάτων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρέασε σημαντικά τον χρόνο ζωής τους, με τα δείγματα που εκτέθηκαν για περισσότερες ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (8h x 20°C) να εμφανίζουν αλλοιώσεις νωρίτερα τρεις ημέρες πριν την ημερομηνία λήξης, σε αντίθεση με όσα παρέμειναν εντός ψυκτικών ορίων (0–4°C), τα οποία διατήρησαν σταθερή μικροβιακή και οργανοληπτική εικόνα.

2. Η χρήση των TTI για την παρακολούθηση της ποιότητας και τη στρατηγική διαχείριση αποθεμάτων

- ❖ Η αλλαγή χρώματος των TTI συνέπιπτε με την αύξηση του μικροβιακού φορτίου και την εμφάνιση αλλοιώσεων, επιβεβαιώνοντας τη συσχέτισή τους με την αλλοίωση των προϊόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν συσχέτιση με την ανάπτυξη αλλοιογόνων

μικροοργανισμών, όπως *Enterobacteriaceae* και οξυγαλακτικά βακτήρια, καθώς και αύξηση της Ολικής Μεσόφιλης Χλωρίδας (OMX), η οποία υποδηλώνει γενική μικροβιακή επιβάρυνση του προϊόντος.

- ❖ Στις εργαστηριακές προσομοιώσεις διαταραχής της ψυκτικής αλυσίδας, σε περίπου ένα από τα τρία δείγματα η χρήση των TTI θα μπορούσε να είχε επιτρέψει την έγκαιρη απόσυρση βάσει της πραγματικής τους κατάστασης ή προώθησή τους, αποτρέποντας την αλλοίωση ανεξάρτητα από την ημερομηνία λήξης. Για παράδειγμα, φάνηκε από τις συνολικές αναλύσεις των προϊόντων υπό κενό ότι η διάρκεια ζωής μειώνεται κατά 3 ημέρες με θερμοκρασιακή καταπόνηση 8h x 20°C σε σχέση με τον μάρτυρα (δείγματα συντηρημένα σε έως 4°C), ενώ σε αερόβιες συνθήκες κατά τουλάχιστον 6 ημέρες σε σχέση με τον μάρτυρα ή κατά τις 3 ημέρες σε σχέση με την συντομότερη καταπόνηση των 2h x 20°C. Τα παραπάνω προκύπτουν από τις μικροβιολογικές και οργανοληπτικές αναλύσεις, αλλά ανιχνεύθηκαν και με βάση την αλλαγή χρώματος των TTI που χρησιμοποιήθηκαν.
- ❖ Η χρήση των TTI μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση αποθεμάτων μέσω προσαρμογής του συστήματος FIFO/FEFO, βασισμένη στην πραγματική ποιότητα των προϊόντων και όχι μόνο στην αναγραφόμενη ημερομηνία λήξης. Επιπλέον, η εφαρμογή τους μπορεί να μειώσει τις επιστροφές και τις απορρίψεις, βελτιώνοντας τη βιωσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας και ενισχύοντας τον ποιοτικό έλεγχο σε κρίσιμα σημεία της ψυκτικής αλυσίδας.
- ❖ Ωστόσο, η εφαρμογή των TTI παρουσίασε περιορισμούς, όπως το κόστος προμήθειας και η απόρριψη τους από εργαζόμενους λόγω λανθασμένης κατανόησης. Η ενδεχόμενη αξιοποίησή τους από αλυσίδες λιανικής για τη χύμα πώληση προϊόντων θα μπορούσε να αποτελέσει πεδίο περαιτέρω διερεύνησης και εφαρμογής.

3. Η σπατάλη τροφίμων μπορεί να μειωθεί μέσω τεχνολογικών λύσεων

- ❖ Βάσει της αξιοπιστίας τους στην αποτύπωση θερμικής καταπόνησης, οι TTI μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μόνο για την αξιολόγηση ποιότητας, αλλά και ως εργαλείο στρατηγικής διαχείρισης αποθεμάτων στο λιανεμπόριο.
- ❖ Η εφαρμογή των TTI επιτρέπει την προσαρμογή του συστήματος FIFO/FEFO βάσει της πραγματικής ποιότητας του προϊόντος και όχι μόνο της αναγραφόμενης ημερομηνίας λήξης. Όπως φάνηκε και από τις εργαστηριακές προσομοιώσεις, σε ορισμένα δείγματα θα μπορούσε να είχε προβλεφθεί εγκαίρως η αλλοίωση και να είχε αποφευχθεί η σπατάλη μέσω έγκαιρης προώθησης ή κατανάλωσης.
- ❖ Σε αντίστοιχη μελέτη πραγματικών συνθηκών λιανεμπορίου, η Waldhans et al. (2024) αξιολόγησε τη χρήση TTI ως εργαλείο διαχείρισης της ποιότητας στο τελικό στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας, καταγράφοντας θετική συμβολή στη μείωση σπατάλης και στη λήψη αποφάσεων βάσει πραγματικής κατάστασης των προϊόντων, προσφέροντας σημαντικά οφέλη στη διαχείριση αποθεμάτων.

5.2 Προτάσεις Βελτίωσης

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας, προτείνονται οι εξής βελτιώσεις για την ενίσχυση της ψυκτικής αλυσίδας, τη βελτίωση της διαχείρισης αποθεμάτων και τη μείωση της σπατάλης τροφίμων, εστιάζοντας στην πρακτική εφαρμογή των TTI. Οι προτεινόμενες παρεμβάσεις ευθυγραμμίζονται με τον Στόχο Βιώσιμης Ανάπτυξης SDG 12.3 του ΟΗΕ, ο οποίος προβλέπει τη μείωση της παγκόσμιας σπατάλης τροφίμων κατά 50% έως το 2030.

1. Επέκταση της χρήσης των TTI σε προϊόντα υψηλού κινδύνου.

- ❖ Η ευρεία εφαρμογή δεικτών TTI σε παρτίδες νωπών κρεάτων, ιδιαίτερα σε εκείνες που υπόκεινται σε μεταφορά μεγάλων αποστάσεων ή σύνθετες εφοδιαστικές αλυσίδες, μπορεί να ενισχύσει τον έλεγχο της ποιότητας και να επιτρέψει τη στοχευμένη

διαχείριση των αποθεμάτων. Η εφαρμογή τους θα μπορούσε επίσης να συμβάλει στη μείωση των απωλειών λόγω θερμοκρασιακής καταπόνησης, όπως διαπιστώθηκε στην παρούσα μελέτη.

- ❖ Η μελέτη Waldhans et al. (2024) επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα των TTI στον εντοπισμό κρίσιμων σημείων θερμικής καταπόνησης και στη μείωση των απορρίψεων σε προϊόντα χοιρινού.
- ❖ Η υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών συνάδει με τις κατευθυντήριες γραμμές του SDG 12.3 για μείωση της σπατάλης τροφίμων μέσω καινοτομιών που στοχεύουν στην πρόληψη απωλειών σε επίπεδο λιανικής και καταναλωτή.

2. Εκπαίδευση προσωπικού στη διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας.

- ❖ Η αποτελεσματική χρήση δεικτών TTI προϋποθέτει την εκπαίδευση του προσωπικού λιανεμπορίου και αποθηκών, τόσο στην ορθή ερμηνεία των ενδείξεων όσο και στην προσαρμογή των διαδικασιών διαχείρισης και αποθήκευσης βάσει των πραγματικών θερμοκρασιακών δεδομένων.
- ❖ Η εξοικείωση με τεχνολογίες παρακολούθησης της ποιότητας θα ενισχύσει την ικανότητα λήψης αποφάσεων σε κρίσιμα σημεία της εφοδιαστικής αλυσίδας και θα μειώσει τον κίνδυνο μη αναγκαίων απορρίψεων.

3. Βελτίωση των συστημάτων καταγραφής θερμοκρασίας.

- ❖ Η ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών όπως το Internet of Things (IoT) και τα συστήματα blockchain μπορεί να προσφέρει συνεχή, σε πραγματικό χρόνο καταγραφή θερμοκρασιακών δεδομένων σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας.

- ❖ Μέσω αυτής της προσέγγισης, οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις μπορούν να εντοπίζονται άμεσα, επιτρέποντας διορθωτικές ενέργειες πριν προκύψει μικροβιακή αλλοίωση, ενώ παράλληλα ενισχύεται η ιχνηλασιμότητα και η διαφάνεια.

4. Αναβάθμιση των πρωτοκόλλων διαχείρισης αποθεμάτων.

- ❖ Η μετάβαση από στατικά μοντέλα όπως το FIFO (First-In First-Out) και FEFO (First-Expired First-Out) σε δυναμικά πρωτόκολλα διαχείρισης που λαμβάνουν υπόψη την πραγματική κατάσταση του προϊόντος, όπως καταγράφεται από δείκτες TTI ή αισθητήρες φρεσκότητας, μπορεί να περιορίσει τις περιττές απορρίψεις τροφίμων.
- ❖ Η προσαρμογή των αποθεμάτων βάσει ποιοτικών παραμέτρων και όχι μόνο ημερομηνιών λήξης ενισχύει τη βιώσιμη διαχείριση και συνδέεται άμεσα με τους στόχους του SDG 12.3.

5. Περαιτέρω έρευνα σε διαφορετικά προϊόντα και συνθήκες αποθήκευσης.

- ❖ Η διερεύνηση της εφαρμογής των TTI σε διάφορα προϊόντα ζωικής προέλευσης και σε διαφορετικές συνθήκες αποθήκευσης, καθώς και η ανάπτυξη νέων, βελτιωμένων τύπων συσκευασίας (έξυπνης, ενεργής), μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της διατήρησης της διάρκειας ζωής των προϊόντων και στη μείωση της σπατάλης τροφίμων.

5.3 Συνολική Εκτίμηση και Μελλοντικές Προοπτικές

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε τη σημασία της παρακολούθησης της ψυκτικής αλυσίδας ως καθοριστικό παράγοντα για τη διατήρηση της ποιότητας των νωπών κρεάτων. Οι Χρονοθερμοκρασιακοί Δείκτες (TTI) αποδείχθηκαν πολύτιμο εργαλείο για την οπτικοποίηση της θερμοκρασιακής καταπόνησης των προϊόντων, επιτρέποντας την έγκαιρη λήψη

αποφάσεων και τη δυναμική διαχείριση αποθεμάτων, με απώτερο στόχο τη μείωση της σπατάλης τροφίμων.

Η αξιοποίηση καινοτόμων τεχνολογιών όπως TTI, IoT και blockchain αναμένεται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη μελλοντική διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων.

Η συνδυασμένη χρήση αυτών των εργαλείων μπορεί να προσφέρει ακριβέστερη παρακολούθηση των συνθηκών συντήρησης, ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας, καθώς και καλύτερη εκτίμηση της πραγματικής φρεσκότητας των προϊόντων.

Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εστιάσουν στην εφαρμογή των TTI και σε άλλα προϊόντα ζωικής προέλευσης, όπως κοτόπουλο, μοσχάρι και ψάρια, καθώς και στην αξιολόγηση νέων τύπων δεικτών με ποικίλες θερμοκρασιακές ευαισθησίες. Παράλληλα, η αξιολόγηση της συμβατότητας των TTI με διαφορετικά υλικά συσκευασίας, καθώς και η ένταξή τους σε ολοκληρωμένα ψηφιακά συστήματα ελέγχου, αποτελούν κρίσιμα πεδία εξέλιξης.

Η μείωση της σπατάλης τροφίμων παραμένει μία από τις βασικές προκλήσεις του σύγχρονου διατροφικού συστήματος, όπως διατυπώνεται και στον Στόχο Βιώσιμης Ανάπτυξης SDG 12.3.

Η παρούσα έρευνα επιβεβαιώνει ότι η εφαρμογή τεχνολογιών παρακολούθησης μπορεί να ενισχύσει τη βιωσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, βελτιώνοντας τη διαχείριση αποθεμάτων και περιορίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την απόρριψη τροφίμων. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων που συνδυάζουν αισθητήρες TTI, τεχνολογίες IoT και ψηφιακές πλατφόρμες, αναδεικνύεται ως μια καινοτόμος κατεύθυνση για τη διασφάλιση της ποιότητας, της ασφάλειας και της αειφορίας των τροφίμων σε όλο το μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adzitey, F., & Huda, N. (2011). Pale soft exudative (PSE) and dark firm dry (DFD) meats: Causes and measures to reduce these incidences—A mini review. *International Food Research Journal*, 18(1), 11-20.
- Badia-Melis, R., Mishra, P., & Ruiz-García, L. (2018). Food traceability: New trends and recent advances. A review. *Food Control*, 92, 505–519. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.05.019>
- Belcher, J. N. (2006). Industrial packaging developments for the global meat market. *Meat Science*, 74(1), 143-148. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.08.021>
- Ercolini, D., Russo, F., Torrieri, E., Masi, P., & Villani, F. (2006). Changes in the spoilage-related microbiota of beef during refrigerated storage under different packaging conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(7), 4663–4671. <https://doi.org/10.1128/AEM.00468-06>
- European Commission. (2005). Commission regulation (EC) No 2073/2005 of 15 November 2005 on microbiological criteria for foodstuffs. *Official Journal of the European Union*, L338, 1–26.
- European Food Safety Authority (EFSA). (2021). Scientific Opinion on the public health risks of meat-borne Salmonella and its control options. *EFSA Journal*, 19(12), e06523. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6523>
- Eurostat. (2021). The scale of food waste in Europe: Estimated amount of food wasted per capita in European countries in 2021. Retrieved from <https://www.statista.com>
- Farber, J. M., & Peterkin, P. I. (1991). *Listeria monocytogenes*, a food-borne pathogen. *Microbiological Reviews*, 55(3), 476–511. <https://doi.org/10.1128/mr.55.3.476-511.1991>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2019). The state of food and agriculture: Moving forward on food loss and waste reduction. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca6030en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2021). Food loss and waste and the right to adequate food: Making the connection. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb6590en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. FAO. <https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Food wastage footprint: Impacts on natural resources: Summary report. FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf>

- Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2003). Application of a TTI-based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end. *Journal of Food Science*, 68(6), 201-209.
- Gill, C. O. (2007). Microbiological conditions of meats from large game animals and birds. *Meat Science*, 77(2), 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.023>
- Han, J. H., Ho, C. H., & Rodrigues, E. T. (2018). Intelligent packaging for food products. *Innovative Food Packaging Solutions*, 35, 1–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811515-2.00001-X>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Jakobsen, M., & Bertelsen, G. (2002). The use of CO₂ in packaging of fresh red meats and its effect on chemical quality changes in the meat: A review. *Meat Science*, 52(3), 205-221. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00082-6)
- James, S. J., & James, C. (2014). The cold chain and climate change. *Food Research International*, 57, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.013>
- Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). *Modern food microbiology* (7th ed.). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/b100840>
- Koutsoumanis, K., & Nychas, G. J. E. (2000). Application of a systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life predictions. *International Journal of Food Microbiology*, 60(2-3), 171-184
- Koutsoumanis, K., & Taoukis, P. (2005). Meat storage: Maintaining product quality at consumer end. In J. N. Sofos (Ed.), *Improving the Safety of Fresh Meat* (pp. 503-561). Woodhead Publishing.
- Koutsoumanis, K. P., Stamatiou, A. P., Drosinos, E. H., & Nychas, G. J. E. (2006). Control of spoilage microorganisms in minced pork by a self-developed modified atmosphere induced by the respiratory activity of meat microflora. *Food Microbiology*, 23(5), 423–429. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2005.07.002>
- Koutsoumanis, K. P., Taoukis, P. S., & Nychas, G. J. E. (2010). Meat spoilage prediction and quality assessment using time-temperature integrators. *International Journal of Food Microbiology*, 140(3), 223–229. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.04.027>

- Koutsoumanis, K., Lambropoulou, K., & Nychas, G. J. (2016). A predictive modeling approach on the spoilage dynamics of chilled beef. *International Journal of Food Microbiology*, 210, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.013>
- Ladikos, D., & Lougovois, V. (1990). Lipid oxidation in muscle foods: A review. *Food Chemistry*, 35(4), 295–314. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(90\)90016-B](https://doi.org/10.1016/0308-8146(90)90016-B)
- Leistner, L., & Gorris, L. G. M. (1995). Food preservation by hurdle technology. *Trends in Food Science & Technology*, 6(2), 41–46. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)88941-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)88941-4)
- Mancini, R. A., & Hunt, M. C. (2005). Current research in meat color. *Meat Science*, 71(1), 100-121. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.03.003>
- Mead, P. S., Slutsker, L., Dietz, V., McCaig, L. F., Bresee, J. S., Shapiro, C., & Tauxe, R. V. (1999). Food-related illness and death in the United States. *Emerging Infectious Diseases*, 5(5), 607–625. <https://doi.org/10.3201/eid0505.990502>
- Montanari, R. (2008). Cold chain tracking: A managerial perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 19(8), 425-431. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.03.009>
- Shahidi, F. (1994). Assessment of lipid oxidation and off-flavour development in meat and meat products. *ACS Symposium Series*, 5(1), 103–109. <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0551.ch008>
- Sperber, W. H., & Doyle, M. P. (2009). *Compendium of the microbiological spoilage of foods and beverages*. Springer Science & Business Media.
- SMAS. (2005). Time-temperature indicators for food safety and quality control. *Scientific Methods for Advanced Shelf-life assessment*.
- SpotSee. (n.d.). *WarmMark temperature indicator*. https://shop.spotsee.io/temperature_indicators/cold_chain_indicators/warmmark_warmmark
- Statista. (2017). Food loss and waste per capita worldwide by stage and region 2017. <https://www.statista.com/statistics/948358/global-food-loss-and-waste-per-capita-by-stage-and-region>
- Taoukis, P. S., & Labuza, T. P. (2003). Time-temperature indicators (TTIs). In: H. R. Taylor (Ed.), *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Testo. (n.d.). *The world market leader in measurement technology*. <https://www.testo.com/en>
- Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 103, 1-16.

- Tompkin, R. B. (2002). Control of *Listeria monocytogenes* in the food-processing environment. *Journal of Food Protection*, 65(4), 709–725. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.4.709>
- Waldhans, T., Putz, L., Smetana, S., & Fitz, T. (2024). Digital time-temperature indicators: A comprehensive approach for optimizing cold chain logistics. *Food Packaging and Shelf Life*, 39, 101091. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101091>
- Waldhans, T., Klein, G., & Nurmi, E. (2024). Impact of temperature deviations on the shelf life of pork under real-life conditions. *Food Control*, 138, 108992
- Wood, J. D., Enser, M., Fisher, A. V., Nute, G. R., Sheard, P. R., Richardson, R. I., & Whittington, F. M. (2008). Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Science*, 78(4), 343-358. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.019>
- WRAP (Waste & Resources Action Programme). (2021). Food waste reduction roadmap. WRAP UK. <https://wrap.org.uk/resources/report/food-waste-reduction-roadmap>
- Zhang, Y., Liu, Z., & Xie, J. (2021). The Internet of Things in food safety: A review of current and future applications. *Food Control*, 126, 108079. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108079>
- Zhu, X., Yan, W., & Guo, J. (2020). Cold chain logistics and food safety: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.002>

ABSTRACT

The maintenance of the cold chain is a key prerequisite for the safety, quality, and shelf life of fresh animal-derived products. However, temperature deviations recorded during the transportation, storage, and distribution of food may accelerate the growth of spoilage and pathogenic microorganisms, leading to quality degradation, food losses, and potential public health risks. This study focuses on recording the cold chain conditions in the retail sector and investigating the impact of temperature fluctuations—as defined by the detection levels of the Time-Temperature Indicators (TTIs) used—on the quality and spoilage of fresh pork meat.

The research was based on the use of Time-Temperature Indicators (TTIs) and wireless temperature data loggers to continuously monitor the cold chain from the distribution stage to storage at retail points. In parallel, microbiological and physicochemical analyses were conducted on pork meat samples, aiming to assess changes in key parameters such as microbial growth (*Pseudomonas spp.*, *Enterobacteriaceae*, lactic acid bacteria), pH, weight loss, and changes in color, odor, and texture. Furthermore, the correlation between temperature deviations and the acceleration of product spoilage was examined, along with the effectiveness of TTIs as tools for dynamic freshness traceability compared to static expiration dates.

The results showed that changes in TTI color and temperature fluctuations, in relation to the duration of product exposure, were directly associated with increased microbial load and sample spoilage. The growth of spoilage bacteria led to noticeable quality deterioration, reducing product shelf life and increasing the likelihood of rejection prior to consumption. The use of TTIs enabled more accurate real-time assessment of food condition, offering a more reliable monitoring method compared to traditional systems based solely on expiration dates. Moreover, the need for integrating advanced cold chain management technologies—such as TTIs, the Internet of Things (IoT), and blockchain—was highlighted, with the aim of improving

traceability, enabling early detection of temperature deviations, and reducing the economic and environmental impacts associated with food losses.

Food losses due to temperature deviations affect not only producers and retailers but also have significant environmental consequences. Food waste entails the loss of valuable natural resources such as water and energy used during production, processing, and transportation. At the same time, discarded quantities contribute to increased organic waste and greenhouse gas emissions, further burdening the environment. Therefore, improving cold chain management is not only a commercial necessity but also a critical factor for the sustainability of the global food supply chain.

Overall, this study highlights the importance of maintaining optimal refrigeration conditions at every stage of the supply chain for fresh animal-derived products. The integration of intelligent monitoring systems and dynamic freshness assessment tools such as TTIs, IoT, and blockchain can significantly contribute to reducing food losses, enhancing food safety, and promoting more sustainable practices in the food supply chain.

Keywords: Cold chain, Time-Temperature Indicators (TTI), meat spoilage, food microbiology, meat quality, food waste, food safety.