

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

Τίτλος: “Εφαρμογές Ενεργού Συσκευασίας σε Φρέσκα Ιχθυηρά και Νωπά Προϊόντα
Κρέατος”

Τσουκαλάς Κωνσταντίνος

Βόλος, 2025

UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF AGRICULTURE, ICHTHYOLOGY & AQUATIC
ENVIRONMENT

DEPARTMENT OF FOOD SCIENCE & NUTRITION

INTERDEPARTMENTAL POSTGRADUATE PROGRAM
«TECHNOLOGY, QUALITY AND SAFETY OF FOODS OF ANIMAL ORIGIN»

POSTGRADUATE DIPLOMA THESIS

Title: “Active Packaging Applications in Fresh Meat and Fish Products”

Tsoukalas Konstantinos

Volos, 2025

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος: “Εφαρμογές Ενεργού Συσκευασίας σε Φρέσκα Ιχθυηρά και Νωπά Προϊόντα Κρέατος”

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) **Γώγου Ελένη**, Επίκουρη Καθηγήτρια - Μηχανική διεργασιών τροφίμων και επεξεργασία/συντήρηση φρούτων και λαχανικών, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, Σχολή Τεχνολογίας Τροφίμων και Διατροφής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, **Επιβλέπουσα**,
- 2) **Γιαβάσης Ιωάννης**, Αναπληρωτής Καθηγητής – Μικροβιολογία τροφίμων και μικροβιακές ζυμώσεις για παραγωγή βιοπολυμερών, Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής, Σχολή Γεωπονικών επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**,
- 3) **Κακαγιάννη Μυρσίνη**, Επίκουρη Καθηγήτρια – Τεχνολογία, ποιότητα και ασφάλεια τροφίμων ζωικής προέλευσης, Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής, Σχολή Γεωπονικών επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα Επίκουρη Καθηγήτρια κα Ελένη Γώγου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη καθώς και τις εύστοχες παρατηρήσεις της σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος πρώτα από όλα για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσαν να συμμετάσχω σε αυτό το πρόγραμμα, καθώς και για την συνεισφορά τους στην προσωπική μου εξέλιξη μέσα από τις νέες γνώσεις που μου προσέφεραν. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές από το προπτυχιακό πρόγραμμα, τους συμφοιτητές μου και τους φίλους μου για την βοήθεια και την ενθάρρυνση που παρείχαν. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου για την αδιάκοπη στήριξη και κατανόηση σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς την δική τους πίστη η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει διεξοδικά την ανάπτυξη, εφαρμογή και προοπτική της ενεργού συσκευασίας στον τομέα των τροφίμων, με έμφαση στα φρέσκα ιχθυηρά και τα νωπά προϊόντα κρέατος. Η ενεργή συσκευασία ορίζεται ως εκείνο το σύστημα συσκευασίας που περιλαμβάνει συστατικά τα οποία σκοπίμως απορροφούν ή απελευθερώνουν ουσίες στο τρόφιμο ή στο περιβάλλον του, με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής και τη διατήρηση ή βελτίωση της ποιότητάς του. Στόχος της εργασίας υπήρξε η διερεύνηση των κυριότερων τεχνολογιών που συνδυάζουν παραδοσιακές μεθόδους συντήρησης, όπως η τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), η συσκευασία κενού (VP) και η υπερυψηλή πίεση (High Pressure, HP), με ενεργά υλικά συσκευασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη βιοπολυμερών και φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, όπως η νανοκυτταρίνη, το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και οι βιοσυνθετικές μεμβράνες, τα οποία συνδυάζουν τη λειτουργικότητα με τη βιωσιμότητα. Παράλληλα, εξετάστηκαν οι τεχνολογίες χημικής και μηχανικής ανακύκλωσης, η βιοαποικοδόμηση και η κομποστοποίηση, καθώς και οι περιορισμοί τους σε όρους ενεργειακής απαίτησης και κανονιστικού πλαισίου. Η εργασία ανέδειξε επίσης την αναδυόμενη συμβολή των έξυπνων συστημάτων, όπως οι αισθητήρες φρεσκάδας, οι δείκτες αερίων και οι ψηφιακές τεχνολογίες ιχνηλασιμότητας μέσω blockchain και RFID/NFC, που μετατρέπουν τη συσκευασία σε δυναμικό εργαλείο διασφάλισης ποιότητας και ενίσχυσης της εμπιστοσύνης του καταναλωτή.

Σε εμπορικό επίπεδο, παρουσιάστηκαν εφαρμογές από τη βιομηχανία κρέατος, ιχθυηρών και έτοιμων γευμάτων, με στοιχεία που αποδεικνύουν την αυξανόμενη διείσδυση της ενεργού συσκευασίας στην αγορά. Εντούτοις, η καταναλωτική αποδοχή παραμένει κρίσιμος παράγοντας, καθώς επηρεάζεται από την ενημέρωση, την αντίληψη για την ασφάλεια και το επιπλέον κόστος. Η εργασία υπογραμμίζει ότι οι νεότερες γενιές καταναλωτών (Millennials, Gen Z) είναι περισσότερο δεκτικές σε τεχνολογίες που συνδέονται με τη βιωσιμότητα, σε σύγκριση με μεγαλύτερες ηλικιακές ομάδες.

Η κριτική ανάλυση της βιβλιογραφίας ανέδειξε κενά που αφορούν τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των ενεργών ουσιών που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ενεργών υλικών συσκευασίας, την τοξικολογική αξιολόγηση των συστατικών, την ανακύκλωση σύνθετων πολυστρωματικών υλικών και την ανάγκη για ολοκληρωμένα συστήματα που συνδέουν ενεργή συσκευασία, έξυπνους αισθητήρες και τεχνολογίες IoT (Internet of Things). Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα εστιάζουν σε πιλοτικές βιομηχανικές εφαρμογές, διεπιστημονικές συνεργασίες και σε μελέτες καταναλωτικής συμπεριφοράς που θα ενισχύσουν τη διαφάνεια και την αποδοχή της τεχνολογίας της ενεργού συσκευασίας τροφίμων.

Συνολικά, η εργασία καταδεικνύει ότι η ενεργή συσκευασία όταν αυτή συνδυάζεται και με την τεχνολογία της έξυπνης συσκευασίας συνιστά στρατηγικό εργαλείο για τον εκσυγχρονισμό της εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων και ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μείωση της σπατάλης τροφίμων μέσω της δυνατότητας επέκτασης της διάρκειας ζωής ευαλλοίωτων τροφίμων με μικρή διάρκεια ζωής όπως είναι τα φρέσκα ιχθυηρά και τα νωπά προϊόντα κρέατος. Η επιτυχής ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών προϋποθέτει την ισορροπία ανάμεσα στη λειτουργικότητα, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την εμπιστοσύνη του καταναλωτή, διαμορφώνοντας έτσι ένα νέο πλαίσιο όπου η συσκευασία μετατρέπεται σε κρίσιμο πυλώνα της ασφάλειας, της ποιότητας και της βιώσιμης ανάπτυξης.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργή συσκευασία, Έξυπνη συσκευασία, Βιοπολυμερή, Ιχνηλασιμότητα τροφίμων, Βιωσιμότητα, Καταναλωτική αποδοχή, Αισθητήρες, Blockchain.

Abstract

This thesis provides an in-depth literature review on the development, application, and prospects of active packaging in the food sector, with an emphasis on fresh fish and meat products. Active packaging is defined as a packaging system that deliberately contains components capable of absorbing or releasing substances into the food or its surrounding environment, with the aim of extending shelf life and preserving or improving product quality. The purpose of this study was to explore the main technologies that combine traditional preservation methods—such as modified atmosphere packaging (MAP), vacuum packaging (VP), and high-pressure processing (HPP)—with active packaging materials. Particular emphasis was placed on the development of biopolymers and environmentally friendly materials, such as nanocellulose, polylactic acid (PLA), and biosynthetic membranes, which combine functionality with sustainability. Furthermore, the study examined chemical and mechanical recycling technologies, biodegradation, and composting, as well as their limitations in terms of energy requirements and regulatory constraints.

The research also highlighted the emerging role of intelligent packaging systems, such as freshness sensors, gas indicators, and digital traceability technologies using blockchain and RFID/NFC, which transform packaging into a dynamic tool for ensuring quality and enhancing consumer trust.

At the commercial level, applications from the meat, seafood, and ready-meal industries were presented, showing the growing penetration of active packaging in the market. However, consumer acceptance remains a key factor, as it is influenced by public awareness, perceptions of safety, and additional cost. The study underscores that younger generations of consumers (Millennials and Gen Z) are more receptive to technologies associated with sustainability compared to older age groups.

The critical review of the literature revealed gaps related to the long-term stability of active compounds used in the development of functional materials, the toxicological assessment of components, the recyclability of multilayer composite materials, and the need for integrated systems that connect active packaging with smart sensors and IoT technologies. Future research should focus on pilot-scale industrial applications, interdisciplinary collaborations, and consumer behavior studies aimed at improving transparency and acceptance of active food packaging technologies.

Overall, the study demonstrates that active packaging, especially when combined with intelligent packaging technologies, constitutes a strategic tool for modernizing the food supply chain and a valuable means of reducing food waste by extending the shelf life of highly perishable products such as fresh fish and meat. The successful integration of these technologies requires a balance between functionality, environmental sustainability, and consumer confidence, thereby shaping a new framework in which packaging becomes a key pillar of safety, quality, and sustainable development.

Keywords: Active packaging, Intelligent packaging, Biopolymers, Food traceability, Sustainability, Consumer acceptance, Sensors, Blockchain.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Η Τεχνολογία της Ενεργού Συσκευασίας	6
1.1 Λειτουργίες συσκευασίας τροφίμων.....	6
1.1.1 Ορισμοί – βασικές αρχές	6
1.1.2 Οφέλη και περιορισμοί	8
1.2 Η τεχνολογία της ενεργού συσκευασίας.....	10
1.2.1 Συστήματα απορρόφησης (O ₂ , CO ₂ , υγρασία)	11
1.2.2 Συστήματα εκπομπής.....	17
1.2.3 Τεχνολογίες υλικών (φιλμ, ένθετα, μεμβράνες).....	22
1.3 Τεχνολογικές Προκλήσεις και Νομοθετικό Πλαίσιο	25
1.3.1 Προβλήματα εφαρμογής, μετανάστευση ουσιών	25
1.3.2 Κανονισμοί ΕΕ.....	26
1.3.3 Ετικετογράφηση και διαφάνεια αγοράς.....	28
Κεφάλαιο 2: Εφαρμογές ενεργού συσκευασίας σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης.....	31
2.1 Αντιδράσεις υποβάθμισης ποιότητας φρέσκων ιχθυηρών	31
2.2 Μελέτες – επιδράσεις στη διατήρηση ποιότητας νωπών προϊόντων κρέατος.....	35
2.3 Εφαρμοσμένες τεχνολογίες ενεργού συσκευασίας.....	40
2.3.1 Συστήματα απορρόφησης (O ₂ , CO ₂ , υγρασία)	40
2.3.2 Συστήματα εκπομπής (αντιοξειδωτικά, αντιμικροβιακοί παράγοντες)	41
2.3.3 Τεχνολογίες υλικών (φιλμ, ένθετα, μεμβράνες).....	45
2.4. Τύποι ενεργού συσκευασίας και αποτελεσματικότητα.....	52
2.5.Παράγοντες επίδρασης: θερμοκρασία, pH, υγρασία	54
Κεφάλαιο 3: Καινοτομία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενεργού συσκευασίας.....	57
3.1 Συνδυασμός ενεργού συσκευασίας με άλλες τεχνολογίες συσκευασίας και επεξεργασίας.....	57
3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) της ενεργού συσκευασίας.....	60

3.3 Έξυπνες συσκευασίες και αισθητήρες (blockchain και ιχνηλασιμότητα).....	62
3.3 Βιοπολυμερή και φιλικά προς το περιβάλλον υλικά.....	67
3.4 Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση.....	70
3.4.1 Κόστος υλικών και εφαρμογών	70
3.4.2 Ανάλυση βιωσιμότητας και ανακύκλωσης	72
3.5 Καταναλωτική αποδοχή – τάσεις αγοράς (εμπορικές εφαρμογές της ενεργού συσκευασίας)	74
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	78
4.1 Κύρια ευρήματα και σύνθεση αποτελεσμάτων	78
4.2 Κριτική αποτίμηση της βιβλιογραφίας και των υφιστάμενων τεχνολογιών.....	81
4.3 Πρακτικές επιπτώσεις και συμβολή της μελέτης.....	83
4.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	86
Λίστα Βιβλιογραφικών Αναφορών.....	89

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) (Πηγή: Zhou et al., 2024).....	7
Εικόνα 2. Γραφική απεικόνιση της χρήσης βιοδραστικών ενώσεων στην ανάπτυξη λειτουργικών υλικών ενεργού συσκευασίας για προϊόντα ζωικής προέλευσης. (Jacinto-Valderrama et al., 2023).....	9
Εικόνα 3. Βασικές κατηγορίες ενεργής συσκευασίας τροφίμων, όπως απορροφητές οξυγόνου, αιθυλενίου, υγρασίας, εκπομποί διοξειδίου του άνθρακα και αιθανόλης, απορροφητές οσμών/γεύσεων και αντιμικροβιακή συσκευασία (Drago et al., 2020).....	12
Εικόνα 4. Ενεργό σύστημα απελευθέρωσης δραστικών ουσιών (αντιοξειδωτικών ή αντιμικροβιακών) από πολυστρωματική συσκευασία προς το τρόφιμο. (Yuan et al., 2024) .	20
Εικόνα 5. Δομές και λειτουργία ενεργών φιλμ στη συσκευασία τροφίμων. Στα διαγράμματα A, B και C απεικονίζονται διαφορετικές διατάξεις φιλμ με στρώσεις ενεργών και φραγμοποιών υλικών: (A) το δραστικό συστατικό απελευθερώνεται προς το headspace, (B) εσωτερική τοποθέτηση μεταξύ φραγμοποιού και ενεργού στρώσης, και (C) εσωτερική ενσωμάτωση με φραγμοποιή φιλμ προς το εξωτερικό. Στα διαγράμματα D και E παρουσιάζεται η δράση του ενεργού παράγοντα: στην περίπτωση D απορροφώνται ανεπιθύμητα αέρια (π.χ. O ₂), ενώ στην περίπτωση E ο δραστικός παράγοντας απελευθερώνεται προς το προϊόν, επηρεάζοντας τη σύστασή του. (Azevedo et al., 2022)	23
Εικόνα 6. Συσκευασία τροφίμου με ένθετο απορροφητικό οξυγόνου για την παράταση της διάρκειας ζωής. (Label and Narrow Web, 2023).....	29
Εικόνα 7. Διαγραμματική απεικόνιση της αντιμικροβιακής δράσης του εκχυλίσματος κανέλας (Cinnamon extract, CE) κατά του <i>Pseudomonas aeruginosa</i> και της εφαρμογής του ως μαρινάδας σε βοδινό κρέας (<i>Longissimus dorsi</i>). (Zawani et al., 2022)	36
Εικόνα 8. Θέματα σχετικά με τη μείωση/απομάκρυνση νιτρικών (NO ₃ ⁻) και νιτρωδών (NO ₂ ⁻) στα επεξεργασμένα κρέατα. (Molina et al., 2024).....	38
Εικόνα 9. Παραγωγή βρώσιμων φιλμ με αντιμικροβιακούς παράγοντες για τρόφιμα (Manzoor et al., 2023)	43
Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση νανοϊνικού φιλμ ανίχνευσης και αναστολής μικροβιακής αλλοίωσης σε νωπό κρέας (Jiao et al., 2023).	53
Εικόνα 11. Σχηματικό διάγραμμα των λειτουργιών ενεργής και έξυπνης συσκευασίας (active & intelligent packaging). (Πηγή: Drago et al., 2020)	58
Εικόνα 12. Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος ιχνηλάτισης τροφίμων με χρήση της τεχνολογίας blockchain (Πηγή: BSEtec, 2024)	65

Εικόνα 13. Σχηματική επισκόπηση στρατηγικών σχηματισμού λειτουργικών φιλμ από βιοπολυμερή (Πηγή: Abdullah et al., 2022).	69
Εικόνα 14. Διάγραμμα των βασικών τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης (Πηγή: Goedecke, 2025)	73
Εικόνα 15. Συσκευασίες με εκπομπή CO ₂ για φρέσκα φιλέτα σολωμού (Rollini et al., 2016)	75
Εικόνα 16. Διάταξη συσκευασίας με τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), η οποία χρησιμοποιεί ενεργό στοιχεία όπως απορροφητές οξυγόνου ή ρυθμιστές CO ₂ για να διατηρήσει τη φρεσκάδα και να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος (Record Packaging, n.d.).	75
Εικόνα 17. Παραδείγματα έξυπνων δεικτών συσκευασίας: (α) δείκτης θερμοκρασίας σε κουτιά αναψυκτικών, (b) δείκτης ripeSense για την ωρίμανση φρούτων, (c) δείκτης φρεσκότητας σε συσκευασία πουλερικών και (d) δείκτης φρεσκότητας σε φιλέτα σολομού. (Yan et al., 2022)	76

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Βασικές κατηγορίες ενεργού συσκευασίας.....	11
Πίνακας 2.Περιγραφή απορροφητών οξυγόνου	14
Πίνακας 3. Απορροφητές Διοξειδίου του Άνθρακα	15
Πίνακας 4. Απορροφητές Υγρασίας	17
Πίνακας 5. Εκπομπή Αντιοξειδωτικών Ουσιών	19
Πίνακας 6. Αντιμικροβιακά Συστήματα Εκπομπής.....	22
Πίνακας 7. Κύριοι μικροοργανισμοί αλλοίωσης σε διαφορετικά είδη ιχθυηρών και οι παράγοντες ανάπτυξής τους (Πηγές όπου στηρίζεται ο Πίνακας Gram & Dalgaard (2002), Ercolini et al. (2006), Kontominas et al. (2021), Kerry et al. (2006))	34
Πίνακας 8. Ενδεικτικά αποτελέσματα μελετών ενεργού συσκευασίας σε νωπά προϊόντα κρέατος.....	48
Πίνακας 9. Επίδραση παραμέτρων (T , pH , a_w) στη δράση ενεργού συσκευασίας	56

Εισαγωγή

Τα νωπά τρόφιμα ζωικής προέλευσης, όπως το κρέας και τα ιχθυηρά, ανήκουν στις πιο ευπαθείς κατηγορίες τροφίμων λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε νερό, πρωτεΐνες και ελεύθερα αμινοξέα, τα οποία αποτελούν ιδανικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη αλλοιογόνων αλλά και παθογόνων μικροοργανισμών (Kerry et al., 2006). Η μικροβιολογική αλλοίωση είναι η κύρια αιτία περιορισμένης διάρκειας ζωής σε αυτά τα προϊόντα, καθώς τα βακτήρια, οι μύκητες και οι ζύμες μεταβολίζουν τα θρεπτικά συστατικά με αποτέλεσμα την παραγωγή πτητικών ενώσεων, αμμωνίας και οργανικών οξέων, που επιδρούν αρνητικά τόσο στην ασφάλεια όσο και στην αποδεκτότητα από τον καταναλωτή (Gram & Dalgaard, 2002; Koutsoumanis & Sofos, 2004).

Η ευπάθεια αυτών των προϊόντων επιτείνεται από την έκθεσή τους στο οξυγόνο και στην υγρασία, δύο παράγοντες που προάγουν την οξείδωση λιπιδίων, την αποδόμηση πρωτεϊνών και την ανάπτυξη αερόβιων βακτηρίων (Zhang et al., 2025). Ειδικά για τα ιχθυηρά, τα υψηλά επίπεδα ακόρεστων λιπαρών οξέων τα καθιστούν εξαιρετικά ευαίσθητα στην οξείδωση, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση του χρώματος, της οσμής και της γεύσης (Nychas et al., 2008). Αντίστοιχα, στο νωπό κρέας παρατηρούνται σημαντικές αλλοιώσεις στη μυϊκή δομή και μεταβολές στο pH που ευνοούν την ανάπτυξη ψυχρότροφων παθογόνων, όπως *Listeria monocytogenes* και *Clostridium spp.* (Troy et al., 2016).

Η ύπαρξη ευνοϊκών φυσικοχημικών συνθηκών, όπως ουδέτερο έως ελαφρώς αλκαλικό pH, καθιστά αυτά τα τρόφιμα ιδανικό πεδίο δράσης για βακτήρια αλλοίωσης όπως τις *Pseudomonas spp.*, τα οποία μπορούν να επικρατήσουν ακόμη και σε συνθήκες ψύξης, μειώνοντας δραστικά τη διάρκεια ζωής (Ercolini et al., 2010). Παράλληλα, εξωγενείς παράγοντες όπως η μη επαρκής υγιεινή στη μεταποίηση, η πιθανή θερμοκρασιακή κακομεταχείριση στην εφοδιαστική αλυσίδα μπορούν να επιταχύνουν την ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών (Barbosa-Cánovas et al., 2005).

Αν και οι συμβατικές τεχνολογίες συσκευασίας παρέχουν ένα βασικό φράγμα προστασίας, αποδεικνύονται συχνά ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση της μικροβιολογικής και οξειδωτικής αλλοίωσης κατά τη διάρκεια διανομής και αποθήκευσης (Appendini & Hotchkiss, 2002). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες στην αλυσίδα εφοδιασμού, αυξημένα περιστατικά απορρίψεων και μείωση της καταναλωτικής εμπιστοσύνης στα φρέσκα προϊόντα ζωικής προέλευσης (Domínguez et al., 2021).

Η ανάγκη για ενίσχυση της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής αυτών των τροφίμων αναδεικνύει τη σημασία της καινοτομίας στον τομέα της συσκευασίας, με την ενεργή συσκευασία να προτείνεται ως μία από τις πλέον υποσχόμενες στρατηγικές παρέμβασης (Yam

et al., 2005). Η δυνατότητα της ενεργού συσκευασίας να επηρεάζει δυναμικά το περιβάλλον του προϊόντος καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδιαίτερα κατάλληλη για την αντιμετώπιση των ειδικών προκλήσεων που παρουσιάζουν τα ευπαθή τρόφιμα ζωικής προέλευσης.

Η ενεργή συσκευασία, όπως ορίζεται από τον Κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 450/2009, αποτελεί μια υποκατηγορία των υλικών και αντικειμένων που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα και «σκοπίμως περιλαμβάνει συστατικά τα οποία απελευθερώνουν ουσίες στο τρόφιμο ή/και απορροφούν ουσίες από αυτό», με στόχο την παράταση της διάρκειας ζωής και τη διατήρηση ή βελτίωση της κατάστασης του τροφίμου. Η βασική της διαφορά από τη συμβατική ή «παθητική» συσκευασία είναι ότι αλληλεπιδρά ενεργά με το περιεχόμενο τρόφιμο ή/και το περιβάλλον του, τροποποιώντας με δυναμικό τρόπο τις συνθήκες εντός του περιέκτη (Κανονισμός (ΕΚ) 450/2009· Restuccia et al., 2010). Η ενεργή συσκευασία (active packaging) ορίζεται ως κάθε σύστημα συσκευασίας τροφίμων το οποίο, εκτός από την παθητική προστασία του προϊόντος, αλληλεπιδρά ενεργά με το περιεχόμενο ή/και το περιβάλλον του, με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής, τη διατήρηση της ποιότητας ή την ενίσχυση της ασφάλειας του τροφίμου (Restuccia et al., 2010). Σε αντίθεση με τις συμβατικές συσκευασίες, που λειτουργούν κυρίως ως φυσικό εμπόδιο έναντι εξωγενών μικροβιακών και περιβαλλοντικών παραγόντων, η ενεργή συσκευασία έχει σχεδιαστεί για να τροποποιεί το περιβάλλον της συσκευασίας μέσω μηχανισμών όπως η απορρόφηση ή απελευθέρωση ουσιών (López-Rubio et al., 2006).

Η βασική αρχή της ενεργού συσκευασίας είναι η διατήρηση ή βελτίωση της ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων μέσω λειτουργικών χαρακτηριστικών που επιτυγχάνονται είτε με την ενσωμάτωση ενεργών συστατικών στο υλικό της συσκευασίας είτε με τη χρήση ειδικών ένθετων (pads, σακουλάκια, δίσκοι) (Yam et al., 2005). Οι κύριες κατηγορίες αυτών των λειτουργιών περιλαμβάνουν αφενός συστήματα απορρόφησης – όπως απορροφητές οξυγόνου, υγρασίας, αιθυλενίου ή ανεπιθύμητων οσμών – και αφετέρου συστήματα εκπομπής – όπως η απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα, αντιμικροβιακών ή αντιοξειδωτικών παραγόντων (Vermeiren et al., 2000; Suppakul et al., 2003).

Οι τεχνολογίες ενεργού συσκευασίας βασίζονται στην ιδέα της δυναμικής αλληλεπίδρασης με το προϊόν, ώστε να επιβραδυνθεί η αλλοίωση ή να αποτραπεί η ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών χωρίς τη χρήση χημικών συντηρητικών (Han, 2014). Για παράδειγμα, οι απορροφητές οξυγόνου μειώνουν την παρουσία αερόβιων μικροοργανισμών και καθυστερούν την οξείδωση λιπιδίων, ενώ η εκπομπή CO₂ συμβάλλει στη μείωση του pH και στην αναστολή βακτηριακής ανάπτυξης (Pires et al., 2022).

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ενεργού συσκευασίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος του τροφίμου, οι στοχευμένοι μικροοργανισμοί, οι συνθήκες αποθήκευσης και

διανομής και οι κανονιστικές απαιτήσεις (Vanderroost et al., 2014). Επιπλέον, η συμβατότητα των ενεργών υλικών με το τρόφιμο και η ασφάλειά τους για τον καταναλωτή αποτελεί κρίσιμο ζήτημα που ρυθμίζεται αυστηρά από την ευρωπαϊκή και διεθνή νομοθεσία (European Commission, 2011). Οι σχετικοί κανονισμοί απαιτούν επαρκή τεκμηρίωση για τη μη τοξικότητα, τη σταθερότητα και την απουσία μετανάστευσης επιβλαβών ουσιών από τα υλικά ενεργής συσκευασίας προς το τρόφιμο (Regulation (EC) No 1935/2004· Regulation (EC) No 450/2009).

Η ενεργή συσκευασία αποτελεί μία σύγχρονη τεχνολογική απάντηση στις προκλήσεις της συντήρησης νωπών και ευπαθών τροφίμων, προσφέροντας στοχευμένη προστασία μέσω ελεγχόμενων αλληλεπιδράσεων. Το επόμενο βήμα για τη βιομηχανία τροφίμων είναι η ενοποίηση αυτών των τεχνολογιών με έξυπνες ή βιώσιμες λύσεις, όπως θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια.

Η παραδοσιακή ή παθητική συσκευασία τροφίμων έχει ως κύριο στόχο την απομόνωση του προϊόντος από το εξωτερικό περιβάλλον, προσφέροντας ένα φράγμα ενάντια σε φυσικούς, χημικούς και μικροβιολογικούς παράγοντες, όπως η υγρασία, το φως, το οξυγόνο και οι ρύποι (Robertson, 2013). Παρότι η παθητική συσκευασία αποτελεί εδώ και δεκαετίες θεμέλιο της βιομηχανίας τροφίμων, η αποτελεσματικότητά της περιορίζεται στη «στατική» προστασία του προϊόντος χωρίς δυνατότητα παρέμβασης στη μικροβιολογική ή οξειδωτική διαδικασία που εξελίσσεται εντός της συσκευασίας (Miltz & Perry, 2005).

Αντίθετα, η ενεργή συσκευασία λειτουργεί με τρόπο «δυναμικό», καθώς εμπλέκεται άμεσα στη διαμόρφωση των συνθηκών του μικροπεριβάλλοντος της τροφής. Συγκεκριμένα, η ενεργή συσκευασία περιλαμβάνει την ενσωμάτωση υλικών ή συστημάτων που απορροφούν ή απελευθερώνουν ουσίες – όπως οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, αιθυλένιο, υγρασία, αντιοξειδωτικά ή αντιμικροβιακά – με στόχο την παράταση της διάρκειας ζωής και τη διατήρηση της ποιότητας του τροφίμου (López-Rubio et al., 2004; Vermeiren et al., 2002).

Η παθητική προσέγγιση βασίζεται κυρίως σε φραγμούς, όπως φιλμ με χαμηλή διαπερατότητα στο οξυγόνο ή την υγρασία, ενώ η ενεργή προσέγγιση περιλαμβάνει λειτουργικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση με την τροφή, για παράδειγμα με την παγίδευση ανεπιθύμητων πτητικών ενώσεων ή την εκπομπή αντιμικροβιακών παραγόντων (Yam et al., 2005). Έτσι, ενώ η παθητική συσκευασία επιβραδύνει απλώς την αλλοίωση, η ενεργή συσκευασία μπορεί να τη στοχεύσει και να τη διαχειριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Ωστόσο, οι δύο προσεγγίσεις δεν είναι απαραίτητα ανταγωνιστικές. Στη σύγχρονη βιομηχανία τροφίμων, παρατηρείται συχνά ο συνδυασμός παθητικών και ενεργών τεχνολογιών συσκευασίας, ώστε να επιτυγχάνεται τόσο η φυσική όσο και η βιολογική/χημική προστασία

του προϊόντος (Restuccia et al., 2010). Για παράδειγμα, σε προϊόντα νωπού κρέατος ή ιχθυηρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί φιλμ με υψηλό φράγμα στο οξυγόνο σε συνδυασμό με απορροφητή υγρασίας ή ενεργό ένθετο με αντιμικροβιακή δράση (Vanderroost et al., 2014).

Η μετάβαση από παθητική σε ενεργή συσκευασία αντανάκλα μια γενικότερη στροφή της αγοράς προς τεχνολογίες που προσφέρουν ενεργό ρόλο στη διαχείριση της ασφάλειας και της ποιότητας, με έμφαση στη μείωση της απώλειας τροφίμων, τη διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και την ικανοποίηση των απαιτήσεων των καταναλωτών (Pires et al., 2022). Παράλληλα, οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη διαφάνεια και βιωσιμότητα ενισχύουν την ανάγκη για ολοκληρωμένες, ενεργές λύσεις συσκευασίας που ξεπερνούν τη στατικότητα των παραδοσιακών μεθόδων.

Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για τη διασφάλιση της ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων, σε συνδυασμό με τις αυστηρές απαιτήσεις των καταναλωτών και της νομοθεσίας, καθιστούν επιτακτική τη διερεύνηση και αξιολόγηση καινοτόμων τεχνολογιών συσκευασίας. Τα νωπά προϊόντα ζωικής προέλευσης – όπως το κρέας και τα ιχθυηρά – αποτελούν εξαιρετικά ευπαθή τρόφιμα, η διατήρηση των οποίων προϋποθέτει την εφαρμογή συστημάτων που υπερβαίνουν τα όρια της παραδοσιακής (παθητικής) συσκευασίας (Kerry et al., 2006· López-Rubio et al., 2004). Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργή συσκευασία αναδεικνύεται ως μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες τροποποίησης του μικροπεριβάλλοντος, προσφέροντας λύσεις σε ζητήματα μικροβιολογικής ασφάλειας, οξειδωτικής σταθερότητας και επέκτασης της διάρκειας ζωής.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό να παρουσιάσει συστηματικά και κριτικά τις εφαρμογές της ενεργού συσκευασίας στα νωπά προϊόντα κρέατος και ιχθυηρών, με έμφαση στους μηχανισμούς δράσης των ενεργών υλικών, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους, τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους που επηρεάζονται, καθώς και τις δυνατότητες συνδυασμού τους με άλλες σύγχρονες τεχνολογίες (όπως η τροποποιημένη ατμόσφαιρα, τα βιοπολυμερή και η έξυπνη συσκευασία) (Han, 2014; Restuccia et al., 2010).

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι να περιγραφεί η εξέλιξη και οι βασικές αρχές της ενεργού συσκευασίας, σε αντιπαραβολή με την παθητική προσέγγιση. Επιπλέον, επιδιώκεται η κατηγοριοποίηση των ειδών ενεργών συστημάτων (απορρόφησης, εκπομπής) και η ανάλυση των λειτουργιών τους στο πλαίσιο της προστασίας ευπαθών τροφίμων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην αποτύπωση των φυσικοχημικών και μικροβιολογικών χαρακτηριστικών των φρέσκων ιχθυηρών και νωπού κρέατος, που καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή ενεργού συσκευασίας. Παράλληλα, καταγράφονται και συγκρίνονται

βιβλιογραφικά οι επιδράσεις των τεχνολογιών ενεργής συσκευασίας στη διάρκεια ζωής, στην οργανοληπτική ποιότητα και στην ασφάλεια των εν λόγω τροφίμων.

Επιπροσθέτως, διερευνώνται οι συνδυαστικές τεχνολογίες και οι καινοτόμες προσεγγίσεις στην ενεργή συσκευασία, ενώ εξετάζονται και οι οικονομικές, περιβαλλοντικές και καταναλωτικές προεκτάσεις της εφαρμογής τέτοιων τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 1: Η Τεχνολογία της Ενεργού Συσκευασίας

1.1 Λειτουργίες συσκευασίας τροφίμων

1.1.1 Ορισμοί – βασικές αρχές

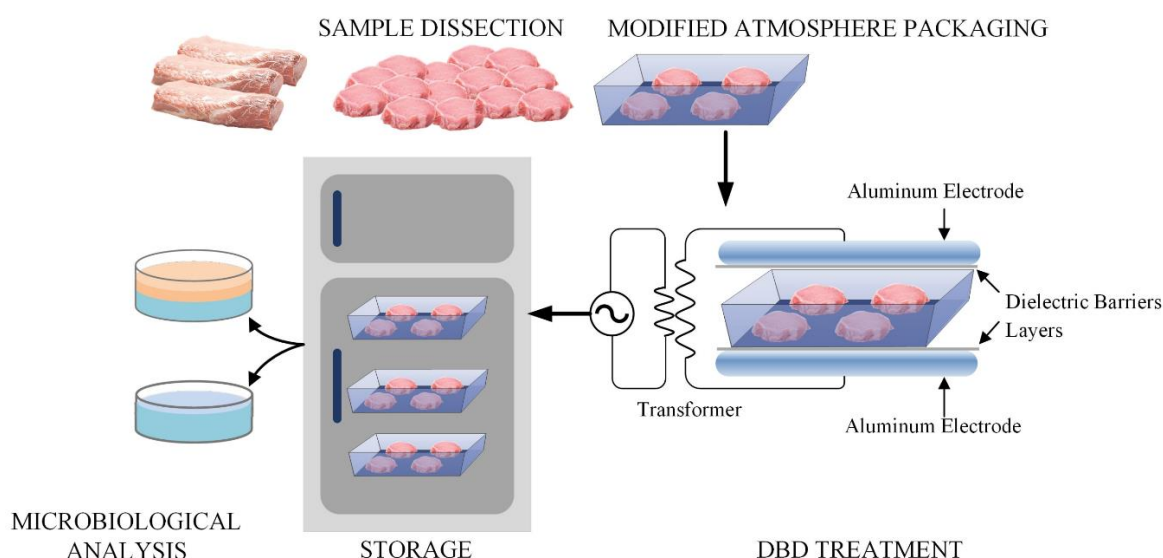
Η συσκευασία τροφίμων αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς της αλυσίδας εφοδιασμού, καθώς λειτουργεί ως φραγμός μεταξύ του τροφίμου και του περιβάλλοντος, εξασφαλίζοντας την προστασία, την ασφάλεια και τη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος μέχρι την κατανάλωσή του. Σύμφωνα με τον Codex Alimentarius (FAO/WHO, 2009), η συσκευασία ορίζεται ως *«το σύνολο των υλικών που περιβάλλουν το τρόφιμο από την παραγωγή έως την πώληση, με σκοπό την προστασία και την προώθηση του προϊόντος, την παροχή πληροφοριών και τη διευκόλυνση της διανομής του»*. Οι βασικές λειτουργίες της συσκευασίας διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: προστατευτική, λειτουργική, πληροφοριακή και εμπορική (Robertson, 2013).

Η έννοια της παραδοσιακής ή παθητικής συσκευασίας αφορά συστήματα που περιορίζονται στην απομόνωση του τροφίμου χωρίς να αλληλεπιδρούν ενεργά με το προϊόν ή το περιβάλλον του. Η προστασία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της χρήσης υλικών με κατάλληλες ιδιότητες φραγμού (π.χ. φιλμ χαμηλής διαπερατότητας στο οξυγόνο ή την υγρασία) και μέσω μηχανικών χαρακτηριστικών που διατηρούν τη δομή και την ακεραιότητα του προϊόντος (Miltz & Perry, 2005).

Αντιθέτως, η ενεργή συσκευασία (active packaging) ορίζεται ως ένα εξελιγμένο σύστημα που έχει σχεδιαστεί ώστε να αλληλεπιδρά με το περιεχόμενο ή το εσωτερικό περιβάλλον της συσκευασίας, με στόχο τη διατήρηση ή ακόμη και τη βελτίωση της ποιότητας και ασφάλειας του τροφίμου (López-Rubio et al., 2006). Η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων προσδιορίζει την ενεργή συσκευασία ως τη συσκευασία εκείνη που περιέχει συστατικά τα οποία σκόπιμα επηρεάζουν τη σύνθεση της συσκευασμένης τροφής ή την ατμόσφαιρα γύρω της (European Commission, 2011).

Οι βασικές αρχές λειτουργίας της ενεργού συσκευασίας βασίζονται στην παρουσία ενεργών ουσιών ή μηχανισμών που απορροφούν (π.χ. οξυγόνο, υγρασία, αιθυλένιο, ανεπιθύμητες οσμές) ή εκλύουν (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα, αντιμικροβιακά, αντιοξειδωτικά, αρώματα) συστατικά στο εσωτερικό της συσκευασίας (Vermeiren et al., 2002; Azevedo et al., 2022). Οι λειτουργίες αυτές πραγματοποιούνται είτε μέσω της ενσωμάτωσης των δραστικών ουσιών στο ίδιο το υλικό συσκευασίας είτε μέσω διακριτών στοιχείων (π.χ. φακελάκια, ένθετα, pads) τοποθετημένων εντός της συσκευασίας (Suppakul et al., 2003; Andrade et al., 2025).

Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης ενεργού συσκευασίας εξαρτάται από το είδος του τροφίμου, τις ιδιότητές του, την επιθυμητή διάρκεια ζωής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες αποθήκευσης και μεταφοράς. Για παράδειγμα, τα τρόφιμα πλούσια σε ακόρεστα λιπαρά (όπως τα ιχθυηρά) ωφελούνται ιδιαίτερα από αντιοξειδωτικά συστήματα ενεργής συσκευασίας, ενώ τα νωπά κρέατα προτιμούν συχνά την απορρόφηση οξυγόνου και την ελεγχόμενη εκπομπή CO₂ για την παρεμπόδιση της ανάπτυξης παθογόνων (Yam et al., 2005; Lou et al., 2025). Η **Εικόνα 1** παρουσιάζει το βασικό μηχανισμό λειτουργίας της τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP).



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) (Πηγή: Zhou et al., 2024)

Η ενεργή συσκευασία διαφοροποιείται σαφώς και από την τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP – Modified Atmosphere Packaging), η οποία βασίζεται στην πλήρωση της συσκευασίας με μείγματα αερίων, συνήθως οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και αζώτου. Αν και η MAP μπορεί να επιτύχει σημαντική επιβράδυνση της αλλοίωσης μέσω του αρχικού ελέγχου της ατμόσφαιρας, η ενεργή συσκευασία υπερέχει στο ότι παρέχει δυναμικό έλεγχο του μικροπεριβάλλοντος, ικανό να ανταποκριθεί σε μεταβολές κατά την αποθήκευση ή τη διανομή (Brody et al., 2001). Για τον λόγο αυτό, οι δύο τεχνολογίες συχνά εφαρμόζονται συμπληρωματικά (Puebla-Duarte et al., 2023).

Τέλος, η ανάπτυξη της ενεργού συσκευασίας είναι στενά συνδεδεμένη με την πρόοδο της επιστήμης των υλικών, της νανοτεχνολογίας και της βιοτεχνολογίας, καθώς επιδιώκεται η ενσωμάτωση λειτουργικών μορίων σε υλικά φιλικά προς το περιβάλλον και

βιοαποικοδομήσιμα. Η συνδυαστική χρήση ενεργών και έξυπνων τεχνολογιών ανοίγει τον δρόμο για ολοκληρωμένα συστήματα συσκευασίας με πολλαπλές λειτουργίες (Vanderroost et al., 2014).

1.1.2 Οφέλη και περιορισμοί

Η ενεργή συσκευασία, ως καινοτόμος τεχνολογία στον τομέα της συντήρησης τροφίμων, προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι της συμβατικής παθητικής προσέγγισης. Τα οφέλη αυτά σχετίζονται με την παράταση της διάρκειας ζωής, τη διατήρηση της ποιότητας, τη βελτίωση της ασφάλειας και τη μείωση απωλειών και αποβλήτων κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας (Yam et al., 2005; Kerry et al., 2006).

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ενεργού συσκευασίας είναι η παράταση της διάρκειας ζωής ευπαθών προϊόντων, κυρίως μέσω της ρύθμισης παραμέτρων όπως η παρουσία οξυγόνου και η σχετική υγρασία. Απορροφητές οξυγόνου έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί στη μείωση της ανάπτυξης αερόβιων βακτηρίων και στην πρόληψη της οξείδωσης λιπιδίων, ειδικά σε προϊόντα όπως τα ιχθυηρά και το νωπό κρέας (López de Dicastillo et al., 2011· Suprakul et al., 2003). Αντίστοιχα, τα συστήματα απορρόφησης υγρασίας περιορίζουν την ανάπτυξη μυκήτων και την ενεργοποίηση ενζύμων, συμβάλλοντας έτσι στη σταθερότητα του προϊόντος (Puebla-Duarte et al., 2023).

Η βελτίωση της μικροβιολογικής ασφάλειας αποτελεί επίσης καθοριστικό όφελος, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση αντιμικροβιακών παραγόντων, όπως οργανικά οξέα, αιθέρια έλαια ή ενώσεις αργύρου (Han, 2014). Οι ενώσεις αυτές αναστέλλουν την ανάπτυξη παθογόνων όπως *Listeria monocytogenes* και *Salmonella spp.*, χωρίς να απαιτείται η χρήση πρόσθετων συντηρητικών (Ramos et al., 2012).

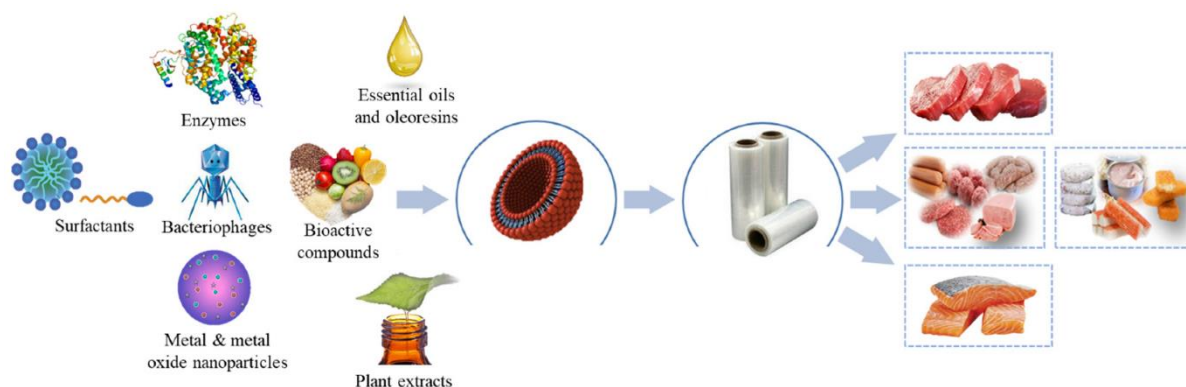
Ένα ακόμη πλεονέκτημα της ενεργού συσκευασίας είναι η δυναμικότητα προσαρμογής στις εκάστοτε συνθήκες αποθήκευσης και διανομής. Σε αντίθεση με την παθητική συσκευασία, η οποία παρέχει στατική προστασία, η ενεργή συσκευασία έχει τη δυνατότητα να αντιδρά σε μεταβολές, π.χ. στην αύξηση της υγρασίας ή στην ανάπτυξη μικροβιακού φορτίου, προσφέροντας έτσι έλεγχο σε πραγματικό χρόνο του περιβάλλοντος της συσκευασίας (Vanderroost et al., 2014).

Παρά τα σημαντικά οφέλη, η τεχνολογία ενεργού συσκευασίας παρουσιάζει και περιορισμούς που σχετίζονται τόσο με τεχνικούς όσο και με ρυθμιστικούς και οικονομικούς παράγοντες. Ένας βασικός περιορισμός είναι η δυσκολία ενσωμάτωσης ορισμένων ενεργών συστατικών στα υλικά συσκευασίας χωρίς να επηρεαστούν οι μηχανικές ή οργανοληπτικές ιδιότητες του προϊόντος (Vermeiren et al., 2002). Η αλληλεπίδραση των δραστικών ουσιών της συσκευασίας

με το τρόφιμο ενδέχεται να προκαλέσει μετανάστευση ενώσεων προς την τροφική μήτρα, γεγονός που εγείρει ανησυχίες σχετικά με την τοξικολογική ασφάλεια και απαιτεί συμμόρφωση με τη σχετική ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα υλικά που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα. Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) έχει εκδώσει γνωμοδοτήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια και την επίδραση συγκεκριμένων ουσιών –όπως το ψευδάργυρο, το DNA και τα λιπίδια– στον ανθρώπινο οργανισμό (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies, 2009).

Επιπλέον, ο κανονιστικός έλεγχος αποτελεί σημαντική πρόκληση, καθώς η χρήση ενεργών συσκευασιών προϋποθέτει την έγκριση των υλικών και ουσιών από αρμόδιους φορείς (όπως η EFSA ή ο FDA) και την ειδική επισημάνση στις συσκευασίες, ώστε να αποφεύγεται η παραπλάνηση του καταναλωτή (Restuccia et al., 2010). Αυτή η απαίτηση δημιουργεί επιπλέον κόστος και καθυστερήσεις στην εισαγωγή νέων προϊόντων στην αγορά.

Από οικονομική σκοπιά, η παραγωγή υλικών ενεργού συσκευασίας απαιτεί υψηλότερο κόστος, τόσο σε επίπεδο πρώτων υλών όσο και στην ανάπτυξη νέων γραμμών παραγωγής ή τεχνολογιών ενσωμάτωσης. Αυτό το κόστος μπορεί να αποθαρρύνει τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις τροφίμων από την υιοθέτηση της τεχνολογίας (Puebla-Duarte et al., 2023· Appendini & Hotchkiss, 2002). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, τα υλικά βιοενεργού συσκευασίας μπορούν να προέλθουν από ποικίλες φυσικές πηγές, όπως αιθέρια έλαια, ένζυμα, μεταλλικά οξείδια, βακτηριοφάγους ή εκχυλίσματα φυτών. Η ενσωμάτωσή τους στο υλικό της συσκευασίας στοχεύει στη λειτουργική προστασία του τροφίμου μέσω αντιμικροβιακής και αντιοξειδωτικής δράσης, προάγοντας τη διατήρηση της ποιότητας των ευπαθών τροφίμων (Davoodi-Aghdam et al., 2023).



Εικόνα 2. Γραφική απεικόνιση της χρήσης βιοδραστικών ενώσεων στην ανάπτυξη λειτουργικών υλικών ενεργού συσκευασίας για προϊόντα ζωικής προέλευσης. (Jacinto-Valderrama et al., 2023)

Τέλος, δεν πρέπει να παραγνωριστεί ο παράγοντας αποδοχής από τον καταναλωτή, ο οποίος συχνά αντιμετωπίζει με επιφυλακτικότητα τις «τεχνολογικά εμπλουτισμένες» συσκευασίες, ιδίως όταν αυτές περιέχουν πρόσθετα ή ναυούλικά (Ahmed et al., 2022). Η κατανόηση των αντιλήψεων και της εμπιστοσύνης του κοινού είναι κρίσιμη για την επιτυχή εμπορική υιοθέτηση της ενεργού συσκευασίας.

Η ενεργή συσκευασία προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα για τη βιομηχανία και την ασφάλεια των τροφίμων, αλλά η επιτυχής εφαρμογή της απαιτεί ολιστική προσέγγιση που να ενσωματώνει τεχνική επάρκεια, ρυθμιστική συμμόρφωση, βιωσιμότητα και καταναλωτική αποδοχή.

1.2 Η τεχνολογία της ενεργού συσκευασίας

Η ενεργή συσκευασία συνιστά μία από τις πιο καινοτόμες προσεγγίσεις στον τομέα της συντήρησης ευπαθών τροφίμων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης του υλικού συσκευασίας με το περιεχόμενο τρόφιμο ή/και το περιβάλλον του. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή παθητική συσκευασία, η οποία αποσκοπεί μόνο στη φυσική προστασία του προϊόντος, τα ενεργά συστήματα στοχεύουν στη διατήρηση ή και βελτίωση της ποιότητας του τροφίμου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, μέσω λειτουργικών μηχανισμών όπως η απορρόφηση οξυγόνου, η έκλυση αντιμικροβιακών ουσιών ή η τροποποίηση της ατμόσφαιρας (Vermeiren et al., 2002; Suppakul et al., 2003).

Η ενεργή συσκευασία περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογικές κατηγορίες, οι οποίες κατατάσσονται με βάση τη λειτουργία τους στις εξής βασικές ομάδες:

- **Συστήματα απορρόφησης** (π.χ. απορρόφηση O₂, CO₂, υγρασίας),
- **Συστήματα εκπομπής** (π.χ. έκλυση αντιμικροβιακών, αντιοξειδωτικών),

Στον Πίνακα 1. παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο βασικοί τύποι ενεργών συσκευασιών, μαζί με τη λειτουργία και τις βασικές τους ιδιότητες.

Πίνακας 1. Βασικές κατηγορίες ενεργού συσκευασίας

Τύπος Συσκευασίας	Ιδιότητες / Στόχος	Παραδείγματα
Απορροφητική (Active)	Αλληλεπιδρά με το τρόφιμο, απορροφά O ₂ /CO ₂ /υγρασία	Σακουλάκια απορρόφησης οξυγόνου, φιλμ με υγροσκοπικά άλατα
Εκπομπής (Active)	Απελευθερώνει ουσίες στο περιβάλλον του τροφίμου	Αντιμικροβιακά φιλμ, απελευθέρωση αιθέριων ελαίων

1.2.1 Συστήματα απορρόφησης (O₂, CO₂, υγρασία)

Τα συστήματα απορρόφησης αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες και τεχνολογικά ώριμες κατηγορίες ενεργού συσκευασίας. Ο στόχος τους είναι η αφαίρεση επιβλαβών ή αλλοιωγόνων παραγόντων από το μικροπεριβάλλον της συσκευασίας, ώστε να περιορίζονται φαινόμενα οξείδωσης, μικροβιακής ανάπτυξης και υποβάθμισης της ποιότητας των τροφίμων (Vermeiren et al., 2002). Τα τρία κυριότερα απορροφούμενα στοιχεία είναι το οξυγόνο (O₂), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και η υγρασία, τα οποία είτε προϋπάρχουν στο εσωτερικό της συσκευασίας είτε παράγονται δευτερογενώς μέσω μεταβολικών διεργασιών του ίδιου του τροφίμου ή της μικροχλωρίδας του (Suppakul et al., 2003; Prasad & Kochhar, 2014). Η Εικ. 3 απεικονίζει τις βασικές τεχνολογίες ενεργής συσκευασίας, με έμφαση στους απορροφητές οξυγόνου (O₂ scavengers), υγρασίας και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ absorbers/emitter), που αποτελούν τις κύριες κατευθύνσεις λειτουργίας των συστημάτων απορρόφησης και επιβεβαιώνουν τη θεωρητική δομή που περιγράφουμε παραπάνω.



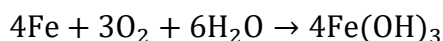
Εικόνα 3. Βασικές κατηγορίες ενεργής συσκευασίας τροφίμων, όπως απορροφητές οξυγόνου, αιθυλενίου, υγρασίας, εκπομποί διοξειδίου του άνθρακα και αιθανόλης, απορροφητές οσμών/γεύσεων και αντιμικροβιακή συσκευασία (Drago et al., 2020)

Απορροφητές Οξυγόνου (O_2 scavengers)

Η απορρόφηση του οξυγόνου είναι κρίσιμη για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τροφίμων ζωικής κυρίως προέλευσης, καθώς το οξυγόνο ευνοεί την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών και την οξείδωση λιπιδίων και χρωστικών (Han, 2014). Οι απορροφητές οξυγόνου (oxygen scavengers) βασίζονται σε διάφορους μηχανισμούς, κυρίως τη χημική αντίδραση του οξυγόνου με αναγωγικούς παράγοντες, όπως ο σίδηρος, το ασκορβικό οξύ ή ένζυμα όπως η γλυκοξειδάση (López-Rubio et al., 2006; Ahuja et al., 2024). Ανάλογα με τον τύπο, μπορούν να ενσωματωθούν:

- α) **στο φιλμ συσκευασίας** (ενεργό στρώμα πολυμερούς),
- β) **σε ξεχωριστό ένθετο** μέσα στη συσκευασία (pads, φακελάκια, αυτοκόλλητα επιθέματα).

Σε περιβάλλον με παρουσία υγρασίας, οι σιδηρούχοι απορροφητές αντιδρούν με το διαθέσιμο οξυγόνο σχηματίζοντας οξείδια, π.χ.:



Ο ρυθμός αυτής της αντίδρασης εξαρτάται από τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία και την επιθυμητή διάρκεια δράσης (Puebla-Duarte et al., 2023).

Τα υλικά φορείς των scavengers μπορεί να είναι:

- Άλατα σιδήρου (Fe-based scavengers)
- Πολυσακχαρίτες με ένζυμα
- Ασκορβικό οξύ ενσωματωμένο σε πολυμερική μήτρα
- Νανοσωματίδια μετάλλων με αντιοξειδωτική δράση

Η χρήση τους είναι διαδεδομένη σε κόκκινα κρέατα, όπου περιορίζεται η οξείδωση της μυοσφαιρίνης (μετατροπή οξυμυοσφαιρίνης σε μεταμυοσφαιρίνη), με αποτέλεσμα τη διατήρηση του επιθυμητού έντονου κόκκινου χρώματος (Kerry et al., 2006). Επιπλέον, σε προϊόντα ιχθυοκαλλιέργειας, συμβάλλουν στην αναστολή της ανάπτυξης μικροβίων όπως τα *Pseudomonas spp.* και *Shewanella spp.*, τα οποία είναι υπεύθυνα για την παραγωγή δυσάρεστων οσμών και την αλλοίωση της υφής (Gram & Dalgaard, 2002; Remya et al., 2020). Όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2**, οι κυριότερες κατηγορίες περιλαμβάνουν ένθετα με σίδηρο ή άλατα σιδήρου, ασκορβικό οξύ, ένθετα με ένζυμα όπως η γλυκοξειδάση, αλλά και νανοσωματίδια μετάλλων, που δρουν με διαφορετικούς μηχανισμούς δέσμευσης και κατανάλωσης του οξυγόνου. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από το είδος του τροφίμου, το μικροβιακό φορτίο και τη διάρκεια ζωής που απαιτείται (Puebla-Duarte et al., 2023).

Πίνακας 2.Περιγραφή απορροφητών οξυγόνου

Τύπος Απορροφητή	Δραστική ουσία	Εφαρμογή	Μηχανισμός
Ένθετο με σίδηρο	Σκόνη Fe ή άλατα σιδήρου	Κόκκινο κρέας, αλλαντικά	Οξείδωση σιδήρου
Ενσωματωμένο φιλμ	Ασκορβικό οξύ	Συσκευασμένα snacks, σάλτσες	Αναγωγή O ₂ μέσω ασκορβικού
Ενζυματικό ένθετο	Γλυκοξειδάση + γλυκόζη	Προϊόντα αρτοποιίας, γλυκίσματα	Ενζυματική κατανάλωση O ₂
Νανοϋλικά	FeO, TiO ₂ ή Ag nanoparticles	Προηγμένα συστήματα συσκευασίας	Φυσικοχημική δέσμευση και αντίδραση

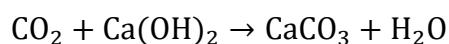
Απορροφητές Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂ scavengers)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) χρησιμοποιείται συχνά ως βασικό αέριο σε συσκευασίες τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) λόγω της αντιμικροβιακής του δράσης, της μεγάλης διαλυτότητάς του στο νερό και της σημαντικής μείωσης που επιφέρει στο pH του τροφίμου μέσω της διάστασης του ανθρακικού οξέος. Ωστόσο, η υπερβολική συσσώρευσή του εντός του περιέκτη μπορεί να προκαλέσει οργανοληπτικά προβλήματα, όπως αύξηση της οξύτητας, αλλοίωση της υφής, ακόμα και σχηματισμό αφρού ή συσσώρευση ανεπιθύμητων πτητικών κατά το άνοιγμα της συσκευασίας (Rooney, 2005).

Η χρήση απορροφητών CO₂ είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε προϊόντα υψηλής αναπνευστικής δραστηριότητας, όπως φρέσκα ψάρια, θαλασσινά, λαχανικά και μανιτάρια, όπου η αποβολή CO₂ από τον ίδιο τον οργανισμό μπορεί να οδηγήσει σε συγκεντρώσεις άνω των επιτρεπτών ορίων.

Οι απορροφητές CO₂ βασίζονται σε χημική δέσμευση του αερίου με ενώσεις που αντιδρούν σχηματίζοντας ανθρακικά ή διττανθρακικά άλατα. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται:

Υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂):



- Ανθρακικό κάλιο (K₂CO₃): λειτουργεί με προσρόφηση CO₂ σε μικροπορώδη υποστρώματα.
- Αργιλικά ή ζεολιθικά υλικά εμποτισμένα με αλκαλικά άλατα (π.χ. NaOH)

- Νανοϋλικά με ενεργή επιφάνεια ή συνδυασμοί ενεργού άνθρακα + αλκαλικών αλάτων.

Η ενσωμάτωση των απορροφητών μπορεί να γίνει είτε ως ένθετα φακελάκια, είτε σε ενεργά φιλμ πολυστρωματικής δομής, ανάλογα με το είδος του προϊόντος. Συνήθως συνδυάζονται με τεχνολογίες MAP, για ρύθμιση και των δύο βασικών αερίων (O_2 και CO_2) (Dev & Neogi, 2021). Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**, κάθε κατηγορία απορροφητή παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα και συγκεκριμένες εφαρμογές, από την παράταση της διάρκειας ζωής σε θαλασσινά και έτοιμα γεύματα έως την εφαρμογή σε νωπά φρούτα και λαχανικά ή τρόφιμα μακράς διάρκειας. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από το είδος του προϊόντος και τις απαιτήσεις της αλυσίδας εφοδιασμού.

Πίνακας 3. Απορροφητές Διοξειδίου του Άνθρακα

Τύπος απορροφητή CO_2	Δραστική ουσία	Μηχανισμός δράσης	Εφαρμογές
Ένθετο φακελάκι με $Ca(OH)_2$	Υδροξείδιο ασβεστίου	Χημική αντίδραση και σχηματισμός $CaCO_3$	Θαλασσινά, έτοιμα γεύματα
Υλικό με K_2CO_3 σε υποστήριγμα	Ανθρακικό κάλιο	Προσρόφηση CO_2 σε υποδοχείς	Νωπά προϊόντα αρτοποιίας
Ζεολίθοι ή ενεργός άνθρακας	$NaOH$ + επιφάνειες υψηλής S.A.	Φυσικοχημική προσρόφηση και ουδετεροποίηση	MAP για μανιτάρια και λαχανικά
Ενσωματωμένο φιλμ	Συνδυασμός αλάτων και πολυμερούς	Σταδιακή ρύθμιση συγκέντρωσης CO_2	Επεξεργασμένα τρόφιμα ή συσκευασίες μακράς διάρκειας

Απορροφητές Υγρασίας (Moisture Absorbers)

Η υγρασία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αλλοίωσης, καθώς επηρεάζει την ενεργότητα νερού (a_w), ενισχύοντας την ανάπτυξη μυκήτων, ενζύμων και υγρασιοφίλων βακτηρίων (Barbosa-Cánovas et al., 2005). Η περίσσεια υγρασίας σε συσκευασίες τροφίμων –ιδίως σε προϊόντα υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, όπως κρέατα, θαλασσινά και τυριά– μπορεί να οδηγήσει σε

απώλεια υγρών (drip loss), αλλοίωση της υφής και υποβάθμιση της εμφάνισης και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών.

Οι απορροφητές υγρασίας βασίζονται σε υγροσκοπικά υλικά όπως:

- Χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2): προσροφά νερό σχηματίζοντας υδρόλυματα.
- Ζεόλιθοι: μικροπορώδη υλικά με μεγάλη επιφάνεια και εκλεκτική προσρόφηση υδρατμών.
- Πυριτικό νάτριο (silica gel): χρησιμοποιείται σε σακουλάκια ή ενσωματωμένο σε φιλμ.
- Μίγματα πολυμερών με αργιλικά ορυκτά (π.χ. βεντονίτης, μοντοριλλονίτης), ενσωματωμένα σε δισκία ή επιστρώσεις.

Η ενσωμάτωση τους γίνεται είτε σε ένθετα φακελάκια, είτε σε ενεργά φιλμ, τα οποία τοποθετούνται σε άμεση επαφή με το τρόφιμο ή στο εσωτερικό καπάκι της συσκευασίας. Ο στόχος είναι η παγίδευση της περίσσειας υδρατμών που εκλύεται κατά τη διατήρηση ή το μαγείρεμα, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα ή η τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος (Appendini & Hotchkiss, 2002).

Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από:

- τη σχετική υγρασία εντός της συσκευασίας,
- τον ρυθμό μεταφοράς υδρατμών μέσω του φιλμ,
- την επιφάνεια και την απορροφητική ικανότητα του υλικού.

Σε εφαρμογές όπως νωπά κρέατα και θαλασσινά, η συγκράτηση των υγρών προλαμβάνει την εμφάνιση παθογόνων όπως *Brochothrix thermosphacta* ή *Clostridium spp.* (Ercolini et al., 2010). Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4**, οι απορροφητές υγρασίας διαφοροποιούνται ως προς τη δραστική ουσία, τον μηχανισμό δράσης και τις εφαρμογές τους: από τη χρήση ενθέτων σε συσκευασίες τυριών έως υγροσκοπικά φιλμ για τρόφιμα υψηλής δραστικότητας νερού. Η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται από τις συνθήκες αποθήκευσης, τον τύπο του τροφίμου και την ποσότητα της υγρασίας, αποτελώντας έτσι ένα σημαντικό εργαλείο για την παράταση της διάρκειας ζωής προϊόντων ζωικής προέλευσης.

Πίνακας 4. Απορροφητές Υγρασίας

Τύπος Απορροφητή	Δραστικό υλικό	Μηχανισμός δράσης	Εφαρμογές
Ένθετο φακελάκι	Silica gel	Φυσική προσρόφηση υδρατμών	Συσκευασίες τυριών, αλλαντικών
Υγροσκοπικό φιλμ	CaCl ₂	Χημική προσρόφηση → CaCl ₂ ·2H ₂ O	Τρόφιμα με υψηλή a _w (νωπά)
Ζεόλιθοι ενσωματωμένοι σε φιλμ	Φυσικά μικροπορώδη	Επιλεκτική προσρόφηση και απελευθέρωση	Προϊόντα με διακυμάνσεις υγρασίας
Δισκία με αργιλικά ορυκτά	Μοντοριλλονίτης	Ιοντική ανταλλαγή και παγίδευση υδρατμών	Έτοιμα γεύματα, εστιατορικά πακέτα

1.2.2 Συστήματα εκπομπής

Τα συστήματα εκπομπής αποτελούν έναν βασικό πυλώνα της ενεργού συσκευασίας, καθώς δρουν ενεργά με την απελευθέρωση προστατευτικών ουσιών στο μικροπεριβάλλον της συσκευασίας. Σε αντίθεση με τα συστήματα απορρόφησης, που αποσκοπούν στην απομάκρυνση παραγόντων που ενισχύουν και επιταχύνουν αντιδράσεις αλλοίωσης, τα συστήματα εκπομπής σχεδιάζονται να προσθέτουν στο περιβάλλον του συσκευασμένου τροφίμου ουσίες που συμβάλλουν στην καθυστέρηση της αλλοίωσης και στη διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (Han, 2014; Vermeiren et al., 2002).

Δύο κύριες υποκατηγορίες περιλαμβάνουν:

- Συστήματα εκπομπής αντιοξειδωτικών ουσιών, που στοχεύουν στην αναστολή της οξείδωσης λιπιδίων και πρωτεϊνών.
- Συστήματα εκπομπής αντιμικροβιακών παραγόντων, που επιβραδύνουν ή/και αναστέλλουν την ανάπτυξη αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών.

Εκπομπή Αντιοξειδωτικών Ουσιών (Antioxidant Release Systems)

Η οξείδωση λιπιδίων είναι ένας από τους κυριότερους μηχανισμούς αλλοίωσης σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης, ιδίως σε εκείνα με υψηλή περιεκτικότητα σε πολυακόρεστα λιπαρά οξέα, όπως τα ψάρια, τα θαλασσινά και ορισμένα κρέατα (Kerry et al., 2006). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει ελεύθερες ρίζες, κυρίως ρίζες υπεροξειδίου, οι οποίες προκαλούν αποδόμηση

λιπιδίων, σχηματισμό πτητικών αλδεϋδών και κετονών, αλλαγή στο χρώμα, δημιουργία οσμών τάγγισης και απώλεια της διατροφικής ποιότητας (López-Rubio et al., 2006). Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η φθορά που προκαλείται από ενδογενή και εξωγενή ένζυμα, μικροβιακή δράση (*Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Lactobacillus*), την παραγωγή μεταβολιτών και ενζύμων από μικροβιακές κοινότητες, καθώς και από οξειδωτικές διεργασίες. Η οξείδωση λιπιδίων πυροδοτείται από αντιδράσεις με ενεργές μορφές οξυγόνου (ROS), ενώ η οξείδωση πρωτεϊνών περιλαμβάνει το σχηματισμό ριζών, οδηγώντας σε υποβάθμιση της ποιότητας και μείωση της διάρκειας ζωής του προϊόντος (Yuan et al., 2024).

Η εκπομπή αντιοξειδωτικών μέσω ενεργών συσκευασιών αποτελεί μια τεχνολογία εστιασμένης παρέμβασης. Σε αντίθεση με την απευθείας προσθήκη στο τρόφιμο, η οποία συχνά περιορίζεται από νομοθετικούς και αισθητικούς λόγους, η εκπομπή επιτρέπει τη στοχευμένη προστασία της λιπιδικής φάσης και την παράταση της διάρκειας ζωής, χωρίς αλλοίωση της γεύσης ή ανάγκη επισήμανσης πρόσθετων.

Τα αντιοξειδωτικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

- Φυσικές ενώσεις: τοκοφερόλες, φαινολικά εκχυλίσματα (π.χ. ροσμαρινικό και γαλλικό οξύ), εστέρες ασκορβικού.
- Συνθετικές ενώσεις: BHT (βουτυλοϋδροξυτολουόλιο), BHA (βουτυλοϋδροξυανισόλη), TBHQ.

Αυτές οι ενώσεις ενσωματώνονται σε:

- πολυμερή μήτρα (π.χ. πολυαιθυλένιο, PLA, PVOH), μέσω co-extrusion ή casting,
- επιστρώσεις επιφανείας, π.χ. μέσω immersion coating ή spraying,
- ή τοποθετούνται σε ένθετα φιλμ ή pads με δυνατότητα ελεγχόμενης απελευθέρωσης (Suppakul et al., 2003).

Ο μηχανισμός δράσης τους περιλαμβάνει:

1. Παθητική εκπομπή πτητικών αντιοξειδωτικών μέσω διάχυσης (e.g. αιθέρια έλαια).
2. Ενεργή απελευθέρωση μέσω διαλυτοποίησης σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία (e.g. ασκορβικό κάλιο).
3. Συνδυασμένα συστήματα που ενεργοποιούνται θερμικά ή με UV.

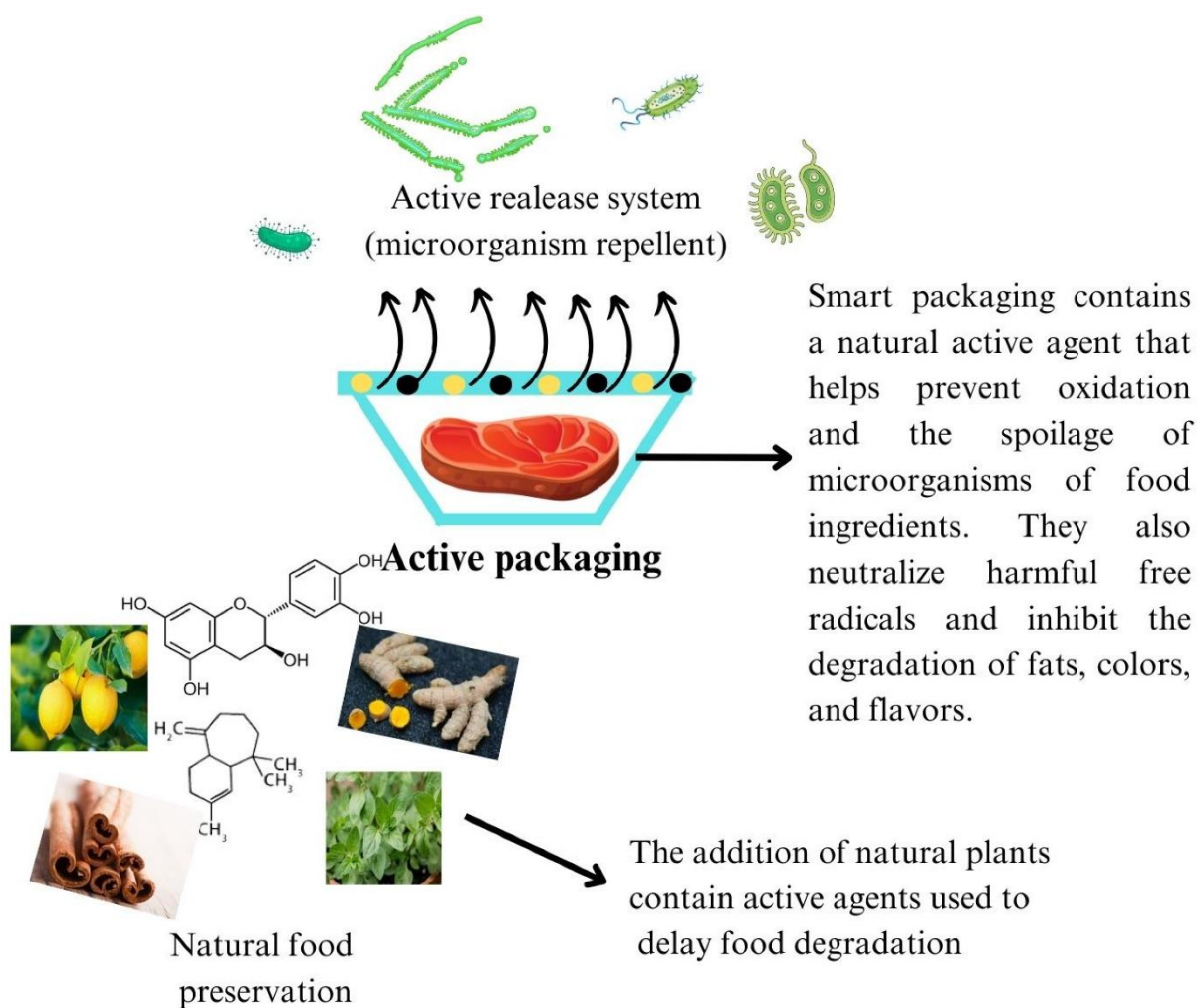
Η χρήση τέτοιων συσκευασιών έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στη μείωση των δεικτών οξείδωσης (TBARS, POV) και στην επιβράδυνση της μικροβιακής ανάπτυξης. Σύμφωνα με τον Vargas et al. (2009), η χρήση αντιοξειδωτικού φιλμ με ροσμαρινικό οξύ παρέτεινε τη διάρκεια ζωής νωπού ψαριού κατά 40% υπό συνθήκες ψύξης. Αντίστοιχα, οι Ojagh et al. (2010) κατέγραψαν μείωση της τάγγισης και βελτίωση της χρωματικής σταθερότητας σε χοιρινό κρέας. Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5**, οι απορροφητές υγρασίας διαφοροποιούνται

ως προς τη δραστική ουσία, τον μηχανισμό δράσης και τις εφαρμογές τους: από τη χρήση ενθέτων σε συσκευασίες τυριών έως υγροσκοπικά φιλμ για τρόφιμα υψηλής δραστηριότητας νερού. Η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται από τις συνθήκες αποθήκευσης, τον τύπο του τροφίμου και την ποσότητα της υγρασίας, αποτελώντας έτσι ένα σημαντικό εργαλείο για την παράταση της διάρκειας ζωής προϊόντων ζωικής προέλευσης.

Πίνακας 5. Εκπομπή Αντιοξειδωτικών Ουσιών

Τύπος Αντιοξειδωτικού	Μορφή Ενσωμάτωσης	Μηχανισμός Απελευθέρωσης	Εφαρμογές
Ροσμαρινικό οξύ	Φιλμ PLA	Διάχυση με υγρασία	Νωπά ψάρια, κοτόπουλο
BHT	Co-extruded φιλμ PE	Θερμοδιεγερμένη εκπομπή	Λουκάνικα, αλλαντικά
Τοκοφερόλη	Επικάλυψη σε PVOH	Σταδιακή εκπομπή	Καπνιστά προϊόντα
Εκχύλισμα πράσινου τσαγιού	Ενεργό pad	Υγροενεργοποιούμενη απελευθέρωση	Νωπό χοιρινό, φιλέτα ψαριού

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει τον μηχανισμό λειτουργίας ενός **ενεργού συστήματος απελευθέρωσης** (active release system), όπου ενσωματωμένα δραστικά μόρια (αντιοξειδωτικά, αντιμικροβιακά) απελευθερώνονται ελεγχόμενα στη ζώνη επαφής με το τρόφιμο για την επιβράδυνση της αλλοίωσης.



Εικόνα 4. Ενεργό σύστημα απελευθέρωσης δραστικών ουσιών (αντιοξειδωτικών ή αντιμικροβιακών) από πολυστρωματική συσκευασία προς το τρόφιμο. (Yuan et al., 2024)

Εκπομπή Αντιμικροβιακών Παραγόντων

Η μικροβιολογική αλλοίωση αποτελεί έναν από τους κυριότερους λόγους υποβάθμισης της ποιότητας και της ασφάλειας φρέσκων τροφίμων, ειδικά σε προϊόντα ζωικής προέλευσης με υψηλή υγρασία και θρεπτικά συστατικά. Μικροοργανισμοί όπως οι *Pseudomonas spp.*, *Listeria monocytogenes* και *Clostridium spp.* δύνανται να αναπτυχθούν ακόμη και υπό συνθήκες ψύξης, προκαλώντας αλλοίωση της υφής, κακοσμία, αποχρωματισμό και σε ορισμένες περιπτώσεις κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Gram & Dalgaard, 2002; Nie et al., 2025).

Η τεχνολογία εκπομπής αντιμικροβιακών στοχεύει στην ελεγχόμενη απελευθέρωση βιοδραστικών ουσιών εντός του περιβάλλοντος της συσκευασίας. Αυτές οι ενώσεις επιδρούν

απευθείας στη μικροβιακή επιφάνεια του τροφίμου, παρεμβαίνοντας στους κυτταρικούς μηχανισμούς των βακτηρίων, οδηγώντας σε:

- αυξημένη διαπερατότητα της μεμβράνης,
- διαρροή ιόντων και πρωτεϊνών,
- αναστολή ενζυμικών και αναπνευστικών λειτουργιών (Han, 2014).

♦ Αντιμικροβιακές ουσίες που χρησιμοποιούνται:

- Οργανικά οξέα: γαλακτικό, σορβικό, βενζοϊκό οξύ (συνήθως απελευθερώνονται από άλατα τους σε υγρό περιβάλλον).
- Αιθέρια έλαια: θυμόλη, καρβακρόλη, ευγενόλη – με φυσική προέλευση και πτητικότητα.
- Μεταλλικά ιόντα: άργυρος (Ag^+), ψευδάργυρος (Zn^{2+}) – με γνωστή αντιμικροβιακή δράση μέσω οξειδωτικών μηχανισμών.
- Πεπτίδια: νισίνη, εδεσίνη, λυσόζυμο – ασφαλή και εγκεκριμένα για χρήση σε τρόφιμα (Ramos et al., 2012).

♦ Υλικά ενσωμάτωσης:

Οι ουσίες αυτές ενσωματώνονται σε διάφορες πολυμερικές ή βιοπολυμερικές μήτρες όπως:

- πολυαιθυλένιο (PE) ή πολυπροπυλένιο (PP) για θερμοπλαστικές εφαρμογές,
- βιοπολυμερή όπως η χιτοζάνη, ζελατίνη, άμυλο, αλγινικά – που είναι βιοδιασπώμενα και ιδανικά για τρόφιμα.

Η απελευθέρωση των δραστικών ουσιών εξαρτάται από τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία αποθήκευσης και την πολικότητα της μήτρας (Rhim et al., 2013). Η σταδιακή ή εκρηκτική απελευθέρωση μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με το προϊόν και την επιθυμητή διάρκεια ζωής.

♦ Συνδυαστικά συστήματα με εκπομπή CO_2

Ορισμένες συσκευασίες χρησιμοποιούν αντιμικροβιακούς παράγοντες σε συνδυασμό με εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), ενισχύοντας την ανασταλτική δράση σε ψυγμένα προϊόντα. Το CO_2 δρα βακτηριοστατικά, ιδιαίτερα σε Gram-αρνητικά βακτήρια, επηρεάζοντας το pH και τη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης (Dev & Neogi, 2021). Σε εφαρμογές όπως τα φρέσκα ψάρια και τα μαριναρισμένα κρέατα, χρησιμοποιούνται ένθετα (pads) με διττανθρακικό άλας (π.χ. K_2CO_3) και οξύ (π.χ. κιτρικό οξύ), που ενεργοποιούνται από την υγρασία και απελευθερώνουν σταδιακά CO_2 εντός της συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP).

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα συστημάτων εκπομπής αντιμικροβιακών ουσιών, οι μηχανισμοί δράσης τους, τα υλικά ενσωμάτωσης και οι αντίστοιχες κατηγορίες τροφίμων-στόχων όπου εφαρμόζονται.

Πίνακας 6. Αντιμικροβιακά Συστήματα Εκπομπής

Ενεργή ουσία	Μηχανισμός δράσης	Υλικό ενσωμάτωσης	Τρόφιμο-στόχος
Νισίνη	Αναστολή σύνθεσης κυτταρικού τοιχώματος	Χιτοζάνη, PLA	Τυποποιημένα κρέατα, τυριά
Καρβακρόλη	Διάσπαση κυτταρικής μεμβράνης	PP + καψουλοποίηση	Φιλέτα ψαριού, πουλερικά
Άλατα ασβεστίου + κιτρικό οξύ	Απελευθέρωση CO ₂ μέσω αντίδρασης με νερό	Ένθετο pad	Συσκευασμένα θαλασσινά (MAP)
Ιόντα Ag ⁺	Οξείδωση και αδρανοποίηση ενζύμων	Φιλμ PE + νανοσωματίδια	Κομμένα αλλαντικά
Θυμόλη + ευγενόλη	Διάχυση και δράση στην κυτταρική μεμβράνη	Biofilm με PVOH	Καπνιστά ψάρια, ψυγμένα προϊόντα

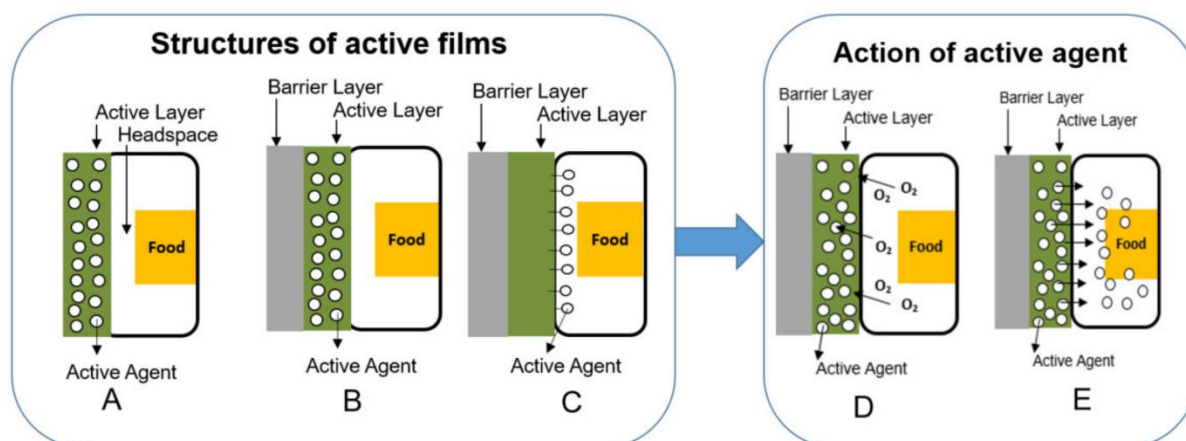
1.2.3 Τεχνολογίες υλικών (φιλμ, ένθετα, μεμβράνες)

Η επιλογή και σχεδίαση των υλικών συσκευασίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας των τεχνολογιών ενεργού συσκευασίας, καθώς τα ενεργά συστατικά πρέπει να ενσωματώνονται ή να απελευθερώνονται με τρόπο ελεγχόμενο, σταθερό και ασφαλή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος (Han, 2014). Οι κύριες τεχνολογικές λύσεις περιλαμβάνουν ενεργά φιλμ (active films), ένθετα (inserts) και μεμβράνες (coated ή πολυμερικές), καθένα από τα οποία παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς αναλόγως της εφαρμογής και του τύπου τροφίμου.

Ενεργά φιλμ (active films)

Τα φιλμ ενεργού συσκευασίας αποτελούν την πιο κοινή και εξελιγμένη μορφή εφαρμογής ενεργών ουσιών. Συνήθως κατασκευάζονται από πολυμερή όπως το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυ(γαλακτικό οξύ) (PLA) ή το πολυ(βινυλική αλκοόλη) (PVOH), και εμπλουτίζονται με δραστικά συστατικά κατά τη διάρκεια της εξώθησης ή με επικαλύψεις

μετά την παραγωγή (Vermeiren et al., 2002; Wang et al., 2022). Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει χαρακτηριστικούς τρόπους ενσωμάτωσης και δράσης βιοδραστικών ουσιών στα φιλμ ενεργού συσκευασίας, καθώς και τη δομή των σχετικών στρωματώσεων σε σχέση με το τρόφιμο και την κατεύθυνση της εκπομπής. Στην Εικόνα 5 αποτυπώνονται οι βασικοί τρόποι ενσωμάτωσης δραστικών ουσιών στα φιλμ ενεργού συσκευασίας, καθώς και οι διαφορετικοί μηχανισμοί εκπομπής τους προς το τρόφιμο, οι οποίοι καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος.



Εικόνα 5. Δομές και λειτουργία ενεργών φιλμ στη συσκευασία τροφίμων. Στα διαγράμματα A, B και C απεικονίζονται διαφορετικές διατάξεις φιλμ με στρώσεις ενεργών και φραγμοποιών υλικών: (A) το δραστικό συστατικό απελευθερώνεται προς το headspace, (B) εσωτερική τοποθέτηση μεταξύ φραγμοποιού και ενεργού στρώσης, και (C) εσωτερική ενσωμάτωση με φραγμοποιή φιλμ προς το εξωτερικό. Στα διαγράμματα D και E παρουσιάζεται η δράση του ενεργού παράγοντα: στην περίπτωση D απορροφώνται ανεπιθύμητα αέρια (π.χ. O_2), ενώ στην περίπτωση E ο δραστικός παράγοντας απελευθερώνεται προς το προϊόν, επηρεάζοντας τη σύστασή του. (Azevedo et al., 2022)

Η τεχνολογία των φιλμ βασίζεται στην ενσωμάτωση ενεργών μορίων (αντιοξειδωτικών, αντιμικροβιακών, ενζύμων) εντός της πολυμερικής μήτρας ή στην επιφανειακή επικάλυψη μέσω νανοφορέις ή λιποσωμάτων. Η απελευθέρωση των ουσιών ρυθμίζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η συγκέντρωση και η διαπερατότητα του φιλμ (Appendini & Hotchkiss, 2002).

Για παράδειγμα, φιλμ με χιτοζάνη εμπλουτισμένα με θυμόλη ή εκχυλίσματα ρίγανης έχουν αποδείξει σημαντική αναστολή της ανάπτυξης βακτηρίων σε φιλέτα σολομού και κοτόπουλου (Rhim et al., 2013; Ojagh et al., 2010). Τα φιλμ αυτά συνδυάζουν βιοδιασπώμενη φύση με λειτουργικότητα, ενώ προσφέρουν ομοιογενή κατανομή του ενεργού συστατικού και ευκολία βιομηχανικής εφαρμογής.

Ένθετα – Pads, φακελάκια, σακουλάκια

Τα ένθετα (inserts) αποτελούν μια πιο ευέλικτη μορφή ενεργού συσκευασίας, όπου τα δραστικά υλικά τοποθετούνται ξεχωριστά μέσα στη συσκευασία και όχι στο ίδιο το φιλμ. Μπορούν να πάρουν τη μορφή φακελίσκων ή pads (απορροφητικά στρώματα κάτω από το τρόφιμο), σακουλάκια με υγραντικά ή οξειδωτικά μέσα, ή πορώδη δοχεία με αρωματικές ή πτητικές ενώσεις (Yam et al., 2005).

Η χρήση ενθέτων προσφέρει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης περιεκτικότητας και συγκέντρωσης της δραστικής ουσίας, καθώς και της δυνατότητας να απομακρυνθεί εύκολα μετά τη χρήση. Επίσης, αποφεύγεται η απευθείας επαφή της δραστικής ουσίας με την τροφή, γεγονός που ενισχύει την ασφάλεια (Restuccia et al., 2010).

Ένθετα απορρόφησης οξυγόνου (με βάση τον σίδηρο ή την ασκορβίνη) χρησιμοποιούνται ευρέως σε κρέατα και ψάρια, περιορίζοντας την ανάπτυξη *Pseudomonas spp.* και την οξείδωση λιπιδίων (Puebla-Duarte et al., 2023). Παράλληλα, pads με ενσωματωμένα αντιμικροβιακά ή ενζυμικά συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναστολή της ανάπτυξης *Listeria monocytogenes* σε προϊόντα αλλαντικών (Han, 2014).

Μεμβράνες και βιοπολυμερή coatings

Οι μεμβράνες ενεργού συσκευασίας συνήθως βασίζονται σε επικαλύψεις (coatings) ή διαστρωματώσεις πάνω σε βιοπολυμερή υποστρώματα, με στόχο την απελευθέρωση βιοδραστικών ενώσεων μέσω διάχυσης. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι συχνά φυσικής προέλευσης, όπως χιτοζάνη, άμυλο, αλγινικά ή ζελατίνη, και συνδυάζονται με αιθέρια έλαια, φαινολικά εκχυλίσματα, ένζυμα ή οργανικά οξέα (Vargas et al., 2009· Ahmed et al., 2022).

Η εφαρμογή αυτών των μεμβρανών γίνεται συχνά σε προϊόντα υψηλής ευπάθειας, όπως ιχθυηρά, φρέσκα φιλέτα κοτόπουλου ή έτοιμα προς κατανάλωση γεύματα. Πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

- Βιοδιασπώμενη φύση (φιλική προς το περιβάλλον)
- Ομοιογενής κάλυψη της επιφάνειας του προϊόντος
- Επιλεκτική και σταδιακή απελευθέρωση δραστικών μορίων

Σε πρόσφατες μελέτες, επιστρώσεις χιτοζάνης με εκχυλίσματα από φασκόμηλο ή δεντρολίβανο έδειξαν σημαντική επιβράδυνση της οξείδωσης και της μικροβιακής επιβάρυνσης σε νωπό κρέας (Ramos et al., 2012· Rhim et al., 2013).

Η επιλογή ανάμεσα σε φιλμ, ένθετα ή μεμβράνες εξαρτάται από:

- τη φύση του τροφίμου (π.χ. υδατική φάση, ευαισθησία σε οξυγόνο)
- την επιθυμητή διάρκεια ζωής

- τις συνθήκες αποθήκευσης (θερμοκρασία, υγρασία)
- τις κανονιστικές απαιτήσεις (π.χ. αποφυγή άμεσης επαφής, μετανάστευση)

Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση της σταθερότητας των υλικών, στη νανοτεχνολογική ενίσχυση της δράσης τους, καθώς και στη συμβατότητα με βιώσιμες, κυκλικές λύσεις για τη βιομηχανία τροφίμων.

1.3 Τεχνολογικές Προκλήσεις και Νομοθετικό Πλαίσιο

1.3.1 Προβλήματα εφαρμογής, μετανάστευση ουσιών

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η ενεργή συσκευασία, η εφαρμογή της στην πράξη εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικές τεχνολογικές, κανονιστικές και επιστημονικές προκλήσεις. Ένα από τα σοβαρότερα εμπόδια στην ευρεία υιοθέτησή της αφορά στη δυνατότητα μετανάστευσης χημικών ουσιών από τα υλικά συσκευασίας στο τρόφιμο, καθώς και τις τεχνολογικές δυσκολίες ενσωμάτωσης των ενεργών συστατικών σε πολυμερικά συστήματα χωρίς να διαταραχθεί η λειτουργικότητα, η ασφάλεια ή τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος (Appendini & Hotchkiss, 2002; Restuccia et al., 2010; Gupta et al., 2024).

Η μετανάστευση (migration) αναφέρεται στη μεταφορά ουσιών από το υλικό συσκευασίας προς την τροφή ή το περιβάλλον της συσκευασίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αντιμικροβιακούς ή αντιοξειδωτικούς παράγοντες, μονομερή, σταθεροποιητές ή ακόμη και υπολείμματα από την παραγωγική διαδικασία. Αν και η μετανάστευση αποτελεί επιθυμητό μηχανισμό σε κάποιες εφαρμογές ενεργού συσκευασίας (π.χ. σταδιακή απελευθέρωση νισίνης ή τοκοφερολών), σε άλλες περιπτώσεις ενέχει τοξικολογικό και νομικό κίνδυνο ((European Commission, 2011).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό και την έκταση της μετανάστευσης περιλαμβάνουν:

- Τη χημική φύση της δραστικής ουσίας (πολικότητα, μοριακό βάρος, λιποφιλία)
- Τη σύνθεση και δομή του πολυμερούς φιλμ (π.χ. διαπερατότητα, βαθμός κρυσταλλικότητας)
- Τη θερμοκρασία και τη διάρκεια αποθήκευσης
- Τη σύσταση του τροφίμου (λιπαρά, νερό, pH)
- Την επιφάνεια επαφής μεταξύ τροφίμου και υλικού (Kerry et al., 2006· Suppakul et al., 2003)

Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΚ) 1935/2004, όλα τα υλικά που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα πρέπει να είναι «αδρανή σε τέτοιο βαθμό ώστε να αποκλείεται η μεταφορά συστατικών προς το τρόφιμο σε ποσότητες ικανές να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία του καταναλωτή, να αλλοιώσουν

τη σύσταση ή να προκαλέσουν αλλαγή στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά» (European Commission, 2004). Συμπληρωματικά, ο Κανονισμός (ΕΚ) 450/2009 εισάγει ειδικές διατάξεις για τα ενεργά υλικά, προβλέποντας ότι οποιαδήποτε ουσία απελευθερώνεται στο τρόφιμο πρέπει να υπόκειται σε αξιολόγηση ασφάλειας από την EFSA και να καταγράφεται στη σχετική θετική λίστα.

Παρά την αυστηρότητα του νομοθετικού πλαισίου, παραμένει τεχνικά δύσκολη η πρόβλεψη και ο έλεγχος της μετανάστευσης, ιδίως όταν εμπλέκονται πολυμερή με νανοσωματίδια ή όταν χρησιμοποιούνται φυσικές δραστικές ουσίες με ασταθή συμπεριφορά (López-Rubio et al., 2006). Ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει πως σε θερμές συνθήκες αποθήκευσης ή όταν υπάρχουν λιπαρά τρόφιμα, η μετανάστευση αυξάνεται σημαντικά, προκαλώντας υπέρβαση των ορίων που τίθενται από τον κανονισμό (Ramos et al., 2012; Seref & Cufaoğlu, 2025).

Εκτός από τη μετανάστευση, η τεχνική σταθερότητα των ενεργών συστατικών κατά την παραγωγή της συσκευασίας είναι ένα ακόμη ζήτημα. Η θερμική επεξεργασία (όπως η εξώθηση ή η ανάμειξη σε θερμοπλαστικά) μπορεί να αποδομήσει βιοδραστικά μόρια όπως οι φαινολικές ενώσεις ή τα αιθέρια έλαια, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της συσκευασίας (Puebla-Duarte et al., 2023). Συχνά απαιτούνται ειδικές τεχνικές, όπως ενθυλάκωση (encapsulation) ή νανοδομημένα φορεία, για τη διατήρηση της δραστικότητας και της ελεγχόμενης απελευθέρωσης των ουσιών (Rhim et al., 2013).

Προστίθεται και το γεγονός ότι πολλοί παραγωγοί διστάζουν να εφαρμόσουν ενεργά υλικά εξαιτίας έλλειψης εξειδικευμένης τεχνογνωσίας, αβεβαιότητας ως προς την κανονιστική συμμόρφωση, και κόστους ανάπτυξης ή αδειοδότησης. Η παραγωγή και ο ποιοτικός έλεγχος ενεργών φιλμ απαιτεί συχνά εξειδικευμένο εξοπλισμό, χρονοβόρες διαδικασίες επικύρωσης και συνεργασία με τοξικολογικά εργαστήρια για την αξιολόγηση της μετανάστευσης (Vanderroost et al., 2014).

Η ενεργή συσκευασία αντιμετωπίζει σημαντικά τεχνολογικά εμπόδια στην εφαρμογή της, κυρίως λόγω των κινδύνων που συνδέονται με τη μετανάστευση ουσιών και τις τεχνικές απαιτήσεις σταθερότητας και ασφάλειας. Η επιτυχής αξιοποίησή της εξαρτάται από την ανάπτυξη καινοτόμων υλικών, την υιοθέτηση τεχνικών ελέγχου, και την πλήρη συμμόρφωση με τη νομοθεσία, προκειμένου να διασφαλιστεί η εμπιστοσύνη τόσο των βιομηχανιών όσο και των καταναλωτών.

1.3.2 Κανονισμοί ΕΕ

Η νομοθετική ρύθμιση της ενεργού συσκευασίας εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στη

βιομηχανία τροφίμων. Βασικός στόχος του ευρωπαϊκού νομικού πλαισίου είναι να εξασφαλίσει την υγειονομική ασφάλεια του καταναλωτή, διατηρώντας παράλληλα την τεχνολογική πρόοδο και την καινοτομία στον τομέα της συσκευασίας τροφίμων (Restuccia et al., 2010).

Κανονισμός (ΕΚ) 1935/2004

Ο Κανονισμός (ΕΚ) 1935/2004 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου θέτει το γενικό πλαίσιο για τα υλικά και αντικείμενα που προορίζονται να έρθουν σε επαφή με τρόφιμα (FCM-Food Contact Materials). Σύμφωνα με το άρθρο 3 του Κανονισμού, όλα τα υλικά που έρχονται σε άμεση ή έμμεση επαφή με τρόφιμα πρέπει να πληρούν τρεις βασικές αρχές:

1. Να μην μεταφέρουν συστατικά στα τρόφιμα σε ποσότητες ικανές να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία
2. Να μην προκαλούν μη αποδεκτές μεταβολές στη σύσταση του τροφίμου
3. Να μην αλλοιώνουν τα οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά (European Commission, 2004).

Ο Κανονισμός αυτός εφαρμόζεται σε όλα τα είδη συσκευασίας, συμπεριλαμβανομένων των ενεργών και έξυπνων υλικών, και επιτρέπει στα κράτη μέλη να θεσπίζουν ειδικές εθνικές διατάξεις υπό την προϋπόθεση ότι δεν παραβιάζουν τις θεμελιώδεις αρχές της ενιαίας αγοράς (Restuccia et al., 2010).

Κανονισμός (ΕΚ) 450/2009 για τα ενεργά και έξυπνα υλικά

Η ανάγκη για περισσότερο εξειδικευμένη νομοθεσία οδήγησε στην έκδοση του Κανονισμού (ΕΚ) 450/2009, ο οποίος ρυθμίζει ειδικά τα ενεργά και έξυπνα υλικά συσκευασίας. Ο Κανονισμός αυτός συμπληρώνει τον 1935/2004 και ορίζει ότι κάθε υλικό ενεργής συσκευασίας που αλληλεπιδρά με το τρόφιμο ή το περιβάλλον του πρέπει να αξιολογείται τοξικολογικά και να εγκρίνεται από την Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) πριν τη διάθεσή του στην αγορά (European Commission, 2011).

Σύμφωνα με τον Κανονισμό:

- Οι ουσίες που εκλύονται από τα ενεργά υλικά στο τρόφιμο πρέπει να θεωρούνται ως "πρόσθετα τροφίμων" και να υπόκεινται σε ειδική αξιολόγηση.
- Οι ουσίες που δεν μεταναστεύουν αλλά παραμένουν σε επαφή με το τρόφιμο (π.χ. απορροφητές) πρέπει επίσης να τεκμηριώνονται επιστημονικά ως προς την ασφάλειά τους.

- Όλα τα υλικά πρέπει να φέρουν ειδική επισήμανση, ώστε να μην παραπλανάται ο καταναλωτής και να γνωρίζει ότι το προϊόν εμπεριέχει ενεργά στοιχεία (European Commission, 2009).

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία απαιτεί από τους κατασκευαστές και χρήστες τέτοιων υλικών να τηρούν τεχνικούς φακέλους με αναλυτικά στοιχεία για τις ουσίες, τις μεθόδους παραγωγής, τα αποτελέσματα δοκιμών μετανάστευσης, και τη συμμόρφωση με τα καθορισμένα ειδικά όρια μετανάστευσης (Specific Migration Limits - SMLs) (López-Rubio et al., 2006).

Συνοδευτικές Οδηγίες και Αξιολόγηση EFSA

Η EFSA έχει εκδώσει οδηγίες και κατευθυντήριες γραμμές για την αξιολόγηση ενεργών συστατικών, στις οποίες προβλέπεται η εφαρμογή πρωτοκόλλων τοξικολογικού ελέγχου, προσομοιώσεων μετανάστευσης σε τρόφιμα και αξιολόγηση επικινδυνότητας. Μόνο οι ουσίες που έχουν εγκριθεί και περιλαμβάνονται στη θετική λίστα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μπορούν να χρησιμοποιούνται.

Ως αποτέλεσμα, η υιοθέτηση ενεργών υλικών εντός της ΕΕ συνεπάγεται υψηλό κανονιστικό κόστος και τεκμηρίωση, κάτι που έχει ως συνέπεια τη σχετικά αργή διείσδυση της τεχνολογίας στην ευρωπαϊκή βιομηχανία τροφίμων, ιδίως στις μικρομεσαίες επιχειρήσεις (Puebla-Duarte et al., 2023).

Οι Κανονισμοί 1935/2004/ΕΚ και 450/2009/ΕΚ θέτουν ένα αυστηρό αλλά αναγκαίο θεσμικό πλαίσιο για την ασφαλή εφαρμογή ενεργών συσκευασιών στην ΕΕ. Εξασφαλίζουν την προστασία του καταναλωτή από πιθανές τοξικές ή αλλοιωτικές επιδράσεις, αλλά ταυτόχρονα απαιτούν τεχνολογική και ρυθμιστική προσαρμογή από τη βιομηχανία τροφίμων και τους παραγωγούς υλικών συσκευασίας.

1.3.3 Ετικετογράφηση και διαφάνεια αγοράς

Η ετικετογράφηση των συσκευασμένων τροφίμων δεν αποτελεί μόνο ένα μέσο παροχής πληροφοριών στον καταναλωτή, αλλά και ένα βασικό εργαλείο για τη διασφάλιση της διαφάνειας στην αγορά, τη ρύθμιση του εμπορίου, καθώς και την προστασία της δημόσιας υγείας. Η χρήση ενεργών και έξυπνων υλικών συσκευασίας εισάγει νέες προκλήσεις στην επισήμανση, καθώς το υλικό δεν είναι πλέον παθητικό αλλά ενεργεί επάνω στο τρόφιμο, επηρεάζοντας ενδεχομένως τη σύστασή του ή τα χαρακτηριστικά του (European Commission, 2009).

Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΚ) 450/2009, τα ενεργά υλικά συσκευασίας που προορίζονται να εκλύσουν ή να απορροφήσουν ουσίες εντός της συσκευασίας πρέπει να επισημαίνονται

υποχρεωτικά με τις ενδείξεις (όπως φαίνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 6 όπου έχει τεθεί ένθετο απορροφητικό οξυγόνου με την κατάλληλη λεκτική ένδειξη):

- «Δεν τρώγεται» (*Not edible*)
- «Μη βρώσιμο συστατικό της συσκευασίας»
- «Ενεργό υλικό – περιέχει ουσίες που επηρεάζουν το τρόφιμο» (European Commission, 2009, άρθρο 4)

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής ενεργής συσκευασίας, όπου χρησιμοποιείται ένθετο απορροφητικό οξυγόνου για την παράταση της διάρκειας ζωής ξηρών τροφίμων.



Εικόνα 6. Συσκευασία τροφίμου με ένθετο απορροφητικό οξυγόνου για την παράταση της διάρκειας ζωής. (Label and Narrow Web, 2023)

Ο βασικός σκοπός της ετικετογράφησης είναι να αποτρέψει την κατά λάθος κατανάλωση ενεργών στοιχείων, όπως απορροφητές ή εκλυόμενα ένθετα, αλλά και να ενημερώσει τον καταναλωτή ότι η συσκευασία δεν είναι συμβατική. Επιπλέον, η παραπλανητική χρήση χαρακτηρισμών όπως “φυσικό”, “χωρίς συντηρητικά” ή “βιοδιασπώμενο” ελέγχεται αυστηρά από τις αρχές για να αποφευχθεί η διαστρέβλωση των χαρακτηριστικών του προϊόντος (López-Rubio et al., 2006; Seref & Cufaoğlu, 2025).

Η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) απαιτεί ότι οποιοδήποτε ενεργό υλικό που τροποποιεί τη σύσταση του τροφίμου – για παράδειγμα μέσω μετανάστευσης αντιοξειδωτικών ή αντιμικροβιακών – θεωρείται πρόσθετο τροφίμων και πρέπει να αναφέρεται σαφώς στη λίστα συστατικών, εφόσον ανιχνεύεται στο τελικό προϊόν. Αυτό

συνεπάγεται τη σύνδεση της επισήμανσης με την ασφάλεια, αλλά και με τη νομική ευθύνη των παραγωγών ((European Commission, 2011).

Πέραν των νομικών υποχρεώσεων, η διαφάνεια στην αγορά ενεργών συσκευασιών αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία για τους καταναλωτές που αναζητούν λειτουργικά τρόφιμα και συσκευασίες φιλικές προς το περιβάλλον. Σύμφωνα με ερευνητικά δεδομένα, το 70–80% των Ευρωπαίων καταναλωτών δηλώνει ενδιαφέρον για τρόφιμα με επαυξημένα ποιοτικά χαρακτηριστικά, αρκεί να υπάρχει ξεκάθαρη και ειλικρινής πληροφόρηση (Ahmed et al., 2022· Vanderroost et al., 2014).

Ωστόσο, υπάρχει σημαντικό έλλειμμα καταναλωτικής ενημέρωσης σχετικά με τη φύση και τη λειτουργία των ενεργών υλικών. Πολλοί καταναλωτές συγχέουν τις ενεργές με τις έξυπνες συσκευασίες ή πιστεύουν εσφαλμένα ότι τα ενεργά υλικά είναι επικίνδυνα ή μη φυσικά (Puebla-Duarte et al., 2023). Αυτή η παρανόηση επιτείνεται όταν οι παραγωγοί δεν επισημαίνουν σαφώς την παρουσία ενεργών συστημάτων ή χρησιμοποιούν ασαφείς όρους, χωρίς επαρκή τεκμηρίωση.

Σε αυτό το πλαίσιο, ενθαρρύνεται η σύνδεση της επισήμανσης με τη βιωσιμότητα. Ο καταναλωτής αναμένει σήμερα η ετικέτα να αποκαλύπτει όχι μόνο τεχνολογικές πληροφορίες, αλλά και περιβαλλοντικά και ηθικά χαρακτηριστικά, όπως η βιοαποικοδομησιμότητα του φιλμ ή η μη χρήση συνθετικών συντηρητικών. Η αποτυχία να προσφερθεί επαρκής διαφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της εμπιστοσύνης, ακόμη και σε απόρριψη του προϊόντος (Vanderroost et al., 2014).

Η ετικετογράφηση των ενεργών συσκευασιών αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της νομοθετικής συμμόρφωσης και της καταναλωτικής διαφάνειας. Η επιτυχής υιοθέτηση της τεχνολογίας δεν εξαρτάται μόνο από τη λειτουργικότητα του συστήματος, αλλά και από τη σαφή, αξιόπιστη και επιστημονικά τεκμηριωμένη επικοινωνία προς τον τελικό χρήστη, βάσει ενός πλαισίου που σέβεται τις νομικές, ηθικές και αγοραστικές παραμέτρους.

Κεφάλαιο 2: Εφαρμογές ενεργού συσκευασίας σε τρόφιμα ζωικής προέλευσης

2.1 Αντιδράσεις υποβάθμισης ποιότητας φρέσκων ιχθυηρών

Τα φρέσκα ιχθυηρά συγκαταλέγονται στα πιο ευπαθή τρόφιμα ζωικής προέλευσης, λόγω της ιδιαίτερης φυσικοχημικής τους σύστασης και της υψηλής βιολογικής δραστηριότητας που παρουσιάζουν ακόμη και μετά τη θανάτωση του ιχθύος. Η υποβάθμιση της ποιότητάς τους ξεκινά άμεσα μετά την αλιεία, και ο ρυθμός της εξαρτάται από σειρά μικροβιολογικών, ενζυμικών, χημικών και φυσικών παραγόντων (Gram & Huss, 1996; Ólafsdóttir et al., 2006). Η μικροβιολογική αλλοίωση αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που περιορίζει τη διάρκεια ζωής των νωπών ιχθυηρών. Κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν ψυχρότροφοι βακτηριακοί πληθυσμοί, όπως *Pseudomonas spp.*, *Shewanella putrefaciens*, *Photobacterium phosphoreum*, και ορισμένα είδη *Aeromonas* και *Brochothrix thermosphacta* (Gram & Dalgaard, 2002). Οι μικροοργανισμοί αυτοί αναπτύσσονται ακόμη και σε συνθήκες ψύξης και παράγουν πτητικές ενώσεις αζώτου, όπως τριμεθυλαμίνη (TMA), αμμωνία, θειώδη, καθώς και άλλα προϊόντα πρωτεόλυσης και λιποδιάσπασης, που οδηγούν στη χαρακτηριστική οσμή και γεύση της αλλοίωσης (Parlapani et al., 2014).

Η συσκευασία των ιχθυηρών αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για τη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειάς τους κατά την αποθήκευση και διανομή. Όπως επισημαίνουν οι Tsironi και Taoukis (2018), οι τρέχουσες πρακτικές βασίζονται κυρίως στη χρήση τροποποιημένης ατμόσφαιρας, στη συσκευασία κενού και στις χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ οι πρόσφατες καινοτομίες εστιάζουν στην ανάπτυξη ενεργών και έξυπνων συστημάτων που μπορούν να παρατείνουν περαιτέρω τη διάρκεια ζωής και να προσφέρουν δυναμική πληροφόρηση για την ποιότητα του προϊόντος. Η ανασκόπηση αυτή καταδεικνύει ότι η πρόοδος στη συσκευασία ιχθυηρών δεν περιορίζεται πλέον στη φυσική προστασία από εξωτερικούς παράγοντες, αλλά επεκτείνεται σε τεχνολογίες που συνδυάζουν βιοδραστικά υλικά, αισθητήρες και ψηφιακή ιχνηλασιμότητα, ανταποκρινόμενες στις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς για ασφάλεια και βιωσιμότητα.

Η ταχύτητα ανάπτυξης των βακτηρίων εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, το pH των ιστών και η παρουσία υπολειμμάτων αίματος ή βλέννης. Ακόμη και υπό συνθήκες διατήρησης στους 0–2°C, τα βακτήρια αυτά μπορούν να φτάσουν σε επίπεδα που καθιστούν το προϊόν μη αποδεκτό εντός 6–10 ημερών, ανάλογα με το είδος του ψαριού (Chytiri et al., 2004).

Τα ιχθυηρά είναι πλούσια σε πολυακόρεστα λιπαρά οξέα, τα οποία καθιστούν τα προϊόντα αυτά εξαιρετικά ευάλωτα στην λιπιδική οξείδωση. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην παραγωγή υπεροξειδίων, αλδεϋδών και κετονών, ενώ προκαλεί μεταβολή στο χρώμα, την υφή και την οσμή του τροφίμου (López de Dicastillo et al., 2011). Η ταχύτητα οξείδωσης αυξάνεται παρουσία φωτός, υψηλής θερμοκρασίας, ιόντων μετάλλων (όπως σιδήρου), και φυσικά του οξυγόνου.

Η οξείδωση δεν επηρεάζει μόνο τα λιπίδια αλλά και τις πρωτεΐνες της σάρκας, με αποτέλεσμα την αποικοδόμηση αμινοξέων, τη δημιουργία διασταυρούμενων δεσμών και την απώλεια ικανότητας κατακράτησης νερού (Kristinsson & Hultin, 2003). Αυτά οδηγούν σε αλλοίωση της υφής και της συνοχής του προϊόντος, επηρεάζοντας άμεσα την καταναλωτική αποδοχή.

Η ενδογενής ενζυμική αποικοδόμηση (autolysis) αρχίζει άμεσα μετά τον θάνατο του ιχθύος και αφορά πρωτεολυτικά και λιπολυτικά ένζυμα όπως οι καθεψίνες, οι ουβικουτίνες και οι φωσφολιπάσες (Nielsen & Hyldig, 2004). Οι ενζυμικές αυτές αντιδράσεις οδηγούν στην αποδόμηση της μυϊκής δομής, στην απώλεια σφριγηλότητας και στη θολότητα των μυϊκών υγρών. Η αυτολυτική δραστηριότητα, αν και δεν είναι από μόνη της υπεύθυνη για την ανάπτυξη παθογόνων, δημιουργεί τις συνθήκες για ταχύτερη προσβασιμότητα των μικροοργανισμών στα θεραπευτικά συστατικά.

Η ποιότητα των ιχθυηρών επηρεάζεται επίσης από φυσικές μεταβολές όπως:

- Απώλεια υγρασίας και drip loss, που προκαλούν αφυδάτωση και αλλαγή στην εμφάνιση
- Αλλαγή στο χρώμα της σάρκας λόγω οξείδωσης μυοσφαιρίνης ή αιμοσφαιρίνης
- Αλλοίωση της οσμής και γεύσης, κυρίως λόγω λιπιδικής διάσπασης και βακτηριακών μεταβολιτών (Olafsdottir et al., 1997)

Η υποβάθμιση της ποιότητας δεν είναι μόνο οργανοληπτική ή μικροβιολογική, αλλά επηρεάζει και τη διατροφική αξία, καθώς η αποδόμηση πολυακόρεστων λιπαρών και βιταμινών μειώνει την ωφέλιμη σύνθεση του προϊόντος.

Οι παραπάνω αλλοιώσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής των ιχθυηρών, αυξάνοντας τα ποσοστά απορρίψεων κατά τη διανομή και πώληση. Αυτό συνεπάγεται οικονομικές απώλειες και αυξημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω σπατάλης τροφίμων (Ghaly et al., 2010). Επιπλέον, σε περίπτωση κακής υγιεινής ή διατήρησης, υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης παθογόνων όπως *Listeria monocytogenes*, *Clostridium botulinum* και *Vibrio spp.*, με σοβαρές συνέπειες για τη δημόσια υγεία (EFSA, 2018).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η αναφορά στα μεταποιημένα φρέσκα ιχθυηρά, όπως τα απαεντερωμένα ψάρια, οι φέτες και τα φιλέτα, τα οποία παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερη ευαλωτότητα στην αλλοίωση. Η απομάκρυνση της επιδερμίδας και των φυσικών φραγμών, η αύξηση της εκτεθειμένης επιφάνειας και η πιθανή μόλυνση κατά τη μεταποίηση οδηγούν σε υψηλότερο αρχικό μικροβιακό φορτίο, καθιστώντας τη διάρκεια ζωής τους ιδιαίτερα περιορισμένη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η τεχνολογία τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) και οι ενεργές συσκευασίες με αντιμικροβιακούς ή αντιοξειδωτικούς παράγοντες κρίνονται απαραίτητες για την παράταση της διάρκειας ζωής και τη διασφάλιση της ασφάλειας του προϊόντος μέχρι την εμπορική του διάθεση.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής ενεργής τροποποιημένης ατμόσφαιρας στα ιχθυηρά αποτελεί η μελέτη των Tsironi et al. (2019), όπου αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη της μικροβιακής σταθερότητας και της διάρκειας ζωής νωπού λαβρακιού υπό διαφορετικές συνθήκες ενεργού MAP. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο συνδυασμός ρυθμιζόμενων συγκεντρώσεων αερίων με ενεργούς μηχανισμούς επιβράδυνε σημαντικά την ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών και αύξησε τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Η έρευνα αυτή αναδεικνύει τον κρίσιμο ρόλο της μοντελοποίησης ως εργαλείο πρόβλεψης και βελτιστοποίησης της εφαρμογής ενεργών συστημάτων σε προϊόντα υψηλής ευπάθειας όπως τα ιχθυηρά, παρέχοντας πολύτιμες κατευθύνσεις για τη βιομηχανική εφαρμογή.

Η συνδυαστική δράση όλων των παραπάνω μηχανισμών έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία μείωση της διάρκειας ζωής των φρέσκων ιχθυηρών, με επακόλουθο την αύξηση απορρίψεων σε επίπεδο λιανικής, τη σπατάλη τροφίμων και τις οικονομικές απώλειες για τη βιομηχανία και τους εμπόρους (Ghaly et al., 2010). Επιπλέον, σε περιπτώσεις κακής ψυκτικής αλυσίδας ή υγειονομικής διαχείρισης, ενέχεται κίνδυνος ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών όπως *Listeria monocytogenes*, *Clostridium botulinum* και *Vibrio spp.*, με σοβαρές συνέπειες για τη δημόσια υγεία (EFSA, 2018). Στον Πίνακα 7 συνοψίζονται τα κυριότερα είδη μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην αλλοίωση διαφορετικών ειδών ιχθυηρών, καθώς και οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους, όπως το pH, η ενεργότητα νερού και η θερμοκρασία συντήρησης. Η συγκεντρωτική αυτή παρουσίαση διευκολύνει την κατανόηση των μηχανισμών αλλοίωσης και των χαρακτηριστικών που καθιστούν τα προϊόντα αυτά ιδιαίτερα ευπαθή.

Πίνακας 7. Κύριοι μικροοργανισμοί αλλοίωσης σε διαφορετικά είδη ιχθυηρών και οι παράγοντες ανάπτυξής τους (Πηγές όπου στηρίζεται ο Πίνακας Gram & Dalgaard (2002), Ercolini et al. (2006), Kontominas et al. (2021), Kerry et al. (2006))

Είδος Ιχθυηρού	Κύριοι Μικροοργανισμοί Αλλοίωσης	pH	a_w	Λιποπεριεκτικότητα (%)	Θερμοκρασία Ανάπτυξης M/O	Χαρακτηριστικά Αλλοίωσης
Σαρδέλα (<i>Sardina pilchardus</i>)	<i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Shewanella putrefaciens</i> , <i>Photobacterium phosphoreum</i>	6.0–6.4	0.98–0.99	10–13	Ψυγείου (0–4 °C)	Οσμή «ψαριού», αυξημένη βλέννη, μαλάκωμα ιστών
Γαύρος (<i>Engraulis encrasicolus</i>)	<i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Acinetobacter</i> , <i>Moraxella</i>	5.8–6.3	0.97–0.99	5–8	0–5 °C	Πικρή/ξινή οσμή, μεταβολές χρώματος, απώλεια λάμψης
Μπακαλιάρος (<i>Gadus morhua</i>)	<i>Photobacterium spp.</i> , <i>Shewanella</i> , <i>Hafnia alvei</i>	6.1–6.5	0.98	0.5–1.5	1–5 °C	Παραγωγή H ₂ S, μεταλλική οσμή, κιτρινίλα μυϊκών ινών
Λαβράκι (<i>Dicentrarchus labrax</i>)	<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Aeromonas spp.</i> , <i>Flavobacterium</i>	6.2–6.6	0.99	3–4	0–6 °C	Οσμή αμμωνίας, απώλεια στιλπνότητας, αλλαγή υφής
Τσιπούρα (<i>Sparus aurata</i>)	<i>Shewanella</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Vibrio spp.</i>	6.0–6.3	0.98	3–5	0–4 °C	Αφυδάτωση επιφανείας, γλοιώδης υφή, ανάπτυξη επιχρίσματος
Ροφός (<i>Epinephelus marginatus</i>)	<i>Brochothrix thermosphacta</i> , <i>Enterobacteriaceae</i>	6.3–6.7	0.97–0.98	5–7	4–8 °C	Βιοφιλμ, έντονη αποσύνθεση οσμής, γκριζάρισμα

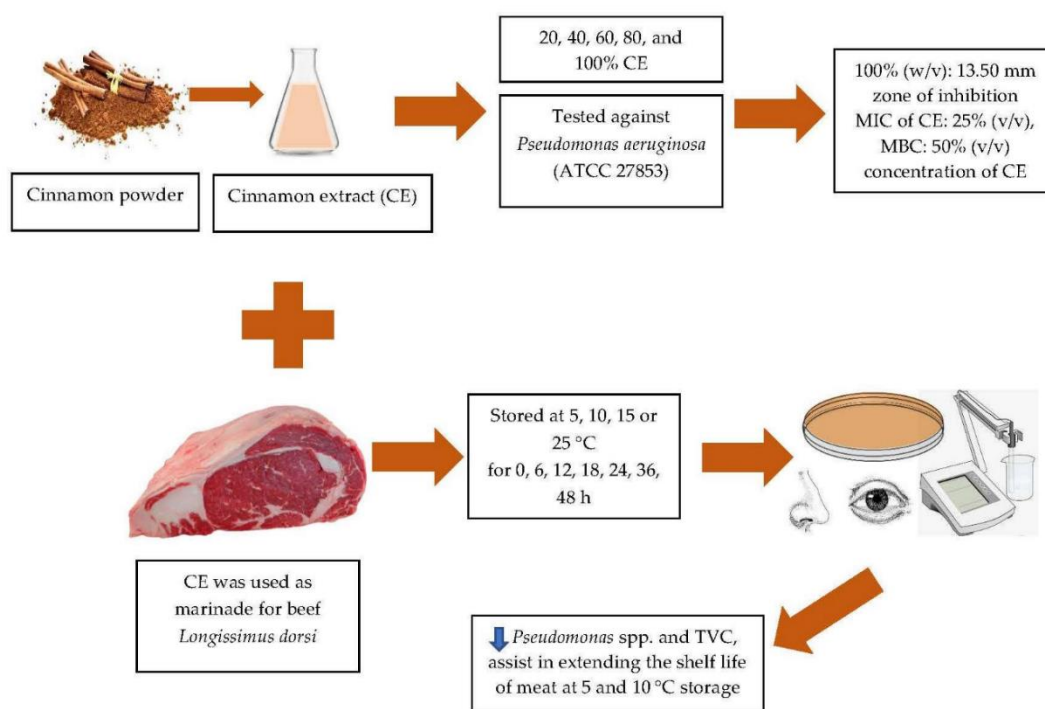
Η κατανόηση των μηχανισμών υποβάθμισης των φρέσκων ιχθυηρών είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή επιλογή τεχνολογίας συσκευασίας. Όπως θα δούμε στα επόμενα υποκεφάλαια, η ενεργή συσκευασία μπορεί να παρέμβει σε καθοριστικά στάδια αυτών των διαδικασιών, μειώνοντας τις απώλειες και βελτιώνοντας την ασφάλεια και αποδεκτότητα του τελικού προϊόντος.

2.2 Μελέτες – επιδράσεις στη διατήρηση ποιότητας νωπών προϊόντων κρέατος

Το νωπό κρέας αποτελεί ένα από τα πλέον ευπαθή τρόφιμα ζωικής προέλευσης, καθώς είναι εξαιρετικά ευάλωτο σε μικροβιολογική αλλοίωση, ενζυμικές αντιδράσεις και λιπιδική οξείδωση. Τα τελευταία χρόνια, πλήθος ερευνητικών μελετών έχουν αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα της ενεργού συσκευασίας ως τεχνολογίας παρέμβασης για την παράταση της διάρκειας ζωής και τη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων αυτών.

Η ενεργή συσκευασία με χρήση πολυμερικού φιλμ ενσωματωμένου με αιθέρια έλαια (π.χ. θυμόλη ή καρβακρόλη) έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αναστολή της ανάπτυξης παθογόνων και αλλοιογόνων βακτηρίων σε νωπό κρέας. Σε μελέτη των Coma et al. (2011), η χρήση πολυμερούς φιλμ με ενσωματωμένο αιθέριο έλαιο θυμαριού σε κομμάτια χοιρινού κρέατος οδήγησε σε μείωση κατά 2–3 log CFU/g του συνολικού βακτηριακού φορτίου, σε σύγκριση με τη συμβατική συσκευασία υπό ψύξη για 10 ημέρες. Παρομοίως, η εφαρμογή φιλμ με νισίνη και ελαϊκό οξύ σε κρέας κοτόπουλου ανέστειλε την ανάπτυξη *Listeria monocytogenes* έως και 7 ημέρες περισσότερο από την ομάδα ελέγχου (Cagri et al., 2004). Η ενεργή συσκευασία έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αναστολή της ανάπτυξης παθογόνων και αλλοιογόνων βακτηρίων σε νωπό κρέας. Σε μελέτη των Coma et al. (2011), η χρήση πολυμερούς φιλμ με ενσωματωμένο αιθέριο έλαιο θυμαριού σε κομμάτια χοιρινού κρέατος οδήγησε σε μείωση κατά 2–3 log CFU/g του συνολικού βακτηριακού φορτίου, σε σύγκριση με τη συμβατική συσκευασία υπό ψύξη για 10 ημέρες. Παρομοίως, η εφαρμογή φιλμ με νισίνη και ελαϊκό οξύ σε κρέας κοτόπουλου ανέστειλε την ανάπτυξη *Listeria monocytogenes* έως και 7 ημέρες περισσότερο από την ομάδα ελέγχου (Cagri et al., 2004). Στο ίδιο πνεύμα, η μελέτη των Zawani et al. (2022) εξέτασε την αντιμικροβιακή δράση του εκχυλίσματος κανέλας (Cinnamon Extract, CE) κατά του *Pseudomonas aeruginosa* και την εφαρμογή του ως μαρινάδα σε βοδινό κρέας (*Longissimus dorsi*). Το εκχύλισμα αξιολογήθηκε σε συγκεντρώσεις 20–100% (w/v), παρουσιάζοντας ζώνη αναστολής 13,50 mm στη μέγιστη συγκέντρωση, με ελάχιστη

ανασταλτική συγκέντρωση (MIC) στο 25% και ελάχιστη βακτηριοκτόνο συγκέντρωση (MBC) στο 50%. Η χρήση του CE ως μαρινάδα οδήγησε σε σημαντική μείωση του πληθυσμού *Pseudomonas spp.* και της ολικής χλωρίδας (TVC), επιτυγχάνοντας **παράταση της διάρκειας ζωής του κρέατος κατά 48 ώρες** υπό ψύξη στους 5 και 10 °C, σε σύγκριση με μη επεξεργασμένα δείγματα. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα φυτικά εκχυλίσματα, όταν εφαρμόζονται στο πλαίσιο της ενεργούς συσκευασίας ή της προεπεξεργασίας, μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την υγιεινή και τη σταθερότητα των νωπών προϊόντων κρέατος. Η Εικόνα 7 απεικονίζει πειραματικά δεδομένα για τη δράση του εκχυλίσματος κανέλας έναντι παθογόνων μικροοργανισμών, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες των φυσικών εκχυλισμάτων ως συστατικών ενεργής συσκευασίας. Η εφαρμογή τους σε νωπά προϊόντα κρέατος δείχνει πως μπορούν να περιορίσουν σημαντικά το μικροβιακό φορτίο και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής τους.



Εικόνα 7. Διαγραμματική απεικόνιση της αντιμικροβιακής δράσης του εκχυλίσματος κανέλας (Cinnamon extract, CE) κατά του *Pseudomonas aeruginosa* και της εφαρμογής του ως μαρινάδας σε βοδινό κρέας (*Longissimus dorsi*). (Zawani et al., 2022)

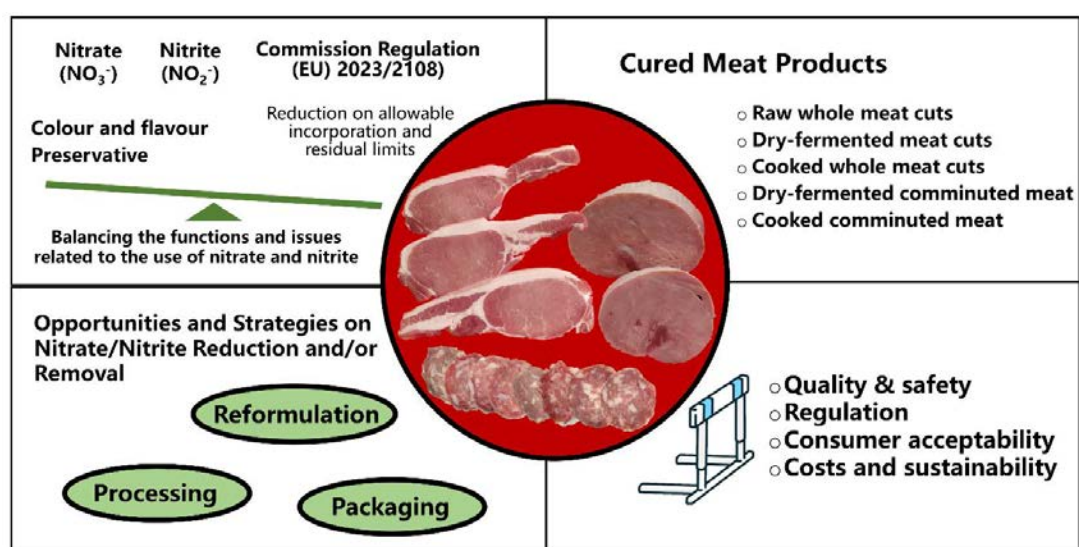
Συστήματα απορρόφησης οξυγόνου, σε συνδυασμό με συσκευασία κενού, έχουν επιδείξει ενίσχυση της μικροβιακής ασφάλειας σε νωπά προϊόντα αρνιού και βοδινού,

μειώνοντας την ανάπτυξη *Pseudomonas spp.* και *Enterobacteriaceae* (Mohan et al., 2022). Η έλλειψη οξυγόνου περιορίζει την αναπνοή των μικροοργανισμών, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη δυνατότητα ανάπτυξης χρωματικών και οξειδωτικών αλλοιώσεων. Παρόλαυτα ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον αποκλεισμό του οξυγόνου ιδιαίτερα στα λευκά ψάρια όπου η πιθανότητα δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών μπορεί να ευνοήσει την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών όπως το *Clostridium botulinum*.

Η οξείδωση λιπιδίων αποτελεί σημαντικό μηχανισμό υποβάθμισης στο κρέας, οδηγώντας σε απώλεια γεύσης, μεταβολή χρώματος και δημιουργία πτητικών αλλοιωτικών ενώσεων. Η χρήση αντιοξειδωτικών φιλμ ή φιλμ με εκπομπή φυσικών εκχυλισμάτων (π.χ. ροσμαρινικού οξέος, γαλλικού οξέος) έχει αξιολογηθεί με επιτυχία σε προϊόντα μοσχαρίσιου, χοιρινού και κοτόπουλου (Vargas et al., 2009· Lorenzo et al., 2014). Τα φιλμ αυτά επιβράδυναν σημαντικά τον σχηματισμό TBARS (thiobarbituric acid reactive substances), δείκτη λιπιδικής οξείδωσης, καθυστερώντας την εμφάνιση οσμών ταγγίσματος.

Επιπλέον, η σταθερότητα του χρώματος, που σχετίζεται με τη διατήρηση της οξυμυοσφαιρίνης, έχει επίσης αποδειχθεί ότι βελτιώνεται σε φιλμ με απορρόφηση οξυγόνου, με αποτέλεσμα καλύτερα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά κατά την τοποθέτηση στα ράφια (Sánchez-Ortega et al., 2014). Το χρώμα είναι καθοριστικό για την αποδοχή του προϊόντος από τον καταναλωτή και η ενεργή συσκευασία προσφέρει τη δυνατότητα διατήρησης του επιθυμητού φωτεινού κόκκινου για περισσότερο χρόνο. Η οργανοληπτική ποιότητα του κρέατος (οσμή, γεύση, υφή) επηρεάζεται άμεσα από μικροβιολογικές και οξειδωτικές διεργασίες. Μελέτες σε χοιρινό κρέας με χρήση αντιμικροβιακών μεμβρανών εμπλουτισμένων με φυτικά εκχυλίσματα έδειξαν καλύτερη αποδοχή από εκπαιδευμένο πάνελ όσον αφορά τη φρεσκάδα, τη γεύση και την υφή, για τουλάχιστον 5 ημέρες επιπλέον (Martínez et al., 2013). Παρόμοια ευρήματα καταγράφηκαν και σε φιλέτα κοτόπουλου όπου χρησιμοποιήθηκαν επιστρώσεις χιτοζάνης με θυμόλη και γλυκολικό οξύ, καθυστερώντας την απώλεια υγρασίας και τη δημιουργία εκχυλισμάτων μυρωδιάς (De Lima et al., 2024). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9, η μείωση ή απομάκρυνση των νιτρικών (NO_3^-) και νιτρωδών (NO_2^-) στα προϊόντα επεξεργασμένου κρέατος σχετίζεται άμεσα με ζητήματα ποιότητας, ασφάλειας, συμμόρφωσης και αποδοχής από τους καταναλωτές (Molina et al., 2024). Η Εικόνα 8 συνοψίζει τα βασικά ζητήματα που σχετίζονται με τη μείωση και/ή απομάκρυνση νιτρωδών (NO_2^-) και νιτρικών (NO_3^-) στα επεξεργασμένα

κρέατα, αναδεικνύοντας τη σύνδεση ανάμεσα στην ποιότητα, την ασφάλεια, τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία και τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Η γραφική απεικόνιση παρουσιάζει τις στρατηγικές που συνδέουν την επεξεργασία, τον ανασχεδιασμό συνταγών και τη συσκευασία ως κρίσιμους παράγοντες για την επίτευξη ασφαλέστερων και πιο βιώσιμων προϊόντων.



Εικόνα 8. Θέματα σχετικά με τη μείωση/απομάκρυνση νιτρικών (NO_3^-) και νιτρωδών (NO_2^-) στα επεξεργασμένα κρέατα. (Molina et al., 2024)

Η ενεργή συσκευασία έχει επίσης μελετηθεί σε συνδυασμό με τεχνικές συσκευασίας υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), όπου το εσωτερικό αέριο περιβάλλον ρυθμίζεται (π.χ. με αύξηση CO_2 και μείωση O_2), και με συσκευασία κενού (vacuum packaging), η οποία αφαιρεί σχεδόν όλον τον αέρα από το περιβάλλον του προϊόντος. Σε αυτούς τους συνδυασμούς, η ενεργός δράση επιτυγχάνεται μέσω ενσωμάτωσης αντιοξειδωτικών ή αντιμικροβιακών ουσιών (όπως αιθέρια έλαια, θυμόλη, εκχυλίσματα δενδρολίβανου, BHT ή νανοσωματίδια ψευδαργύρου) σε φιλμ συσκευασίας ή επιφανειακές επικαλύψεις, παρέχοντας ελεγχόμενη απελευθέρωση δραστικών συστατικών κατά την αποθήκευση (Coma, 2008· Suppakul et al., 2003). Σε μελέτη του Gammariello et al. (2014), η εφαρμογή φιλμ με νισίνη και συσκευασία υπό MAP σε λουκάνικα αύξησε τη διάρκεια ζωής κατά 8 ημέρες, χωρίς αρνητική επίδραση στην οσμή ή τη γεύση. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε προϊόντα αρνιού και κοτόπουλου όπου εφαρμόστηκαν φιλμ με αιθέρια έλαια, σε συνδυασμό με υψηλή υδροστατική πίεση (Kumar et al., 2020).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ελληνικής εφαρμογής αφορά την αξιοποίηση παραδοσιακών αλκοολούχων αποσταγμάτων ως φυσικών αντιμικροβιακών παραγόντων σε συστήματα ενεργού συσκευασίας. Συγκεκριμένα, η μελέτη των Kapetanakou, Pateraki και Skandamis (2020) ανέπτυξε και αξιολόγησε ένα εμπορικό πρωτότυπο συστήματος ενεργού συσκευασίας κιμά, βασισμένο στο απόσταγμα “Τσίπουρο”. Το συγκεκριμένο υλικό επέδειξε σημαντική ικανότητα περιορισμού της ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών και αλλοιογόνων βακτηρίων, συμβάλλοντας παράλληλα στη διατήρηση της οργανοληπτικής ποιότητας του προϊόντος. Η έρευνα αυτή αναδεικνύει τον ρόλο που μπορούν να παίξουν οι τοπικοί βιοδραστικοί πόροι στη δημιουργία καινοτόμων, φιλικών προς τον καταναλωτή λύσεων ενεργού συσκευασίας, οι οποίες αξιοποιούν γνωστά παραδοσιακά προϊόντα της Μεσογειακής διατροφής για την ενίσχυση της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής των τροφίμων.

Ένα ακόμη καινοτόμο παράδειγμα αφορά τη διερεύνηση της δράσης ατμών από εμπορικά αλκοολούχα ποτά σε συνθήκες τροποποιημένης ατμόσφαιρας. Οι Kapetanakou, Agathaggelou και Skandamis (2014) μελέτησαν την αποθήκευση χοιρινού κρέατος σε MAP, όπου συνδυάστηκαν ελεγχόμενες συγκεντρώσεις αερίων με ατμούς αλκοολούχων αποσταγμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση μείωσε σημαντικά το μικροβιακό φορτίο, ανέστειλε την ανάπτυξη παθογόνων και επιβράδυνε τις οξειδωτικές διεργασίες, οδηγώντας σε επιμήκυνση της διάρκειας ζωής χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών. Η μελέτη αυτή καταδεικνύει τη δυνατότητα συνδυασμού τεχνολογιών, όπως η MAP και τα φυσικά αντιμικροβιακά, για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων ενεργού συσκευασίας σε προϊόντα κρέατος.

Τέλος, σημαντικά αποτελέσματα έχουν αναφερθεί και για τα πουλερικά, τα οποία αποτελούν ιδιαίτερα ευπαθή προϊόντα με υψηλό μικροβιακό κίνδυνο. Στη μελέτη των Ntzimani, Kalamaras, Tsironi και Taoukis (2023), διερευνήθηκε η εφαρμογή συνδυασμού τροποποιημένης ατμόσφαιρας με βρώσιμες αντιμικροβιακές επιστρώσεις σε τεμάχια κοτόπουλου. Η προσέγγιση αυτή οδήγησε σε ουσιαστική παράταση της διάρκειας ζωής, περιορίζοντας παράλληλα την ανάπτυξη παθογόνων και αλλοιογόνων μικροοργανισμών, ενώ συνέβαλε και στη διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Τα ευρήματα αναδεικνύουν τον ρόλο των συνδυαστικών τεχνολογιών ενεργού συσκευασίας ως στρατηγικών λύσεων για τη βιομηχανία κρέατος, με άμεση εφαρμοσιμότητα σε εμπορικό επίπεδο.

2.3 Εφαρμοσμένες τεχνολογίες ενεργού συσκευασίας

2.3.1 Συστήματα απορρόφησης (O₂, CO₂, υγρασία)

Η χρήση συστημάτων απορρόφησης στην ενεργό συσκευασία φρέσκων τροφίμων ζωικής προέλευσης στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας, στην επιβράδυνση της αλλοίωσης και στην παράταση της διάρκειας ζωής. Τα απορροφητικά στοιχεία ενσωματώνονται εντός της συσκευασίας και δρουν παθητικά ή ενεργά απομακρύνοντας ανεπιθύμητα αέρια και υγρασία που επιταχύνουν μικροβιακές και χημικές αντιδράσεις.

Το οξυγόνο είναι από τους κύριους παράγοντες οξειδωτικής υποβάθμισης στα νωπά τρόφιμα. Προκαλεί λιπιδική οξείδωση, μεταβολή χρώματος και ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών, όπως *Pseudomonas spp.* και *Listeria monocytogenes* (Lopez-Rubio et al., 2004). Η απορρόφηση οξυγόνου επιτυγχάνεται μέσω υλικών όπως σιδηρούχες ενώσεις (Fe²⁺/Fe³⁺), ασκορβικό νάτριο, γαλλικό οξύ και ένζυμα όπως η οξειδάση της γλυκόζης (Han et al., 2005). Αυτά είτε ενσωματώνονται στο φιλμ είτε σε σακουλάκια (sachets).

Εφαρμογές σε κρέας κοτόπουλου με χρήση σακουλιών απορρόφησης οξυγόνου έχουν δείξει παράταση διάρκειας ζωής κατά 7–10 ημέρες, λόγω μειωμένης μικροβιακής ανάπτυξης και σταθερότητας χρώματος (Sivertsvik et al., 2002). Αντίστοιχα, η εφαρμογή σε φιλέτα ψαριού είχε ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της οξείδωσης λιπιδίων και διατήρηση της φρεσκάδας κατά την αποθήκευση σε ψύξη (Wu et al., 2020).

Το CO₂ έχει μικροβιοστατικές ιδιότητες, αλλά σε υπερβολικές συγκεντρώσεις μπορεί να οδηγήσει σε όξινη επίγευση και απώλεια της αποδεκτής αισθητηριακής ποιότητας (Yam et al., 2005). Συνεπώς, η ελεγχόμενη απορρόφησή του είναι απαραίτητη σε προϊόντα που συσκευάζονται υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP). Υλικά όπως υδροξείδιο του ασβεστίου ή νανοσωματίδια ανθρακικού ασβεστίου χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση πλεονάζοντος CO₂, κυρίως σε λιπαρά ψάρια ή ωριμασμένα κρέατα (Rodríguez et al., 2011).

Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων σε σαρδέλες και τόνο έδειξε ότι μείωσαν την τάση δημιουργίας ανεπιθύμητων αρωμάτων και οξίνισης, διατηρώντας την οργανοληπτική ποιότητα του προϊόντος για τουλάχιστον 4 ημέρες περισσότερο (Manios et al., 2015).

Η υπερβολική υγρασία εντός της συσκευασίας ενισχύει την ανάπτυξη μούχλας, βακτηρίων και ανεπιθύμητων μεταβολών υφής. Η απορρόφησή της είναι κρίσιμη

ειδικά σε προϊόντα όπως ψάρι ή συσκευασμένα φιλέτα που εκλύουν «drip loss». Υλικά όπως ζεόλιθοι, silica gel, άμυλο, κυτταρίνη και υπεραπορροφητικά πολυμερή (SAPs) χρησιμοποιούνται σε pads ή ένθετα (Yam et al., 2012).

Σε συσκευασίες σολομού και πέστροφας, η χρήση απορροφητικών pads με ενεργό άνθρακα και silica gel μείωσε την υγρασία του περιβάλλοντος κατά 35–40% και επιβράδυνε τη μικροβιακή αλλοίωση (Jayas & Jeyamkondan, 2002). Επιπλέον, απέτρεψε την αλλαγή υφής του προϊόντος και τη δημιουργία ανεπιθύμητων μυρωδιών. Τα συστήματα απορρόφησης στην ενεργό συσκευασία αποτελούν πυρήνα καινοτομίας για την παράταση της διάρκειας ζωής νωπών τροφίμων ζωικής προέλευσης. Ο κατάλληλος συνδυασμός απορροφητικών παραγόντων (οξυγόνου, υγρασίας, CO₂) προσφέρει βελτιωμένη μικροβιολογική σταθερότητα, σταθερότητα χρώματος και γεύσης και αυξημένη αποδοχή από τον καταναλωτή, ιδίως όταν συνδυάζεται με άλλες τεχνικές (π.χ. MAP, φιλμ με εκχυλίσματα). Η μελλοντική έρευνα εστιάζει στη βελτιστοποίηση αυτών των υλικών ως προς την επιλεκτικότητα, τη βιοσυμβατότητα και τη βιοαποικοδομησιμότητα.

Πέρα από τα συστήματα απορρόφησης, έχουν αναπτυχθεί και ενεργά συστήματα απελευθέρωσης ή ενίσχυσης τροποποιημένης ατμόσφαιρας, τα οποία στοχεύουν στη διατήρηση των επιθυμητών συγκεντρώσεων αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) ή το άζωτο (N₂), εντός της συσκευασίας. Τέτοια συστήματα περιλαμβάνουν φορείς που απελευθερώνουν CO₂ μέσω χημικών αντιδράσεων (π.χ. μεταξύ διττανθρακικών αλάτων και οργανικών οξέων) ή απελευθερώνουν αντιμικροβιακά αέρια (όπως αιθέρια έλαια) με ελεγχόμενο ρυθμό (Lopez-Rubio et al., 2004). Με αυτόν τον τρόπο, διατηρείται η μικροβιοστατική δράση της ατμόσφαιρας και επιβραδύνεται η αλλοίωση του τροφίμου, ιδιαίτερα σε προϊόντα υψηλής ευπάθειας όπως το νωπό κρέας και τα ιχθυηρά (Vermeiren et al., 2003).

2.3.2 Συστήματα εκπομπής (αντιοξειδωτικά, αντιμικροβιακοί παράγοντες)

Τα συστήματα εκπομπής στην ενεργό συσκευασία βασίζονται στην εκούσια απελευθέρωση ουσιών με λειτουργικές ιδιότητες, όπως αντιοξειδωτικά ή αντιμικροβιακοί παράγοντες, στο περιβάλλον της συσκευασίας, με στόχο τη συντήρηση της ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων ζωικής προέλευσης. Η τεχνολογία αυτή διαφέρει ριζικά από την απλή προστασία του τροφίμου, καθώς εμπλέκει ενεργή αλληλεπίδραση του υλικού συσκευασίας με το περιεχόμενο (Mkhari et al., 2025).

Η λιπιδική οξείδωση είναι ένας από τους κύριους μηχανισμούς αλλοίωσης σε προϊόντα όπως κρέας και λιπαρά ψάρια. Η προσθήκη αντιοξειδωτικών μέσω του υλικού συσκευασίας επιτρέπει τον ελεγχόμενο ρυθμό απελευθέρωσης, αποφεύγοντας την άμεση προσθήκη τους στο τρόφιμο (Junqueira-Gonçalves et al., 2011).

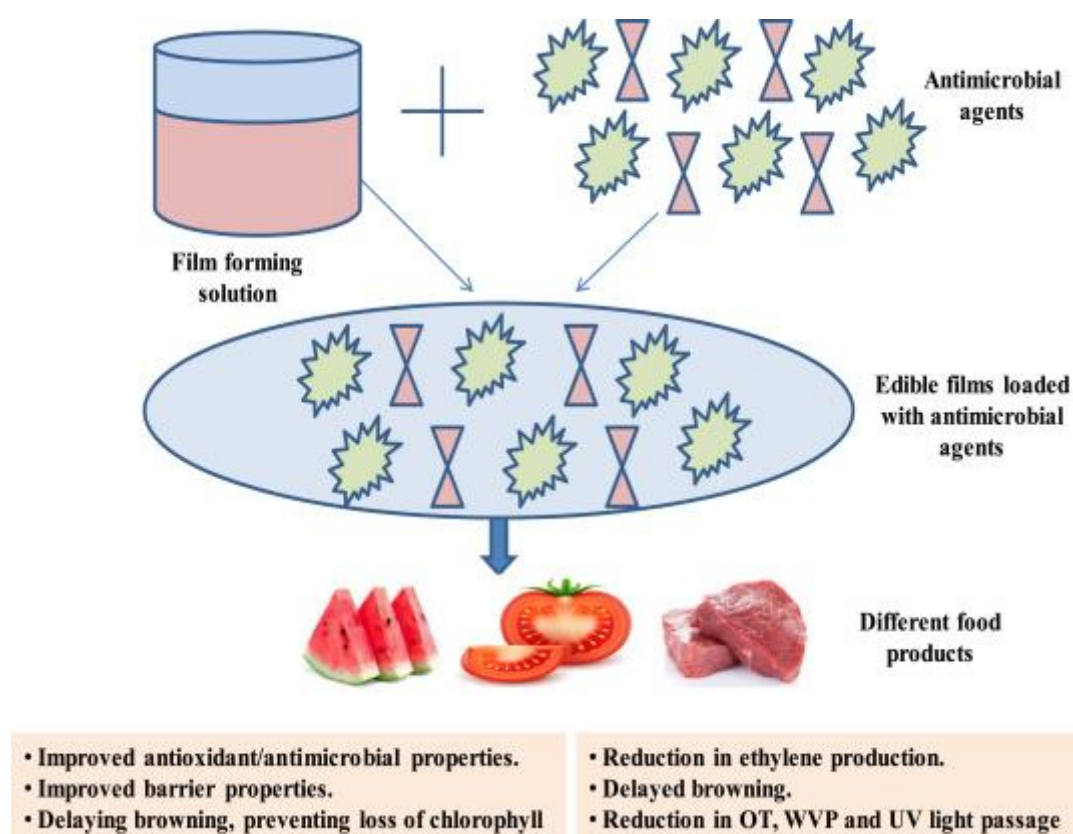
Ενεργά φιλμ που περιέχουν φυσικά εκχυλίσματα, όπως φαινολικές ενώσεις από δενδρολίβανο, θυμάρι, πράσινο τσάι ή σταφυλόκουκκο, έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στη σταθεροποίηση της χρωματικής και οξειδωτικής σταθερότητας του κρέατος κατά την ψυκτική αποθήκευση (Pereira de Abreu et al., 2012). Για παράδειγμα, εφαρμογή φιλμ με εκχύλισμα ροδιού σε φιλέτα σολομού οδήγησε σε 50% μείωση της δευτερογενούς οξείδωσης λιπιδίων (TBARS) συγκριτικά με την κλασική συσκευασία (De Lima et al., 2024).

Παράλληλα, συνθετικά αντιοξειδωτικά όπως το BHT και το BHA έχουν χρησιμοποιηθεί σε φιλμ πολυπροπυλενίου με ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής (Kuswandi et al., 2011). Ωστόσο, η τάση της αγοράς και των ρυθμιστικών αρχών είναι προς φυσικές εναλλακτικές λόγω ανησυχιών για την ασφάλεια και την αποδοχή από τον καταναλωτή. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, τα βρώσιμα ενεργά φιλμ με αντιμικροβιακές ουσίες μπορούν να βελτιώσουν την οξειδωτική σταθερότητα, τις ιδιότητες φραγμού και τη συνολική διάρκεια ζωής διαφόρων τροφίμων. Η Εικόνα 9 απεικονίζει τη διαδικασία παραγωγής βρώσιμων φιλμ που ενσωματώνουν αντιμικροβιακούς παράγοντες, με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας και τη μείωση της μικροβιακής αλλοίωσης σε τρόφιμα. Τα βρώσιμα φιλμ αποτελούν μια καινοτόμα προσέγγιση της ενεργού συσκευασίας, καθώς εκτός από τον προστατευτικό τους ρόλο μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς βιοδραστικών ενώσεων, προσφέροντας στοχευμένη δράση ενάντια σε παθογόνα και αλλοιογόνους μικροοργανισμούς.

Μια ιδιαίτερα καινοτόμος προσέγγιση στην ανάπτυξη συστημάτων εκπομπής αφορά την ενσωμάτωση ζωντανών μικροοργανισμών με αντιμικροβιακή δράση στο υλικό της συσκευασίας. Ενδεικτικά, οι Gialamas, Zinoviadou, Biliaderis και Koutsoumanis (2010) ανέπτυξαν βιοενεργά φιλμ νατριούχου καζεΐνης στα οποία ενσωματώθηκε ο *Lactobacillus sakei*, γνωστός για την ικανότητά του να αναστέλλει την ανάπτυξη της *Listeria monocytogenes*. Τα φιλμ αυτά λειτούργησαν ως φορείς σταθερής απελευθέρωσης αντιμικροβιακών μεταβολιτών, παρέχοντας αποτελεσματική προστασία στα τρόφιμα χωρίς την άμεση προσθήκη χημικών συντηρητικών. Η μελέτη αυτή υπογραμμίζει τη δυναμική των βιοπολυμερών φιλμ ως πλατφόρμα για τη στοχευμένη εφαρμογή προβιοτικών ή προστατευτικών καλλιεργειών, ανοίγοντας

νέους δρόμους για την ανάπτυξη βιοενεργών συστημάτων συσκευασίας με υψηλή αποδοχή από τον καταναλωτή.

Η αξιοποίηση πρωτεϊνικών φιλμ ως φορέων αντιμικροβιακών ουσιών έχει αποτελέσει αντικείμενο εντατικής έρευνας, ειδικά σε εφαρμογές σε νωπό κρέας. Οι Zinoviadou, Koutsoumanis και Biliaderis (2009) ανέπτυξαν βρώσιμα φιλμ από απομόνωση πρωτεϊνών ορού γάλακτος (whey protein isolate), τα οποία εμπλουτίστηκαν με αντιμικροβιακούς παράγοντες και αξιολογήθηκαν τόσο ως προς τις φυσικές και θερμομηχανικές τους ιδιότητες όσο και ως προς τη δράση τους έναντι της αλλοιωγόνου μικροχλωρίδας στο νωπό βόειο κρέας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα φιλμ παρουσίασαν ικανοποιητική μηχανική αντοχή και σταθερότητα, ενώ παράλληλα μείωσαν την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που ευθύνονται για τη μείωση της διάρκειας ζωής του προϊόντος. Η συγκεκριμένη μελέτη αναδεικνύει τον διπλό ρόλο των πρωτεϊνικών φιλμ, τόσο ως δομικών υλικών συσκευασίας όσο και ως φορέων βιοδραστικών ενώσεων που ενισχύουν τη μικροβιολογική ασφάλεια.



Εικόνα 9. Παραγωγή βρώσιμων φιλμ με αντιμικροβιακούς παράγοντες για τρόφιμα (Manzoor et al., 2023)

Τα αντιμικροβιακά ενεργά συστήματα στοχεύουν στην αναστολή ή καταστολή της ανάπτυξης αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών στο επιφανειακό στρώμα του τροφίμου, όπου η μόλυνση είναι πιο πιθανή. Οι ουσίες αυτές μπορούν να είναι φυσικές (π.χ. αιθέρια έλαια, χιτοζάνη, εστέρες) ή συνθετικές (π.χ. sorβικό κάλιο, οξικό νάτριο) (Muriel-Galet et al., 2012).

Σε φιλέτα ψαριού, η ενσωμάτωση χιτοζάνης με αιθέρια έλαια λεμονιού ή θυμαριού σε βιοπολυμερικά φιλμ είχε ως αποτέλεσμα την αναστολή ανάπτυξης *Listeria monocytogenes* και *Aeromonas* spp., επιμηκύνοντας τη διάρκεια ζωής κατά 6–8 ημέρες σε ψυκτικές συνθήκες (Jovanović et al., 2016).

Στον τομέα του κρέατος, φιλμ με εκχύλισμα ροδιού ή δενδρολίβανου απέδειξαν σημαντική αντιβακτηριακή δράση έναντι *Escherichia coli* και *Salmonella* spp., καθυστερώντας παράλληλα τη δημιουργία οσμών και την αποχρωματοποίηση του προϊόντος (Mkhari et al., 2025). Η εκπομπή μπορεί να είναι είτε συνεχής είτε προκαλούμενη από συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), καθιστώντας τη τεχνολογία αυτή δυναμική και προσαρμόσιμη.

Τα συστήματα εκπομπής συνήθως συνδυάζονται με MAP, ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας ή βιοδιασπώμενα φιλμ, ώστε να δημιουργηθεί ένα πολυλειτουργικό σύστημα συσκευασίας (Vargas et al., 2011). Οι έρευνες προσανατολίζονται σήμερα στην ελεγχόμενη εκπομπή με νανοτεχνολογία, για παράδειγμα μέσω νανοφορέων που ενεργοποιούνται με pH ή θερμοκρασία (Ramos et al., 2014). Ωστόσο, η νομοθεσία για μετανάστευση ουσιών και η αποδοχή του καταναλωτή παραμένουν κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Η αξιοποίηση φυσικών και χημικών αντιμικροβιακών παραγόντων αποτελεί βασικό άξονα στην ανάπτυξη συστημάτων εκπομπής ενεργής συσκευασίας. Η εφαρμογή τέτοιων παρεμβάσεων έχει μελετηθεί εκτενώς και σε φυτικά τρόφιμα, όπου η μικροβιολογική ασφάλεια συνιστά κρίσιμη πρόκληση. Ενδεικτικά, η έρευνα των Poimenidou et al. (2015) αξιολόγησε την επίδραση μεμονωμένων ή συνδυασμένων αντιμικροβιακών παρεμβάσεων, βασισμένων σε χημικές και φυσικές ουσίες, στην ανάπτυξη του *Escherichia coli* O157:H7, στη συνολική μικροβιακή χλωρίδα και στο χρώμα συσκευασμένων φύλλων σπανακιού και μαρουλιού. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι συνδυαστικές παρεμβάσεις προσφέρουν ανώτερη αποτελεσματικότητα, περιορίζοντας ταυτόχρονα τις αλλαγές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Αν και η μελέτη αφορά λαχανικά, υπογραμμίζει την ευρύτερη προοπτική των αντιμικροβιακών συστημάτων εκπομπής να βρουν εφαρμογή σε

διαφορετικές κατηγορίες τροφίμων, ενισχύοντας τη διασταλτική κατανόηση του πεδίου της ενεργού συσκευασίας.

Η τεχνολογία εκπομπής αντιοξειδωτικών και αντιμικροβιακών παραγόντων προσφέρει εξαιρετικές προοπτικές για την προστασία της ποιότητας και την ασφάλεια των νωπών τροφίμων ζωικής προέλευσης. Ο κατάλληλος σχεδιασμός και η συμμόρφωση με τα ρυθμιστικά όρια αποτελούν προϋπόθεση για την ευρεία αποδοχή τους τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τους καταναλωτές.

2.3.3 Τεχνολογίες υλικών (φίλμ, ένθετα, μεμβράνες)

Η αποτελεσματικότητα της ενεργού συσκευασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά φορείς που επιτρέπουν την απορρόφηση ή την εκπομπή δραστικών ουσιών. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν ενεργά φίλμ, ένθετα (pads, σακουλάκια), μεμβράνες και επενδύσεις, τα οποία λειτουργούν είτε ενσωματωμένα στο υλικό της συσκευασίας είτε ως ξεχωριστά συστατικά εντός του περιβάλλοντος της συσκευασίας (Arrieta et al., 2017).

Τα ενεργά φίλμ είναι ευέλικτες επιφάνειες που ενσωματώνουν ή φέρουν στην επιφάνειά τους δραστικές ενώσεις όπως αντιοξειδωτικά, αντιμικροβιακά ή απορροφητικά υγρασίας. Η τεχνολογία επιτρέπει είτε την άμεση ενσωμάτωση της δραστικής ουσίας στο πολυμερές υπόστρωμα κατά την εξώθηση, είτε την επιφανειακή επικάλυψη μέσω εμβάπτισης, εκνέφωσης ή επίστρωσης (Kumar et al., 2022). Τέτοια φίλμ έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε νωπό κοτόπουλο, ψάρια και μοσχάρι κιμά, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους κατά αρκετές ημέρες υπό ψύξη (Pereira de Abreu et al., 2012).

Σημαντική έρευνα επικεντρώνεται σήμερα στα βιοαποδομήσιμα ενεργά φίλμ, βασισμένα σε πολυσακχαρίτες (όπως άμυλο και κυτταρίνη), πρωτεΐνες (π.χ. ζελατίνη, καζεΐνη) ή πολυγαλακτικό οξύ (PLA), τα οποία ενισχύονται με αιθέρια έλαια, νανοσωματίδια ή εκχυλίσματα φυτών (Vargas et al., 2011). Αυτά τα φίλμ όχι μόνο παρατείνουν τη διάρκεια ζωής, αλλά είναι και φιλικά προς το περιβάλλον, ικανοποιώντας τη ζήτηση για βιώσιμες συσκευασίες.

Τα ένθετα είναι ξεχωριστά στοιχεία που τοποθετούνται εντός της συσκευασίας, χωρίς να έρχονται σε άμεση επαφή με το τρόφιμο. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως απορροφητικά οξυγόνου, υγρασίας ή εκπομποί αερίων, συχνά σε μορφή σακουλακίων, pads ή δισκίων. Πρόκειται για ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνολογία στη βιομηχανία, ιδίως για την απορρόφηση υγρασίας σε νωπά προϊόντα κρέατος και ιχθυηρών, ώστε να

περιοριστεί η μικροβιακή ανάπτυξη και να βελτιωθεί η εμφάνιση του προϊόντος (Han et al., 2018).

Ένθετα με σιδηρούχα συστατικά χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση οξυγόνου, ενώ άλλα βασίζονται σε ενεργό άνθρακα, οξείδια ή ένζυμα, ανάλογα με τη στοχευόμενη ουσία. Η χρήση τους θεωρείται ασφαλής εφόσον περιβάλλονται από διαπερατό φιλμ που δεν μεταφέρει το περιεχόμενο στο τρόφιμο. Ωστόσο, η απαιτούμενη επισήμανση (“μη βρώσιμο”) και η διαχείριση αποβλήτων παραμένουν ζητήματα υπό συζήτηση (European Commission, 2009).

Οι μεμβράνες που εφαρμόζονται σε εσωτερικές επιφάνειες των συσκευασιών ή ως ενδιάμεσες στρώσεις προσφέρουν εκλεκτική διαπερατότητα και στοχευμένη εκπομπή ή απορρόφηση. Συχνά χρησιμοποιούνται για την ελεγχόμενη απελευθέρωση CO₂ ή αρωματικών ουσιών σε ψάρια ή αλλαντικά (Mahmood et al., 2018). Σε εφαρμογές με τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), μεμβράνες με ρυθμιζόμενη διαπερατότητα σε αέρια επιτρέπουν τη διατήρηση της επιθυμητής σύστασης εντός της συσκευασίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος (Rodríguez-Rojo et al., 2019).

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στον τομέα της ενεργού συσκευασίας για προϊόντα κρέατος έχει στραφεί σε καινοτόμα βιοϋλικά και φυσικά εκχυλίσματα, με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας, της διάρκειας ζωής και της ποιότητας των τροφίμων. Οι Alizadeh-Sani, Khezerlou και Ehsani (2024) ανέπτυξαν νανοσύνθετα φιλμ χιτοζάνης εμπλουτισμένα με νανο-εγκλεισμένο αιθέριο έλαιο δενδρολίβανου, τα οποία παρουσίασαν αυξημένη αντιοξειδωτική δράση και επέκτειναν τη διάρκεια ζωής του βοδινού κρέατος κατά την ψυκτική αποθήκευση. Σε παρόμοια κατεύθυνση, η μελέτη των Haghighatpanah, Khosravi-Darani και Farhadnejad (2022) αξιοποίησε βρώσιμο φιλμ από άμυλο μούγκο και πολυλουλάνη, ενισχυμένο με αιθέριο έλαιο ρίγανης, επιτυγχάνοντας σημαντική αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης και επιβράδυνση των οξειδωτικών μεταβολών.

Επιπλέον, οι Figueroa-Enríquez et al. (2024) εφάρμοσαν ενεργά βιοδιασπώμενα φιλμ ενσωματωμένα με φυτικά εκχυλίσματα, τα οποία έδειξαν ισχυρή αντιμικροβιακή και αντιοξειδωτική δράση, συμβάλλοντας στη διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και της ασφάλειας του κρέατος. Παράλληλα, η ανασκόπηση των Li, Li, Hu και Li (2022) συνοψίζει την αποτελεσματικότητα ενεργών υλικών συσκευασίας βασισμένων σε αιθέρια έλαια, υπογραμμίζοντας τη μετατόπιση της αγοράς και των ρυθμιστικών πλαισίων προς φυσικές εναλλακτικές λύσεις, λόγω των ανησυχιών για τη χημική μετανάστευση και την αποδοχή από τους καταναλωτές.

Οι νέες αυτές προσεγγίσεις επιβεβαιώνουν τη δυναμική της ενεργού συσκευασίας ως στρατηγικής βελτίωσης της ποιότητας και της διάρκειας ζωής των προϊόντων κρέατος, ενισχύοντας παράλληλα τη βιωσιμότητα μέσω της χρήσης βιοδιασπώμενων και φιλικών προς το περιβάλλον υλικών.

Οι επενδύσεις περιλαμβάνουν επικαλύψεις εσωτερικής επιφάνειας, που εφαρμόζονται κατά τη διαδικασία παραγωγής της συσκευασίας. Χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της προσκόλλησης λειτουργικών ενώσεων ή για την αποτροπή μεταναστεύσεων από άλλα στρώματα. Αυτές οι τεχνολογίες προϋποθέτουν ακριβή έλεγχο του πάχους και της συμβατότητας με το περιεχόμενο.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας υλικού εξαρτάται από τη φύση του τροφίμου, την επιθυμητή λειτουργία, τη διάρκεια ζωής, το κανονιστικό πλαίσιο και τις καταναλωτικές προτιμήσεις. Ο συνδυασμός υλικών με προβλεπόμενη απελευθέρωση και αποδόμηση, σε συνδυασμό με τεχνολογίες χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, θα αποτελέσει την αιχμή της καινοτομίας στην ενεργό συσκευασία τα επόμενα χρόνια. Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει ενδεικτικά αποτελέσματα μελετών που αξιολόγησαν την εφαρμογή ενεργού συσκευασίας σε νωπά προϊόντα κρέατος.

Πίνακας 8. Ενδεικτικά αποτελέσματα μελετών ενεργού συσκευασίας σε νωπά προϊόντα κρέατος.

Βιβλιογραφική Αναφορά	Τύπος Προϊόντος	Τεχνολογία Ενεργού Συσκευασίας	Δραστική Ουσία / Σύστημα	Τρόπος Εφαρμογής	Επίδραση / Αποτέλεσμα
Coma (2008)	Χοιρινό φιλέτο	Εκπομπή αντιμικροβιακών	Θυμόλη, καρβακρόλη	Εμποτισμένο φιλμ	Παράταση διάρκειας ζωής κατά 4 ημέρες σε 4 °C
Kerry et al. (2006)	Μοσχαρίσιος κιμάς	Εκπομπή CO ₂ και οργανικών οξέων	Οξικό & σορβικό οξύ	Ενεργό ένθετο	Μείωση μικροβιακού φορτίου κατά 1.5 log CFU/g
López-Carballo et al. (2012)	Κοτόπουλο σε φέτες	Φιλμ με αντιμικροβιακούς παράγοντες	Θυμάρι, εστραγκόν (φυτικά εκχυλίσματα)	Βιοδραστικό φιλμ PLA	Καθυστέρηση ανάπτυξης <i>Listeria monocytogenes</i>
Quintavalla & Vicini (2002)	Χοιρινό κρέας	Απορρόφηση O ₂	Sachets με σίδηρο	Τοποθέτηση στη συσκευασία	Παράταση ζωής κατά 5 ημέρες σε 5 °C
Fernández-Pan et al. (2014)	Μοσχάρι σε φέτες	Φιλμ με αντιοξειδωτικά	Εστέρες κιτρικού οξέος	Εκπυρηνωμένο φιλμ	Μείωση επιπέδων TBA (οξειδωτικές αλλοιώσεις)

Βιβλιογραφική Αναφορά	Τύπος Προϊόντος	Τεχνολογία Ενεργού Συσκευασίας	Δραστική Ουσία / Σύστημα	Τρόπος Εφαρμογής	Επίδραση / Αποτέλεσμα
Ntzimani et al. (2008)	Χοιρινό μπέικον	Εκπομπή αντιμικροβιακών & MAP	Μείγμα αιθέριων ελαίων & CO ₂	Συνδυασμένο φιλμ	Παράταση διάρκειας ζωής > 8 ημέρες
Devlieghere et al. (2004)	Νωπό κοτόπουλο	Εκπομπή αντιμικροβιακών	Λυσοζύμη, EDTA	Ενεργή μεμβράνη	Αναστολή <i>Pseudomonas spp.</i> & <i>Brochothrix thermosphacta</i>
Sun et al. (2017)	Μοσχάρι – sous vide	Φιλμ βιοενεργό με νανοσωματίδια	Nano-Ag, ZnO	Επιστρωματική μεμβράνη	Μείωση μικροβιακού φορτίου · παράταση διάρκειας ζωής κατά 6 ημέρες
Ojagh et al. (2010)	Μοσχαρίσιος κιμάς	Εκπομπή ελαιωδών φαινολών	Εκχύλισμα ροδιού	Βρώσιμο φιλμ	Ενίσχυση οργανοληπτικής αποδοχής · σταθερότητα χρώματος

Βιβλιογραφική Αναφορά	Τύπος Προϊόντος	Τεχνολογία Ενεργού Συσκευασίας	Δραστική Ουσία / Σύστημα	Τρόπος Εφαρμογής	Επίδραση / Αποτέλεσμα
Haghighatpanah et al. (2022)	Μοσχαρίσιος κιμάς	Φιλμ με αντιοξειδωτικά & αντιμικροβιακά	Έλαιο ρίγανης σε μεμβράνη mung bean/pullulan	Βιοδραστικό φιλμ	Μείωση μικροβιακού φορτίου & TBARS · φρεσκάδα έως 14 ημέρες (PMC , kosfaj.org)
Alizadeh-Sani et al. (2024)	Αρνίσιο κρέας	Φιλμ με ανασταλτικές ιδιότητες	Ροσμαρίνης αιθέριο έλαιο σε chitosan-nanocomposite	Νανοβιοσύνθετο φιλμ	Μείωση μικροβιακής ανάπτυξης & οξείδωσης · παράταση διάρκειας ζωής (kosfaj.org)
Figueroa-Enríquez et al. (2024)	Διάφορα κρέατα	Βιοδιασπώμενα, ενεργά φιλμ	Φυτικά εκχυλίσματα (αντιοξειδωτικά/αντιμικροβιακά)	Πολυμερικά / ηλεκτροϋδροδυναμικά / casting φιλμ	Ανανέωση φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων με προστασία ποιότητας – παράταση φρεσκάδας (MDPI)
Smaoui et al. (2021)	Διάφορα είδη κρέατος και	Βιοπολυμερικά φιλμ με ενσωματωμένα	Θυμάρι, ρίγανη, κανέλα, γαρύφαλλο, δενδρολίβανο,	Ενσωμάτωση EOs σε βρώσιμα ή βιοδιασπώμενα	Παράταση διάρκειας ζωής έως 30–50 %, σημαντική μείωση του

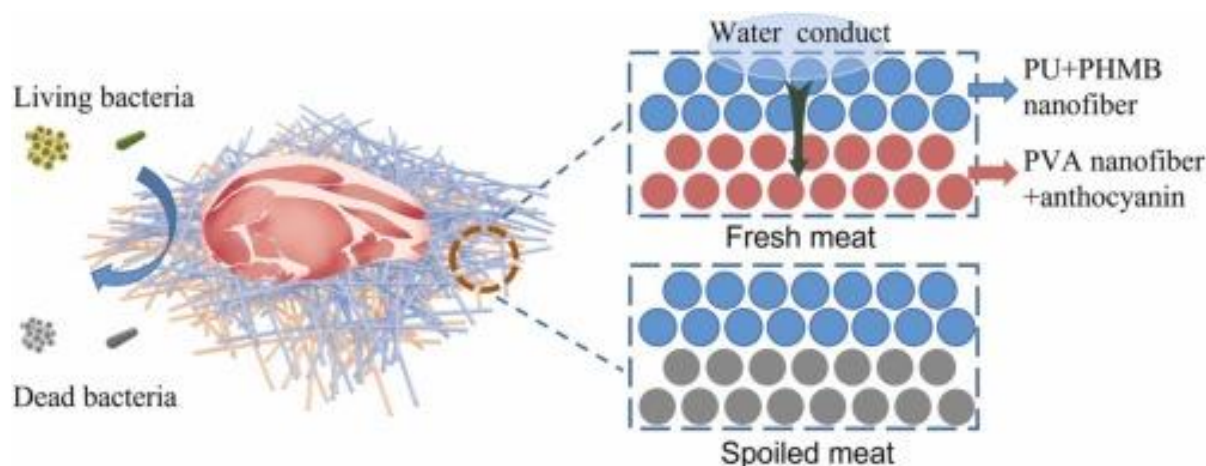
Βιβλιογραφική Αναφορά	Τύπος Προϊόντος	Τεχνολογία Ενεργού Συσκευασίας	Δραστική Ουσία / Σύστημα	Τρόπος Εφαρμογής	Επίδραση / Αποτέλεσμα
	προϊόντα κρέατος	αιθέρια έλαια (EOs)	βασιλικός (διάφορες φυσικές ενώσεις)	films/coatings πολυσακχαριτών ή πρωτεϊνών	μικροβιακού φορτίου (Listeria spp., Salmonella spp.) και επιβράδυνση της οξείδωσης λιπιδίων και πρωτεϊνών· διατήρηση χρώματος και οργανοληπτικής αποδεκτότητας. (PMC)

2.4. Τύποι ενεργού συσκευασίας και αποτελεσματικότητα

Η ενεργή συσκευασία αποτελεί μια δυναμική προσέγγιση διατήρησης της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων, προσφέροντας λειτουργικότητες που υπερβαίνουν την απλή φυσική προστασία των συμβατικών (παθητικών) συστημάτων. Οι τύποι ενεργού συσκευασίας διακρίνονται ανάλογα με τη λειτουργία τους σε συστήματα απορρόφησης, συστήματα εκπομπής, και συνδυασμένα ή πολλαπλής λειτουργικότητας, καθένα εκ των οποίων παρουσιάζει διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας ανάλογα με τη φύση του προϊόντος, τις συνθήκες αποθήκευσης και τον σχεδιασμό του υλικού.

Τα συστήματα απορρόφησης στοχεύουν στην παθητική απομάκρυνση ανεπιθύμητων παραγόντων όπως το οξυγόνο, η υγρασία ή το διοξείδιο του άνθρακα. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι απορροφητές οξυγόνου (O_2 scavengers) μειώνουν δραστικά την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών και οξειδωτικών αλλοιώσεων, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής σε συσκευασμένο νωπό κρέας και ψάρι έως και κατά 50% (Yam et al., 2005· Kumar et al., 2025). Η αποτελεσματικότητα των απορροφητικών υλικών εξαρτάται από την ικανότητα κατακράτησης ή χημικής δέσμευσης του στόχου και από τον ρυθμό δράσης, ο οποίος πρέπει να είναι συμβατός με τη φύση του τροφίμου και τις θερμοκρασίες αποθήκευσης (Pinto et al., 2021).

Η απορρόφηση υγρασίας μέσω pads ή film εμποδίζει την ανάπτυξη βακτηρίων, ιδίως σε τρόφιμα υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, όπως ο σολομός ή το κοτόπουλο. Σε προϊόντα ψαριού, η μείωση της επιφανειακής υγρασίας σχετίζεται με χαμηλότερα επίπεδα ψευδομονάδων και καθυστερημένη εμφάνιση μεταβολών οσμής (Han et al., 2018). Επιπλέον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, η χρήση νανοϊνικών φιλμ διπλής στρώσης με ενσωματωμένους αντιμικροβιακούς και χρωμοαντιδραστικούς παράγοντες μπορεί να προσφέρει ταυτόχρονη ένδειξη φρεσκότητας και αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης (Jiao et al., 2023). Η Εικόνα 10 απεικονίζει τη λειτουργία ενός νανοϊνικού φιλμ με διπλή δράση, καθώς επιτρέπει την ανίχνευση αλλά και την αναστολή της μικροβιακής αλλοίωσης σε νωπό κρέας, αναδεικνύοντας τις προοπτικές των έξυπνων και ενεργών συστημάτων συσκευασίας επόμενης γενιάς.



Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση νανοϊνικού φιλμ ανίχνευσης και αναστολής μικροβιακής αλλοίωσης σε νωπό κρέας (Jiao et al., 2023).

Σε αντιδιαστολή, τα συστήματα εκπομπής στοχεύουν στην απελευθέρωση λειτουργικών ενώσεων εντός του περιβάλλοντος της συσκευασίας, όπως αντιμικροβιακά (π.χ. αιθέρια έλαια, οργανικά οξέα, ένζυμα) και αντιοξειδωτικά (π.χ. τοκοφερόλες, φαινολικά εκχυλίσματα). Τα φιλμ εκπομπής δραστικών ενώσεων έχουν βρεθεί αποτελεσματικά στη μείωση του φορτίου της *Listeria monocytogenes* και άλλων παθογόνων σε προϊόντα όπως καπνιστός σολομός ή νωπά κομμάτια βοδινού (Ozdemir & Floros, 2004; Kerry et al., 2006).

Η απελευθέρωση της ουσίας μπορεί να είναι συνεχής ή ρυθμιζόμενη ανάλογα με τον σχεδιασμό του πολυμερούς υλικού και τη συγκέντρωση του δραστικού παράγοντα. Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται τόσο από τη διάχυση της ουσίας όσο και από την αλληλεπίδρασή της με το τρόφιμο ή με την υγρασία/θερμοκρασία περιβάλλοντος (Muriel-Galet et al., 2015).

Στην πράξη, η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμένων εφαρμογών: για παράδειγμα, φιλμ που συνδυάζουν απορροφητές οξυγόνου και αντιοξειδωτικά, ή παθητικά φιλμ με ενσωματωμένες αντιμικροβιακές επιστρώσεις. Αυτά τα συστήματα ενισχύουν τη σταθερότητα των τροφίμων και μειώνουν την ανάγκη για χημικά πρόσθετα, ενισχύοντας έτσι τη φυσικότητα και την αποδοχή από τους καταναλωτές (Vilela et al., 2018).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα βιοπολυμερή υλικά, όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), τα οποία μπορούν να ενσωματώσουν δραστικές ουσίες με ελεγχόμενη αποδόμηση και απελευθέρωση, αποτελώντας μία εξαιρετική επιλογή για βιώσιμες και λειτουργικές λύσεις στη βιομηχανία νωπών τροφίμων (López de Dicastillo et al., 2020).

Η αποτελεσματικότητα κάθε τύπου ενεργού συσκευασίας εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες: το είδος του τροφίμου, το pH, τη θερμοκρασία συντήρησης, την αρχική μικροβιακή κατάσταση, τη διαπερατότητα του φιλμ και την ενεργότητα νερού (a_w) (Appendini & Hotchkiss, 2002). Για παράδειγμα, προϊόντα υψηλής περιεκτικότητας σε λίπος όπως το αρνίσιο κρέας είναι περισσότερο ευάλωτα σε οξείδωση και απαιτούν φιλμ υψηλής αντιοξειδωτικής δράσης.

Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου τύπου ενεργού συσκευασίας δεν είναι γενική, αλλά πρέπει να βασίζεται σε προσαρμοσμένες αξιολογήσεις ανά προϊόν και σκοπούς συντήρησης.

2.5. Παράγοντες επίδρασης: θερμοκρασία, pH, υγρασία

Η αποτελεσματικότητα της ενεργού συσκευασίας σε νωπά προϊόντα ζωικής προέλευσης, όπως το κρέας και τα ιχθυηρά, επηρεάζεται σημαντικά από φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Μεταξύ αυτών, η θερμοκρασία, το pH και η ενεργότητα νερού (a_w) είναι οι πλέον καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τη μικροβιακή σταθερότητα όσο και τη συμπεριφορά των λειτουργικών υλικών της συσκευασίας.

Η θερμοκρασία αποτελεί τον πιο κρίσιμο παράγοντα, καθώς επηρεάζει τη δράση τόσο των μικροοργανισμών όσο και των μηχανισμών που διέπουν την ενεργή συσκευασία (Coma, 2008). Σε ψυχρά περιβάλλοντα, όπως η ψύξη στους 0–4 °C, παρατηρείται επιβράδυνση της μικροβιακής αύξησης αλλά και πιθανή μείωση της αποδοτικότητας των ενεργών υλικών, λόγω χαμηλότερης κινητικότητας των μορίων και βραδύτερης απελευθέρωσης ή απορρόφησης ουσιών (Blázquez et al., 2017). Αντιστρόφως, υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν τη διάχυση πτητικών αντιμικροβιακών ενώσεων ή την απορρόφηση οξυγόνου, αλλά ενδέχεται να επηρεάσουν τη σταθερότητα των πολυμερών ή να προκαλέσουν απώλειες δραστικών παραγόντων (Quintavalla & Vicini, 2002).

Επιπλέον, η θερμοκρασία μεταφοράς και συντήρησης πρέπει να είναι αυστηρά ελεγχόμενη, καθώς η αστάθεια μπορεί να ακυρώσει πλήρως τα οφέλη της ενεργού συσκευασίας. Για παράδειγμα, μικρές αυξομειώσεις θερμοκρασίας επιτρέπουν την ανάπτυξη ψυχρότροφων βακτηρίων, όπως οι *Pseudomonas spp.* στα ιχθυηρά, μειώνοντας σημαντικά τη διάρκεια ζωής (Gram & Dalgaard, 2002).

Το pH επηρεάζει την ανάπτυξη παθογόνων και αλλοιογόνων μικροοργανισμών, αλλά και την ιονισμένη κατάσταση ορισμένων προσθέτων ή δραστικών ενώσεων της

συσκευασίας. Τα φρέσκα προϊόντα κρέατος και ιχθυερών τυπικά έχουν αρχικό pH γύρω στο 5.5–6.5, εύρος στο οποίο ευνοείται η ανάπτυξη βακτηρίων όπως *Lactobacillus*, *Brochothrix thermosphacta* και *Shewanella putrefaciens* (Ercolini et al., 2006). Ορισμένες αντιμικροβιακές ενώσεις, όπως τα οργανικά οξέα (γαλακτικό, κιτρικό), παρουσιάζουν αυξημένη αποτελεσματικότητα σε χαμηλό pH, λόγω της παρουσίας τους σε μη ιονισμένη, λιπόφιλη μορφή που διαπερνά πιο εύκολα τα κυτταρικά τοιχώματα των βακτηρίων (Han, 2014).

Επιπλέον, το pH επηρεάζει τη δομή των πρωτεϊνών του τροφίμου, γεγονός που με τη σειρά του μπορεί να μεταβάλει την απορρόφηση ή απελευθέρωση των ενεργών ενώσεων από τα φιλμ (Kerry et al., 2006). Για τον λόγο αυτό, απαιτείται προσαρμογή της σύνθεσης του φιλμ και των δραστικών παραγόντων ανάλογα με την τιμή pH του συγκεκριμένου τροφίμου.

Η ενεργότητα νερού (a_w), δηλαδή το ελεύθερο νερό που είναι διαθέσιμο για μικροβιακή ανάπτυξη, είναι εξίσου κρίσιμος παράγοντας. Προϊόντα με $a_w > 0.95$, όπως το φρέσκο ψάρι ή τα κομμάτια κρέατος, είναι εξαιρετικά ευπαθή. Η υψηλή a_w διευκολύνει όχι μόνο τη βακτηριακή αύξηση αλλά και την υδρόλυση λιπιδίων, επιταχύνοντας τη λιπιδική οξείδωση (Kontominas et al., 2021).

Παράλληλα, η υψηλή υγρασία επηρεάζει αρνητικά τη σταθερότητα ορισμένων φιλμ, ιδίως εκείνων που βασίζονται σε βιοπολυμερή όπως το άμυλο ή η ζελατίνη, τα οποία εμφανίζουν ευαισθησία στην απορρόφηση υγρασίας και πιθανή αλλοίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων (Kumar et al., 2025). Από την άλλη πλευρά, η παρουσία υγρασίας μπορεί να είναι απαραίτητη για την ενεργοποίηση συγκεκριμένων αντιμικροβιακών συστημάτων, όπως εκείνων που απελευθερώνουν ιόντα μετάλλων (π.χ. Ag^+ , Zn^{2+}) (Sun et al., 2025).

Η εξισορρόπηση της υγρασίας στο εσωτερικό της συσκευασίας αποτελεί βασική τεχνική πρόκληση. Τα απορροφητικά pads ή οι ρυθμιστές υγρασίας χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών και την αποφυγή συμπύκνωσης, η οποία προάγει την επιφανειακή αλλοίωση (Han et al., 2018). Ο Πίνακας 9 συνοψίζει την επίδραση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, το pH και η ενεργότητα νερού, στη λειτουργικότητα και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ενεργού συσκευασίας.

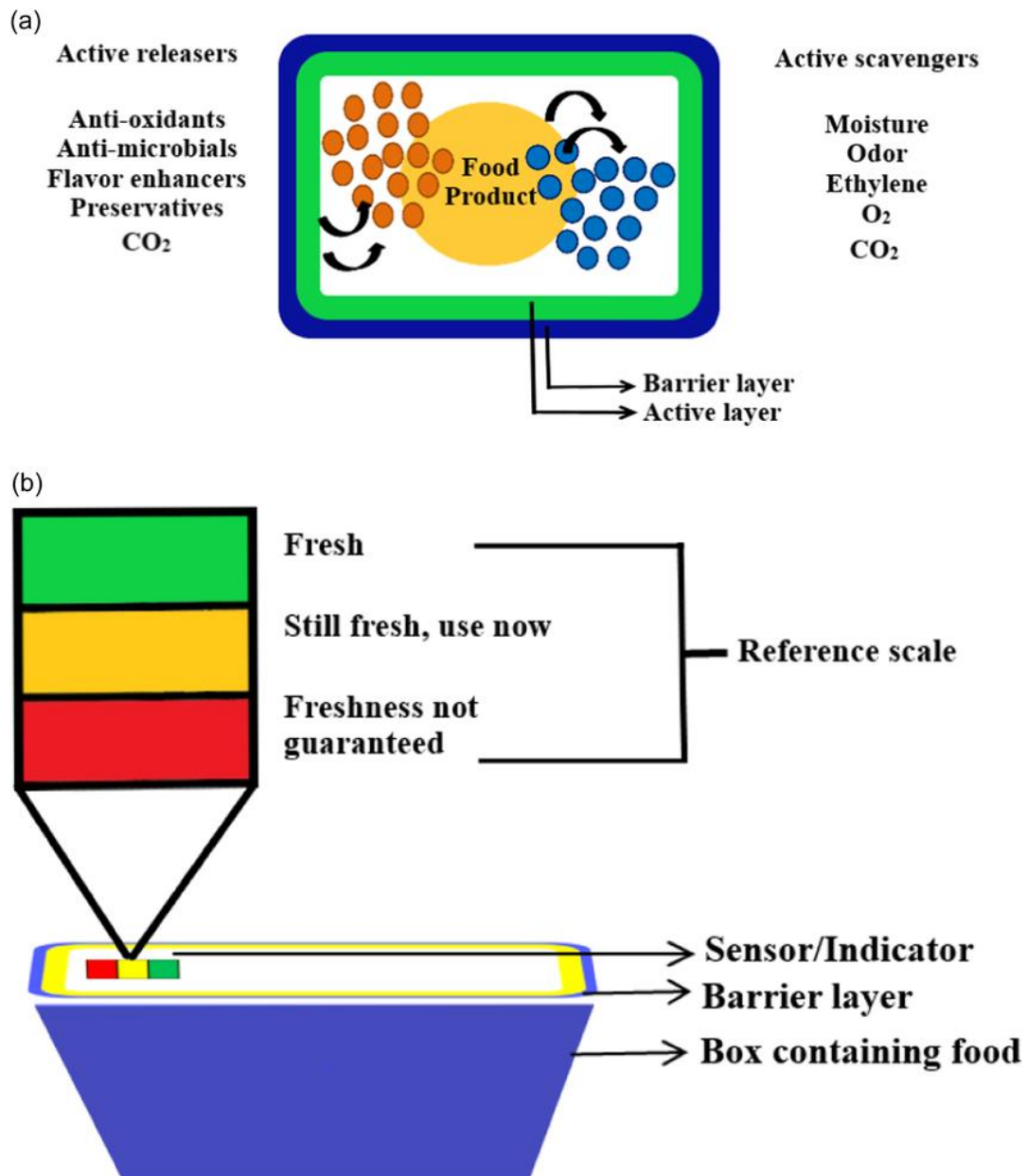
Πίνακας 9. Επίδραση παραμέτρων (T, pH, a_w) στη δράση ενεργού συσκευασίας

Παράμετρος	Φαινόμενο	Επίδραση στη συσκευασία	Παράδειγμα
Θερμοκρασία	Υψηλή (>8 °C)	Επιτάχυνση δράσης εκπομπής – αύξηση μικροβιακής ανάπτυξης	Μειωμένη αποτελεσματικότητα σε πακέτα CO ₂
pH < 5.5	Αυξημένη οξύτητα	Ενίσχυση δράσης οργανικών οξέων	Μείωση <i>Listeria</i> σε κοτόπουλο
a_w > 0.95	Υψηλή υγρασία	Κίνδυνος αλλοίωσης πολυμερών	Αστάθεια σε βιοφίλμ ζελατίνης

Κεφάλαιο 3: Καινοτομία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενεργού συσκευασίας

3.1 Συνδυασμός ενεργού συσκευασίας με άλλες τεχνολογίες συσκευασίας και επεξεργασίας

Η συνδυαστική εφαρμογή ενεργών συστημάτων συσκευασίας με τεχνολογίες όπως η Τροποποιημένη Ατμόσφαιρα (Modified Atmosphere Packaging, MAP), η συσκευασία κενού (Vacuum Packaging, VP) και η Υπερυψηλή Πίεση (High Pressure, HP) αποτελεί μια δυναμική και σύγχρονη προσέγγιση στη συντήρηση τροφίμων ζωικής προέλευσης, παρέχοντας παράλληλα πλεονεκτήματα στην ποιότητα, την ασφάλεια και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Το σχήμα της Εικόνας 11 για παράδειγμα απεικονίζει πώς ενσωματώνονται στοιχεία όπως αντιοξειδωτικά, απορροφητές O₂/CO₂/υγρασίας και αισθητήρες φρεσκάδας σε πολυστρωματικές συσκευασίες, επιτρέποντας ελεγχόμενη απόδοση και παρακολούθηση της ποιότητας του τροφίμου (Vasuki, 2023; Pires et al., 2022). Η Εικόνα 11 παρουσιάζει σχηματικά τις βασικές λειτουργίες της ενεργής και της έξυπνης συσκευασίας, απεικονίζοντας πώς οι τεχνολογίες απορρόφησης, εκπομπής και ανίχνευσης συνδυάζονται για την παράταση της διάρκειας ζωής, την ασφάλεια και την ιχνηλασιμότητα των τροφίμων.



Εικόνα 11. Σχηματικό διάγραμμα των λειτουργιών ενεργής και έξυπνης συσκευασίας (active & intelligent packaging). (Πηγή: Drago et al., 2020)

Η MAP επιτυγχάνει παράταση της διάρκειας ζωής μειώνοντας το οξυγόνο και αντικαθιστώντας το με CO₂ ή N₂, περιορίζοντας έτσι την ανάπτυξη αερόβιων αναλόγων και τις οξειδωτικές αλλοιώσεις (Rasheed et al., 2025). Όταν συνδυάζεται με ενεργή συσκευασία —όπως απορροφητές O₂/CO₂ και απελευθερωτές αντιοξειδωτικών ή αντιμικροβιακών ουσιών (π.χ. αιθέρια έλαια)— το αποτέλεσμα είναι ένα πολυλειτουργικό περιβάλλον που προάγει την βιωσιμότητα και μειώνει τη σπατάλη τροφίμων (Zouharóna et al., 2022).

Η συσκευασία κενού, μέσω της αφαίρεσης του αέρα, εξασφαλίζει τη στενή επαφή της μεμβράνης με το τρόφιμο και περιορίζει την παρουσία οξυγόνου. Όταν συνδυαστεί με ενεργά υλικά, η στρατηγική αυτή οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη επιμήκυνση της διάρκειας ζωής, ιδιαίτερα για ευαλλοίωτα προϊόντα (Polak et al., 2021).

Η Υπερυψηλή Πίεση (HP) είναι μια μη-θερμική μέθοδος επεξεργασίας που, σε συνδυασμό με ενεργά συστήματα, επιτυγχάνει εξαιρετική μείωση του μικροβιακού φορτίου, διατηρώντας παράλληλα τα θρεπτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Μελέτη σε φιλέτα μπακαλιάρου έδειξε ότι ο συνδυασμός VP και HPP 400 MPa με κατάλληλη πολυστρωματική συσκευασία επιμηκώνει τη διάρκεια ζωής και εξασφαλίζει μικροβιολογική ασφάλεια (Ferri et al., 2023). Επιπλέον, η επιλογή ανθεκτικών και βιώσιμων υλικών συσκευασίας είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου (García, 2020).

Σε προϊόντα όπως το ωμό ψάρι, η σύνθεση MAP με αντιοξειδωτικά όρους και VP έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Πειραματικές εφαρμογές με συνδυασμό MAP και ενεργού συσκευασίας, όπως σε ψημένα ρολά αρνιού και κοτόπουλου, παρουσίασαν σημαντική επιμήκυνση της διάρκειας ζωής χωρίς επιπτώσεις στην οργανοληπτική ποιότητα (Merlo et al., 2019).

Τελευταία, η καινοτομία επεκτείνεται στην έξυπνη και αυτόνομη συσκευασία, όπου συστήματα ενεργοποιούνται από αισθητήρες φρεσκάδας και NFC ή άλλα τσιπ, απελευθερώνοντας αντισπαστικά ή αντιοξειδωτικά μόρια όταν το τρόφιμο δείχνει σημάδια αλλοίωσης — επιτυγχάνοντας διάρκεια ζωής έως και 14 ημέρες μέσω ελεγχόμενης έκλυσης (Douaki et al., 2024).

Ο συνδυασμός ενεργής συσκευασίας με MAP, VP και HP δεν αποτελεί μια απλή εφαρμογή του συνδυασμού τεχνολογιών, αλλά την κορωνίδα της σύγχρονης προσέγγισης της «τεχνολογίας εμποδίων» (hurdle technology). Αυτό επιτρέπει τη μέγιστη διατήρηση της ασφάλειας, της ποιότητας και της διάρκειας ζωής, με παράλληλη μείωση αποβλήτων και περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Pires et al., 2022).

3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) της ενεργού συσκευασίας

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση της ενεργού συσκευασίας έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια ως κρίσιμο πεδίο έρευνας, καθώς ο κλάδος της βιομηχανίας τροφίμων βρίσκεται υπό αυξανόμενη πίεση να μειώσει το οικολογικό του αποτύπωμα και να ευθυγραμμιστεί με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Siracusa & Blanco, 2020; Alizadeh-Sani et al., 2024). Η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) παρέχει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την ποσοτική αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την παραγωγή, χρήση και απόρριψη των συστημάτων συσκευασίας, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους — από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την τελική διάθεση ή ανακύκλωση (Siracusa et al., 2008). Η εφαρμογή της LCA στα ενεργά συστήματα συσκευασίας αποσκοπεί στην αποτίμηση όχι μόνο της ενεργειακής και υλικής αποδοτικότητας, αλλά και της σχέσης ανάμεσα στη λειτουργική αποτελεσματικότητα της συσκευασίας και στις πιθανές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που προκαλούνται από τα ενεργά συστατικά, τα βιοπολυμερή και τις διαδικασίες παραγωγής τους (Basavegowda & Baek, 2021; Oliveira et al., 2025).

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πλαστικά φιλμ που βασίζονται σε μη ανανεώσιμες πηγές, όπως το πολυαιθυλένιο ή το πολυπροπυλένιο, τα βιοπολυμερικά συστήματα ενεργού συσκευασίας που χρησιμοποιούν πολυγαλακτικό οξύ (PLA), νανοκυτταρίνη ή πολυσακχαριτικά υποστρώματα έχουν καταδείξει σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂, καθώς και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή (Mellinas et al., 2020; Pires et al., 2022). Παρόλα αυτά, η διαδικασία σύνθεσης και μετατροπής των φυσικών πολυμερών σε λειτουργικά φιλμ, καθώς και η ενσωμάτωση ενεργών ουσιών, όπως αιθέρια έλαια, μεταλλικά οξείδια ή νανοσωματίδια αργύρου, συνεπάγονται πρόσθετα στάδια κατεργασίας που ενδέχεται να αυξήσουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και να περιορίσουν τη βιοαποικοδομησιμότητα του τελικού προϊόντος (Ramos et al., 2014; Alizadeh-Sani et al., 2024). Η περιβαλλοντική απόδοση επομένως εξαρτάται από την ισορροπία ανάμεσα στο όφελος της επιμήκυνσης της διάρκειας ζωής των τροφίμων και στο κόστος παραγωγής και απόρριψης των υλικών.

Μελέτες LCA έχουν δείξει ότι η χρήση ενεργών φιλμ μπορεί να μειώσει τη σπατάλη τροφίμων κατά 15 % – 30 %, γεγονός που αντισταθμίζει το αυξημένο ενεργειακό αποτύπωμα από την παραγωγή των υλικών (Holman et al., 2018; Tørngren et al., 2018).

Η παράταση της διάρκειας ζωής των ευαλλοίωτων προϊόντων οδηγεί σε μείωση της συνολικής κατανάλωσης πόρων, όπως νερό και ενέργεια, καθώς και σε περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις αλυσίδες διανομής και μεταφοράς (Oliveira et al., 2025). Το συνολικό περιβαλλοντικό ισοζύγιο επηρεάζεται επίσης από την επιλογή της πρώτης ύλης· για παράδειγμα, το PLA που προέρχεται από άμυλο καλαμποκιού παρουσιάζει μικρότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά 25 % σε σχέση με τα συμβατικά πολυμερή, ενώ η χρήση νανοκυτταρίνης ως ενισχυτικού υλικού μπορεί να μειώσει περαιτέρω το βάρος της συσκευασίας και κατ' επέκταση το αποτύπωμα μεταφοράς (Mellinas et al., 2020).

Ένα επιπλέον ζήτημα που αναδεικνύεται στη βιβλιογραφία αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης και ανακύκλωσης των ενεργών φιλμ. Ενώ τα βιοπολυμερικά υλικά μπορούν θεωρητικά να αποικοδομηθούν πλήρως υπό βιομηχανικές συνθήκες κομποστοποίησης, στην πράξη η παρουσία ενεργών ουσιών, προσθέτων ή μεταλλικών νανοσωματιδίων συχνά παρεμποδίζει τη διαδικασία, αυξάνοντας τον χρόνο αποσύνθεσης και περιορίζοντας τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης (Siracusa & Blanco, 2020· Nešić et al., 2019). Παράλληλα, η ανακύκλωση πολυστρωματικών φιλμ παραμένει τεχνικά πολύπλοκη λόγω της διαφορετικής χημικής φύσης των επιμέρους στρωμάτων, γεγονός που αυξάνει το κόστος και περιορίζει την περιβαλλοντική αποδοτικότητα του συστήματος (Bócoli et al., 2025). Ωστόσο, η ανάπτυξη τεχνολογιών μηχανικής και χημικής ανακύκλωσης για τα σύνθετα βιοπολυμερή έχει ήδη αρχίσει να προσφέρει βιώσιμες λύσεις, ιδίως όταν συνδυάζεται με πηγές ενέργειας χαμηλού άνθρακα (Basavegowda & Baek, 2021).

Η συνολική εκτίμηση του περιβαλλοντικού οφέλους της ενεργού συσκευασίας πρέπει επομένως να εξετάζεται σε συνάρτηση με τη λειτουργία της, δηλαδή με τη μείωση της σπατάλης τροφίμων και τη διατήρηση της ποιότητας, που οδηγούν σε έμμεση εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Οι Salgado et al. (2021) επισημαίνουν ότι ακόμη και όταν η παραγωγή των ενεργών φιλμ απαιτεί περισσότερη ενέργεια από τα συμβατικά πλαστικά, η συνολική καθαρή περιβαλλοντική συνεισφορά μπορεί να είναι θετική, εφόσον μειώνονται οι απώλειες προϊόντων σε κρίσιμα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επιπλέον, η μετάβαση προς ένα βιοοικονομικό μοντέλο παραγωγής υλικών συσκευασίας, βασισμένο σε ανανεώσιμες πρώτες ύλες και βιοδιεργασίες χαμηλής ενεργειακής έντασης, προωθεί την ευθυγράμμιση της βιομηχανίας με τους στόχους της

Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και της στρατηγικής για μηδενικά απόβλητα (Siracusa & Blanco, 2020).

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής αποδεικνύει ότι η ενεργή συσκευασία μπορεί να αποτελέσει περιβαλλοντικά πλεονεκτική επιλογή, υπό την προϋπόθεση ότι η σχεδίασή της στηρίζεται σε βιοπολυμερή χαμηλού αποτυπώματος, ότι διασφαλίζεται η δυνατότητα ανακύκλωσης ή κομποστοποίησης, και ότι τα ενεργά συστατικά προέρχονται από φυσικές, μη τοξικές πηγές. Η συστηματική ένταξη της μεθόδου LCA στη διαδικασία ανάπτυξης νέων υλικών συσκευασίας συμβάλλει όχι μόνο στην ποσοτική μέτρηση των επιπτώσεων αλλά και στη χάραξη πολιτικών βιωσιμότητας που ενισχύουν τη διαφάνεια και την αποδοχή από τον καταναλωτή. Έτσι, η ενεργή συσκευασία δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική καινοτομία αλλά εξελίσσεται σε βασικό πυλώνα της περιβαλλοντικής υπευθυνότητας της βιομηχανίας τροφίμων.

3.3 Έξυπνες συσκευασίες και αισθητήρες (blockchain και ιχνηλασιμότητα)

Η «έξυπνη» συσκευασία (smart or intelligent packaging) ορίζεται ως το σύστημα εκείνο που παρακολουθεί, ανιχνεύει ή/και κοινοποιεί πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του προϊόντος ή/και του περιβάλλοντος της συσκευασίας, χωρίς να αλληλεπιδρά απαραίτητα με το τρόφιμο όπως η ενεργή συσκευασία. Τα τελευταία χρόνια, η σύγκλιση αισθητήρων, ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος, εκτυπώσιμων/εύκαμπτων υλικών, IoT και blockchain με πρότυπα ιχνηλασιμότητας έχει δημιουργήσει ένα «ψηφιακό περίβλημα» γύρω από ευαλλοίωτα και ευπαθή τρόφιμα, όπως το φρέσκο νωπό κρέας και τα φρέσκα ιχθυηρά, επιτρέποντας σε πραγματικό χρόνο έλεγχο ψυκτικής αλυσίδας, νωπότητας και αυθεντικότητας ή ακόμα και ιχνηλασιμότητας (Pires et al., 2022; Vilela et al., 2018).

Στο επίπεδο ανίχνευσης ποιότητας, οι χρονοθερμοκρασιακοί δείκτες (Time Temperature Indicators, TTIs) αποτυπώνουν το χρονοθερμοκρασιακό ιστορικό ενός προϊόντος στα διάφορα στάδια της ψυκτικής αλυσίδας επιτρέποντας την εκτίμηση της πραγματικά εναπομένουσας διάρκειας ζωής σε αντιδιαστολή με την ονομαστική διάρκεια ζωής που αναφέρεται σε μια θερμοκρασία αναφοράς (τη συνιστώμενη θερμοκρασία αποθήκευσης του εκάστοτε τροφίμου). Τα TTIs βασίζονται σε χημικές, ενζυμικές ή πολυμερικές αντιδράσεις με κινητική ανάλογη της αλλοίωσης του τροφίμου στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν, παρέχοντας σε πραγματικό χρόνο ένδειξη φρεσκότητας και ασφάλειας του προϊόντος (Kuswandi, 2020).

Παράλληλα, πρόσφατες ευρωπαϊκές και ελληνικές μελέτες έχουν τεκμηριώσει τη χρησιμότητα των TTIs στην ιχθυλασιμότητα ευαλλοίωτων τροφίμων, ιδιαίτερα σε προϊόντα κρέατος και ιχθυηρά, επιβεβαιώνοντας τη συσχέτιση της μεταβολής του χρώματος ή της αγωγιμότητας με μικροβιολογικούς δείκτες αλλοίωσης (Giannakourou & Taoukis, 2021· Koutsoumanis et al., 2006· Giamakourou et al., 2005· Nychas et al., 2016).

Οι δείκτες αερίων και οι βιοδείκτες νωπότητας αποτελούν ένα από τα πιο ελπιδοφόρα πεδία της έξυπνης συσκευασίας. Η μέτρηση αερίων όπως το CO₂, το O₂, το H₂S, η αμμωνία ή οι πτητικές αμίνες (TVB-N) παρέχει άμεση ένδειξη για την ποιότητα και την ασφάλεια του προϊόντος. Ταυτόχρονα, βιοδείκτες όπως συγκεκριμένα αμινοξέα αποδόμησης ή η τριμεθυλαμίνη στα ψάρια μπορούν να ανιχνευθούν με μεγάλη ακρίβεια, δίνοντας σαφή εικόνα για το στάδιο αλλοίωσης. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί χρωμογενείς και φθορίζουσες μεμβράνες, καθώς και εκτυπώσιμα patches, τα οποία αλλάζουν εμφανώς χρώμα ανάλογα με τη χημική σύσταση της ατμόσφαιρας στο εσωτερικό της συσκευασίας.

Στο πλαίσιο των νεότερων εφαρμογών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνδυαστική χρήση ενεργών και έξυπνων συστημάτων σε προϊόντα ιχθυηρών. Οι Katsouli et al. (2022) αξιολόγησαν τη δράση ενεργού και έξυπνης συσκευασίας σε φιλέτα τσιπούρας, υπό ισοθερμικές αλλά και μεταβαλλόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, προσομοιώνοντας έτσι ρεαλιστικές συνθήκες εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή ενεργών μηχανισμών ενίσχυσε την αποτελεσματικότητα της τροποποιημένης ατμόσφαιρας, ενώ οι έξυπνοι δείκτες ποιότητας παρείχαν αξιόπιστη πληροφόρηση για τη μικροβιακή σταθερότητα και τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Η μελέτη αυτή αναδεικνύει την πρακτική αξία της ενοποίησης ενεργών και έξυπνων τεχνολογιών, προσφέροντας ολοκληρωμένες λύσεις που ενισχύουν τόσο την ασφάλεια όσο και τη διαφάνεια για τον καταναλωτή.

Εξίσου ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιοποίηση φυσικών χρωμοφόρων από ανθοκυανίνες φυτικών εκχυλισμάτων, όπως από κόκκινο λάχανο ή μούρα. Αυτές οι ενώσεις, όταν ενσωματωθούν σε βιοπολυμερή μήτρα (PLA, PVOH, χιτοζάνη), εμφανίζουν αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος σε συνάρτηση με το pH ή τη συγκέντρωση TVB-N. Έτσι, λειτουργούν ως «οπτικοί δείκτες νωπότητας» που ενημερώνουν τον καταναλωτή για την ποιότητα του προϊόντος χωρίς να απαιτείται άνοιγμα της

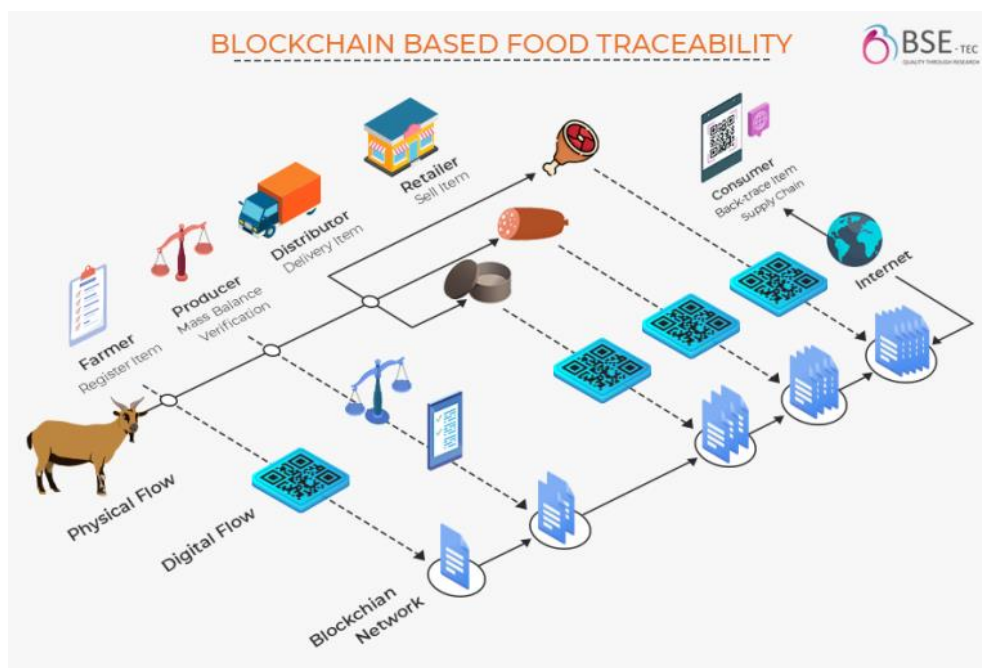
συσκευασίας. Μελέτες έχουν δείξει την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων σε φιλέτα ψαριού και πουλερικά υπό συνθήκες ψύξης, αποδεικνύοντας την αξιοπιστία τους ως πρακτικά εργαλεία για τη βιομηχανία τροφίμων (Zhai et al., 2020· Chen et al., 2023).

Για πιο εξειδικευμένη και ποσοτική ανάλυση, έχουν αναπτυχθεί βιοαισθητήρες με νανοδομημένα ηλεκτρόδια, ένζυμα ή βιοδραστικά μόρια. Ενδεικτικά, η ξανθίνη οξειδάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της αλλοίωσης στα ιχθυηρά, ενώ αντιμικροβιακά πεπτίδια ή απταμερή προσφέρουν στοχευμένη αναγνώριση μικροοργανισμών. Οι βιοαισθητήρες αυτοί επιτρέπουν ηλεκτροχημική ή οπτική ποσοτικοποίηση δεικτών μέσα στο headspace της συσκευασίας, δίχως να χρειάζεται να παραβιαστεί το προϊόν (Tsegay et al., 2025).

Η ενσωμάτωση τέτοιων αισθητήρων με τεχνολογίες RFID και NFC δημιουργεί νέες δυνατότητες για τη συσκευασία ως «έξυπνο κόμβο» του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Οι παθητικές ετικέτες RFID μπορούν να περιλαμβάνουν θερμοευαίσθητα ή υγρασιοευαίσθητα στοιχεία, τα οποία μεταβάλλουν το σήμα τους όταν παραβιαστούν κρίσιμα όρια. Αντίστοιχα, οι NFC ετικέτες προσφέρουν δυνατότητα ανάγνωσης και γραφής με απλό smartphone, διευκολύνοντας τον καταναλωτή να έχει άμεση πρόσβαση σε πληροφορίες για την προέλευση, τις συνθήκες μεταφοράς και την ποιότητα του προϊόντος, συχνά υπό τη μορφή ψηφιακού πιστοποιητικού (Nalbandian, 2015).

Η καινοτομία όμως δεν σταματά εδώ. Σήμερα αναπτύσσονται και «χωρίς μπαταρία» (battery-free) RFID/NFC ετικέτες, που αντλούν ενέργεια από το πεδίο του αναγνώστη ή από μηχανισμούς ενεργειακής συλλογής, όπως η θερμοηλεκτρική μετατροπή ή η συλλογή ενέργειας από ραδιοκύματα (RF harvesting). Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται εφικτή η συνεχής και χαμηλού κόστους παρακολούθηση της ψυκτικής αλυσίδας, κάτι που ενισχύει σημαντικά την ασφάλεια και τη διαφάνεια.

Τέλος, η **Εικόνα 12** παρουσιάζει συνοπτικά τη διασύνδεση όλων αυτών των τεχνολογιών μέσα σε ένα σύστημα ιχνηλασιμότητας βασισμένο στο blockchain. Στο διάγραμμα αποτυπώνεται η ροή δεδομένων από το στάδιο της παραγωγής έως τη διάθεση στον καταναλωτή, με τα στοιχεία να αποθηκεύονται σε αποκεντρωμένο ledger και να συνδέονται με QR codes ή RFID. Έτσι, ο τελικός χρήστης μπορεί εύκολα να επαληθεύσει την ποιότητα, την ασφάλεια και την προέλευση του προϊόντος, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη του στη διατροφική αλυσίδα (Douaki et al., 2024).



Εικόνα 12. Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος ιχνηλάτισης τροφίμων με χρήση της τεχνολογίας blockchain (Πηγή: BSEtec, 2024)

Η ιχνηλασιμότητα άκρου-σε-άκρο απαιτεί, πέρα από την αίσθηση/τηλεμετρία, ακεραιότητα δεδομένων και διαλειτουργικότητα σε όλη την αλυσίδα. Εδώ, το blockchain προσφέρει κατακευκαλισμένο, μη παραποιήσιμο καθολικό (ledger) όπου γεγονότα EPCIS (capture events: τι, πού, πότε, γιατί) αποθηκεύονται με χρονικές σφραγίδες και κρυπτογραφικά αποτυπώματα (hashes), επιτρέποντας επαλήθευση προέλευσης, συνθηκών και ιδιοκτησίας χωρίς κεντρική εμπιστευόμενη αρχή (Galvez et al., 2018; Casino et al., 2019). Πρόσφατα, το GS1 EPCIS 2.0 εισάγει γλώσσα φιλική προς το χρήστη σε IoT και υποστηρίζει την ταυτόχρονη χρήση αισθητήρων (π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, αερίων) ώστε τα δεδομένα από TTI, RFID/NFC και βιοαισθητήρες να αποστέλλονται ως τυποποιημένα γεγονότα που μπορούν να «αγκυρωθούν» (anchor) σε blockchain ή/και να παραμένουν ασφαλή ως αποτύπωμα για την απόδειξη ακεραιότητας (GS1, 2022). Επιπλέον, έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) μπορούν να κωδικοποιούν κανόνες συμμόρφωσης (π.χ. «απόρριψε παρτίδα εάν $>8^{\circ}\text{C}$ για >4 ώρες»), να αυτοματοποιούν ανακλήσεις και να εκτελούν ασφαλιστικές ρήτρες βάσει πραγματικών δεδομένων αισθητήρων (Wang et al., 2021).

Σε εφαρμογές κρέατος και ιχθύων, «υβριδικά» σχήματα που συνδυάζουν TTI/δείκτες παραγωγής TVB-N με RFID-EPC και blockchain έχουν δείξει μείωση σπατάλης μέσω δυναμικής ανακατανομής (dynamic pricing/shelf-life) και ταχύτερη ιχνηλάτηση παρτίδων (<2 s για αναζήτηση μονοπατιού) σε πιλοτικές εγκαταστάσεις λιανεμπορίου (Zouharová et al., 2022; Kouhizadeh et al., 2021). Σε φρέσκο σολομό, ενσωμάτωση anthocyanin-based TVB-N patches σε MAP, συνδεδεμένα με NFC που ενημέρωνε εφαρμογή καταναλωτή για «πράσινο/κίτρινο/κόκκινο» status, συσχετίστηκε στενά με μικροβιολογικούς δείκτες και οδήγησε σε ορθότερη απόρριψη και μείωση επιστροφών (Weston et al., 2020). Ανάλογες μελέτες σε βοδινό/πουλερικά επιβεβαιώνουν ότι η συνεχής τηλεμετρία θερμοκρασίας μέσω παθητικού RFID προλέγει με μεγαλύτερη ακρίβεια την εναπομένουσα διάρκεια ζωής έναντι των στατικών ημερομηνιών λήξης (Nalbandian, 2015).

Η χρήση χρονοθερμικών δεικτών (Time Temperature Integrators – TTIs) συγκαταλέγεται στις πιο αξιόπιστες τεχνολογίες «έξυπνης» συσκευασίας, καθώς προσφέρει συνεχή πληροφόρηση για τις θερμοκρασιακές συνθήκες που έχει υποστεί το τρόφιμο καθ' όλη τη διάρκεια της αλυσίδας ψύξης. Οι Giannakourou, Koutsoumanis, Nychas και Taoukis (2005) πραγματοποίησαν εκτενή επιτόπια αξιολόγηση TTIs για την παρακολούθηση της ποιότητας των ιχθυηρών, αποδεικνύοντας ότι οι δείκτες αυτοί μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την υποβάθμιση της ποιότητας σε συνάρτηση με το ιστορικό θερμοκρασίας. Η εφαρμογή τους βελτιώνει σημαντικά τη διαχείριση της ψυκτικής εφοδιαστικής αλυσίδας, μειώνει τον κίνδυνο διάθεσης αλλοιωμένων προϊόντων και ενισχύει τη διαφάνεια απέναντι στον καταναλωτή. Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί ορόσημο για την εισαγωγή τεχνολογιών δυναμικής ιχνηλασιμότητας στα τρόφιμα ζωικής προέλευσης, καταδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο των «έξυπνων» συστημάτων στη διασφάλιση ποιότητας και ασφάλειας. Μια εξέλιξη στη χρήση των χρονοθερμικών δεικτών αποτελεί η ανάπτυξη μικροβιακών TTIs, οι οποίοι βασίζονται στην ανάπτυξη επιλεγμένων μικροοργανισμών ως «δείκτες» της ποιότητας του προϊόντος. Σε αντίθεση με τους χημικούς ή ενζυματικούς δείκτες, οι μικροβιακοί TTIs αντανakλούν άμεσα τη βιολογική δυναμική που οδηγεί στην αλλοίωση. Στο πλαίσιο αυτό, οι Vaikousi et al. (2009) αξιολόγησαν την εφαρμογή μικροβιακών TTIs για τον έλεγχο της φθοράς σε κιμά συσκευασμένο υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα, καταδεικνύοντας ότι το εργαλείο αυτό μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια το σημείο λήξης της αποδεκτής διάρκειας ζωής.

Η έρευνα αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της ενσωμάτωσης βιολογικών δεικτών σε έξυπνες συσκευασίες, παρέχοντας στοχευμένη και αξιόπιστη πληροφόρηση τόσο στη βιομηχανία όσο και στον τελικό καταναλωτή.

Παρά τα οφέλη, παραμένουν προκλήσεις. Επιπλέον, τα ηλεκτρονικά συστήματα RFID/NFC πρέπει να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα και ασφάλεια σε συνθήκες ψύξης ή κατάψυξης, αλλά και σε φαινόμενα πλύσης ή συμπύκνωσης, δηλαδή στην έκθεση της συσκευασίας σε νερό είτε κατά τον καθαρισμό είτε λόγω υγρασίας που προκύπτει από μεταβολές θερμοκρασίας, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητα των αισθητήρων. Στη διακυβέρνηση δεδομένων, η προστασία εμπορικά ευαίσθητων πληροφοριών, το κόστος on-chain αποθήκευσης και η διαλειτουργικότητα μεταξύ προμηθευτών, 3PL και λιανεμπορίου απαιτούν αρχιτεκτονικές υβριδικών λύσεων (off-chain αποθήκευση, on-chain hash, role-based access) και υιοθέτηση προτύπων (EPCIS 2.0, Digital Link) (GS1, 2022; Casino et al., 2019). Επιπλέον, τα συστήματα άνευ μπαταρίας χρειάζονται προσεκτικό σχεδιασμό για συγκομιδή ενέργειας και ασφαλή σύζευξη με smartphones/πύλες, ενώ το κόστος ανά μονάδα πρέπει να δικαιολογείται από τη μείωση απωλειών και το όφελος εμπιστοσύνης του καταναλωτή (Douaki et al., 2024; Pires et al., 2022).

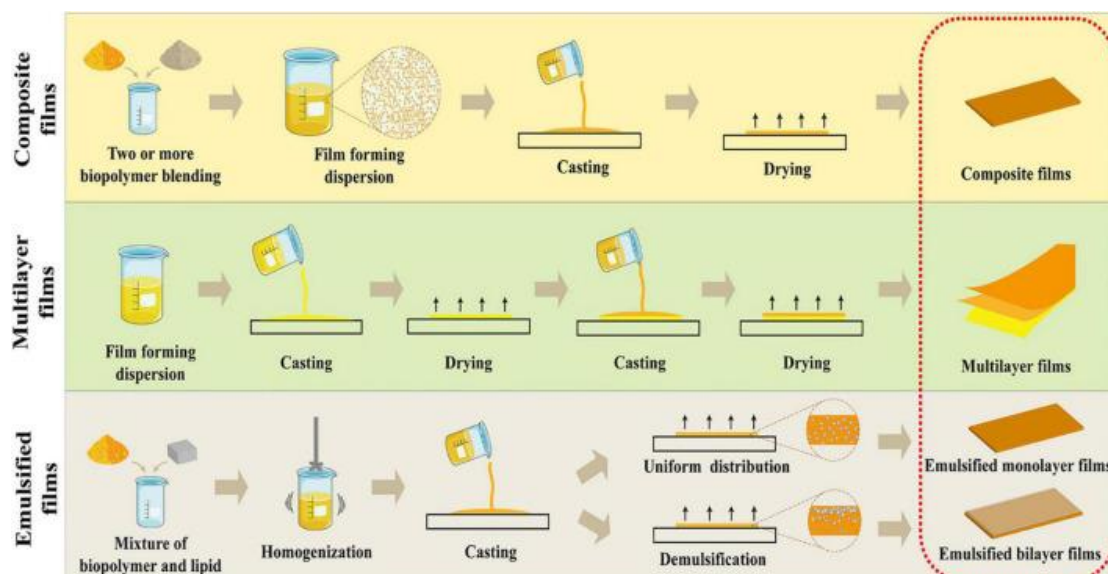
Στρατηγικά, η σύζευξη έξυπνης συσκευασίας + blockchain μετατοπίζει το μοντέλο από «συσκευασία ως κόστος» σε «συσκευασία ως πλατφόρμα δεδομένων» και σε αυτό που πλέον εμπορικά αποκαλείται ως Διαδίκτυο της Συσκευασίας, Internet of packaging (IoP). Για προϊόντα υψηλού κινδύνου όπως τα ιχθυηρά και το νωπό κρέας, αυτό σημαίνει προληπτική ασφάλεια (έγκαιρη ενημέρωση σε περιστατικά κακοδιαχείρισης στην εφοδιαστική αλυσίδα), μη παραποιήσιμη ιστορικότητα (αυθεντικότητα/προέλευση), δυναμική διαχείριση της διάρκειας ζωής και στοχευμένες ανακλήσεις με μικρότερο περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος. Η ωρίμανση εκτυπώσιμων/βιοδιασπώμενων υποστρωμάτων και η συνεχιζόμενη τυποποίηση αναμένεται να μειώσουν περαιτέρω το κόστος και να επιταχύνουν την ευρεία υιοθέτηση σε αλυσίδες κρέατος-ιχθύων τα επόμενα χρόνια (Pires et al., 2022; GS1, 2022).

3.3 Βιοπολυμερή και φιλικά προς το περιβάλλον υλικά

Η μετάβαση σε πιο βιώσιμα υλικά συσκευασίας εστιάζει ολοένα και περισσότερο στα **βιοπολυμερή** και στα «φιλικά προς το περιβάλλον» υποστρώματα, με στόχο τη μείωση

του ανθρακικού αποτυπώματος, τη βελτίωση της κυκλικότητας και την ελαχιστοποίηση της παραμονής μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι βιοπολυμερή όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), οι πολυϋδροξυαλκανοϊκές ενώσεις (PHA/PHB), το άμυλο, η κυτταρίνη/νανοκυτταρίνη και η χιτοζάνη μπορούν—μόνα τους ή ως σύνθετα/επικαλύψεις—να δώσουν λειτουργικές λύσεις στη συσκευασία τροφίμων, ιδίως όταν συνδυάζονται με νανοενισχύσεις ή ενεργές ουσίες όπως αντιοξειδωτικά και αντιμικροβιακά (Perera et al., 2023; González-López et al., 2023). Παράλληλα, οι τεχνολογίες αυτές συνοδεύονται από πραγματιστική αξιολόγηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), με έμφαση στην κομποστοποίηση, την ανακύκλωση και τις νέες ρυθμιστικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω του Κανονισμού για τις Συσκευασίες και τα Απόβλητα Συσκευασιών (PPWR) (European Commission, 2024a).

Στο πεδίο των βιο-εστερικών πολυμερών, το PLA έχει αποκτήσει ιδιαίτερη βιομηχανική σημασία λόγω επεξεργασιμότητας και διαθεσιμότητας, ωστόσο η σχετικά υψηλή διαπερατότητα σε υδρατμούς και αέρια καθώς και η ευθραυστότητά του αντιμετωπίζονται με συν-εξώθηση, μίγματα (π.χ. PLA/PBAT) και νανοενισχύσεις όπως η νανοκυτταρίνη ή οι νανοπληρωτές πηλού (González-López et al., 2023). Οι PHA, και ειδικότερα το PHB, εμφανίζουν καλύτερη βιοαποδομησιμότητα, ακόμη και σε θαλάσσια περιβάλλοντα, αλλά το υψηλότερο κόστος και η ευθραυστότητα απαιτούν συνδυαστικές τεχνικές, όπως μίγματα, πλαστικοποίηση και επικαλύψεις (Perera et al., 2023). Πρόσφατες ανασκοπήσεις αναδεικνύουν ότι τα υβρίδια PLA/PHA με νανοκυτταρίνη και βιοδραστικά πληρωτικά παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές και φραγμο-ιδιότητες, καθιστώντας τα ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές επαφής με τρόφιμα (Reddy et al., 2025). Η Εικόνα 13 απεικονίζει τον σχηματικό σχεδιασμό βιοπολυμερικών φιλμ για εφαρμογές τροφίμων, επισημαίνοντας μεθόδους όπως τα composite, multilayer και emulsified films καθώς και την ενσωμάτωση βιοδραστικών συστατικών—όλα εργαλεία που στοχεύουν στον εμπλουτισμό λειτουργικών ιδιοτήτων όπως φραγμού, μηχανικής αντοχής και ενεργής δράσης (Cai et al., 2022). Η Εικόνα 13 απεικονίζει τις βασικές στρατηγικές σχηματισμού λειτουργικών φιλμ από βιοπολυμερή, αναδεικνύοντας τις μεθόδους με τις οποίες ενσωματώνονται ενεργά ή έξυπνα συστατικά στη δομή τους.



Εικόνα 13. Σχηματική επισκόπηση στρατηγικών σχηματισμού λειτουργικών φιλμ από βιοπολυμερή (Πηγή: Abdullah et al., 2022).

Η νανοκυτταρίνη, είτε ως κρυσταλλική (CNC) είτε ως νανοΐνες (CNF), χρησιμοποιείται εκτενώς τόσο ως επικάλυψη χαρτιού/χαρτονιού όσο και ως ενισχυτική φάση σε πολυμερή όπως το PLA, το PVOH και το άμυλο, βελτιώνοντας την αντοχή, το φράγμα στο οξυγόνο και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία (Ahankari et al., 2021; Adak et al., 2025). Παράλληλα, η νανοκυτταρίνη μπορεί να λειτουργήσει ως φορέας ενεργών ουσιών, προσδίδοντας αντιοξειδωτικές ή αντιμικροβιακές ιδιότητες σε συστήματα ενεργής συσκευασίας (Shi et al., 2025).

Τα υλικά βάσης πολυσακχαριτών, όπως το άμυλο και η κυτταρίνη, αλλά και οι πρωτεϊνικές μήτρες (ζελατίνη, καζεΐνη), χρησιμοποιούνται είτε ως βρώσιμα φιλμ είτε ως επικαλύψεις σε χαρτί/χαρτόνι, αποτελώντας ελκυστικές λύσεις λόγω της ανανεώσιμης προέλευσής τους και της δυνατότητας κομποστοποίησης (Adak et al., 2025). Σε αυτό το πλαίσιο, νέες τεχνολογίες “paperization” συνδυάζουν βιοπολυμερικές επικαλύψεις με νανοκυτταρίνη, βελτιώνοντας τις φραγμο-ιδιότητες και αντικαθιστώντας επιστρώσεις με βάση τα φθοριούχα ή τα πετροχημικά, διευκολύνοντας παράλληλα την ανακύκλωση ή την οργανική ανάκτηση (Adak et al., 2025).

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω μελετών ανάλυσης κύκλου ζωής LCA δείχνει ότι πολλά βιοπλαστικά εμφανίζουν χαμηλότερο αποτύπωμα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και μικρότερη περιβαλλοντική παραμονή όταν διαχειρίζονται σε

κατάλληλες υποδομές, όπως η βιομηχανική κομποστοποίηση και η μηχανική ανακύκλωση (Yadav et al., 2024; Keyes et al., 2024). Ωστόσο, προκλήσεις όπως η ετερογένεια των ρευμάτων αποβλήτων, οι ελλειπείς υποδομές και η σύγχυση στη σήμανση απαιτούν ευθυγράμμιση υλικών, υποδομών και καταναλωτικής ενημέρωσης (Islam et al., 2024). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, με το νέο PPWR, θέτει αυστηρότερες απαιτήσεις για την ανακυκλωσιμότητα και περιορίζει την κομποστοποιησιμότητα σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως οι σακούλες βιοαποβλήτων και οι συσκευασίες που ρυπαίνονται έντονα από τρόφιμα (European Commission, 2024a; British Plastics Federation, n.d.).

Η ενσωμάτωση ενεργών λειτουργιών σε βιοπολυμερή, όπως φυτικά εκχυλίσματα ή αντιοξειδωτικά, συμβάλλει διπλά στη βιωσιμότητα: μειώνει τις απώλειες τροφίμων και επιτρέπει την αντικατάσταση πολυστρωματικών συστημάτων με μονοϋλικά, απλουστεύοντας την ανακύκλωση (Reddy et al., 2025; Shi et al., 2025). Παράλληλα, η δημόσια συζήτηση υπογραμμίζει ότι τα κομποστοποιήσιμα υλικά δεν αποδίδουν τα αναμενόμενα οφέλη όταν καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ η έλλειψη σαφούς σήμανσης ενισχύει το φαινόμενο της «πράσινης σύγχυσης» (Reuters, 2024; Rawnsley, 2024). Για να επιτευχθεί το πλήρες δυναμικό τους, απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών, η καθιέρωση κοινών προτύπων και η εκπαίδευση των καταναλωτών.

3.4 Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση

3.4.1 Κόστος υλικών και εφαρμογών

Η οικονομική αξιολόγηση των υλικών ενεργού και έξυπνης συσκευασίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την υιοθέτησή τους στη βιομηχανία τροφίμων. Το κόστος των υλικών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η πρώτη ύλη, η τεχνολογία παραγωγής, η κλίμακα παραγωγής, η προστιθέμενη λειτουργικότητα και οι απαιτήσεις συμμόρφωσης με κανονιστικά πλαίσια (Panou & Karabagias, 2023). Για παράδειγμα, τα συμβατικά πολυμερή πετροχημικής προέλευσης, όπως το πολυαιθυλένιο (PE) ή το πολυπροπυλένιο (PP), εμφανίζουν χαμηλό κόστος αγοράς λόγω μεγάλης κλίμακας παραγωγής και ώριμων βιομηχανικών διαδικασιών, με τιμές που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1,2–1,8 €/kg (European Bioplastics, 2023). Αντιθέτως, τα βιοπολυμερή όπως το PLA και το PHB παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερο κόστος, συχνά 2,5–4 φορές

μεγαλύτερο, κυρίως λόγω περιορισμένης παραγωγικής δυναμικότητας και πιο δαπανηρών διεργασιών ζύμωσης ή εκχύλισης (Yadav et al., 2024).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση ενεργών ή έξυπνων λειτουργιών, όπως η προσθήκη νανοενισχύσεων, μικροκάψουλων αντιοξειδωτικών ή αισθητήρων, αυξάνει το συνολικό κόστος παραγωγής κατά 15–40% σε σύγκριση με την απλή παθητική συσκευασία (Mkhari et al., 2025). Για παράδειγμα, οι βιοδιασπώμενες μεμβράνες από PLA με νανοκυτταρίνη και εκχύλισμα δενδρολίβανου μπορούν να έχουν τελικό κόστος 4–5 €/m², έναντι 1–2 €/m² για ένα συμβατικό φιλμ PE χωρίς ενεργά πρόσθετα (Perera et al., 2023). Αντίστοιχα, η ενσωμάτωση αισθητήρων χρώματος ή RFID για ιχνηλασιμότητα μπορεί να αυξήσει την τιμή ανά συσκευασία κατά 0,03–0,10 €, κάτι που σε μεγάλους όγκους παραγωγής είναι σημαντικό (Abdullah et al., 2022).

Από την άλλη πλευρά, το υψηλότερο αρχικό κόστος μπορεί να αντισταθμιστεί από την αύξηση της διάρκειας ζωής του προϊόντος, τη μείωση των απωλειών τροφίμων και την ενίσχυση της εμπορικής αξίας μέσω διαφοροποίησης και πράσινης πιστοποίησης (Yildirim et al., 2018). Υπολογιστικά μοντέλα κόστους-οφέλους δείχνουν ότι, σε προϊόντα υψηλής αξίας όπως τα φρέσκα ψάρια, η αύξηση της διάρκειας ζωής κατά 30–40% μπορεί να αποδώσει οικονομικά οφέλη 2–3 φορές μεγαλύτερα από το πρόσθετο κόστος συσκευασίας (Ojagh et al., 2010; Mkhari et al., 2025).

Η οικονομική βιωσιμότητα επηρεάζεται επίσης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι διακυμάνσεις στις τιμές πρώτων υλών, η ενεργειακή κατανάλωση των γραμμών παραγωγής και τα κόστη πιστοποίησης σύμφωνα με πρότυπα όπως το EN 13432 για κομποστοποιήσιμα υλικά ή το ISO 22000 για ασφάλεια τροφίμων (European Commission, 2024). Παράλληλα, οι πολιτικές στήριξης, οι επιδοτήσεις για βιοπλαστικά και οι φορολογικές ελαφρύνσεις για βιώσιμες τεχνολογίες μπορούν να μειώσουν τη διαφορά κόστους με τα συμβατικά υλικά, ενώ η αύξηση της παραγωγικής κλίμακας εκτιμάται ότι θα επιφέρει μείωση τιμών βιοπολυμερών κατά 20–30% μέσα στην επόμενη δεκαετία (Islam et al., 2024).

Συνεπώς, το κόστος των υλικών και εφαρμογών ενεργής και έξυπνης συσκευασίας αποτελεί έναν δυναμικό παράγοντα που εξαρτάται τόσο από την τεχνολογική εξέλιξη όσο και από τις συνθήκες της αγοράς. Ενώ το σημερινό κόστος παραμένει υψηλότερο σε σχέση με τα συμβατικά υλικά, η τάση δείχνει ότι η ευρύτερη βιομηχανική υιοθέτηση

και οι πολιτικές ενίσχυσης θα ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητα των βιώσιμων λύσεων, ιδιαίτερα σε προϊόντα υψηλής αξίας και ευαισθησίας.

3.4.2 Ανάλυση βιωσιμότητας και ανακύκλωσης

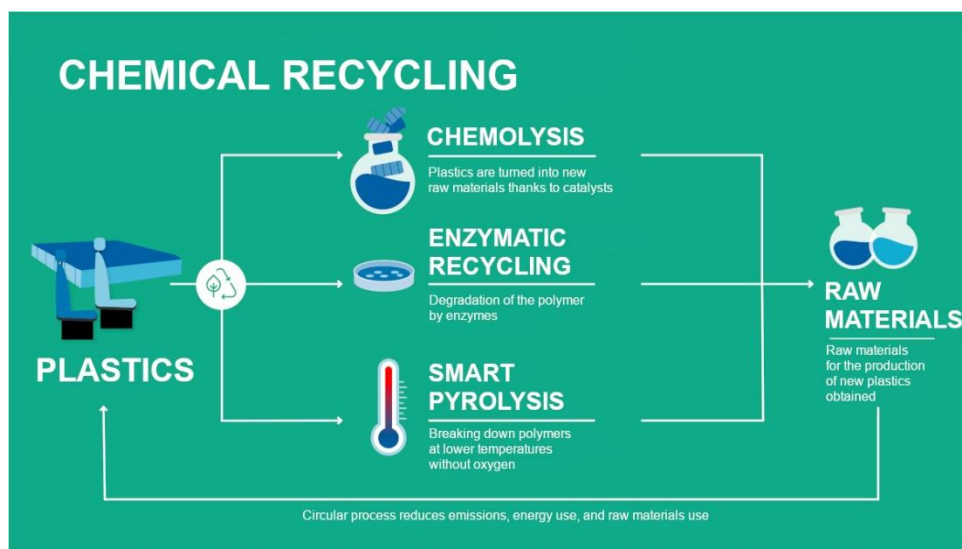
Η αξιολόγηση της βιωσιμότητας και των δυνατοτήτων ανακύκλωσης των υλικών ενεργής και έξυπνης συσκευασίας αποτελεί κεντρικό κριτήριο για τη σύγχρονη βιομηχανία τροφίμων, καθώς η Ευρωπαϊκή Ένωση και διεθνείς οργανισμοί θέτουν αυστηρούς στόχους για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συσκευασιών (European Commission, 2024). Η βιωσιμότητα συνδέεται τόσο με τον κύκλο ζωής των υλικών όσο και με τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης στο τέλος της χρήσης τους, ενώ η ενεργή και έξυπνη συσκευασία δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις λόγω της πολυπλοκότητας των υλικών και των ενσωματωμένων λειτουργικών στοιχείων (Vanderroost et al., 2017).

Η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί το βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης μιας συσκευασίας, λαμβάνοντας υπόψη στάδια όπως η εξόρυξη πρώτων υλών, η παραγωγή, η μεταφορά, η χρήση και η τελική διάθεση (ISO 14040, 2006). Μελέτες έχουν δείξει ότι τα βιοπολυμερή, όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), εμφανίζουν μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα κατά 25–60% σε σχέση με τα συμβατικά πολυμερή, κυρίως λόγω της ανανεώσιμης προέλευσής τους και της δυνατότητας κομποστοποίησης (Yadav et al., 2024). Ωστόσο, η περιβαλλοντική απόδοση εξαρτάται από την πηγή της πρώτης ύλης, την ενεργειακή κατανάλωση της παραγωγής και την ύπαρξη κατάλληλων υποδομών διαχείρισης αποβλήτων (Islam et al., 2024).

Η ανακύκλωση ενεργών και έξυπνων συσκευασιών αντιμετωπίζει ιδιαίτερες τεχνικές δυσκολίες. Η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων, αισθητήρων, μεταλλικών επαφών ή χρωμοευαίσθητων δεικτών μπορεί να δυσχεράνει τον διαχωρισμό υλικών και να μειώσει την καθαρότητα του ανακυκλωμένου πολυμερούς (Panou & Karabagias, 2023). Για τον λόγο αυτό, προτείνεται ο σχεδιασμός με αρχές “Design for Recycling” και “Design for Disassembly”, όπου οι λειτουργικές προσθήκες μπορούν να αφαιρεθούν ή να διαχωριστούν εύκολα πριν από την ανακύκλωση (Geueke et al., 2018).

Οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης, όπως η πυρόλυση και η γλυκόλυση, αποτελούν εναλλακτική λύση για τη διαχείριση πολυστρωματικών ή μολυσμένων υλικών,

επιτρέποντας την ανάκτηση μονομερών ή χρήσιμων παραγώγων, αν και η ενεργειακή τους απαίτηση παραμένει υψηλή (Ragaert et al., 2020). Παράλληλα, η βιοαποικοδόμηση και η κομποστοποίηση αναπτύσσονται ως λύσεις για βιοπολυμερή και υλικά με βάση φυσικά πολυμερή, αλλά απαιτούν αυστηρό έλεγχο συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, μικροβιακή δραστηριότητα) για την πλήρη αποικοδόμηση χωρίς παραγωγή τοξικών υπολειμμάτων (Samir et al., 2022). Η Εικόνα 14 παρουσιάζει συνοπτικά τις κύριες μεθόδους χημικής ανακύκλωσης όπως η χημολύση (solvolysis), η καταλυτική πυρόλυση και η ενζυμική ανακύκλωση, αναδεικνύοντας την ικανότητά τους να επεξεργάζονται πολύπλοκα ή ρυπασμένα ρεύματα πλαστικών που δεν μπορούν να υποβληθούν σε μηχανική ανακύκλωση, οδηγώντας στην ανάκτηση διαθέσιμων μονομερών ή χρήσιμων πρώτων υλών (Covestro-style diagram with chemolysis, smart pyrolysis, enzymatic recycling). Η Εικόνα 14 παρουσιάζει συγκριτικά τις κύριες τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης, αναδεικνύοντας τις διαδρομές πυρόλυσης, γλυκόλυσης και συναφών διεργασιών που εφαρμόζονται στη διαχείριση υλικών συσκευασίας.



Εικόνα 14. Διάγραμμα των βασικών τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης (Πηγή: Goedecke, 2025)

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας προωθεί τη μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο “παραγωγή – χρήση – απόρριψη” σε κλειστά κυκλώματα υλικών, όπου η συσκευασία επαναχρησιμοποιείται, ανακυκλώνεται ή επιστρέφει στο περιβάλλον ως βιομάζα χωρίς αρνητικές επιπτώσεις (Ellen MacArthur Foundation, 2022). Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη συσκευασιών με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα συνδυάζεται με

πολιτικές διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού (EPR), όπου οι εταιρείες αναλαμβάνουν την ευθύνη για τη συλλογή και ανακύκλωση των προϊόντων τους (European Commission, 2024).

Η βιωσιμότητα και η ανακύκλωση ενεργών και έξυπνων συσκευασιών απαιτούν μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει τον οικολογικό σχεδιασμό, την επιλογή ανανεώσιμων ή βιοαποικοδομήσιμων υλικών, την προσαρμογή των γραμμών ανακύκλωσης στις νέες τεχνολογίες και την ανάπτυξη διεθνών προτύπων για την αξιολόγηση και την πιστοποίησή τους. Η υιοθέτηση αυτών των πρακτικών μπορεί να μειώσει δραστικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της βιομηχανίας τροφίμων, να βελτιώσει την εταιρική κοινωνική ευθύνη και να ενισχύσει την αποδοχή των προϊόντων από τους καταναλωτές.

3.5 Καταναλωτική αποδοχή – τάσεις αγοράς (εμπορικές εφαρμογές της ενεργού συσκευασίας)

Η καταναλωτική αποδοχή της ενεργού συσκευασίας συνιστά κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή εμπορική της διάθεση και διάδοση στην αγορά, καθώς οι τεχνολογικές καινοτομίες στην αλυσίδα τροφίμων δεν αξιοποιούνται πλήρως αν δεν συνοδεύονται από θετική στάση των καταναλωτών (Liu et al., 2013). Παρά την αποδεδειγμένη συμβολή της στην παράταση διάρκειας ζωής, τη μείωση της σπατάλης τροφίμων και την ενίσχυση της ασφάλειας, οι καταναλωτές συχνά εκφράζουν επιφυλάξεις που σχετίζονται με το κόστος, την ασφάλεια των χρησιμοποιούμενων ουσιών και τη σαφήνεια των πληροφοριών στην επισήμανση (Biji et al., 2015).

Η έρευνα αγοράς δείχνει ότι οι καταναλωτές είναι περισσότερο πρόθυμοι να επιλέξουν προϊόντα με ενεργή συσκευασία όταν ενημερώνονται επαρκώς για τον μηχανισμό λειτουργίας και τα οφέλη της, ιδίως εφόσον αυτή συνδέεται με μείωση της χρήσης χημικών συντηρητικών (Ghaani et al., 2016). Οι Millennial και Gen Z καταναλωτές φαίνεται να επιδεικνύουν μεγαλύτερη προθυμία αποδοχής και πληρωμής για τεχνολογίες που συνδυάζουν καινοτομία και βιωσιμότητα, σε σύγκριση με μεγαλύτερες ηλικιακές ομάδες (Liu et al., 2013).

Στην εμπορική διάσταση, μεγάλες εταιρείες τροφίμων έχουν ήδη ενσωματώσει ενεργά συστήματα σε συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων, όπως φρέσκα κρέατα, θαλασσινά, έτοιμα γεύματα και αρτοσκευάσματα. Για παράδειγμα, συσκευασίες με εκπομπή CO₂ για φρέσκα φιλέτα σολομού έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς από

σκανδιναβικές εταιρείες, παρατείνοντας τον χρόνο αποθήκευσης κατά 4–6 ημέρες χωρίς απώλεια ποιότητας (López-Gálvez et al., 2021). Αυτή η τεχνική παρουσιάζεται στην εικόνα 15. Παράλληλα, η χρήση αντιμικροβιακών φιλμ σε έτοιμες σαλάτες εφαρμόζεται ήδη σε αλυσίδες λιανικής της Βόρειας Αμερικής, με στόχο τη μείωση των επιστροφών και των απορριπτόμενων ποσοτήτων (Realini & Marcos, 2014).



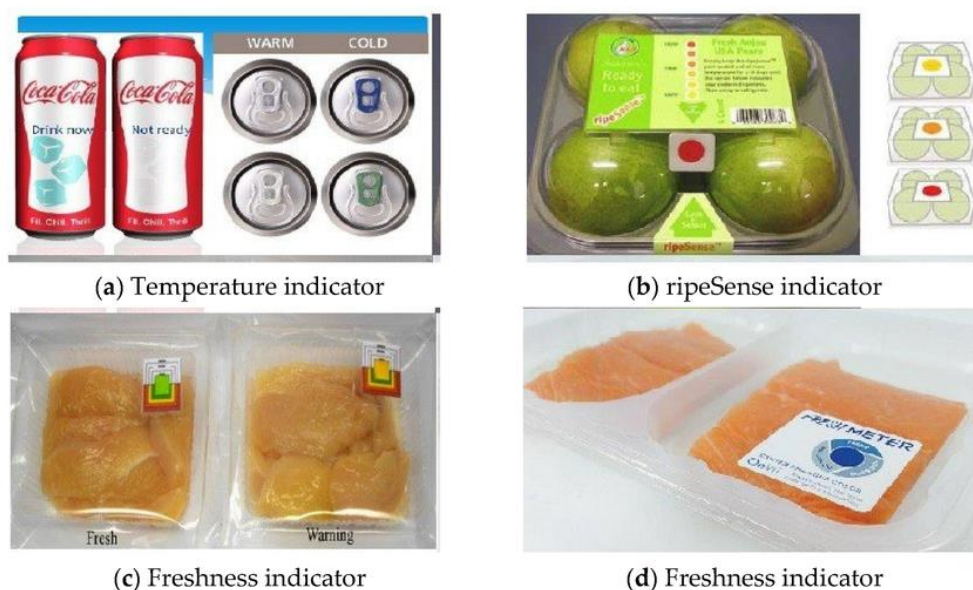
Εικόνα 15. Συσκευασίες με εκπομπή CO₂ για φρέσκα φιλέτα σολωμού (Rollini et al., 2016)

Η Εικόνα 16 παρουσιάζει ένα παράδειγμα εμπορικής εφαρμογής συσκευασίας με τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), όπου η χρήση ενεργών στοιχείων, όπως απορροφητές οξυγόνου και ρυθμιστές CO₂, συμβάλλει στην παράταση της διάρκειας ζωής και στη διατήρηση της φρεσκότητας των τροφίμων.



Εικόνα 16. Διάταξη συσκευασίας με τροποποιημένη ατμόσφαιρα (MAP), η οποία χρησιμοποιεί ενεργό στοιχεία όπως απορροφητές οξυγόνου ή ρυθμιστές CO₂ για να διατηρήσει τη φρεσκάδα και να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος (Record Packaging, n.d.).

Οι τάσεις της αγοράς δείχνουν επίσης αυξανόμενη ενσωμάτωση της ενεργού συσκευασίας με έξυπνα στοιχεία, όπως δείκτες φρεσκάδας και θερμοκρασίας, καθώς οι καταναλωτές εκτιμούν την οπτική επιβεβαίωση της ποιότητας (Yam et al., 2005). Η σύζευξη αυτών των τεχνολογιών με εφαρμογές ιχνηλασιμότητας μέσω blockchain ενισχύει την εμπιστοσύνη και διαφοροποιεί το προϊόν στην αγορά, προσφέροντας ανταγωνιστικό πλεονέκτημα (George & Al-Ansari, 2023). Η ενσωμάτωση των δεικτών φρεσκάδας και θερμοκρασίας σε τέτοιου είδους συσκευασίες απεικονίζονται ενδεικτικά στην εικόνα 17.



Εικόνα 17. Παραδείγματα έξυπνων δεικτών συσκευασίας: (a) δείκτης θερμοκρασίας σε κουτιά αναψυκτικών, (b) δείκτης ripeSense για την ωρίμανση φρούτων, (c) δείκτης φρεσκότητας σε συσκευασία πουλερικών και (d) δείκτης φρεσκότητας σε φιλέτα σολομού. (Yan et al., 2022)

Ωστόσο, η διάδοση της ενεργού συσκευασίας στις εμπορικές εφαρμογές περιορίζεται ακόμη από παράγοντες όπως το υψηλότερο κόστος παραγωγής, η ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού, και οι κανονιστικές απαιτήσεις για την ασφάλεια και επισήμανση των ενεργών συστατικών (Regulation (EC) No 450/2009). Η μείωση του κόστους μέσω βελτιστοποίησης παραγωγικών διαδικασιών, η ανάπτυξη βιοβασισμένων και ασφαλών ενεργών ουσιών και η ενίσχυση της ενημέρωσης των καταναλωτών αποτελούν τους βασικούς άξονες για την περαιτέρω αύξηση της αποδοχής.

Η καταναλωτική αποδοχή και οι τάσεις της αγοράς για την ενεργό συσκευασία συνδέονται στενά με την αντίληψη για τα οφέλη, την εμπιστοσύνη στην ασφάλεια και την ταύτιση με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι εταιρείες που επενδύουν σε

διαφανή επικοινωνία, εκπαίδευση του κοινού και συνεχή καινοτομία έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχίας στην εμπορική αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

4.1 Κύρια ευρήματα και σύνθεση αποτελεσμάτων

Η βιβλιογραφική διερεύνηση καταδεικνύει με συνέπεια ότι η ενεργή συσκευασία συνιστά οργανικό τμήμα της σύγχρονης τεχνολογίας τροφίμων, ιδίως για ευαλλοίωτα προϊόντα όπως τα ιχθυηρά και το νωπό κρέας. Το σώμα των μελετών συγκλίνει στο ότι η ενσωμάτωση βιοδραστικών παραγόντων σε φιλμ/επικαλύψεις και η χρήση δεικτών ή αισθητήρων ποιότητας μπορούν να επιμηκύνουν ουσιαστικά τη διάρκεια ζωής, να περιορίσουν μικροβιακές αλλοιώσεις και να σταθεροποιήσουν ιδιότητες ποιότητας, όταν οι λύσεις σχεδιάζονται συμβατά με τις ιδιαιτερότητες του υποστρώματος και τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια (Kerry et al., 2006· Realini & Marcos, 2014· Regulation (EC) No 450/2009).

Στο επίπεδο των υλικών, η μετάβαση από συμβατικά πολυμερή σε βιοπολυμερικά συστήματα με ενεργές λειτουργικότητες αποτελεί σαφή τάση, με τομείς αιχμής τα σύνθετα φιλμ πολυσακχαριτών/πρωτεϊνών, τα πολυστρωματικά βιοδιασπώμενα υλικά και τις νανοενισχύσεις με νανοκυτταρίνη ή ανόργανα νανοσωματίδια για ενίσχυση μηχανικών/φραγμάτων ιδιοτήτων (Abdullah et al., 2022· Wang et al., 2022· Ahankari et al., 2020). Οι πρόσφατες συνθέσεις επιβεβαιώνουν ότι τα βιοπολυμερή μπορούν να φιλοξενήσουν αντιμικροβιακές και αντιοξειδωτικές ουσίες με σχετικά ομοιόμορφη κατανομή και ελεγχόμενη αποδέσμευση, επιτυγχάνοντας παράλληλα βελτίωση αντοχής, αδιαπερατότητας και σταθερότητας έναντι UV όπου αυτό απαιτείται (Azevedo et al., 2022· Alizadeh-Sani et al., 2024). Ταυτόχρονα, η διεθνής συζήτηση γύρω από τη βιωσιμότητα επισημαίνει ότι η αντικατάσταση πετρελαϊκής βάσης υλικών από βιοβασισμένα/κομποστοποιήσιμα οφείλει να συνοδεύεται από αποτίμηση κύκλου ζωής και ρεαλιστικά σενάρια τέλους ζωής, λόγω εμποδίων στην ανακύκλωση πολυστρωματικών δομών και πιθανών μεταναστεύσεων συστατικών (Geueke et al., 2018· Ragaert et al., 2017· European Commission, 2024).

Ως προς τους ενεργούς μηχανισμούς, η αξιοποίηση φυτικών εκχυλισμάτων και αιθέριων ελαίων σε φιλμ/επικαλύψεις αναδεικνύεται ως τεχνολογία ώριμη για εφαρμογές σε κρέας και προϊόντα του, με εκτενείς τεκμηριώσεις για ανασταλτική δράση έναντι παθογόνων/αλλοιογόνων και περιορισμό οξείδωσης λιπιδίων/πρωτεϊνών (Smaoui et al., 2021· Vilela et al., 2018· Manzoor et al., 2023). Ενδεικτικές εφαρμογές με φιλμ χιτοζάνης ή πολυπροπυλενίου ενισχυμένα με καρβακρόλη/θυμόλη ή

εκχυλίσματα ροσμαρίνου και κανέλας καταγράφουν σημαντικές μειώσεις μικροβιακού φορτίου και σταθεροποίηση χρώματος/οσμής, προσφέροντας πρακτικά οφέλη συντήρησης (Ramos et al., 2012· De Lima et al., 2024· Zawani et al., 2022). Παράλληλα, η λογική των «συλλεκτών οξυγόνου» και συναφών συστημάτων απορρόφησης/εκπομπής αερίων παραμένει κεντρική, ιδίως όταν συνδυάζεται με MAP και χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς διευρύνει το «παράθυρο» σταθερότητας και μειώνει τις αποκλίσεις κατά την ψυκτική αλυσίδα (Ahuja et al., 2024· Rasheed et al., 2025· Kontominas et al., 2021).

Η βιβλιογραφία για προϊόντα ιχθυοκαλλιέργειας και θαλασσινά επιβεβαιώνει ότι οι συνδυαστικές στρατηγικές ενεργών υλικών με ατμόσφαιρες τροποποίησης ή/και μη θερμικές επεξεργασίες (όπως HPP) μπορούν να μετατοπίσουν ουσιαστικά το μικροβιακό/οργανοληπτικό όριο αποδοχής, υπό την προϋπόθεση ότι ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη τη φυσιολογία του μικροβιώματος των συγκεκριμένων υποστρωμάτων (Ferri et al., 2023· Merlo et al., 2019· Tsironi et al., 2019). Τα ευρήματα αυτά ευθυγραμμίζονται με παλαιότερες και πρόσφατες μελέτες που περιγράφουν δυναμικά της αλλοίωσης σε κρέας και ψάρι και αναδεικνύουν κρίσιμους δείκτες όπως οι βιογενείς αμίνες, τα πτητικά και το μεταβαλλόμενο μικροβίωμα σε διαφορετικά σχήματα συσκευασίας (Ercolini et al., 2006· Ercolini et al., 2011· Parlapani et al., 2014· Gram & Dalgaard, 2002).

Στο πεδίο της έξυπνης συσκευασίας, αναγνωρίζεται ουσιώδης πρόοδος στη μετάφραση αισθητήρων και ενδεικτικών συστημάτων σε λύσεις παρακολούθησης ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Οι μελέτες για χρωματομετρικούς δείκτες, αισθητήρες φρεσκότητας που αξιοποιούν ανθοκυανίνες/φαινολικές χρωστικές, pads απορρόφησης/αιχμαλώτισης και εκτυπώσιμες διατάξεις ενισχύουν τη διαγνωστική ικανότητα των συσκευασιών με χαμηλό ενεργειακό/υλικό κόστος (Ghaani et al., 2016· Chen et al., 2023· Jiao et al., 2023· Weston et al., 2020). Σε ψάρια ιχθυοκαλλιέργειας, συνδυασμοί ενεργών στοιχείων με MAP έχουν ήδη επιδειχθεί σε συνθήκες σταθερής και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας, προσφέροντας αξιόπιστες εκτιμήσεις διάρκειας ζωής (Katsouli et al., 2022). Επιπλέον, ο ρόλος των TTI στην πρόβλεψη αλλοίωσης και στη διαχείριση της ψυκτικής αλυσίδας παραμένει κομβικός, με εφαρμογές τόσο σε κιμά όσο και σε φιλέτα ψαριού (Vaikousi et al., 2009· Giannakourou et al., 2005). Η προέκταση σε ιχνηλασιμότητα βασισμένη σε πρότυπα EPCIS/CBV και έξυπνες συμβάσεις επιτρέπει ενσωμάτωση ποιοτικών και θερμοκρασιακών δεδομένων με

ασφάλεια και διαφάνεια, στοιχείο που συνδέεται με την εμπιστοσύνη του καταναλωτή και την κανονιστική συμμόρφωση (GS1, 2022· Wang et al., 2021).

Τα τεχνικά οφέλη της ενεργού συσκευασίας τεκμηριώνονται σε τρία επίπεδα. Πρώτον, τεχνολογικά, η ενσωμάτωση βιοδραστικών παραγόντων και η χρήση πολυστρωματικών ή νανοενισχυμένων φιλμ βελτιώνουν ικανότητες φραγμού, μηχανική αντοχή και στοχευμένη δράση έναντι μικροβιακής/οξειδωτικής υποβάθμισης (Rhim et al., 2013· Abdullah et al., 2022). Δεύτερον, λειτουργικά, τα συστήματα αυτά μειώνουν ρυθμούς ανάπτυξης αλλοιογόνων και διατηρούν κρίσιμα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε κρέας και θαλασσινά, ιδίως όταν συνδυάζονται με MAP ή HPP και βελτιστοποιημένες θερμοκρασίες αποθήκευσης (Troy et al., 2016· Ferri et al., 2023· Kontominas et al., 2021). Τρίτον, επιχειρησιακά/κανονιστικά, η αρχιτεκτονική των λύσεων οφείλει να συμμορφώνεται με το ενωσιακό πλαίσιο για υλικά σε επαφή με τρόφιμα, να ελέγχει τη μετανάστευση και να αποδεικνύει ασφάλεια/αποτελεσματικότητα με βάση ρεαλιστικά σενάρια χρήσης (European Commission, 2011· Restuccia et al., 2010· Gupta et al., 2024).

Παρά τα ισχυρά θετικά σήματα, αναδεικνύονται και κρίσιμες προκλήσεις. Η ανακύκλωση ενεργών, πολυστρωματικών ή νανοενισχυμένων συστημάτων παραμένει τεχνικά σύνθετη, γεγονός που καθιστά αναγκαίες λύσεις συμβατότητας με υφιστάμενα ρεύματα διαχείρισης ή εναλλακτικά σενάρια κομποστοποίησης με αποδεδειγμένο περιβαλλοντικό όφελος (Ragaert et al., 2017· Keyes et al., 2024· Panou & Karabagias, 2023). Επιπλέον, ζητήματα καταναλωτικής αντίληψης/εμπιστοσύνης και προσαρμογής κόστους εξακολουθούν να επηρεάζουν τη διείσδυση των τεχνολογιών στην αγορά, ιδίως όταν οι λύσεις εμπλέκουν νέες ουσίες ή ψηφιακές υποδομές ιχνηλασιμότητας (Yan et al., 2022· Casino et al., 2018). Τέλος, η διασύνδεση έξυπνων δεικτών με επικυρωμένα μοντέλα πρόβλεψης αλλοίωσης και μικροβιακής ανάπτυξης απαιτεί περαιτέρω πρότυπα και μελέτες πεδίου, ώστε τα σήματα/μετρήσεις να μεταφράζονται με αξιοπιστία σε αποφάσεις logistics και εμπορικής διάθεσης (Vanderroost et al., 2014· Biji et al., 2015).

Η σύνθεση των ευρημάτων, λοιπόν, δείχνει ότι η ενεργή συσκευασία έχει πλέον σαφή τεχνολογική ωριμότητα για κρίσιμες κατηγορίες ζωικών προϊόντων, με χειροπιαστά οφέλη στη μικροβιακή σταθερότητα, την οξειδωτική προστασία και την επεκτεινόμενη ιχνηλασιμότητα. Η πλήρης αξιοποίηση αυτής της δυναμικής προϋποθέτει σχεδιασμό

υλικών με γνώμονα την ασφάλεια και τη συμβατότητα ανακύκλωσης, προτυποποίηση μεθόδων επικύρωσης σε συνθήκες βιομηχανικής κλίμακας και ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων παρακολούθησης που διασυνδέουν δεδομένα αισθητήρων με τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Yildirim et al., 2017· Yam et al., 2005· GS1, 2022). Μέσα από αυτό το πρίσμα, τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας τεκμηριώνουν ότι η ενεργή συσκευασία, όταν ευθυγραμμίζεται με τις κατάλληλες τεχνολογικές και κανονιστικές προϋποθέσεις, συνεισφέρει ταυτόχρονα στη βελτίωση της ασφάλειας/ποιότητας και στην αποδοτικότερη, πιο βιώσιμη διαχείριση ευαλλοίωτων τροφίμων.

4.2 Κριτική αποτίμηση της βιβλιογραφίας και των υφιστάμενων τεχνολογιών

Η βιβλιογραφία αναδεικνύει μια ώριμη, αλλά άنيση, εικόνα για την αποτελεσματικότητα και τη μεταφερισιμότητα των ενεργών συστημάτων από το εργαστήριο στη βιομηχανική κλίμακα. Τα ισχυρά τεκμήρια υπέρ των βιοδραστικών επικαλύψεων και φιλμ προκύπτουν κυρίως από *in vitro* ή πιλοτικές μελέτες με φυτικά εκχυλίσματα, αιθέρια έλαια και οργανικά οξέα, όπου καταγράφονται μειώσεις μικροβιακών φορτίων και επιβράδυνση οξειδωσης σε κρέας και αλιεύματα (Smaoui et al., 2021· De Lima et al., 2024· Ramos et al., 2012· Merlo et al., 2019· Ntzimani et al., 2023). Ωστόσο, οι διακυμάνσεις ως προς τις συγκεντρώσεις, τη μήτρα του υλικού, το pH/δραστικότητα νερού και τη θερμοκρασία καθιστούν δύσκολη τη σύγκριση μεγεθών επίδρασης, ενώ συχνά απουσιάζει τυποποιημένη μεθοδολογία για ρεαλιστικές καμπύλες αποδέσμευσης και επικύρωση σε δυναμικές συνθήκες εφοδιαστικής (Kerry et al., 2006· Realini & Marcos, 2014). Η ασυνέχεια αυτή μεταφράζεται σε αβεβαιότητα για τη σταθερότητα και το λειτουργικό παράθυρο των δραστικών συστατικών κατά την πραγματική αποθήκευση, ιδίως όταν το ενεργό σύστημα λειτουργεί σε συνέργεια με MAP ή HPP (Ferri et al., 2023· Kontominas et al., 2021).

Σε επίπεδο υλικών, οι βιοβασισμένες πλατφόρμες και οι πολυστρωματικές/σύνθετες δομές προσφέρουν βελτιωμένα φράγματα και μηχανική αντοχή, αλλά εισάγουν trade-offs. Τα πολυμερή πολυσακχαριτών ή πρωτεϊνών συχνά απαιτούν πλαστικοποιητές ή νανοενισχύσεις για να επιτύχουν απαιτήσεις μεταποίησης και ανθεκτικότητας, κάτι που μπορεί να επηρεάσει μετανάστευση, οργανοληπτικό αποτύπωμα και δυνατότητα ανακύκλωσης (Abdullah et al., 2022· Ahankari et al., 2020· Rhim et al., 2013· Wang et al., 2022). Η νανοτεχνολογική ενίσχυση βελτιώνει την απόδοση φραγμού/UV, αλλά εγείρει ανάγκη για αυστηρό έλεγχο ασφάλειας και διαχειρισιμότητας στο τέλος ζωής

(Alizadeh-Sani et al., 2024· Geueke et al., 2018). Η πραγματικότητα των πολυστρωματικών δομών είναι ότι παραμένουν δύσκολες στη μηχανική ανακύκλωση, με κρίσιμες συνέπειες για τη συμμόρφωση με τους στόχους κυκλικής οικονομίας· η βιβλιογραφία προκρίνει χημική ανακύκλωση ή ελεγχόμενα σενάρια κομποστοποίησης, που όμως ενέχουν ενεργειακό/περιβαλλοντικό κόστος και απαιτούν ώριμες αλυσίδες υποδομών (Ragaert et al., 2017· Keyes et al., 2024· Panou & Karabagias, 2023). Εδώ, η κανονιστική ασφάλεια και η αξιολόγηση μετανάστευσης αποκτούν κεντρική σημασία· το πλαίσιο της ΕΕ απαιτεί συμμόρφωση με ειδικούς και ολικούς περιορισμούς μετανάστευσης, με έμφαση σε εναρμόνιση δοκιμών και αξιολόγηση ενδιάμεσων/αποικοδομητικών προϊόντων (European Commission, 2011· Regulation (EC) No 450/2009· Gupta et al., 2024). Παρά τις προόδους, εντοπίζεται κενό σε μακροχρόνιες τοξικολογικές μελέτες για σύνθετα συστήματα και σε δεδομένα πραγματικής χρήσης για συνδυασμούς βιοπολυμερών-δραστικών μορίων (Geueke et al., 2018· Realini & Marcos, 2014).

Η έξυπνη συσκευασία παρουσιάζει ισχυρή ερευνητική δυναμική, αλλά αντιμετωπίζει ζητήματα ωρίμανσης ως προς βαθμονόμηση, αξιοπιστία σήματος και διαλειτουργικότητα δεδομένων. Οι χρωματομετρικοί δείκτες και τα pads απορρόφησης καταγράφουν καλή ευαισθησία, όμως το σήμα επηρεάζεται από υγρασία, φως και μη ομοιόμορφες θερμικές καταπονήσεις, οδηγώντας σε πιθανές ψευδώς θετικές/αρνητικές ενδείξεις χωρίς κατάλληλη μοντελοποίηση αλλοίωσης (Ghaani et al., 2016· Chen et al., 2023· Jiao et al., 2023). Σε θαλασσινά/ιχθυηρά, ενδείξεις ενσωμάτωσης TTIs και έξυπνων ετικετών σε MAP είναι ενθαρρυντικές, αλλά περιορισμένες σε συγκεκριμένες εφοδιαστικές ροές με εντατική επιτήρηση (Katsouli et al., 2022). Η επέκταση σε ιχνηλασιμότητα και διαφάνεια απαιτεί ψηφιακά πρότυπα συμβάντων και λεξιλογίων ώστε τα δεδομένα από αισθητήρες/ετικέτες να ρέουν με ασφάλεια κατά μήκος του chain-of-custody· η σύγκλιση προς EPCIS/CBV 2.0 προσφέρει θεμέλια, αλλά η διακυβέρνηση δεδομένων, το κόστος υλοποίησης και η ωριμότητα blockchain λύσεων παραμένουν εμπόδια για μαζική υιοθέτηση (GS1, 2022· Wang et al., 2021· Casino et al., 2018· Yan et al., 2022).

Ως προς την τεχνοοικονομική διάσταση, η βιβλιογραφία σπανίως συνδυάζει ρητά τεχνολογικά οφέλη με αναλυτικές αποτιμήσεις κόστους κύκλου ζωής· η πλειονότητα των μελετών επικεντρώνεται σε τεχνικά ή μικροβιολογικά αποτελέσματα χωρίς συστηματικό οικονομικό benchmarking εναντίον συμβατικών λύσεων, παρότι οι

ανάγκες κλιμάκωσης, προμήθειας βιοδραστικών και γραμμών μεταποίησης είναι αποφασιστικοί παράγοντες υιοθέτησης (Troy et al., 2016· Realini & Marcos, 2014). Επιπλέον, παρότι η καταναλωτική στάση έναντι «λειτουργικών» συσκευασιών δείχνει αυξανόμενη αποδοχή όταν συνδέεται με ασφάλεια/φρεσκότητα και βιωσιμότητα, παραμένουν ευαίσθητα ζητήματα αποδοχής τιμολόγησης, διαφάνειας ισχυρισμών και σαφήνειας επισημάνσης για να αποφευχθεί η σύγχυση ή η κόπωση πληροφόρησης (Yan et al., 2022). Η κριτική ανάγνωση των πηγών συνεπώς καταδεικνύει ότι η τεχνολογική ωριμότητα δεν αρκεί χωρίς παράλληλη τεκμηρίωση συμμόρφωσης, ανακυκλωσιμότητας και αποδοχής από την αγορά.

Τα ισχυρά στοιχεία της βιβλιογραφίας εδράζονται στην αποδεδειγμένη μικροβιολογική/οξειδωτική προστασία και στις βελτιωμένες ιδιότητες φραγμού/μηχανικής αντοχής που προσφέρουν βιοπολυμερικά και νανοενισχυμένα φιλμ, καθώς και στην αναδυόμενη ικανότητα των έξυπνων συστημάτων να αποτυπώνουν την ιστορία θερμοκρασίας και την ποιότητα σε πραγματικό χρόνο (Abdullah et al., 2022· Vilela et al., 2018· Vanderroost et al., 2014). Τα βασικά κενά αφορούν την τυποποίηση πρωτοκόλλων αποδέσμευσης και επικύρωσης σε δυναμικές συνθήκες, τη μακροχρόνια ασφάλεια/μετανάστευση σε σύνθετες δομές, την ανακυκλωσιμότητα πολυστρωματικών ενεργών υλικών και τη διαλειτουργική αξιοποίηση των δεδομένων έξυπνων ετικετών σε επίπεδο εφοδιαστικής και κανονιστικής συμμόρφωσης (European Commission, 2011· Ragaert et al., 2017· GS1, 2022). Η διόρθωση αυτών των ασυμμετριών αποτελεί προϋπόθεση ώστε τα τεχνικά οφέλη να μετασχηματιστούν σε βιώσιμες, κλιμακώσιμες και κοινωνικά αποδεκτές λύσεις για κρέας και ιχθυηρά.

4.3 Πρακτικές επιπτώσεις και συμβολή της μελέτης

Η σύνθεση των δεδομένων της παρούσας έρευνας καταδεικνύει ότι η ενεργή συσκευασία συνιστούν πλέον στρατηγικό εργαλείο για τη βιομηχανία τροφίμων, με ουσιαστικές πρακτικές επιπτώσεις σε τρία βασικά επίπεδα: την τεχνολογική αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα και κανονιστική συμμόρφωση, και την ενίσχυση της εμπιστοσύνης του καταναλωτή. Η μελέτη συμβάλλει στην ενοποίηση διαφορετικών κλάδων γνώσης – της επιστήμης υλικών, της μικροβιολογίας και των συστημάτων ιχνηλασιμότητας – προσφέροντας μια ολιστική θεώρηση για το πώς η συσκευασία μπορεί να λειτουργήσει όχι απλώς ως παθητικός φορέας προστασίας, αλλά

ως δυναμικό σύστημα διασφάλισης ποιότητας (Yildirim et al., 2017· Kerry et al., 2006· Realini & Marcos, 2014).

Από τεχνολογική σκοπιά, η συμβολή της ενεργού συσκευασίας εντοπίζεται κυρίως στην παράταση της διάρκειας ζωής ευαλλοίωτων τροφίμων όπως το κρέας και τα ιχθυηρά, μέσω συνδυασμένων μηχανισμών απορρόφησης οξυγόνου, δέσμευσης υγρασίας και αναστολής μικροβιακής ανάπτυξης (Ahuja et al., 2024· Smaoui et al., 2021· Figueroa-Enríquez et al., 2024). Η χρήση βιοδραστικών επικαλύψεων με φυτικά εκχυλίσματα, αιθέρια έλαια ή φαινολικές ενώσεις έχει ήδη μεταφραστεί σε πιλοτικές εφαρμογές με μετρήσιμα αποτελέσματα στη σταθεροποίηση χρώματος και οσμής, μειώνοντας ταυτόχρονα τις απώλειες προϊόντων σε επίπεδο εφοδιαστικής αλυσίδας (De Lima et al., 2024· Manzoor et al., 2023· Zawani et al., 2022). Η παρούσα μελέτη επιβεβαιώνει ότι οι τεχνολογίες αυτές, όταν συνδυάζονται με συστήματα τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) ή υψηλής υδροστατικής πίεσης (HPP), ενισχύουν τη σταθερότητα και καθυστερούν την αλλοίωση, συμβάλλοντας σε προϊόντα με υψηλότερη μικροβιολογική ασφάλεια και μειωμένη ανάγκη συντηρητικών (Kontominas et al., 2021· Ferri et al., 2023).

Σε επίπεδο βιωσιμότητας, τα ευρήματα τεκμηριώνουν την αναγκαιότητα μιας ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής προσέγγισης που να συνδέει την απόδοση συντήρησης με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του υλικού. Τα βιοπολυμερικά φιλμ από πολυγαλακτικό οξύ (PLA), νανοκυτταρίνη ή χιτοζάνη δείχνουν σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ και της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά πλαστικά, αλλά η αποδοτικότητα των συστημάτων εξαρτάται από τη δυνατότητα συλλογής, ανακύκλωσης ή κομποστοποίησης σε πραγματικές συνθήκες (Abdullah et al., 2022· Ahankari et al., 2020· Alizadeh-Sani et al., 2024). Η εφαρμογή της αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασικό εργαλείο λήψης αποφάσεων για την επιλογή υλικών και σχεδίων φιλμ, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικά, ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια (Islam et al., 2024· Keyes et al., 2024). Η εργασία συμβάλλει στην εδραίωση της ανάγκης για εναρμονισμένα κριτήρια LCA, που θα επιτρέπουν στις επιχειρήσεις να ποσοτικοποιούν τα οφέλη από τη χρήση βιοδιασπώμενων και ενεργών φιλμ, αποδεικνύοντας παράλληλα τη συμμόρφωση με το υπό διαμόρφωση Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2024).

Η συμβολή της μελέτης είναι επίσης σημαντική στο επίπεδο της κανονιστικής συμμόρφωσης και της ασφάλειας. Η ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας ανέδειξε ότι, ενώ οι τεχνολογίες ενεργών φιλμ είναι ώριμες σε ερευνητικό επίπεδο, η εμπορική τους υιοθέτηση καθυστερεί λόγω κενών σε δοκιμές μετανάστευσης και τοξικολογικών εκτιμήσεων για τα νέα ενεργά συστατικά (Gupta et al., 2024· Geueke et al., 2018). Η εργασία συμβάλλει στη διατύπωση της ανάγκης για νέα πρωτόκολλα ασφάλειας και επικύρωσης που να συνδέουν τα αποτελέσματα *in vitro* με τα σενάρια πραγματικής χρήσης, στο πνεύμα του Κανονισμού (ΕΚ) 450/2009 για ενεργά υλικά. Μια τέτοια προσέγγιση εξασφαλίζει ότι η τεχνολογική καινοτομία θα ενισχύει την ασφάλεια τροφίμων χωρίς να εισάγει νέες πηγές κινδύνου.

Η μελέτη συμβάλλει, επίσης, στην ανάδειξη του ρόλου των έξυπνων συστημάτων ως πυρήνα μιας νέας προσέγγισης στη διαχείριση ποιότητας και ιχνηλασιμότητας. Η αξιοποίηση αισθητήρων φρεσκότητας, χρονοθερμοκρασιακών δεικτών (TTI) και ψηφιακών ετικετών με τεχνολογίες RFID και blockchain επιτρέπει τον πραγματικό χρόνο παρακολούθησης των κρίσιμων παραμέτρων ασφάλειας και τη διαφανή ενημέρωση του καταναλωτή (Katsouli et al., 2022· Giannakourou et al., 2005· Wang et al., 2021). Η ενσωμάτωση προτύπων EPCIS/CBV 2.0 και έξυπνων συμβάσεων επιτρέπει τη ροή αξιόπιστων δεδομένων σε όλο το μήκος της ψυκτικής αλυσίδας, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη στην προέλευση και τη φρεσκότητα του προϊόντος (GS1, 2022· Casino et al., 2018). Έτσι, η συμβολή της παρούσας μελέτης εκτείνεται πέρα από τη φυσικοχημική και μικροβιολογική σταθερότητα: περιλαμβάνει και τη μεταρρύθμιση της πληροφορίας και της διαφάνειας στη διαχείριση τροφίμων.

Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, η ενεργή συσκευασία δύναται να μετασχηματίσει τον τρόπο που η βιομηχανία και οι καταναλωτές αντιλαμβάνονται τη σχέση μεταξύ ασφάλειας και βιωσιμότητας. Οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν τη σπατάλη τροφίμων, να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη των πελατών τους και να συμμορφωθούν με τις ευρωπαϊκές πολιτικές για μηδενικά απόβλητα, προβάλλοντας παράλληλα υπεύθυνο περιβαλλοντικό προφίλ (Islam et al., 2024· Ellen MacArthur Foundation, 2022). Η παρούσα μελέτη συμβάλλει θεωρητικά και πρακτικά στην κατεύθυνση αυτή, προτείνοντας τη συσχέτιση τεχνολογικών, περιβαλλοντικών και κανονιστικών δεικτών μέσα από ολιστικά μοντέλα αξιολόγησης συσκευασίας, ικανά να συνδυάσουν την ποιότητα, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα. Μέσα από αυτό το πλαίσιο, η ενεργή συσκευασία παύει να είναι απλώς τεχνολογική καινοτομία· αναδεικνύεται σε μοχλό

μετάβασης προς μια κυκλική, διαφανή και αξιόπιστη αλυσίδα τροφίμων (Yam et al., 2005· Yildirim et al., 2017· Yan et al., 2022).

4.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η επιστημονική πρόοδος στον τομέα της ενεργής συσκευασίας έχει επιτύχει σημαντικά βήματα στην κατανόηση των μηχανισμών δράσης, των υλικών και των λειτουργικών τους δυνατοτήτων. Ωστόσο, η ανάλυση της βιβλιογραφίας αποκαλύπτει σαφή ερευνητικά κενά και ανάγκες για περαιτέρω διερεύνηση, που αφορούν τόσο τη θεμελιώδη γνώση όσο και τη βιομηχανική εφαρμογή. Η μελλοντική έρευνα οφείλει να επικεντρωθεί στη δημιουργία συστημάτων που συνδυάζουν αποτελεσματικότητα, ασφάλεια και περιβαλλοντική βιωσιμότητα, με βάση τεκμηριωμένα δεδομένα κύκλου ζωής, τοξικολογικές αξιολογήσεις και καταναλωτική αποδοχή (Realini & Marcos, 2014· Geueke et al., 2018· Alizadeh-Sani et al., 2024).

Μια πρώτη κατεύθυνση αφορά την πειραματική επικύρωση ενεργών και βιοδραστικών υλικών σε συνθήκες βιομηχανικής κλίμακας. Παρότι πλήθος ερευνών έχει αποδείξει την αντιμικροβιακή και αντιοξειδωτική δράση φυτικών εκχυλισμάτων, αιθέριων ελαίων και νανοενισχυμένων φιλμ, οι περισσότερες μελέτες περιορίζονται σε εργαστηριακό επίπεδο ή σε βραχυχρόνιες εφαρμογές (Smaoui et al., 2021· Ramos et al., 2012· De Lima et al., 2024· Figueroa-Enríquez et al., 2024). Οι μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να στοχεύουν στη μεταφορά τεχνολογίας από το εργαστήριο στη βιομηχανική παραγωγή, με πιλοτικές δοκιμές σε πραγματικά σενάρια αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής, ειδικά για φρέσκα και νωπά τρόφιμα μικρής διάρκειας ζωής. Η ανάπτυξη προτυποποιημένων πρωτοκόλλων για την αξιολόγηση μικροβιολογικών, φυσικοχημικών και αισθητηριακών παραμέτρων θα επιτρέψει τη συγκρισιμότητα μεταξύ διαφορετικών τύπων ενεργών συστημάτων και θα καθιερώσει κοινά σημεία αναφοράς για τη βιομηχανία (Kerry et al., 2006· Realini & Marcos, 2014· Vilela et al., 2018).

Δεύτερον, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση γύρω από την τοξικολογική ασφάλεια και τη δυναμική μετανάστευσης των δραστικών ουσιών από τα φιλμ προς τα τρόφιμα ή το περιβάλλον τους. Παρά τη ρυθμιστική πρόοδο μέσω του Κανονισμού (ΕΚ) 450/2009, τα διαθέσιμα δεδομένα για τα προϊόντα αποικοδόμησης, την αλληλεπίδραση νανοσωματιδίων με τα τρόφιμα και τις επιδράσεις χρόνου/θερμοκρασίας είναι περιορισμένα (Gupta et al., 2024· Geueke et al., 2018· Abdullah et al., 2022). Οι

μελλοντικές έρευνες πρέπει να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη μακροπρόθεσμων προσομοιώσεων μετανάστευσης υπό ρεαλιστικές συνθήκες και στη χρήση προηγμένων τεχνικών χαρακτηρισμού (π.χ. LC-MS, Raman spectroscopy) για την παρακολούθηση αλληλεπιδράσεων τροφίμου-υλικού. Παράλληλα, η αξιολόγηση της βιοσυμβατότητας και της τοξικότητας των νανοενισχυμένων φιλμ αποτελεί προτεραιότητα, καθώς η χρήση νανοκυτταρίνης, TiO₂, ZnO και παρόμοιων υλικών εγείρει ερωτήματα για τη μακροπρόθεσμη επίδρασή τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (Ahankari et al., 2020· Rhim et al., 2013· Alizadeh-Sani et al., 2024).

Τρίτον, μια σημαντική προοπτική εστιάζεται στην ολοκληρωμένη περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση μέσω Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC). Οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν σε περιβαλλοντικές ή τεχνολογικές μεταβλητές, αφήνοντας αδιερεύνητη τη συσχέτιση περιβαλλοντικού αποτυπώματος και οικονομικής βιωσιμότητας. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να αναπτύξει συνδυαστικά μοντέλα LCA/LCC, ενσωματώνοντας μεταβλητές όπως οι εκπομπές CO₂, η κατανάλωση ενέργειας, οι απώλειες τροφίμων και το κόστος επεξεργασίας αποβλήτων (Islam et al., 2024· Keyes et al., 2024· Panou & Karabagias, 2023). Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα κατεύθυνση αποτελεί η σύγκριση διαφορετικών τύπων ενεργών φιλμ (PLA, PHA, χιτοζάνη, νανοκυτταρίνη), ώστε να τεκμηριωθούν οι πραγματικές περιβαλλοντικές ωφέλειες σε σχέση με τα συμβατικά πλαστικά, μέσα από πλήρεις αλυσίδες αξίας που περιλαμβάνουν μεταφορά, αποθήκευση και διαχείριση αποβλήτων.

Μια τέταρτη ερευνητική προτεραιότητα αφορά την ενοποίηση έξυπνων τεχνολογιών παρακολούθησης με τα ενεργά συστήματα, οδηγώντας στην ανάπτυξη υβριδικών συσκευασιών. Η σύνδεση αισθητήρων φρεσκότητας, TTIs, RFID και blockchain με ενεργά φιλμ μπορεί να επιτρέψει τη συνεχή παρακολούθηση και τη δυναμική προσαρμογή των συνθηκών αποθήκευσης (Katsouli et al., 2022· Giannakourou et al., 2005· Wang et al., 2021). Ερευνητικά προγράμματα θα πρέπει να εστιάζουν σε διαλειτουργικά πρότυπα δεδομένων (π.χ. EPCIS/CBV 2.0) και στην αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη διάρκειας ζωής με βάση τα πραγματικά σήματα αλλοίωσης. Παράλληλα, η ανάλυση κόστους-οφέλους τέτοιων συστημάτων και η εκτίμηση της καταναλωτικής αποδοχής τους υπό διαφορετικά επίπεδα ενημέρωσης και τιμολόγησης αποτελεί κρίσιμο αντικείμενο για μελλοντική διερεύνηση (Yan et al., 2022· Casino et al., 2018).

Τέλος, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εμβαθύνει στη σχέση μεταξύ τεχνολογικής και κοινωνικής βιωσιμότητας, δηλαδή πώς οι καταναλωτές, οι παραγωγοί και οι ρυθμιστικές αρχές αντιλαμβάνονται την αξία και το ρίσκο της ενεργού συσκευασίας. Παρότι η βιώσιμη ανάπτυξη και η ασφάλεια τροφίμων συνιστούν κοινό στόχο, η κοινωνική αποδοχή εξαρτάται από παράγοντες όπως η εμπιστοσύνη στις νέες τεχνολογίες, η αντίληψη για το περιβαλλοντικό όφελος και η ευκολία ανακύκλωσης (Liu et al., 2013· Yan et al., 2022· Ellen MacArthur Foundation, 2022). Η ενσωμάτωση κοινωνικών δεικτών στις μελέτες LCA/LCC και η διερεύνηση προτιμήσεων των νεότερων γενεών καταναλωτών (Millennials, Gen Z) θα συμβάλουν στην κατανόηση των πραγματικών παραμέτρων που καθορίζουν την αποδοχή ή απόρριψη των νέων τεχνολογιών.

Η μελλοντική έρευνα στον τομέα της ενεργής συσκευασίας θα πρέπει να κινηθεί προς μια διεπιστημονική, ολιστική και βιώσιμη κατεύθυνση, συνδέοντας φυσικοχημική καινοτομία, τοξικολογική ασφάλεια, περιβαλλοντική αξιολόγηση και κοινωνική αποδοχή. Μέσα από αυτήν την πολυεπίπεδη προσέγγιση, θα καταστεί εφικτή η πλήρης ενσωμάτωση των ενεργών συστημάτων στην αλυσίδα αξίας των τροφίμων, εξασφαλίζοντας ασφάλεια, ποιότητα και διαφάνεια σε ένα πλαίσιο κυκλικής οικονομίας (Abdullah et al., 2022· Realini & Marcos, 2014· Yildirim et al., 2017· Yam et al., 2005).

Λίστα Βιβλιογραφικών Αναφορών

- Abdullah, N., Cai, J., Hafeez, M. A., Wang, Q., Farooq, S., Huang, Q., Tian, W., & Xiao, J. (2022). Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1000116>
- Adak, B., Baidya, S., & Teramoto, Y. (2025). Biopolymers and their nanocomposites coated paper-based high barrier and sustainable food packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 367, 123966. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123966>
- Ahankari, S. S., Subhedar, A. R., Bhadauria, S. S., & Dufresne, A. (2020). Nanocellulose in food packaging: A review. *Carbohydrate Polymers*, 255, 117479. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117479>
- Ahmed, M. W., Haque, M. A., Mohibullah, M., Khan, M. S. I., Islam, M. A., Mondal, M. H. T., & Ahmmed, R. (2022). A review on active packaging for quality and safety of foods: Current trends, applications, prospects and challenges. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100913. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100913>
- Ahuja, A., Singh, D., Singh, V., Singh, A. et al.. (2024). Oxygen scavengers in active food packaging systems. In *Smart food packaging systems* (pp. 103–129). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394189595.ch4>
- Alizadeh-Sani., Khezerlou, A., Tavassoli, M., Abedini, A. H., & McClements, D. J. (2024). Development of sustainable UV-screening food packaging materials: A review of recent advances. *Trends in Food Science & Technology*, 145, 104366. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104366>
- Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Ribeiro-Santos, R., Tomé, S., Fernando, A. L., Silva, A. S., & Vilarinho, F. (2025). Emerging Trends in Active Packaging for Food: A Six-Year Review. *Foods*, 14(15), 2713. <https://doi.org/10.3390/foods14152713>
- Appendini, P., & Hotchkiss, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(2), 113–126. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00012-7)
- Azevedo, A. G., Barros, C., Miranda, S., Machado, A. V., Castro, O., Silva, B., Saraiva, M., Silva, A. S., Pastrana, L., Carneiro, O. S., & Cerqueira, M. A. (2022). Active

- Flexible Films for Food Packaging: a review. *Polymers*, 14(12), 2442. <https://doi.org/10.3390/polym14122442>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2005). *Water activity in foods: Fundamentals and applications*. Wiley-Blackwell.
- Basavegowda, N., & Baek, K.-H. (2021). Advances in Functional Biopolymer-Based Nanocomposites for Active Food Packaging Applications. *Polymers*, 13(23), 4198. <https://doi.org/10.3390/polym13234198>
- Biji, K. B., Ravishankar, C. N., Mohan, C. O., & Gopal, T. K. S. (2015). Smart packaging systems for food applications: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6125–6135. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1766-7>
- Blázquez, I. O., Burgos, M. G., Pérez-Pulido, R., Gálvez, A., & Lucas, R. (2017). Inactivation of *Listeria* in Foods Packed in Films Activated with Enterocin AS-48 plus Thymol Singly or in Combination with High-Hydrostatic Pressure Treatment. *Coatings*, 7(11), 204. <https://doi.org/10.3390/coatings7110204>
- Bócoli, P. F. J., Gomes, V. E. d. S., Maia, A. A. D., & Marangoni Júnior, L. (2025). Perspectives on Eco-Friendly Food Packaging: Challenges, Solutions, and Trends. *Foods*, 14(17), 3062. <https://doi.org/10.3390/foods14173062>
- Brody, A., Strupinsky, E., & Kline, L. (2001). *Active packaging for food applications*. <https://doi.org/10.1201/9781420031812>
- BSEtec. (2024, October 8). *Blockchain-Backed food Traceability [An Overview]*. BSEtec. <https://www.bsetec.com/blog/blockchain-food-supply-chain-traceability/>
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2018). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- Chen, L., Wang, W., Wang, W., & Zhang, J. (2023). Effect of anthocyanins on colorimetric indicator film Properties. *Coatings*, 13(10), 1682. <https://doi.org/10.3390/coatings13101682>
- Coma, V. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat Science*, 78(1-2), 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.035>

- De Lima, A. F., De L Leite, R. H., Pereira, M. W. F., Silva, M. R. L., De Araújo, T. L. a. C., De Lima Júnior, D. M., De N B Gomes, M., & De O Lima, P. (2024). Chitosan Coating with Rosemary Extract Increases Shelf Life and Reduces Water Losses from Beef. *Foods*, 13(9), 1353. <https://doi.org/10.3390/foods13091353>
- Domínguez, R., Pateiro, M., Munekata, P. E. S., McClements, D. J., & Lorenzo, J. M. (2021). Encapsulation of Bioactive Phytochemicals in Plant-Based Matrices and Application as Additives in Meat and Meat Products. *Molecules*, 26(13), 3984. <https://doi.org/10.3390/molecules26133984>
- Douaki, A., Ahmed, M., Longo, E., Windisch, G., Riaz, R., Inam, S., Tran, T. N., Papadopoulou, E. L., Athanassiou, A., Boselli, E., Petti, L., & Lugli, P. (2025). Battery-Free, stretchable, and autonomous smart packaging. *Advanced Science*. <https://doi.org/10.1002/advs.202417539>
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in Smart Packaging Concepts for Food: An Extensive review. *Foods*, 9(11), 1628. <https://doi.org/10.3390/foods9111628>
- Ellen MacArthur Foundation. (2022). *Circular economy in food packaging*.
- Ercolini, D., Ferrocino, I., Nasi, A., Ndagijimana, M., Vernocchi, P., La Storia, A., Laghi, L., Mauriello, G., Guerzoni, M. E., & Villani, F. (2011). Monitoring of microbial metabolites and bacterial diversity in beef stored under different packaging conditions. *Applied and environmental microbiology*, 77(20), 7372–7381. <https://doi.org/10.1128/AEM.05521-11>
- 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 Bioplastics. (2023). *Bioplastics market data 2023*.
- European Commission. (2011). *Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food*. Official Journal of the European Union, L 12, 1–89.
- European Commission. (2024). *Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR)*.

- Federation, B. P. (n.d.). *Packaging Waste directive & Compostable packaging*. British Plastics Federation. Retrieved 28/8/2025 https://www.bpf.co.uk/topics/Standards_for_compostability.aspx
- Ferri, G., Lauteri, C., Scattolini, M., & Vergara, A. (2023). Shelf life and safety of vacuum packed HPP-Treated soaked cod fillets: effects of salt content and multilayer plastic film. *Foods*, 12(1), 179. <https://doi.org/10.3390/foods12010179>
- Figuerola-Enríquez, R., Urrea-García, G. R., Hernández-Cocoletzi, H., López-Luna, J., & Calderón-Domínguez, G. (2024). Biodegradable active films with antioxidant and antimicrobial plant extracts for meat preservation. *Processes*, 12(10), 2115. <https://doi.org/10.3390/pr12102115>
- Fitri, N., Chan, S. X. Y., Lah, N. H. C., Jam, F. A., Misnan, N. M., Kamal, N., Sarian, M. N., Lazaldin, M. a. M., Low, C. F., Hamezah, H. S., Rohani, E. R., Mediani, A., & Abas, F. (2022). A comprehensive review on the processing of dried fish and the associated chemical and nutritional changes. *Foods*, 11(19), 2938. <https://doi.org/10.3390/foods11192938>
- Galvez, J. F., Mejuto, J., & Simal-Gandara, J. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 107, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.011>
- García, O. (2020, December 30). *Packaging, an essential part of the success of HPP technology*. Hiperbaric. <https://www.hiperbaric.com/en/packaging-an-essential-part-of-the-success-of-hpp-technology-2/>
- George, W., & Al-Ansari, T. (2023). Review of blockchain applications in food supply chains. *Blockchains*, 1(1), 34–57. <https://doi.org/10.3390/blockchains1010004>
- Geueke, B., Groh, K., & Muncke, J. (2018). Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *Journal of Cleaner Production*, 193, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005>
- Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>

- Gialamas, H., Zinoviadou, K. G., Biliaderis, C. G., & Koutsoumanis, K. P. (2010). Development of a novel bioactive packaging based on the incorporation of *Lactobacillus sakei* into sodium-caseinate films for controlling *Listeria monocytogenes* in foods. *Food Research International*, 43(10), 2402–2408. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.020>
- Giannakourou, M., & Taoukis, P. (2021). Changes during Food Freezing and Frozen Storage. *Foods*, 10(11), 2525. <https://doi.org/10.3390/foods10112525>
- Giannakourou, M., Koutsoumanis, K., Nychas, G., & Taoukis, P. (2005). Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *International Journal of Food Microbiology*, 102(3), 323–336. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.037>
- Goedecke, C. (2025, January 17). *Chemical recycling – a key technology for the circular economy*. ChemistryViews. <https://www.chemistryviews.org/chemical-recycling-a-key-technology-for-the-circular-economy/>
- González-López, M. E., De Jesús Calva-Estrada, S., Gradilla-Hernández, M. S., & Barajas-Álvarez, P. (2023). Current trends in biopolymers for food packaging: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1225371>
- Gram, L., & Dalgaard, P. (2002). Fish spoilage bacteria--problems and solutions. *Current opinion in biotechnology*, 13(3), 262–266. [https://doi.org/10.1016/s0958-1669\(02\)00309-9](https://doi.org/10.1016/s0958-1669(02)00309-9)
- GS1. (2022). *EPCIS and CBV Standard, Version 2.0*. GS1 AISBL.
- Gupta, R. K., Pipliya, S., Karunanithi, S., U, G. M. E., Kumar, S., Mandliya, S., Srivastav, P. P., Suthar, T., Shaikh, A. M., Harsányi, E., & Kovács, B. (2024). Migration of Chemical Compounds from Packaging Materials into Packaged Foods: Interaction, Mechanism, Assessment, and Regulations. *Foods*, 13(19), 3125. <https://doi.org/10.3390/foods13193125>
- Haghighatpanah, N., Khosravi-Darani, K., & Farhadnejad, H. (2022). Development of mung bean starch/pullulan edible film incorporated with oregano essential oil for

- preservation of beef. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 42(5), 789–802. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2022.e32>
- Han, J. H. (2014). Innovations in food packaging. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2011-0-06876-x>
- Han, J. H., Zhao, Y., & Krochta, J. M. (2018). Edible coatings and films. In J. H. Han (Ed.), *Packaging for nonthermal processing of food* (pp. 275–309). Wiley-Blackwell.
- Holman, B. W. B., Kerry, J. P., & Hopkins, D. L. (2018). Meat packaging solutions to current industry challenges: A review. *Meat science*, 144, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.026>
- Islam, M., Xayachak, T., Haque, N., Lau, D., Bhuiyan, M., & Pramanik, B. K. (2024). Impact of bioplastics on environment from its production to end-of-life. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 151–166. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.113>
- ISO 14040. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- Jacinto-Valderrama, R. A., Andrade, C. T., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., & Conte-Junior, C. A. (2023). Recent trends in active packaging using nanotechnology to inhibit oxidation and microbiological growth in muscle foods. *Foods*, 12(19), 3662. <https://doi.org/10.3390/foods12193662>
- Jiao, X., Xie, J., Du, H., Bian, X., Wang, C., Zhou, L., & Wen, Y. (2023). Antibacterial smart absorbent pad with Janus structure for meat preservation. *Food Packaging and Shelf Life*, 37, 101066. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101066>
- Kapetanakou, A. E., Pateraki, G., & Skandamis, P. N. (2020). Developing a commercial antimicrobial active packaging system of ground beef based on “Tsipouro” alcoholic distillate. *Foods*, 9(9), 1171. <https://doi.org/10.3390/foods9091171>
- Kapetanakou, A., Agathagelou, E., & Skandamis, P. (2014). Storage of pork meat under modified atmospheres containing vapors from commercial alcoholic beverages. *International Journal of Food Microbiology*, 178, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.02.021>

- Katsouli, M., Semenoglou, I., Kotsiri, M., Gogou, E., Tsironi, T., & Taoukis, P. (2022). Active and intelligent packaging for enhancing modified atmospheres and monitoring quality and shelf life of packed gilthead seabream fillets at isothermal and variable temperature conditions. *Foods*, 11(15), 2245. <https://doi.org/10.3390/foods11152245>
- Kerry, J. P., O'Grady, M. N., & Hogan, S. A. (2006). Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat science*, 74(1), 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.024>
- Keyes, A., Saffron, C. M., Manjure, S., & Narayan, R. (2024). Biobased Compostable Plastics End-of-Life: Environmental assessment including carbon footprint and microplastic impacts. *Polymers*, 16(21), 3073. <https://doi.org/10.3390/polym16213073>
- Kontominas, M. G., Badeka, A. V., Kosma, I. S., & Nathanailides, C. I. (2021). Innovative Seafood Preservation Technologies: Recent Developments. *Animals*, 11(1), 92. <https://doi.org/10.3390/ani11010092>
- Koutsoumanis, K., & Sofos, J. N. (2004). Microbial contamination and shelf life of fresh meat: a review. In J. N. Sofos (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 163–207). Elsevier.
- Koutsoumanis, K., Stamatiou, A., Skandamis, P., & Nychas, G. J. (2006). Development of a microbial model for the combined effect of temperature and pH on spoilage of ground meat, and validation of the model under dynamic temperature conditions. *Applied and environmental microbiology*, 72(1), 124–134. <https://doi.org/10.1128/AEM.72.1.124-134.2006>
- Kumar, L., Tyagi, P., Lucia, L., & Pal, L. (2025). Innovations in Edible Packaging Films, Coatings, and Antimicrobial Agents for Applications in Food Industry. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 24(4), e70217. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70217>
- Kuswandi, B. (2017). Freshness sensors for food packaging. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.21876-3>

- Label and Narrow Web. (2023, May 18). *New technologies to revolutionize food labels and packaging* - Label and Narrow Web. <https://www.labelandnarrowweb.com/exclusives/new-technologies-to-revolutionize-food-labels-and-packaging/>
- Liu, R., Pieniak, Z., & Verbeke, W. (2013). Consumers' attitudes and behaviour towards safe food in China: A review. *Food Control*, 33(1), 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.01.051>
- López-Gálvez, F., Gómez, P. A., Artés, F., Artés-Hernández, F., & Aguayo, E. (2021). Interactions between Microbial Food Safety and Environmental Sustainability in the Fresh Produce Supply Chain. *Foods*, 10(7), 1655. <https://doi.org/10.3390/foods10071655>
- Lopez-Rubio, A., Gavara, R., & Lagaron, J. M. (2006). Bioactive packaging: turning foods into healthier foods through biomaterials. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 567–575. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.012>
- Lou, W., Huang, Z., Shao, Q., Shan, Y., Shi, D., Chen, Z., Zhang, J., Yu, W., Wang, J., Yang, H., & Cai, M. (2025). Recent advances in active packaging: Insights into novel functional elements, response strategies and applications for food preservation. *Food Packaging and Shelf Life*, 49, 101489. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101489>
- Manzoor, A., Yousuf, B., Pandith, J. A., & Ahmad, S. (2023). Plant-derived active substances incorporated as antioxidant, antibacterial or antifungal components in coatings/films for food packaging applications. *Food Bioscience*, 53, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102717>
- Mellinas, C., Ramos, M., Jiménez, A., & Garrigós, M. C. (2020). Recent Trends in the Use of Pectin from Agro-Waste Residues as a Natural-Based Biopolymer for Food Packaging Applications. *Materials*, 13(3), 673. <https://doi.org/10.3390/ma13030673>
- Merlo, T. C., Contreras-Castillo, C. J., Saldaña, E., Barancelli, G. V., Dargelio, M. D. B., Yoshida, C. M. P., Ribeiro, E. E., Junior, Massarioli, A., & Venturini, A. C. (2019). Incorporation of pink pepper residue extract into chitosan film combined with a modified atmosphere packaging: Effects on the shelf life of salmon fillets.

Food Research International, 125, 108633.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108633>

Miltz, J., & Perry, M. (2005). Packaging for food preservation. In G. W. Gould (Ed.), *New methods of food preservation* (pp. 301–333). Springer.

Mkhari, T., Adeyemi, J. O., & Fawole, O. A. (2025). Recent Advances in the fabrication of intelligent Packaging for food Preservation: a review. *Processes*, 13(2), 539.
<https://doi.org/10.3390/pr13020539>

Molina, J., Frías-Celayeta, J., Bolton, D., & Botinestean, C. (2024). A Comprehensive review of cured meat products in the Irish market: Opportunities for reformulation and processing. *Foods*, 13(5), 746. <https://doi.org/10.3390/foods13050746>

Nalbandian, S. (2015). A survey on Internet of Things: Applications and challenges. *2015 International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK)*, 165–169. <https://doi.org/10.1109/ictck.2015.7582664>

Nešić, A., Cabrera-Barjas, G., Dimitrijević-Branković, S., Davidović, S., Radovanović, N., & Delattre, C. (2019). Prospect of Polysaccharide-Based Materials as Advanced Food Packaging. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(1), 135.
<https://doi.org/10.3390/molecules25010135>

Nie, X., Zuo, Z., Zhang, R., Luo, S., Chi, Y., Yuan, X., Song, C., & Wu, Y. (2025). New advances in biological preservation technology for aquatic products. *Npj Science of Food*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00372-4>

Ntzimani, A., Kalamaras, A., Tsironi, T., & Taoukis, P. (2023). Shelf Life Extension of Chicken Cuts Packed under Modified Atmospheres and Edible Antimicrobial Coatings. *Applied Sciences*, 13(6), 4025. <https://doi.org/10.3390/app13064025>

Nychas, G. E., Panagou, E. Z., & Mohareb, F. (2016). Novel approaches for food safety management and communication. *Current Opinion in Food Science*, 12, 13–20.
<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.06.005>

Nychas, G. J., Skandamis, P. N., Tassou, C. C., & Koutsoumanis, K. P. (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat science*, 78(1-2), 77–89.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.020>

- Ojagh, S. M., Rezaei, M., Razavi, S. H., & Hosseini, S. M. H. (2010). Development and evaluation of a novel biodegradable film made from chitosan and cinnamon essential oil with low molecular weight. *Food Chemistry*, 122(1), 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.033>
- Oliveira, I., Pinto, T., Afonso, S., Karaś, M., Szymanowska, U., Gonçalves, B., & Vilela, A. (2025). Sustainability in Bio-Based Edible Films, Coatings, and Packaging for Small Fruits. *Applied Sciences*, 15(3), 1462. <https://doi.org/10.3390/app15031462>
- Panou, A., & Karabagias, I. (2023). Biodegradable packaging materials for foods preservation: sources, advantages, limitations, and future perspectives. *Coatings*, 13(7), 1176. <https://doi.org/10.3390/coatings13071176>
- Parlapani, F. F., Mallouchos, A., Haroutounian, S. A., & Boziaris, I. S. (2014). Microbiological spoilage and investigation of volatile profile during storage of sea bream fillets under various conditions. *International journal of food microbiology*, 189, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.08.006>
- Perera, K. Y., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2023). Biopolymer-Based Sustainable Food Packaging Materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods*, 12(12), 2422. <https://doi.org/10.3390/foods12122422>
- Pires, J. R. A., Almeida, K. M., Augusto, A. S., Vieira, É. T., Fernando, A. L., & Souza, V. G. L. (2022). Application of Biocomposite Films of Chitosan/Natural Active Compounds for Shelf Life Extension of Fresh Poultry Meat. *Journal of Composites Science*, 6(11), 342. <https://doi.org/10.3390/jcs6110342>
- Poimenidou, S. V., Bikouli, V. C., Gardeli, C., Mitsi, C., Tarantilis, P. A., Nychas, G., & Skandamis, P. N. (2015). Effect of single or combined chemical and natural antimicrobial interventions on Escherichia coli O157:H7, total microbiota and color of packaged spinach and lettuce. *International Journal of Food Microbiology*, 220, 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.12.013>
- Polak, T., Mejaš, R., Jamnik, P., Kralj Cigić, I., Poklar Ulrih, N., & Cigić, B. (2021). Accumulation and Transformation of Biogenic Amines and Gamma-Aminobutyric Acid (GABA) in Chickpea Sourdough. *Foods*, 10(11), 2840. <https://doi.org/10.3390/foods10112840>

- Prasad, P., & Kochhar, A. (2014). Active Packaging in food Industry: a review. *IOSR Journal of Environmental Science Toxicology and Food Technology*, 8(5), 01–07. <https://doi.org/10.9790/2402-08530107>
- Puebla-Duarte, A. L., Santos-Sauceda, I., Rodríguez-Félix, F., Iturralde-García, R. D., Fernández-Quiroz, D., Pérez-Cabral, I. D., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2023). Active and Intelligent Packaging: A Review of the Possible Application of Cyclodextrins in Food Storage and Safety Indicators. *Polymers*, 15(21), 4317. <https://doi.org/10.3390/polym15214317>
- Quintavalla, S., & Vicini, L. (2002). Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat Science*, 62(3), 373–380. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00121-](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00121-)
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Ramos, M., Jiménez, A., Peltzer, M., & Garrigós, M. C. (2012). Characterization and antimicrobial activity studies of polypropylene films with carvacrol and thymol for active packaging. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.031>
- Ramos, M., Jiménez, A., Peltzer, M., & Garrigós, M. C. (2014). Development of novel nano-biocomposite antioxidant films based on poly (lactic acid) and thymol for active packaging. *Food Chemistry*, 162, 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.026>
- Rasheed, J. L., Evangeline, C. A., Azeez, N., & Samuel, J. (2025). Modified atmospheric packaging in various food products. *American Journal of Food Science and Technology*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.54536/ajfst.v4i1.2942>
- Rawnsley, J. (2024, November 25). Bioplastics start-ups gain ground but green credentials face scrutiny. *Financial Times*. <https://www.ft.com/content/39ec3f72-5840-4127-9c8f-f1f8d5bf036d>
- Realini, C. E., & Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science*, 98(3), 404–419. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.031>

- Record Packaging. (n.d.). *Gas flush packaging & MAP packaging*. Retrieved October 2, 2025, from <https://recordpackaging.com>
- Reddy, T. R. K., Jayaramudu, T., Varaprasad, K., Sani, R. K., Reddy, G. V. S., & Kim, H. J. (2025). A review on nanocellulose in food packaging: A paradigm shift for enhanced mechanical strength and barrier performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146672. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146672>
- Regulation (EC) No 450/2009 of the European Parliament and of the Council of 29 May 2009 on active and intelligent materials and articles intended to come into contact with food.
- Remya, S., Mohan, C. O., & Ravishankar, C. N. (2020). Oxygen Scavenger Packaging for Seafood Preservation. *Fishery Technology*, 57(3). <https://doi.org/10.56093/ft.v57i3.103000>
- Repin, D., Gablina, M., Repina, N., Cherednichenko, K., Li, W., Gushchina, Y., Ivanov, E., Melnikov, V., Fakhrullin, R., & Vinokurov, V. (2025). Cellulose-Based Composite Materials for Fresh Water Extraction from Atmospheric Air. *Polymers*, 17(3), 328. <https://doi.org/10.3390/polym17030328>
- Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., Curcio, M., Iemma, F., Puoci, F., Vinci, G., & Picci, N. (2010). New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry applications. *Food Control*, 21(11), 1425–1435. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.04.028>
- Reuters. (2024). Comment: Why compostable packaging can't absolve us of our single-use sins.
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>
- Robertson, G. L. (2013). *Food Packaging: Principles and Practice* (3rd ed.). CRC Press.
- Rollini, M., Nielsen, T., Musatti, A., Limbo, S., Piergiovanni, L., Hernandez Munoz, P., & Gavara, R. (2016). Antimicrobial Performance of Two Different Packaging

- Materials on the Microbiological Quality of Fresh Salmon. *Coatings*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.3390/coatings6010006>
- Salgado, P. R., Di Giorgio, L., Musso, Y. S., & Mauri, A. N. (2021). Recent developments in smart food packaging focused on biobased and biodegradable polymers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.630393>
- Samir, A., Ashour, F. H., Hakim, A. a. A., & Bassyouni, M. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7>
- Seref, N., & Cufaoglu, G. (2025). Food Packaging and Chemical Migration: A Food Safety perspective. *Journal of Food Science*, 90(5). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70265>
- Shi, B., Wu, D., Lin, Y., Xu, X., Xie, S., Zhao, G., & Wang, Y. (2025). Advances in nanocellulose-based composites for sustainable food packaging. *BioResources*, 20(3). <https://doi.org/10.15376/10.15376/biores.20.3.shi>
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications. *Polymers*, 12(8), 1641. <https://doi.org/10.3390/polym12081641>
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
- Smaoui, S., Hlima, H. B., Tavares, L., Ennouri, K., Braiek, O. B., Mellouli, L., Abdelkafi, S., & Khaneghah, A. M. (2021). Application of essential oils in meat packaging: A systemic review of recent literature. *Food Control*, 132, 108566. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108566>
- Sun, D., Jia, Z., Zhu, J., Liu, J., Chen, Y., Xu, Z., & Ma, H. (2025). Antimicrobial Peptides and Their Potential Applications in Plant Protection. *Agronomy*, 15(5), 1113. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051113>

- Suppakul, P., Miltz, J., Sonneveld, K., & Bigger, S. (2003). Active Packaging Technologies with an Emphasis on Antimicrobial Packaging and its Applications. *Journal of Food Science*, 68(2), 408–420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05687.x>
- Tørngren, M. A., Darré, M., Gunvig, A., & Bardenshtein, A. (2018). Case studies of packaging and processing solutions to improve meat quality and safety. *Meat science*, 144, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.018>
- Troy, D. J., Ojha, K. S., Kerry, J. P., & Tiwari, B. K. (2016). Sustainable and consumer-friendly emerging technologies for application within the meat industry: An overview. *Meat science*, 120, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.002>
- Tsegay, Z. T., Hosseini, E., D'Amore, T., Smaoui, S., & Varzakas, T. (2025). Biosensing strategies to monitor contaminants and additives on fish, meat, poultry, and related products. *Biosensors*, 15(7), 415. <https://doi.org/10.3390/bios15070415>
- Tsironi, T. N., & Taoukis, P. S. (2018). Current practice and innovations in fish packaging. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 27(10), 1024–1047. <https://doi.org/10.1080/10498850.2018.1532479>
- Tsironi, T., Ntzimani, A., Gogou, E., Tsevdou, M., Semenoglou, I., Dermesonlouoglou, E., & Taoukis, P. (2019). Modeling the effect of active modified atmosphere packaging on the microbial stability and shelf life of gutted sea bass. *Applied Sciences*, 9(23), 5019. <https://doi.org/10.3390/app9235019>
- Vaikousi, H., Biliaderis, C. G., & Koutsoumanis, K. P. (2009). Applicability of a microbial Time Temperature Indicator (TTI) for monitoring spoilage of modified atmosphere packed minced meat. *International Journal of Food Microbiology*, 133(3), 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.05.030>
- Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>
- Vargas, M., Pastor, C., Chiralt, A., McClements, D. J., & González-Martínez, C. (2009). Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits.

- Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(6), 496–511.
<https://doi.org/10.1080/10408390701537344>
- Vermeiren, L., Devlieghere, F., Van Beest, M., De Kruijf, N., & Debevere, J. (1999). Developments in the active packaging of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 10(3), 77–86. [https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(99)00032-1)
- Vilela, C., Kurek, M., Hayouka, Z., Röcker, B., Yildirim, S., Antunes, M. D. C., Nilsen-Nygaard, J., Pettersen, M. K., & Freire, C. S. (2018). A concise guide to active agents for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.006>
- Wang, L., Xu, L., Zheng, Z., Liu, S., Li, X., Cao, L., Li, J., & Sun, C. (2021). Smart Contract-Based Agricultural food Supply chain traceability. *IEEE Access*, 9, 9296–9307. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3050112>
- Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *Npj Science of Food*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00132-8>
- Weston, M., Phan, M. a. T., Arcot, J., & Chandrawati, R. (2020). Anthocyanin-based sensors derived from food waste as an active use-by date indicator for milk. *Food Chemistry*, 326, 127017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127017>
- Yam, K. L., & Lee, D. S. (2012). Emerging food packaging technologies. In *Woodhead Publishing Limited eBooks*. <https://doi.org/10.1533/9780857095664>
- Yam, K. L., Takhistov, P. T., & Miltz, J. (2005). Intelligent Packaging: Concepts and applications. *Journal of Food Science*, 70(1), R1–R10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09052.x>
- Yan, M. R., Hsieh, S., & Ricacho, N. (2022). Innovative food packaging, food quality and safety, and consumer perspectives. *Processes*, 10(4), 747. <https://doi.org/10.3390/pr10040747>
- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., & Coma, V. (2017). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165–199. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>

- Yuan, M., Mei, J., & Xie, J. (2024). Research Progress on Polysaccharide Composite Films and Coatings with Antioxidant and Antibacterial Ingredients to Extend the Shelf Life of Animal-Derived Meat. *Coatings*, 14(10), 1338. <https://doi.org/10.3390/coatings14101338>
- Zawani, C., Nor-Khaizura, M., Mahyudin, N., Ismail-Fitry, M., & Nirmal, N. (2022). Microbiological and Sensorial Quality of Beef Meat (*Longissimus dorsi*) Marinated with Cinnamon Extract and Stored at Various Temperatures. *Foods*, 11(24), 3971. <https://doi.org/10.3390/foods11243971>
- Zhang, J., Zhang, J., Zhang, L., Qin, Z., & Wang, T. (2025). Review of Recent Advances in Intelligent and Antibacterial Packaging for Meat Quality and Safety. *Foods*, 14(7), 1157. <https://doi.org/10.3390/foods14071157>
- Zhou, Y., Zuo, H., Dai, Z., Guo, Z., Holman, B. W. B., Ding, Y., Shi, J., Ding, X., Huang, M., & Mao, Y. (2024). Changes to pork bacterial counts and composition after dielectric barrier discharge plasma treatment and storage in Modified-Atmosphere packaging. *Foods*, 13(24), 4162. <https://doi.org/10.3390/foods13244162>
- Zinoviadou, K. G., Koutsoumanis, K. P., & Biliaderis, C. G. (2009). Physical and thermo-mechanical properties of whey protein isolate films containing antimicrobials, and their effect against spoilage flora of fresh beef. *Food hydrocolloids*, 24(1), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.08.003>
- Zouharová, A., Bartáková, K., Bursová, Š., Necidová, L., Haruštiaková, D., Klimešová, M., & Vorlová, L. (2023). Meat and fish packaging and its impact on the shelf life – a review. *Acta Veterinaria Brno*, 92(1), 95–108. <https://doi.org/10.2754/avb202392010095>