



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην παραγωγή τροφίμων
και ο αντίκτυπος στην ασφάλεια τους και στην υγεία των
καταναλωτών**

Υποψήφια: Βλάχου Μυρτώ (ΑΜ 20679018)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Τσόγκα Αρετή

ΑΘΗΝΑ, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην παραγωγή τροφίμων
και ο αντίκτυπος στην ασφάλεια τους και στην υγεία των
καταναλωτών**

Υποψήφια: Βλάχου Μυρτώ (ΑΜ 20679018)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Τσόγκα Αρετή

Η εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του ΠΠΣ για την λήψη του πτυχίου της Κατεύθυνσης Δημόσιας Υγείας του Τμήματος Δημόσιας και Κοινωνικής Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

ΑΘΗΝΑ, 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF PUBLIC HEALTH
DEPARTMENT OF PUBLIC AND COMMUNITY
HEALTH

Thesis

The application of nanotechnology in food production and the impact on food safety and consumer's health

Student name and surname: Myrto Vlachou

Registration number: 20679018

Supervising Professor: Dr. Tsoga Areti

Athens, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην παραγωγή τροφίμων και ο αντίκτυπος στην ασφάλεια τους και στην υγεία των καταναλωτών

Μέλη Επιτροπής Εξέτασης συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Επιτροπή Εξέτασης:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Αρετή Τσόγκα	Επικ. Καθηγήτρια/Επιβλέπουσα	
2	Γεώργιος Ζακυνθινός	Καθηγητής/Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής	
3	Ζήσιμος Λυκούδης	ΕΔΙΠ/Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Βλάχου Μυρτώ του Θεόδωρου, με αριθμό μητρώου 20679018, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Τμήματος Δημόσιας και Κοινωνικής Υγείας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή*

Ο/Η Δηλών/ούσα

* Ονοματεπώνυμο/Ιδιότητα

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

** Σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από αιτιολόγηση και έγκριση του επιβλέποντα, προβλέπεται χρονικός περιορισμός πρόσβασης (embargo) 6-12 μήνες. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6):*

https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf

Πνευματικά δικαιώματα Copyright © [Μυρτώ Βλάχου,2024]

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Δημόσιας και Κοινωνικής Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής δε δηλώνει απαραίτητως την αποδοχή των απόψεων της συγγραφέα.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια που προσφέρθηκε στην εκπόνησή της αναγνωρίζεται και αναφέρεται στο κείμενο. Επιπλέον, αναφέρονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές που αξιοποιήθηκαν, πρωτογενείς και δευτερογενείς, είτε η συμβολή τους παρατίθεται επακριβώς ως απόσπασμα είτε ως παράφραση.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει το αντικείμενο της νανοτεχνολογίας στα τρόφιμα και την υγεία των καταναλωτών, με στόχο την κατανόηση τόσο των θετικών όσο και των αρνητικών επιπτώσεων αυτής της αναδυόμενης τεχνολογίας. Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία σχετικά με τις εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων και τονίζει την αναγκαιότητα της μελέτης, τα δεδομένα των σημαντικών δυνατοτήτων, αλλά και των κινδύνων που ενέχει για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ο στόχος της μελέτης είναι να διερευνήσει τα στοιχεία της νανοτεχνολογίας στα τρόφιμα από την άποψη της ασφάλειας και της υγείας των καταναλωτών, καθώς και να αξιολογήσει την αποδοχή της από το κοινό και τα ρυθμιστικά μέτρα που υιοθετούνται.

Τα βασικά ευρήματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η νανοτεχνολογία έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει τη συσκευασία και την ποιότητα των τροφίμων, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής και ενισχύοντας την ασφάλειά τους. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές ανησυχίες σχετικά με την τοξικότητα και τη βιοσυσώρευση των νανοσωματιδίων, καθώς και με τη διαφάνεια και την ενημέρωση των καταναλωτών. Επιπλέον, οι κανονιστικές αρχές δεν έχουν ακόμη θεσπίσει τα πλαίσια για τη διαχείριση των νανοϋλικών. Το κεντρικό τμήμα της μελέτης είναι ότι ενώ η νανοτεχνολογία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στον τομέα της διατροφής, χρειάζεται προσεκτική διαχείριση και περαιτέρω έρευνα για την εξασφάλιση της ασφάλειας των καταναλωτών και την αποφυγή περιβαλλοντικών κινδύνων. Η εργασία υπογραμμίζει την ανάγκη για διαφάνεια, αυστηρούς κανόνες και ενδείξεις αξιολόγησης των κινδύνων πριν από την ευρεία υιοθέτηση των νανοτεχνολογικών εφαρμογών στα τρόφιμα.

Λέξεις-κλειδιά: νανοτεχνολογία, νανοσωματίδια, νανοϋλικά, νανοτοξικότητα, ασφάλεια τροφίμων, νανοσυσκευασία τροφίμων, υγεία καταναλωτή,

Abstract

This study examines the subject of nanotechnology in food and consumer health, with the aim of understanding both the positive and negative impacts of this emerging technology. It presents the key aspects of nanotechnology applications in the food industry and highlights the necessity of the study, given the significant potential and risks that this technology poses to human health and the environment. The study's objective is to investigate the aspects of nanotechnology in food in terms of consumer safety and health, as well as to assess public acceptance and the regulatory measures being adopted.

The main findings of the study indicate that nanotechnology has the potential to improve food packaging and quality, extending shelf life and enhancing safety. However, there are significant concerns regarding the toxicity and bioaccumulation of nanoparticles, as well as issues related to transparency and consumer information. Additionally, regulatory authorities have not yet established clear frameworks for managing nanomaterials. The central conclusion of the study is that while nanotechnology offers substantial advantages in the food sector, careful management and further research are needed to ensure consumer safety and avoid environmental risks. The study underscores the need for transparency, stringent regulations, and thorough risk assessments before the widespread adoption of nanotechnology applications in food.

Keywords: nanotechnology, nanoparticles, nanomaterials, nanotoxicity, food safety, food nanopackaging, consumer health

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων	11
Κατάλογος Πινάκων	12
Συντομογραφίες.....	13
Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή στη νανοτεχνολογία	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2. Νανοτεχνολογία στα τρόφιμα	16
1.2.1. Νανοϋλικά	17
1.2.2. Συνθετικά Νανοςωματίδια	19
1.2.3. Ενίσχυση τροφίμων με πρόσθετα.....	20
Κεφάλαιο 2 ^ο Η νανοτεχνολογία στις συσκευασίες τροφίμων	22
2.1. Εισαγωγή	22
2.2. Είδη νανοςυσκευασίας	22
2.2.1 Ενίσχυση φυσικών χαρακτηριστικών συμβατικών συσκευασιών	22
2.2.2 Ενεργή συσκευασία	23
2.2.3 Έξυπνη συσκευασία	25
2.2.4 Βιοδιασπώμενη συσκευασία.....	28
2.2.5 Βρώσιμη συσκευασία.....	29
Κεφάλαιο 3 ^ο Επιπτώσεις στον οργανισμό και στο περιβάλλον.....	32
3.1. Νανοςωματίδια στον οργανισμό.....	32
3.2. Έλεγχος μετανάστευσης	33
3.3. Νανοτοξικότητα	34
3.3.1. Αλλεργίες από νανοςωματίδια	36
3.4. Εφαρμογές στην αγροτική παραγωγή και επιπτώσεις.....	37
3.4.1. Περιβαλλοντολογικές Επιπτώσεις	38
3.5 Βιοσυσσωρευση και Βιομεγέθυνση	39
3.5.1 Επιπτώσεις στην διατροφική αλυσίδα και τον άνθρωπο.....	40
Κεφάλαιο 4 ^ο Κοινωνικά και νομικά θέματα	43
4.1. Κοινωνικά και ηθικά ζητήματα	43
4.1.2 Αντίληψη καταναλωτών	44
4.1.3 Δεοντολογικά θέματα σχετικά με τη νανοτεχνολογία και τα τρόφιμα	45
4.2. Νομοθεσία και ρυθμιστικά μέτρα.....	46
Κεφάλαιο 5 ^ο Συζήτηση	50

5.1. Συζήτηση	50
5.2. Προοπτικές	52
Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα	54
Βιβλιογραφία	57

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1 Μέθοδος δημιουργίας γαλακτώματος</i>	Σελ. 18
<i>Εικόνα 2.1 Απεικόνιση διαφόρων έξυπνων συστημάτων συσκευασίας</i>	Σελ. 26
<i>Εικόνα 2.2 Ταξινόμηση βρώσιμων υλικών</i>	Σελ. 30
<i>Εικόνα 3.1 Μηχανισμός κυτταρικής βλάβης από NPs</i>	Σελ. 32
<i>Εικόνα 3.2 Οι πιθανές πορείες των νανοσωματιδίων</i>	Σελ. 41

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Οι κύριες παραλλαγές των νανοαισθητήρων που χρησιμοποιούνται από τη νανοτεχνολογία τροφίμων	Σελ. 27
---	---------

Συντομογραφίες

nm	nanometre
NCS	Nanocomposite Structures
RFID	Radio Frequency Identification
FAO	Food and Agriculture Organization
ΠΟΥ	Παγκόσμιο Οργανισμός Υγείας
E.E.	Ευρωπαϊκή Ένωση
EFSA	European Food Safety Authority
NP	Nanoparticles
KET	Κέντρο Επικοινωνίας και Τεχνολογίας
ISO	International Organization for Standardization
ΟΟΣΑ	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
REACH	Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals
ECHA	European Chemicals Agency

Εισαγωγή

Η νανοτεχνολογία αποτελεί ένα ανερχόμενο πεδίο στην επιστημονική έρευνα και τη βιομηχανία, με ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων και της γεωργίας. Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι επιστήμονες και οι ερευνητές είναι η ανάγκη για αναπτυξιακές προσεγγίσεις που θα επιτρέψουν την ασφαλή και αποτελεσματική εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων. Η χρήση νανοσωμάτων στην παραγωγή τροφίμων έχει ανοίξει νέους ορίζοντες για τη βελτίωση της ποιότητας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας στον τομέα. Αυτό το γενικό θέμα οδηγεί την έρευνα προς την κατεύθυνση της αναζήτησης νέων τεχνικών και μεθόδων που θα επιτρέψουν την αξιολόγηση των δυνητικών κινδύνων και οφελών της χρήσης νανοτεχνολογίας στην παραγωγή, συσκευασία και διατήρηση των τροφίμων. Η προσέγγιση αυτή αντανακλά το ενδιαφέρον και το σκοπό της έρευνας, ο οποίος επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που θα βελτιώσουν την ποιότητα, την ασφάλεια και τη διατηρησιμότητα των τροφίμων, ενώ παράλληλα θα μειώσουν τυχόν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Ο κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη πιο ασφαλών και αποδοτικών μεθόδων για την εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην παραγωγή και επεξεργασία τροφίμων.

Με αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία επιδιώκει να εξετάσει το ρόλο της νανοτεχνολογίας στην παραγωγή τροφίμων και τη γεωργία, εστιάζοντας τόσο στα θετικά όσο και στα αρνητικά της αποτελέσματα, προσφέροντας έτσι μια πλήρη και ισορροπημένη εικόνα του θέματος. Μέσω αυτής της ανάλυσης, η εργασία αποσκοπεί στην προσφορά ενός εμβληματικού πλαισίου για τη συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της νανοτεχνολογίας τροφίμων και γεωργίας.

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή στη νανοτεχνολογία

1.1 Εισαγωγή

Η νανοτεχνολογία μπορεί να οριστεί ως ένας διεπιστημονικός κλάδος επιστήμης και τεχνολογίας που συνδυάζει τη φυσική, την επιστήμη των υλικών, τη χημεία, τη μηχανική, τη βιολογία με τις ιδιότητες κβαντικής φύσεως και των αντικειμένων νανο-μεγέθους (Adams & Barbante, 2013). Επικεντρώνεται στη μελέτη και χρήση νανοϋλικών, των οποίων η διάσταση κυμαίνεται μεταξύ 1 έως 100 νανομέτρων (nm) όπου είναι εφικτές νέες εφαρμογές οι οποίες δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτά τα υλικά σε μακροσκοπική κλίμακα. Όταν οι διαστάσεις ενός υλικού μειώνονται κάτω από τα 100nm μπορεί να προκύψουν δραματικές αλλαγές στις ιδιότητές του. Οι ιδιότητες αυτές αλλάζουν ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα των νανοσωματιδίων (Nasrollahzadeh et al., 2019). Τα νανοσωματίδια αποτελούν κεντρικό στοιχείο της νανοεπιστήμης και της νανοτεχνολογίας, οφείλουν την ιδιαίτερη θέση τους όχι μόνο στις μειωμένες διαστάσεις τους που προσδίδουν εξαιρετικές ιδιότητες, αλλά και στο γεγονός ότι αποτελούν καίρια δομικά στοιχεία για τη δημιουργία πιο πολύπλοκων νανοδομών (Poeta et al., 2023).

Τα ανόργανα νανοσωματίδια, χρησιμοποιούνται σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας και περιλαμβάνουν ορισμένα σημαντικά στοιχεία, όπως είναι το οξείδιο ψευδαργύρου και το διοξείδιο του τιτανίου, που χρησιμοποιούνται σε αντηλιακά, το κολλοειδές χρυσό και ασήμι για αντιμικροβιακή δράση και επούλωση πληγών, το οξείδιο του αλουμινίου στο μακιγιάζ, η αιθάλη σε διακοσμητικά προϊόντα για τα μάτια, το πυρίτιο ως αντικολητικό, και ο υδροξυαπατίτης στη στοματική φροντίδα. Στον τομέα των οργανικών νανοϋλικών, χρησιμοποιούνται νανοδομές βασισμένες σε λιπίδια, επιφανειοδραστικά και πολυμερή που λειτουργούν ως φορείς βιολογικά ενεργών μορίων. Τα θετικά στοιχεία της νανοϋλικών περιλαμβάνουν τη βελτίωση της προστασίας από την υπεριώδη ακτινοβολία, την αυξημένη διείσδυση του υλικού στο δέρμα, τη μεγαλύτερη διάρκεια των αποτελεσμάτων και την ενίσχυση του χρωματισμού.

Τα συνδυασμένα νανοσωματίδια (NCS) είναι υποσχόμενα αντιμικροβιακά υλικά για τη συσκευασία τροφίμων. Με μια πυκνή δομή και ένα ανθεκτικό δίκτυο μεταξύ των ινιδίων, τα φιλμ NCS εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις εφελκυσμού και διαθέτουν εξαιρετική θερμική σταθερότητα, καθώς και ιδιότητες φραγμού. Χρησιμοποιούνται ως λειτουργικά πρόσθετα και νανοπληρωτικά με σκοπό τη βελτιστοποίηση των βακτηριοστατικών χαρακτηριστικών και των χημικών ιδιοτήτων των μεμβρανών ζελατίνης. Επιπλέον, οι ιδιότητες της συσκευασίας, όπως η μηχανική αντοχή, η αντοχή σε αέρια και νερό, καθώς και η μικροβιακή αντίσταση, μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με τη χρήση συνδυασμένων νανοσωματιδίων (Yuan et al., 2021; Gupta et al., 2024).

Η ανακάλυψη νέων υλικών, φαινομένων και διαδικασιών σε νανοκλίμακα ανοίγει νέες προοπτικές για την πρόοδο της νανοτεχνολογίας. Οι καινοτόμες

θεωρητικές και πειραματικές τεχνικές στην έρευνα επιτρέπουν την ανάπτυξη νέων νανοδομημένων υλικών και συστημάτων. Η επιστήμη και η νανοτεχνολογία διανύουν μια εποχή γεμάτη προοπτικές, με πολλές τρέχουσες και αναμενόμενες εξελίξεις σε τομείς όπως η γεωργία, η ηλεκτρονική, η ιατρική και η ενέργεια. Αυτές οι εξελίξεις προχωρούν με ταχύτατους ρυθμούς, ανοίγοντας νέους ορίζοντες και προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στον τρόπο παραγωγής και εφαρμογής τεχνολογιών σε παγκόσμιο επίπεδο (Nasrollahzadeh et al., 2019). Παρόλο που προσφέρουν πολλά οφέλη για τη βελτίωση του προϊόντος, η αυξημένη δυνατότητα απορρόφησης από το δέρμα, την αναπνοή και την κυτταρική πρόσληψη απαιτεί μια συνεχή αξιολόγηση της ασφάλειας για την ανθρώπινη υγεία (Darbre, 2023).

1.2. Νανοτεχνολογία στα τρόφιμα

Η νανοτεχνολογία είναι απολύτως εφαρμόσιμη στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή, επεξεργασία, αποθήκευση και ποιοτικό έλεγχο των τροφίμων. Τα νανοϋλικά, σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά μικροκλίμακας, παρουσιάζουν νέα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιώσουν την αισθητική ποιότητα των τροφίμων, προσδίδοντας νέα υφή, χρώμα, εμφάνιση (Yu et al., 2018) και έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την ποσοτική και ποιοτική ανάπτυξη υψηλής ποιότητας, πιο υγιεινών και ασφαλέστερων τροφίμων όταν εφαρμόζονται σε αυτά. Μπορούν να υπερβούν τις συμβατικές τεχνικές επεξεργασίας τροφίμων, βελτιώνοντας την αντοχή τους στο χρόνο και προλαμβάνοντας τη μόλυνσή τους. Η εφαρμογή των νανοϋλικών στη γεωργία και τη βιομηχανία τροφίμων ανοίγει νέους ορίζοντες για τη βελτίωση της ποιότητας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας στην παραγωγή τροφίμων.

Η εφαρμογή νανοϋλικών σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας τροφίμων και της γεωργίας έχει αποδειχθεί ελκυστική για πολλές επιχειρήσεις, καθώς επιτρέπει τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των τροφίμων, την αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής και την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η χρήση νανοϋλικών σε λιπάσματα και φυτοφάρμακα επιτρέπει την ακριβέστερη δοσολογία και την ενίσχυση της εφαρμογής τους, ενώ η χρήση σε γεωργικά εργαλεία μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και την αποτελεσματικότητά τους (He et al., 2019).

Η νανοτεχνολογία έχει εφαρμοστεί και για το σχεδιασμό νανοαισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση επιβλαβών συστατικών στα τρόφιμα. Αυτοί οι νανοαισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν μόλυνση ή παρουσία επιβλαβών ουσιών σε τρόφιμα με γρήγορο και ευαίσθητο τρόπο. Ένα παράδειγμα νανοαισθητήρων είναι η χρήση τους στην ανίχνευση φυτοφαρμάκων σε φρούτα και νερό. Οι αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για τον εντοπισμό παθογόνων μικροοργανισμών και μυκοτοξινών σε τρόφιμα. Η παραδοσιακή διαδικασία ελέγχου αυτών των μικροοργανισμών μπορεί να είναι περίπλοκη, αλλά οι νανοαισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν γρήγορα τυχόν τοξίνες και παθογόνα στα τρόφιμα κατά την επεξεργασία και την αποθήκευσή τους.

Ωστόσο, η τοξικότητα των νανοσωματιδίων και των νανοϋλικών παραμένει ένα ζήτημα που δεν έχει εξεταστεί επαρκώς, επομένως, υπάρχει η πιθανότητα τα νανοϋλικά να είναι δυνητικά τοξικά. Δεδομένης της συνεχούς εξέλιξης στην επιστήμη των τροφίμων, είναι αναγκαίο να γίνει περαιτέρω χαρακτηρισμός τους και να ρυθμιστεί πιο αυστηρά η χρήση τους. Υπάρχει η πιθανότητα να αντιμετωπίσουμε μια κρίση νανοτοξικότητας εάν δεν έχουμε ακόμη κατανοήσει πλήρως τους μοριακούς μηχανισμούς με τους οποίους τα νανοσωματίδια και τα νανοϋλικά επιδρούν στα τρόφιμα και στους ζωντανούς οργανισμούς (Yu et al., 2018).

1.2.1. Νανοϋλικά

Οι πηγές νανοϋλικών μπορούν να είναι είτε οργανικές είτε ανόργανες, μερικές φορές ακόμα και ένας συνδυασμός των δύο σε νανοκλίμακα. Η σύνθεση οργανικών νανοϋλικών αποκαλύπτει αυξημένη βιοδιασπασσιμότητα σε σύγκριση με τα ανόργανα νανοϋλικά. Αυτό έχει οδηγήσει στη δημιουργία βιο-νανοσυνθετικών υλικών, τα οποία συνδυάζουν την οργανική τους φύση με βιοδιασπώμενες αλυσίδες, προσφέροντας έτσι περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις. Αντιθέτως, τα ανόργανα νανοϋλικά χρησιμοποιούνται ευρέως ως αντιμικροβιακά μεσολαβητικά στις συσκευασίες τροφίμων. Τα ανόργανα νανο-σωματίδια σχηματίζονται με τη μέθοδο του φυσικού ατμού, της τεχνοχημικής επεξεργασίας και της μεθόδου sol-gel, και επομένως εξαρτώνται κυρίως από το ανόργανο συνθετικό υλικό (Sahoo et al., 2021).

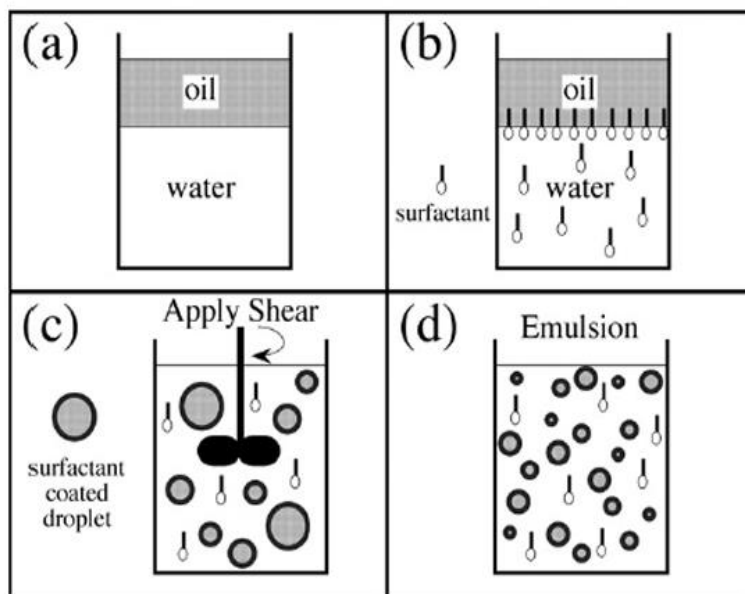
Οι φυσικές πηγές νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία τροφίμων εξετάζονται ως βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές. Τα νανοϋλικά που προέρχονται από φυσικές ενώσεις έχουν αποδειχθεί ότι βελτιώνουν ενεργά τις μηχανικές ιδιότητες, τις ιδιότητες φραγμού και τη δράση κατά των μικροοργανισμών στα υλικά συσκευασίας των τροφίμων. Αυτά τα φυσικά νανοϋλικά μπορούν να δημιουργήσουν μια προστατευτική φραγματική στρώση ενάντια στις εξωτερικές συνθήκες και να επεκτείνουν την διάρκεια ζωής των φρέσκων τροφίμων, μειώνοντας την ποσότητα των απορρίψεων και προωθώντας την αειφόρο διαχείριση των πόρων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα νανοσωματίδια χιτοζάνης που προέρχονται από χιτίνη, που βρίσκεται σε κέλυφη καρκινοειδών ή σε πηγές μυκήτων, παρουσιάζουν αντιμικροβιακές ιδιότητες και συμβάλλουν στην αύξηση της ασφάλειας των τροφίμων αλλά και τα νανο-σωματίδια με βάση τα λιπίδια που προέρχονται από φυσικά έλαια, όπως το ελαιόλαδο ή η σόγια εξετάζονται για τις δυνατότητές τους στην ενθυλάκωση και τη συντήρηση συστατικών τροφίμων (Pirsa et al., 2022).

Επιπλέον, τα πολυμερή νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται στις συσκευασίες νανοτροφίμων για την ευελιξία τους στη δημιουργία φραγμών που προστατεύουν από εξωτερικούς παράγοντες, όπως το οξυγόνο και η υγρασία. Επίσης, τα σφαιρικά κυστίδια λιποσωμάτων αποτελούμενα από διπλές στοιβάδες λιπιδίων χρησιμοποιούνται σε συσκευασίες για την ενθυλάκωση βιοδραστικών ενώσεων, την ενίσχυση της σταθερότητάς τους και τη διευκόλυνση της ελεγχόμενης απελευθέρωσής τους σε προϊόντα διατροφής. Αυτή η νανοτεχνολογία βελτιώνει τη διαλυτότητα, τη

βιοδιαθεσιμότητα και τη στοχευμένη παράδοση των συστατικών, προσφέροντας έτσι λειτουργική και αποτελεσματική συσκευασία τροφίμων.

Διάφορες πρωτεΐνες, όπως αυτές στον ορό γάλακτος και τη σόγια, και η ζελατίνη, χρησιμοποιούνται στις συσκευασίες ναοτροφίμων λόγω της ικανότητάς τους να αυτοσυναρμολογούνται σε ναοσωματίδια, παρέχοντας έτσι διάφορες επιλογές για την ενθυλάκωση και τη συντήρηση των συστατικών τροφίμων. Το ναογαλάκτωμα αποτελεί μια λεπτή απόδοση σταγονιδίων λαδιού ή νερού που στηρίζεται σε τάση επιφάνειας όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόζεται ευρέως στις συσκευασίες ναοτροφίμων λόγω της ικανότητάς της να προστατεύει και να ενθυλακώνει τα συστατικά των τροφίμων, βελτιώνοντας έτσι την αποθήκευσή τους και επεκτείνοντας την αντοχή τους στο χρόνο. Τα ναοϋλικά που προέρχονται από οργανικές πηγές επίσης ενισχύουν την ποιότητα και τη λειτουργικότητα της συσκευασίας. Αυτές οι οργανικές επιλογές συμβάλλουν στη δημιουργία περιβαλλοντικά φιλικών συσκευασιών, ανταποκρινόμενες έτσι στην αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμες λύσεις στη βιομηχανία τροφίμων (Ahmad et al., 2024).

Εικόνα 1.1: Μέθοδος δημιουργίας γαλακτώματος



(a) Δύο μη αναμιγνύμετα υγρά, όπως το έλαιο και το νερό, απομονώνονται σε δύο στρώματα σε μια επίπεδη διεπιφάνεια, με το λιγότερο πυκνό υγρό στο επάνω στρώμα και το πιο πυκνό στο κάτω στρώμα, (b) Μία τασιενεργή ουσία, γνωστή και ως γαλακτωματοποιητής, διαλύεται στη συνεχή φάση και προσροφάτε επιλεκτικά στη διεπιφάνεια ελαίου-νερού, αντικαθιστώντας τα μονομερή και τα μικκύλια στο διάλυμα, (c) Μετά την εφαρμογή της τασιενεργούς ουσίας στο σύστημα ανάδευσης ή ομογενοποίησης, το έλαιο διαχωρίζεται σε σταγονίδια, τα οποία είναι επικαλυμμένα με το επιφανειοδραστικό συστατικό, (d) Το γαλακτώμα που προκύπτει μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά την αποθήκευσή του.

Πηγή: Mohd. Aamir Mirza et al., 2015

Η χρήση ανόργανων πηγών νανοϋλικών αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της τεχνολογίας νανοσυσκευασίας, καθώς παρέχει μοναδικές ιδιότητες που ενισχύουν την λειτουργικότητα και την απόδοση των υλικών συσκευασίας στη βιομηχανία τροφίμων (Yu et al., 2018). Τα μεταλλικά νανοσωματίδια, όπως το χρυσό και το ασήμι, είναι επιθυμητές για τις αντιμικροβιακές τους εγκαταστάσεις, οι οποίες συμβάλλουν στην ανάπτυξη συσκευασιών με αυξημένη ασφάλεια, αναστέλλοντας τη μικροβιακή ανάπτυξη. Τα οξειδία μετάλλων, όπως το διοξείδιο του τιτανίου (TiO₂) και το διοξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), για τη βελτίωση των λειτουργιών φραγμού, όπως η προστασία από τους παράγοντες όπως το οξυγόνο και η υγρασία, με αποτέλεσμα να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. των προϊόντων διατροφής. Τα διοξείδια του πυριτίου (SiO₂), λόγω της εξαιρετικής σταθερότητάς τους και της μηχανικής αντοχής, συμβάλλουν στη δημιουργία διαλυμάτων συσκευασίας (Ahmad et al., 2024).

Τα πλεονεκτήματα αυτών των ανόργανων νανοϋλικών είναι κρίσιμα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με τη συντήρηση, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των τροφίμων, αποτελώντας μια σημαντική προαγωγή στην τεχνολογία συσκευασίας τροφίμων. Λεπτομερείς αναλύσεις των ιδιοτήτων, των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και των κινδύνων ασφάλειας αυτών των ανόργανων νανοϋλικών σε συσκευασίες νανοτροφίμων είναι ζωτικής σημασίας για τη βιομηχανία τροφίμων (Ahmad et al., 2024).

1.2.2. Συνθετικά Νανοσωματίδια

Στα τρόφιμα, υπάρχουν στοιχεία νανομεγέθους τα οποία διαφέρουν από τα συνθετικά παραγόμενα νανοϋλικά. Τα πιο σημαντικά συνθετικά νανοδομημένα υλικά στα τρόφιμα περιλαμβάνουν τα εξής:

- (i) Πολυμερή/Βιοπολυμερή Νανοσωματίδια (πρωτεΐνη): Αυτά τα νανοσωματίδια αποτελούνται συνήθως από βιολογικά πολυμερή και χρησιμοποιούνται για μακροχρόνια φαρμακευτική αγωγή ή απελευθέρωση αντιοξειδωτικών,
- (ii) Λιποσώματα: Τα λιποσώματα είναι μικροσκοπικά, σφαιρικά συνθετικά κυστίδια που αποτελούνται κυρίως από διπλές στοιβάδες λιπιδίων,
- (iii) Μικκύλια: Τα μικκύλια είναι αυτοσυναρμολογούμενα αμφίφιλα σωματίδια που μπορούν να εγκλωβίσουν είτε λιπόφιλα είτε λιπόφοβα φάρμακα ενώ σταθεροποιούνται από τασιενεργά,
- (iv) Νανοκάψουλες: Οι νανοκάψουλες ενθυλακώνουν σημαντικές ποσότητες φαρμάκων και νουκλεϊκών οξέων, συμπεριλαμβανομένων των DNA, microRNA, shRNA και siRNA,
- (v) Νανοσυζεύγματα: Πολυμερή που έχουν συνδεθεί ομοιοπολικά με φαρμακευτικά μόρια,

(vi) Δενδριμερή: Μονοδιασπορά μακρομόρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενθυλάκωση ή την ομοιοπολική σύζευξη φαρμάκων, παραγόντων απεικόνισης και τμημάτων στόχευσης (Biswas et al., 2022).

1.2.3. Ενίσχυση τροφίμων με πρόσθετα

Σήμερα, οι φορείς νανοτεχνολογίας χρησιμοποιούνται ως μέσα διανομής για τη μεταφορά πρόσθετων συστατικών σε τρόφιμα χωρίς να παραβιάζεται η βασική τους μορφολογία, η υφή ή η γεύση. Τα νανοσυστήματα λειτουργούν ως «φορείς» που μεταφέρουν και προστατεύουν δραστικές ουσίες, όπως βιταμίνες, ανόργανα στοιχεία, αντιοξειδωτικά και άλλα θρεπτικά συστατικά. Μέσω της τεχνολογίας αυτής, τα πρόσθετα μπορούν να διανεμηθούν ομοιόμορφα στα τρόφιμα, αυξάνοντας τη βιοδιαθεσιμότητά τους, δηλαδή την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από τον οργανισμό. Το μέγεθος των νανοσωματιδίων μπορεί να επηρεάσει την αποδοτικότητα απορρόφησης των βιοδραστικών ενώσεων σε διάφορα μέρη του τροφίμου, καθώς παρατηρείται ότι σε ορισμένες κυτταρικές γραμμές, μόνο τα νανοσωματίδια χαμηλού μεγέθους μπορούν να απορροφηθούν αποτελεσματικά, αλλά όχι τα μικροσωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους.

Ένα ιδανικό σύστημα παροχής πρέπει να διαθέτει τις εξής ιδιότητες:

- (i) να μπορεί να παρέχει τη δραστική ουσία με ακρίβεια στον στόχο,
- (ii) να εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ρυθμό και
- (iii) να διατηρεί τις δραστικές ενώσεις σε κατάλληλα επίπεδα για μεγάλα χρονικά διαστήματα κατά την αποθήκευση.

Η εφαρμογή νανοτεχνολογίας στη δημιουργία φορέων, γαλακτωμάτων, πολυμερών μητρών, διαλυμάτων και συνδέσεων προσφέρει αποτελεσματικά συστήματα παροχής που διαθέτουν όλες τις προαναφερθείσες υπηρεσίες. Νανογαλακτώματα, νανοκαψούλες και λιποσώματα, προστατεύουν τις ευαίσθητες ενώσεις από την υποβάθμιση λόγω του οξυγόνου, της θερμότητας ή του φωτός, επιτρέποντας τη μακροχρόνια διατήρηση των θρεπτικών ιδιοτήτων. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να απελευθερώνουν τα δραστικά συστατικά σε συγκεκριμένες συνθήκες μέσα στο πεπτικό σύστημα, μεγιστοποιώντας έτσι τα οφέλη τους (Singh et al., 2017).

Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες συστημάτων βιοδιανομής τροφίμων: αυτά που βασίζονται σε πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια και υβριδικά συστήματα. Συνήθως, το αμφίφιλο σύστημα βιοδιανομής θεωρείται ιδανικό για την επεξεργασία και παράδοση τροφίμων, και η δομή αυτής της βιοδιανομής πρέπει να περιλαμβάνει αποκλειστικά υλικά κατάλληλα για τρόφιμα. Πρέπει να είναι οικονομικά εφικτό και να παραμένει σταθερό σε ένα ευρύ φάσμα pH, θερμοκρασιών και ευαισθησίας στο φως. Ο αυτοσυναρμολογούμενος σχηματισμός μικροκυλίνδρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως όχημα παράδοσης ή ενθυλάκωσης για τη μεταφορά λειτουργικών ή πλήρων τροφίμων,

τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως θρεπτικά συστατικά (Singh & Packirisamy, 2023).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενίσχυσης τροφίμου με πρόσθετο είναι η ενθυλάκωση των μορίων κυανιδίνης-3-O-γλυκοζίτη (C3G) μέσα στην εσωτερική κοιλότητα της υπομονάδας H-2 της φερριτίνης (rH-2) σπόρου ανασυνδυασμένης σόγιας (rH-2) βελτίωσε τη θερμική σταθερότητα και φωτοσταθερότητα. Αυτός ο σχεδιασμός και η κατασκευή πολυλειτουργικών νανοφορέων συμβάλλουν στην προστασία και τη διανομή βιοενεργών μορίων (Singh et al., 2017). Η κυανιδίνη-3-O-γλυκοσίδη (C3G), η οποία είναι η πιο διαδεδομένη ανθοκυανίνη (ACN) στα φρούτα που καταναλώνουμε, έχει προταθεί για διάφορες βιολογικές δράσεις, όπως αντιφλεγμονώδη, νευροπροστατευτική, αντιμικροβιακή, αντι-υική, αντιθρομβωτική και επιγενετική δράση. Ωστόσο, η κατανάλωση ACN και C3G μπορεί να διαφέρει ανάμεσα σε διάφορους πληθυσμούς, περιοχές και εποχές, καθώς και ανάλογα με την εκπαίδευση και την οικονομική κατάσταση των ατόμων. Η κύρια απορρόφηση του C3G συμβαίνει στο λεπτό και στο παχύ έντερο, επομένως έχει προταθεί ότι οι θεραπευτικές ιδιότητές του μπορεί να επηρεάσουν φλεγμονώδεις νόσους του εντέρου (IBD), όπως η ελκώδης κολίτιδα και η νόσος του Crohn (Φρούντζας Μ. et al., 2023).

Η χρήση των νανοφορέων απαιτεί συνεχή έρευνα και ανάπτυξη για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των νανοϋλικών και να αξιολογηθεί η τοξικότητά τους, προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

Κεφάλαιο 2^ο Η νανοτεχνολογία στις συσκευασίες τροφίμων

2.1. Εισαγωγή

Η συσκευασία ορίζεται ως ένα φράγμα που αποτελεί διαχωριστική γραμμή μεταξύ του προϊόντος και του περιβάλλοντος. Σχεδιάζεται με σκοπό να προστατεύσει το προϊόν από επιβλαβείς εξωτερικούς παράγοντες ή, μερικές φορές, να προστατεύσει το περιβάλλον από τυχόν βλαβερές ουσίες του προϊόντος (Wyrwa & Barska, 2017). Τα χημικά συντηρητικά, οι κλασικές μέθοδοι διατήρησης και οι συσκευασίες τροφίμων αντιμετωπίζουν με επιτυχία το πρόβλημα της διατήρησης της ποιότητας των τροφίμων. Παρ' όλα αυτά, έχουν κάποια μειονεκτήματα. Αυτά τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την έλλειψη παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά, τη σχετικά σύντομη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με άλλες πιο σύγχρονες τεχνολογίες, και την αναποτελεσματικότητα έναντι τροφιμογενών μικροοργανισμών.

Με την εφαρμογή τεχνικών νανοτεχνολογίας, είναι δυνατόν να γίνει βελτίωση των αντιοξειδωτικών και αντιμικροβιακών ιδιοτήτων σε νανοκλίμακα, βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως βελτιωμένο μηχανικό φράγμα, το οποίο ενισχύει την προστασία των προϊόντων, ενώ οι ιδιότητες αντοχής στη θερμότητα την καθιστούν ιδανική για προϊόντα που χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες και πρόσθετα, βελτίωση της σταθερότητας των συσκευασιών (Alfei et al., 2020). Επιπλέον, η βιοδιασπασιμότητά της συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, προωθώντας πιο φιλικές πρακτικές συσκευασίας. τη σταθερότητα των συσκευασιών (Biswas et al., 2022), καθώς και η εισαγωγή έξυπνων λειτουργιών, όπως η ανίχνευση μολύνσεων με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια και συγκεκριμένα, ο αισθητήρας ο οποίος μπορεί να φθορίσει σε διαφορετικά χρώματα όταν έρχεται σε επαφή με διαφορετικά παθογόνα (Onyeaka et al., 2022).

2.2. Είδη νανοσυσκευασίας

2.2.1 Ενίσχυση φυσικών χαρακτηριστικών συμβατικών συσκευασιών

Τις τελευταίες δεκαετίες, η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νανοδομών που μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα των φυσικών ενώσεων ως συντηρητικών παραγόντων. Η νανοενθυλάκωση βιοδραστικών φυσικών ενώσεων με χρήση σωματιδίων με διαμέτρους που κυμαίνονται από 1 έως 100nm ως φορείς παροχής έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση της διαλυτότητας και σταθερότητας τους, καθώς και σε μείωση του ρυθμού αδρανοποίησής τους. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή συσκευασιών με βελτιωμένη απόδοση ως συντηρητικοί παράγοντες σε σύγκριση με τα συμβατικά. Η χρήση νανοϋλικών έχει επίσης βελτιώσει τα φυσικά χαρακτηριστικά των συσκευασιών τροφίμων, όπως η αυξημένη μηχανική αντοχή, ιδιότητες φραγμού, ευελιξία και σταθερότητα, με τη χρήση νανοσωματιδίων πλήρωσης (νανοπληρωτικά) με ενισχυτικές ιδιότητες. Επιπλέον, έχει βελτιωθεί η

βιοχημική πλευρά, με αυξημένη βιοσυμβατότητα, βιοαποδομησιμότητα και οικολογική βιωσιμότητα, χρησιμοποιώντας βιο-βασισμένα πολυμερή νανοσωματίδια.

Τα βασικά νανοϋλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται ως νανοενισχύσεις περιλαμβάνουν:

1. Ανόργανα νανοϋλικά: Περιλαμβάνουν άργιλους με διπλά υδροξείδια, πολυεπίπεδα πυριτικά, άλατα, οξειδία μετάλλων και μεταλλικά νανοσωματίδια, κυλινδρικούς νανοσωληνες οξειδίων μετάλλων (NTs) ή νανοράβδους χρυσού (AuNR). Αυτά τα νανοϋλικά έχουν ενσωματωθεί σε ένα ευρύ φάσμα πολυμερών. Τα νανοϋλικά με βάση τον άργιλο είναι φυσικές ανόργανες ενώσεις με μεταβλητή χημική σύσταση και έχουν μελετηθεί ευρέως λόγω των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων,

2. Φυσικά νανοσωματίδια: Περιλαμβάνουν νανοκρύσταλλους κυτταρίνης, νανοσωματίδια κυτταρίνης και άλλα παρόμοια σωματίδια, όπως νανοσωματίδια ζεΐνης κ.λπ. Τα νανοϋλικά που προέρχονται από άργιλο είναι φυσικές ανόργανες ενώσεις με ποικίλη χημική σύνθεση και έχουν εξεταστεί εκτενώς λόγω των μηχανικών, θερμικών και ιδιοτήτων φραγμού τους, καθώς και λόγω του χαμηλού κόστους που αποτελεί το πλεονέκτημά τους.

Αυτά τα νανοϋλικά έχουν ενσωματωθεί σε ένα ευρύ φάσμα πολυμερών. Τα νανοϋλικά που προέρχονται από άργιλο είναι φυσικές ανόργανες ενώσεις με ποικίλη χημική σύνθεση και έχουν εξεταστεί εκτενώς λόγω των μηχανικών, θερμικών και ιδιοτήτων φραγμού τους, καθώς και λόγω του χαμηλού κόστους που αποτελεί το πλεονέκτημά τους (Alfei et al., 2020).

2.2.2 Ενεργή συσκευασία

Οι συσκευασίες που βασίζονται σε νανοϋλικά, συμπεριλαμβανομένων των φυσικώς βελτιωμένων, ενεργών και έξυπνων συσκευασιών, έχουν ερευνηθεί και εφαρμοστεί εκτενώς, τόσο σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Μια ιδιαίτερα καινοτόμος στρατηγική είναι η ενεργή συσκευασία με βάση νανοϋλικά, η οποία περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αντιοξειδωτικών νανοκλίμακας ή/και αντιμικροβιακών ενώσεων στα υλικά συσκευασίας. Με το μετριασμό των επιπτώσεων εξωτερικών παραγόντων και της τροφικής υποβάθμισης, αυτή η προσέγγιση ενισχύει την προστατευτική λειτουργία της συσκευασίας και παρατείνει τη διάρκεια ζωής των προϊόντων διατροφής χωρίς να αλλοιώνει το ίδιο το τρόφιμο (Alfei et al., 2020).

Η ενεργή συσκευασία αποτελεί μια πολύ ευέλικτη και ποικιλόμορφη κατηγορία, που εφαρμόζεται για διάφορους σκοπούς και λειτουργίες. Η χρήση της κατάλληλης ενεργής συσκευασίας μπορεί να επιφέρει ουσιαστικά οφέλη στη διατήρηση και προστασία των τροφίμων μέσω των ακόλουθων τρόπων:

1. Φυσιολογικές διεργασίες: Η ενεργή συσκευασία μπορεί να ελέγξει τις φυσιολογικές διεργασίες των τροφίμων, όπως η αναπνοή των φρούτων και των λαχανικών, προκειμένου να διατηρήσει τη φρεσκάδα τους για μεγαλύτερο διάστημα,
2. Χημικές διεργασίες: Μπορεί να αντιμετωπίσει χημικές διεργασίες, όπως η οξείδωση των λιπών, προστατεύοντας έτσι τα τρόφιμα από την αλλοίωση λόγω της διαδικασίας αυτής,
3. Φυσικές διεργασίες: Μπορεί να ελέγξει φυσικές διεργασίες όπως η μαγιάτευση του ψωμιού, εμποδίζοντας την αύξηση του μικροβιακού φορτίου και διατηρώντας έτσι τη φρεσκάδα του,
4. Μικροβιολογικές αλλαγές: Μπορεί να προλάβει μικροβιολογικές αλλαγές λόγω της επίδρασης των μικροοργανισμών, προστατεύοντας τα τρόφιμα από τη διασπορά των μικροβίων,
5. Λοιμώξεις που προκαλούνται από έντομα: Μπορεί να προστατεύσει τα τρόφιμα από λοιμώξεις που προκαλούνται από έντομα, εμποδίζοντας την εισβολή τους στη συσκευασία (Wyrwa & Barska, 2017).

Τα ενεργά συστήματα συσκευασίας διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο της ατμόσφαιρας μέσα στη συσκευασία για τη βελτίωση της συντήρησης των τροφίμων. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ουσίες που είτε απορροφούν (καθαριστές/scavengers) είτε απελευθερώνουν (εκπέμπουν/emitters) αέρια για να επηρεάσουν ενεργά το περιβάλλον μέσα στη συσκευασία. Ακολουθεί μια ανάλυση των δύο κύριων τύπων ενεργών συστημάτων συσκευασίας και των λειτουργιών τους:

Καθαριστές/scavengers: Οι καθαριστές έχουν σχεδιαστεί για να απορροφούν ανεπιθύμητα συστατικά από την ατμόσφαιρα μέσα στη συσκευασία. Δεν αλληλεπιδρούν άμεσα με το προϊόν, αλλά βελτιώνουν τις συνθήκες μέσα στη συσκευασία, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Ανάλογα με την εφαρμογή, οι scavengers μπορούν να απορροφήσουν οξυγόνο, υγρασία, αιθυλένιο ή διοξείδιο του άνθρακα. Οι κοινές ουσίες που χρησιμοποιούνται ως καθαριστές περιλαμβάνουν ζεόλιθο, κυτταρίνη, ενεργό άνθρακα, πυριτική γέλη, ιόντα σιδήρου, ασκορβικό οξύ, υπερμαγγανικό κάλιο και υδροξείδιο του ασβεστίου (Wyrwa & Barska, 2017).

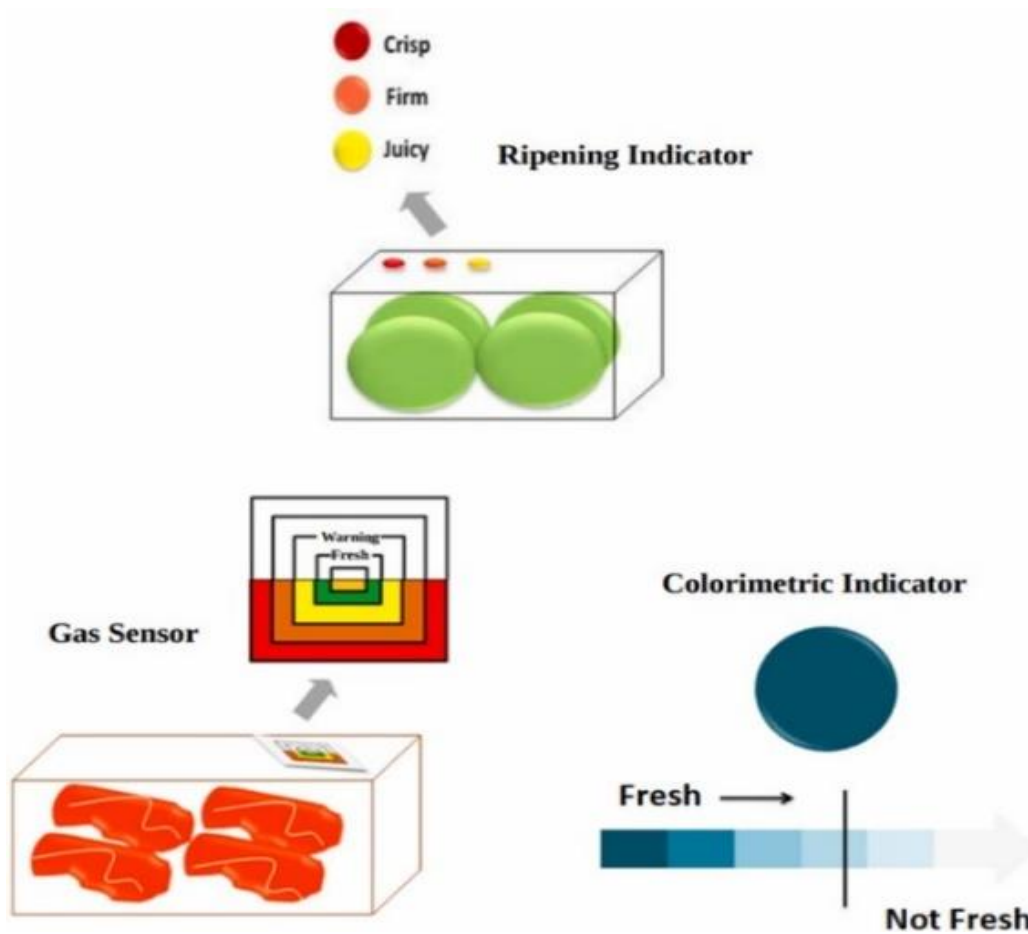
Εκπομποί/emitters: Οι emitters απελευθερώνουν τις επιθυμητές ουσίες στο περιβάλλον συσκευασίας για να επηρεάσουν θετικά το προϊόν διατροφής. Αυτές οι ενώσεις προορίζονται να εισέλθουν στη συσκευασία και να αναστείλουν τις επιβλαβείς διεργασίες, διασφαλίζοντας σταθερές συνθήκες κατά την αποθήκευση και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής. Οι εκπομποί μπορούν να ρυθμίζουν την υγρασία, να εμποδίζουν την ανάπτυξη επιβλαβών μικροοργανισμών, να προλαμβάνουν τη βακτηριακή διάσπαση και να προσθέτουν αρώματα στα εσωτερικά του προϊόντος. Αυτοί περιλαμβάνουν αρωματικές ενώσεις, ενισχυτές γεύσης, φυσικά συστατικά, ρυθμιστές υγρασίας και αντιμικροβιακές ουσίες όπως η αιθανόλη, το διοξείδιο του θείου και το διοξείδιο του άνθρακα (Wyrwa & Barska, 2017).

Συνοπτικά, τα ενεργά συστήματα συσκευασίας στη βιομηχανία τροφίμων περιλαμβάνουν καθαριστές/scavengers για την αφαίρεση ανεπιθύμητων συστατικών και εκπομπών/ emitters για την απελευθέρωση ευεργετικών ουσιών, βελτιστοποιώντας έτσι το περιβάλλον συσκευασίας και διατηρώντας την ποιότητα των τροφίμων. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν σαρωτές οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και αιθυλενίου, εκπομπούς διοξειδίου του άνθρακα, εκπομπούς και απορροφητές οσμών, ρυθμιστές υγρασίας, αντιβακτηριακές ουσίες και αντιοξειδωτικά. Συνολικά, η ενεργή συσκευασία είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτίωση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Wyrwa & Barska, 2017).

2.2.3 Έξυπνη συσκευασία

Η έξυπνη συσκευασία με βάση νανοϋλικά αναφέρεται σε συσκευασίες τροφίμων που είναι εξοπλισμένες με νανοτεχνολογικές λειτουργίες που τους επιτρέπουν να ανταποκρίνονται σε διάφορες παραμέτρους όπως η εσωτερική ατμόσφαιρα της συσκευασίας, οι περιβαλλοντικές αλλαγές και η κατάσταση του τροφίμου (Alfei et al., 2020). Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη έξυπνων παραγόντων, όπως αισθητήρες, ανιχνευτές ή ιχνηλάτες, RFID ετικέτες και δείκτες για τον εντοπισμό, την παρακολούθηση, την καταγραφή και την εμφάνιση πληροφοριών ποιότητας και ιστορικού των τροφίμων (Ashfaq et al., 2022) κάποιιοι εκ των οποίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1. Η έξυπνη συσκευασία μπορεί να μεταδίδει πληροφορίες ποιότητας των τροφίμων και να λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν την παράταση της διάρκειας ζωής τους (Kusuma et al., 2024). Σε αντίθεση με την ενεργή συσκευασία, που βελτιώνει την ποιότητα των τροφίμων, η έξυπνη συσκευασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της κατάστασης του τροφίμου αλλά και στην παροχή προειδοποιήσεων εάν αυτό είναι απαραίτητο (Gupta et al., 2024). Αυτές οι συσκευασίες μπορούν να είναι εφοδιασμένες με νανοαισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύουν τη θερμοκρασία, την υγρασία, τα επίπεδα οξυγόνου ή την παρουσία μικροβιακής μόλυνσης (Yu et al., 2018), παραδείγματα νανοαισθητήρων που χρησιμοποιούνται στην νανοτεχνολογία τροφίμων αναφέρονται παρακάτω στον Πίνακα 2.1 σε συνδυασμό με τα κατάλληλα νανοσωματίδια. Διάφορα εργαλεία και τεχνικές, όπως ο συντονισμός πλασμονίου επιφανείας, η κυκλική βολταμετρία, η ανάλυση σύνθετης αντίστασης με βάση μικροηλεκτρόδια συμπλεγμένης διάταξης, η παλμική βολταμετρία, η βιοφωταύγεια και η ανάλυση έγχυσης ροής, χρησιμοποιούνται για την ταχεία ανίχνευση νοθευτών, τοξινών και τροφιμογενών παθογόνων σε διάφορα προϊόντα συσκευασίας νανοτροφίμων (Kuswandi & Moradi, 2019). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να μεταδοθούν στους χρήστες μέσω ηλεκτροοπτικών ιδιοτήτων ή να ενεργοποιήσουν διάφορες λειτουργίες συσκευασίας, όπως η ενεργοποίηση απορροφητικών υλικών για να αντιμετωπίσουν ανεπιθύμητες καταστάσεις που ενδέχεται να προκύψουν.

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση διαφόρων έξυπνων συστημάτων συσκευασίας.



Πηγή: *Ashfaq et al., 2022*

Επιπλέον, η νανοτεχνολογία επιτρέπει την ενσωμάτωση έξυπνων λειτουργιών σε ετικέτες ή επικαλύψεις συσκευασίας, που μπορούν να επικοινωνήσουν την κατάσταση του περιεχομένου, όπως η παρουσία διαρροών ή οι μεταβολές στη θερμοκρασία, προστατεύοντας έτσι την ακεραιότητα της συσκευασίας και την ασφάλεια του περιεχομένου (Kusuma et al., 2024). Παρ' όλα αυτά, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις στο να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ των δυνατοτήτων του εργαστηρίου και της πρακτικής εφαρμογής στον πραγματικό κόσμο.

Πίνακας 2.1: Οι κύριες παραλλαγές των νανοαισθητήρων που χρησιμοποιούνται από τη νανοτεχνολογία τροφίμων

Έξυπνη λειτουργία	Ενεργοποιημένη υποκλάση και παραλλαγές	Λειτουργίες	Βασικά νανοσωματίδια
Νανοαισθητήρες	Δείκτες φρεσκάδας	Να δώσει στους χρήστες το ακριβές σενάριο φρεσκάδας των προϊόντων διατροφής	Ag/CuNPs, πολυ(θειοφαίνιο), πολυανιλίνη, NP με βάση πρωτεΐνες, νανοσωλήνες άνθρακα
	Δείκτες αλλοίωσης και παθογόνων παραγόντων	Ανίχνευση αλλαγών που σχετίζονται με αλλοίωση, ανίχνευση παθογόνων και χημικών ρύπων Ανίχνευση CO ₂ , πρωτεϊνών, νουκλεϊκών οξέων, NH ₃ , ενζύμων	CdSe/ZnS QDs, UCNPs
	Δείκτες χρόνου-θερμοκρασίας	Ενδείξεις διακυμάνσεων χρόνου-θερμοκρασίας (π.χ. κατάψυξη-απόψυξη-επανακατάψυξη)	Νανοράβδοι Au, νανοπλάκες Ag, Νανοράβδοι Au/Ag AuNPs/αλγινικό
	Δείκτες υγρασίας		NPs με βάση την κυτταρίνη πολυ(στυρόλιο-μεθακρυλικό μεθυλεστέρα-ακρυλικό οξύ)/φωτοπολυμερισμένο ακρυλαμίδιο, συμπολυστυρένιο/μεθακρυλικό οξύ

Έξυπνη λειτουργία	Ενεργοποιημένη υποκλάση και παραλλαγές	Λειτουργίες	Βασικά νανοσωματίδια
	Οπτικούς αισθητήρες οξυγόνου	Ανίχνευση O ₂	TiO ₂ , NPs, SnO ₂ νανοκρύσταλλοι
	Οπτοχημικοί δείκτες CO ₂	Ανίχνευση CO ₂	NP με βάση χιτοζάνη, PtNPs
	Δείκτες τοξινών	Ανίχνευση αφλατοξίνης B1, αφλατοξίνης B2, οχρατοξίνης A	Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες βασισμένοι σε δενδριμερή
	Δείκτες ρύπων	Ανίχνευση ατραζίνης	Ογκομετρικός ανοσοαισθητήρας βασισμένος σε δενδριμερές
		Ανίχνευση μεθυλοπαραθείου	Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες βασισμένοι σε AgNPs/GNRs

Πηγή: Alfei et al., 2020

Με αυτόν τον τρόπο, η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στον τομέα της επεξεργασίας και συσκευασίας τροφίμων μπορεί να προσφέρει πιο αποτελεσματικές και ασφαλείς λύσεις για την αγορά και τους καταναλωτές (Alfei et al., 2020).

2.2.4 Βιοδιασπώμενη συσκευασία

Η αύξηση του ενδιαφέροντος για τη δημιουργία βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών από ανανεώσιμες πηγές αντικατοπτρίζει την ανησυχία για περιβαλλοντικά ζητήματα. Η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων, όπως η νανοκυτταρίνη και το νανοπυρίτιο, σε αυτές τις βιοαποικοδομήσιμες μήτρες ενισχύει τη μηχανική αντοχή, καθιστώντας τη συσκευασία πιο ανθεκτική στις κρούσεις, επιπλέον βελτιώνουν τη θερμική σταθερότητα, μειώνοντας τον κίνδυνο υποβάθμισης σε διάφορες συνθήκες. Η παρουσία νανοσωματιδίων βελτιώνει τις ιδιότητες των βιοαποικοδομήσιμων υλικών μέσω της αποτροπής της διέλευσης ουσιών που ενδέχεται να προκαλέσουν αποδόμηση. Αυτό συμβαίνει επειδή τα νανοσωματίδια μπορούν να λειτουργήσουν ως φραγμοί, εμποδίζοντας την πέραση επιβλαβών ουσιών μέσω του υλικού.

Με τη συνδυασμένη χρήση νανοσωματιδίων και βιοδιασπώμενων υλικών, η απόδοση της συσκευασίας βελτιώνεται χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τη φυσική της ικανότητα διάσπασης, διασφαλίζοντας τη φιλικότητά της προς το περιβάλλον. Οι βιοαποικοδομήσιμες μεμβράνες, κατασκευασμένες από πολυμερή που προέρχονται από βιομάζα, εμφανίζουν υδρόφιλες ιδιότητες λόγω της παρουσίας υδροξυλομάδων, προκαλώντας αυξημένη διαπερατότητα υδρατμών και επιφέροντας πλαστικοποιητικό αποτέλεσμα. Η προσθήκη αιθέριων ελαίων σε αυτές τις μεμβράνες παρέχει αντιοξειδωτικές και αντιμικροβιακές ιδιότητες (Gupta et al., 2024). Για την κατασκευή, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως η εξώθηση και η χύτευση. Τα συνθετικά βιοαποδομήσιμα πολυμερή, όπως το πολυγλυκολικό οξύ και το πολυγαλακτικό οξύ, προσφέρουν διάφορες εναλλακτικές λύσεις συσκευασίας μέσω ελεγχόμενης χημικής αποικοδόμησης στο νερό. Μια πρόσφατη μελέτη ανέπτυξε βιοαποδομήσιμα νανოსύνθετα φιλμ χρησιμοποιώντας CMC και MgO NP που προέρχονται από ζαχαροκάλαμοεναίο δεσμό. Τα νανοσωματίδια στο φιλμ οδήγησαν σε πιο αργή αποικοδόμηση από το φιλμ χωρίς νανοσωματίδια (Kumar et al., 2023).

Η προσθήκη νανοσωματιδίων σε βιοδιασπώμενα υλικά βελτιώνει την απόδοση της συσκευασίας χωρίς να επηρεάζεται η φυσική τους ικανότητα διάσπασης, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη φιλικότητά τους προς το περιβάλλον (Ortega et al., 2022).

2.2.5 Βρώσιμη συσκευασία

Οι προχωρημένες τεχνικές συσκευασίας τροφίμων αντιπροσωπεύουν έναν σημαντικό τομέα έρευνας για τη βελτίωση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων. Υπάρχει μια εμφανής τάση προς την ανάπτυξη περιβαλλοντικά βιώσιμων και βρώσιμων μορφών συσκευασίας, η οποία εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες της νανοτεχνολογίας.

Οι βρώσιμες συσκευασίες χρησιμοποιούν βιώσιμα, βιοαποδομήσιμα υλικά ως αναλώσιμα περιτυλίγματα ή επικαλύψεις γύρω από τα τρόφιμα, υιοθετώντας τη νανοτεχνολογία για τη δημιουργία μεμβρανών και επικαλύψεων σε επίπεδο νανομέτρων, δεν προκαλούν δηλαδή απόβλητα. Η χρήση των αναφερόμενων βρώσιμων συσκευασιών αποτελεί μια βιώσιμη και βιοαποδομήσιμη εναλλακτική λύση στον τομέα της ενεργητικής συσκευασίας τροφίμων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές συσκευασίες. Η αξία της βρώσιμης συσκευασίας φαίνεται στην ικανότητά της να διατηρεί την ποιότητα των τροφίμων, να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής τους, να μειώνει τα απόβλητα και να συμβάλλει στην οικονομική απόδοση των υλικών συσκευασίας (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία των τροφίμων προέρχονται από βρώσιμα συστατικά, όπως φυσικά πολυμερή, τα οποία μπορούν να καταναλωθούν απευθείας από τον άνθρωπο χωρίς κίνδυνο για την υγεία (Aguirre-Joya et al., 2018). Αυτά τα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε διαφορετικές μορφές μεμβρανών και επικαλύψεων χωρίς συγκεκριμένες διαφορές στη σύνθεση των υλικών

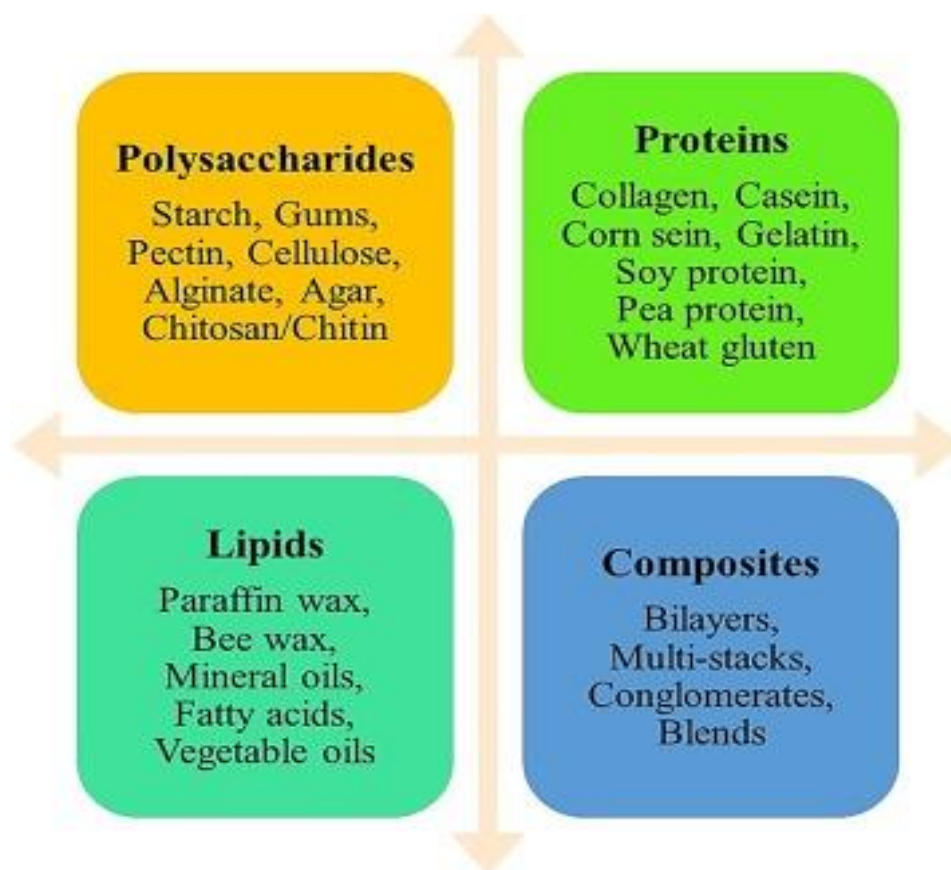
τους αλλά μάλλον με αλλαγές στο πάχος τους. Η σωστή επιλογή των βρώσιμων συστατικών συσκευασίας εξαρτάται κυρίως από το τρόφιμο που απαιτείται να συσκευαστεί και τη σύνθεση του υλικού από το οποίο προέρχεται η βρώσιμη συσκευασία, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου επεξεργασίας. Επιπλέον, η συσκευασία θα πρέπει να έχει αισθητηριακή συμβατότητα με τα συσκευασμένα τρόφιμα (Trajkovska Petkoska et al., 2021).

Τα βιοπολυμερή που χρησιμοποιούνται ως βρώσιμα υλικά ταξινομούνται ως:

- Πολυσακχαρίτες
- Πρωτεΐνες (ζωικής ή φυτικής προέλευσης)
- Λιπίδια
- Άλλα σύνθετα (Trajkovska Petkoska et al., 2021).

Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται καλύτερα οι παραπάνω κατηγορίες.

Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση βρώσιμων υλικών



Πηγή: Trajkovska Petkoska et al., 2021

Αυτά τα βρώσιμα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές τεχνολογίας τροφίμων μόνα τους ή σε συνδυασμό με άλλα συστατικά (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Οι βρώσιμες μεμβράνες και επικαλύψεις ποικίλλουν ως προς τη

φύση και την προέλευσή τους με πολλά διαφορετικά παραδείγματα που χρησιμοποιούνται, όπως επικάλυψη χιτοζάνης με βάση την ντομάτα , κάκτος -βλέννα, βρώσιμα φιλμ πρωτεΐνης κινόα/χιτοζάνης (Robledo et al., 2018), με βάση το μήλο (Kadzińska et al., 2020), άμυλο μπανάνας (Pinzon et al., 2020), Aloe Vera , φιλμ καρότου, ρύζι, καλαμπόκι, πατάτα και φιλμ ιβίσκου μεταξύ άλλων (Trajkovska Petkoska et al., 2021).

Η βρώσιμη συσκευασία βρίσκει εφαρμογές κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και της μεταφοράς, τα φρέσκα φρούτα και λαχανικά εκτίθενται σε διάφορες διαδικασίες οξείδωσης και ωρίμανσης που μπορούν να επιδεινώσουν την ποιότητά τους. Η χρήση βρώσιμων επικαλύψεων μπορεί να αποτρέψει την είσοδο του οξυγόνου, περιορίζοντας έτσι τις διαδικασίες οξείδωσης και την επιβράδυνση της ωρίμανσης των φρούτων και λαχανικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση της διάρκειας ζωής τους και τη διατήρηση της φρεσκάδας και της θρεπτικής τους αξίας (Yousuf & Qadri, 2020). Σε κρέας, πουλερικά και ψάρια καθώς περιορίζει τη βιοχημική αποσύνθεση των προϊόντων, προστατεύει τα λιπίδια και τις πρωτεΐνες τους από την οξείδωση, καθυστερεί το τάγγισμά τους και εμποδίζει τις μη επιθυμητές αλλαγές στο χρώμα τους (Trajkovska Petkoska et al., 2021).

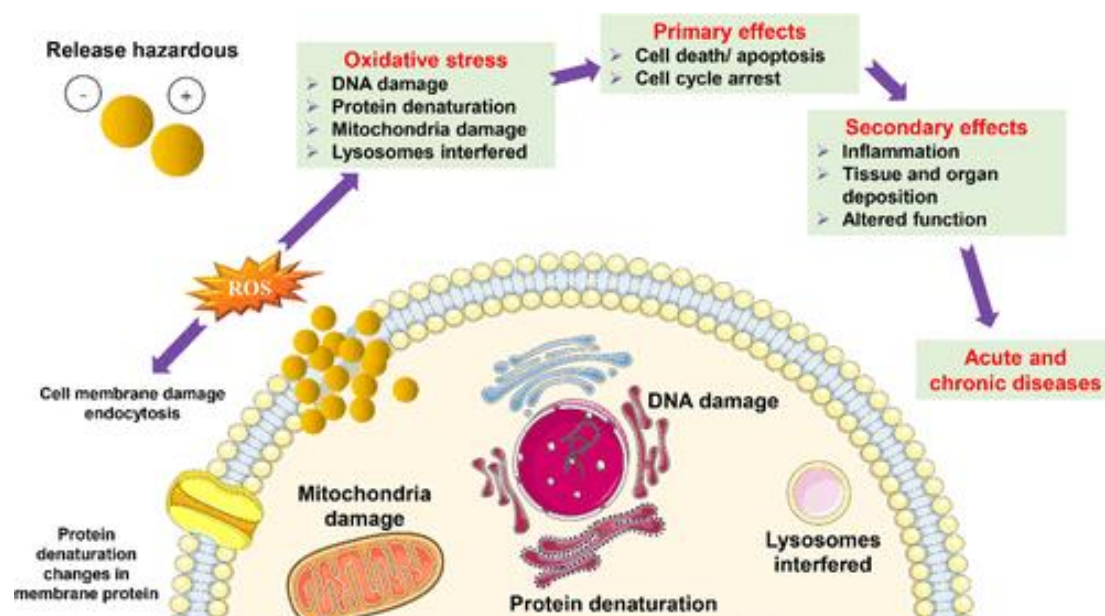
Ακόμη χρησιμοποιείται σε γαλακτοκομικά προϊόντα. Τα υψηλά ποσοστά ασθeneιών που συνδέονται με τα γαλακτοκομικά προϊόντα, όπως η λιστερίωση, έχουν επισημάνει τη σημασία της πρόληψης της μικροβιακής μόλυνσης σε αυτά. Επιπλέον, η σαλμονέλα είναι ένα άλλο βακτήριο που έχει εντοπιστεί σε χαλασμένο τυρί. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, μια λύση είναι ο φυσικός εμποτισμός των προϊόντων με μπαχαρικά, βότανα ή έλαια τους. Αυτή η πρακτική αντιμετωπίζει τη μικροβιακή αλλοίωση και συμβάλλει στην προστασία της ποιότητας των γαλακτοκομικών προϊόντων. Αναφέρεται ως μια μορφή έννοιας βρώσιμης συσκευασίας που εφαρμόζεται με επιτυχία στη γαλακτοβιομηχανία (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Τα δημητριακά και οι ξηροί καρποί χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Η χρήση βρώσιμης συσκευασίας έχει αποδειχθεί ότι είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τον έλεγχο της μη επιθυμητής μεταφοράς υγρασίας μεταξύ των προϊόντων και του περιβάλλοντος (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Τέλος, η απώλεια της τραγανότητας και της μαλακότητας στα αρτοπαρασκευάσματα λόγω της υγρασίας που απορροφάται κατά την αποθήκευσή τους μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με τη χρήση κατάλληλων βρώσιμων συσκευασιών (Jiménez et al., 2018).

Κεφάλαιο 3^ο Επιπτώσεις στον οργανισμό και στο περιβάλλον

3.1. Νανοσωματίδια στον οργανισμό

Ορισμένες μελέτες έχουν συνδέσει την κατάποση νανοσωματιδίων με διάφορες βιολογικές συνέπειες, συμπεριλαμβανομένης της μετουσίωσης της πρωτεΐνης, της διέγερσης αποκρίσεων οξειδωτικού στρες, της βλάβης του DNA όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. και άλλων δυνητικών επιπτώσεων στον οργανισμό. Ειδικότερα, η στοματική έκθεση σε νανοϋλικά, ιδίως σε στερεά νανοσωματίδια, έχει συσχετιστεί με πιθανή βλάβη του γαστρεντερικού συστήματος και άλλων δευτερογενών οργάνων. Παρόλα αυτά, οι ακριβείς μηχανισμοί και οι συνέπειες απαιτούν περαιτέρω ερευνητική δουλειά για να διευκρινιστούν πλήρως (Biswas et al., 2022). Πάντως, όσον αφορά στην ανθρώπινη έκθεση σε νανοσωματίδια, η μοναδική βεβαιότητα είναι ότι τα νανοσωματίδια δεν μεταβιβάζονται και δεν μεταβολίζονται με τον κανονικό τρόπο (Karimi et al., 2018). Η πολυεπιστημονική χρήση νανοσωματιδίων και η εισαγωγή τους μέσω καθημερινών προϊόντων έχουν προβληματίσει τους επιστήμονες υγείας και τους τοξικολόγους. Οι επιπτώσεις αυτές εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθος των νανοσωματιδίων και την αλληλεπίδρασή τους με τα κύτταρα.

Εικόνα 3.1: Μηχανισμός κυτταρικής βλάβης από NPs



Πηγή: Chen et al., 2023

Η μετανάστευση νανοσωματιδίων από τις συσκευασίες στα τρόφιμα/προϊόντα αποτελεί μια διαδικασία όπου συστατικά με χαμηλή μοριακή μάζα που αρχικά περιέχονται στη συσκευασία ελευθερώνονται στο περιεχόμενο του προϊόντος, επειδή τα υλικά συσκευασίας δεν είναι χημικά αδρανή, η άμεση επαφή μεταξύ της συσκευασίας και του περιεχομένου μπορεί να οδηγήσει στη μεταφορά ουσιών στο

προϊόν (Huang et al., 2015). Η χρήση νανοσυνθετικών υλικών στις συσκευασίες τροφίμων μπορεί να συνεπάγεται τον κίνδυνο εκπλήξεως των πληρωτικών νανοσωματιδίων και τη μόλυνση των τροφίμων. Ιδιαίτερα, εάν το νανοϋλικό πλήρωσης είναι από μη βιοσυμβατή ουσία, όπως το ασήμι (Ag), μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας. Αυτά τα πληρωτικά νανοσωματίδια έχουν τη δυνατότητα να εισέλθουν στα εσωτερικά όργανα του ανθρώπινου σώματος μέσω της κατανάλωσης, της διεισδυτικής επαφής με το δέρμα ή ακόμα και μέσω της εισπνοής (Ariyaratna et al., 2017). Στην περίπτωση της συσκευασίας τροφίμων, αυτή η διαδικασία αποκτά κρίσιμη σημασία, καθώς η άσκοπη μεταφορά ανεπιθύμητων συστατικών της συσκευασίας μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ασφάλεια των τροφίμων για τον καταναλωτή. Για παράδειγμα, το TiO_2 (το διοξείδιο του τιτανίου) θα μπορούσε να προκαλέσει τάγγιση λόγω της οξείδωσης των λιπιδίων σε λιπαρά τρόφιμα. Επιπλέον, λόγω της μετανάστευσης νανοϋλικών από τη συσκευασία λόγω κακής απόδοσης, η κατανάλωση τροφίμων που ήλθαν σε επαφή με νανοσυσκευασίες μπορεί να συνιστά μια πηγή έκθεσης (Huang et al., 2015).

Η διαδικασία μετανάστευσης συνίσταται από δύο βασικά στάδια. Αρχικά, η μετανάστευση αρχίζει με την ενθυλάκωση των νανοϋλικών εντός των επιφανειακών στρωμάτων. Στη συνέχεια, η απελευθέρωση των νανοϋλικών από το εσωτερικό του δείγματος απαιτεί τη διέλευσή τους μέσα από κενά και κενά μεταξύ των μορίων του πολυμερούς. Αυτή η διέλευση εξαρτάται από ιδιότητες του πολυμερούς, όπως η πυκνότητα, η κρυσταλλικότητα και ο βαθμός διασταύρωσης και διακλάδωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα νανοϋλικά που ενθυλακώνονται αποτελεσματικά εντός του φιλμ πρέπει να υποστούν διαδικασία οξείδωσης και να διαχυθούν προς τα έξω μέσω των πολυμερών μητρών. Αυτά τα νανοϋλικά κυρίως είναι υπεύθυνα για την απελευθέρωση σε μεταγενέστερα στάδια.

Η διαδικασία και η ταχύτητα μετανάστευσης των νανοϋλικών προς τα τρόφιμα εξαρτώνται από τα χημικά χαρακτηριστικά των τροφίμων και των πολυμερών. Η δυνατότητα διάλυσης των μεταλλικών νανοσωματιδίων σε υδατικό περιβάλλον αυξάνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται και μειώνεται όταν η τιμή του pH μειώνεται. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε αυξημένη μετανάστευση του μετάλλου στο σύστημα. Η μεταφορά των νανοσωματιδίων με υψηλότερη ταχύτητα μπορεί να οφείλεται σε μια αυξανόμενη διαπερατότητα, η οποία αναμένεται να υπάρχει σε πολυμερικά υλικά με χαμηλότερο μοριακό βάρος, προκαλώντας μεγαλύτερο ελεύθερο όγκο. Ο ρυθμός μεταφοράς ενός συστήματος αυξάνεται όταν το μέγεθος των νανοσωματιδίων και το δυναμικό ιζώδες του πολυμερούς μειώνονται (Huang et al., 2015).

3.2. Έλεγχος μετανάστευσης

Κατά την ανάπτυξη νέων υλικών για τη συσκευασία τροφίμων, είναι απαραίτητο να μελετηθούν οι ιδιότητες μετανάστευσης των συστατικών, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν μεταναστεύουν επιβλαβή ή ανεπιθύμητα συστατικά στα τρόφιμα. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, η δοκιμή μετανάστευσης σημαίνει «τον

προσδιορισμό της απελευθέρωσης ουσιών από το υλικό ή το αντικείμενο είτε σε τρόφιμα είτε σε προσομοιωτή τροφίμων» (Ashfaq et al., 2022).

Ο έλεγχος της μετανάστευσης ουσιών προς το τρόφιμο πραγματοποιείται με την χρήση προσομοιωτών τροφίμων οι οποίοι είναι μοντέλα συστημάτων που επιλέγονται για να αναπαράγουν παρόμοιες αλληλεπιδράσεις με αυτές των πραγματικών τροφίμων. Αυτό σημαίνει ότι και η σύνθεση και η μεταφορά τους πρέπει να είναι παρόμοιες. Ένας από τους κύριους αντιπρόσωπους τροφίμων είναι το νερό, το οποίο θεωρείται ιδανικός αντιπροσωπευτικός προσομοιωτής για μια ευρεία ποικιλία τροφίμων, όπως ψωμί, φρέσκα φρούτα και λαχανικά, κρέας και ψάρι. Επιπλέον, μια ακόμα πρακτική είναι η χρήση ελαφρώς οξυμένου νερού, όπως νερό με 3% οξικό οξύ, ως ακόμα πιο αποτελεσματικός προσομοιωτής τροφίμων για προϊόντα με όξινο περιβάλλον, όπως αναψυκτικά και ανθρακούχα ποτά με pH χαμηλότερο από 4,6. Επιπλέον, τα αλκοολούχα τρόφιμα και ποτά μπορούν να προσομοιωθούν μέσω διαλύματος με 10% αιθανόλη ή με πραγματικό αλκοολικό τίτλο, εάν η συγκέντρωση υπερβαίνει το 10% (Huang et al., 2015). Οι αξιολογήσεις που διεξήχθησαν σχετικά με τη μετανάστευση νανοσωματιδίων αργίλου σε λαχανικά που συσκευάστηκαν με βιοαποικοδομήσιμο άμυλο/νανοσύνθετο άργιλο έφεραν ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Αυτές οι αξιολογήσεις κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συνολική μετανάστευση ήταν σύμφωνη με τις ευρωπαϊκές οδηγίες (European Commission 2007/19/EC, 2007) επιβεβαιώνοντας έτσι την καταλληλότητα αυτών των υλικών για χρήση σε συσκευασίες τροφίμων (Alfei et al., 2020).

Ωστόσο, όταν τα νανοσωματίδια ενσωματώνονται σωστά στη μήτρα του πολυμερούς, οι πιθανότητες μετανάστευσής τους δεν είναι πολύ υψηλές. Παρόλα αυτά, ορισμένοι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν τη μετανάστευσή τους στα τρόφιμα. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να μελετηθούν η μετανάστευση, η τοξικότητα, τα επιτρεπόμενα όρια και η αλληλεπίδραση των νανοσωματιδίων με το πολυμερές πριν από την παραγωγή οποιουδήποτε νανοσύνθετου υλικού που έρχεται σε άμεση επαφή με τα τρόφιμα (Ashfaq et al., 2022).

3.3. Νανοτοξικότητα

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ νανοϋλικών και κυττάρων, ζώων, ανθρώπων και περιβάλλοντος είναι πολύπλοκες και απαιτούν εκτενή ερευνητική εργασία προκειμένου να κατανοηθεί αναλυτικά πώς οι φυσικές, χημικές και άλλες ιδιότητες των νανοϋλικών επηρεάζουν αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Μόνο μέσω αυτής της έρευνας μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια η τελική επίδραση των νανοϋλικών στην υγεία και το περιβάλλον. Σύμφωνα με έκθεση, η μακροχρόνια χρήση έτοιμων για κατανάλωση τροφίμων μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στη μικροχλωρίδα του εντέρου, προκαλώντας δυσκοιλιότητα. Άλλες επιπτώσεις περιλαμβάνουν την παραγωγή αντιδραστικών ειδών οξυγόνου (ROS), γονιδιοτοξικές επιδράσεις, και βλάβες σε σημαντικά όργανα, όπως ο ήπαρ, οι νεφροί, ο στόμαχος και ο σπλήνας (Ashraf et al., 2021). Η αύξηση της παραγωγής ROS από νανοδομημένα υλικά μπορεί να οδηγήσει

σε κυτταρική βλάβη ή οξειδωτικό στρες, αντίθετα με τις θετικές τους εφαρμογές ως αντιμικροβιακά και αντιοξειδωτικά. Η νανοτοξικότητα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένης της βλάβης στο DNA, της υπερβολικής διέγερσης των κυττάρων, των αλλαγών στην κινητικότητα των κυττάρων, της τοξικότητας, της κυτταροτοξικότητας, της απόπτωσης και ακόμα του σχηματισμού καρκίνου. Παράγοντες όπως η τοξικότητα του χρησιμοποιούμενου νανοσωματιδίου, ο τύπος της μήτρας συσκευασίας, η έκταση της μετανάστευσης και ο ρυθμός απορρόφησης του συγκεκριμένου τροφίμου μπορούν να επηρεάσουν αυτόν τον αντίκτυπο. Οι πιθανοί κίνδυνοι των νανοδομημένων υλικών μπορούν να εκτιμηθούν αναλόγως με τις θέσεις εισβολής, την επακόλουθη εναπόθεση και τη μεταφορά των νανοϋλικών στο σώμα. Η έκθεση σε μεγαλύτερες ποσότητες αυτού του είδους των ενώσεων μέσω αναπνευστικής ή δερματικής απορρόφησης μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά ζητήματα ασφάλειας (Biswas et al., 2022).

Τα οργανικά νανοσωματίδια, όπως οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια, οι υδατάνθρακες και η χιτοζάνη, θεωρούνται γενικά μη τοξικά και περισσότερο ασφαλή καθώς διασπώνται πλήρως στο ανθρώπινο πεπτικό σύστημα και δεν είναι βιοανθεκτικά. Ωστόσο, μπορούν να μεταβάλλουν τη διαδικασία της πέψης, τη βιοδιαθεσιμότητα και τις θρεπτικές τους ιδιότητες σε σχέση με την αρχική τους μορφή, εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας επιφάνειας προς όγκο. Αυτό μπορεί να αυξήσει τη βιοδιαθεσιμότητά τους, κάτι που μπορεί μερικές φορές να είναι επικίνδυνο. Ακόμη, ορισμένα ανόργανα νανοϋλικά, όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα, το οξείδιο του πυριτίου, το οξείδιο του αργιλίου, το διοξείδιο του τιτανίου, ο ψευδάργυρος και τα νανοσωματίδια αργύρου, μπορεί να παρουσιάζουν απρόβλεπτους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια (Gupta et al., 2024). Έχει επίσης αναφερθεί ότι διάφορα νανοσωματίδια επηρεάζουν τον πολλαπλασιασμό των κυττάρων, την αρχή της απόπτωσης, καθώς και την απελευθέρωση κυτοκίνης, προκαλώντας κυτταροτοξικότητα σε δοκιμές in-vivo σε ήπαρ, νεφρούς, στομάχι και σπλήνα. Πέραν αυτού, το νανογαλάκτωμα με λιπόφιλο πυρήνα εμφανίζει διαφοροποιήσεις στο ρυθμό και την εκτατότητα πέψης και απορρόφησης στο πεπτικό σύστημα, γεγονός που μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις λόγω της χημικής φύσης του ως επιφανειοδραστικής ουσίας. Η πρόοδος στη νανοτεχνολογία και οι εφαρμογές της στους κλάδους των τροφίμων και της γεωργίας έχουν ως αποτέλεσμα να υποδεικνύεται ότι τα νανοσωματίδια θα πρέπει να επιλέγονται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη και τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά τους. (Ashraf et al., 2021).

Παρόλο που δεν υπάρχει ακόμα καμία πληροφορία σχετικά με την καρκινογένεση, τη γονοτοξικότητα ή την τερατογένεση των νανοσωματιδίων στα τρόφιμα, ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO), ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) και η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχουν δηλώσει ότι η ασφάλεια των νανοσωματιδίων στα τρόφιμα πρέπει να ενισχυθεί (Magnuson et al., 2013). Η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) αναδιατύπωσε τις κατευθυντήριες οδηγίες της σχετικά με την αξιολόγηση των κινδύνων που σχετίζονται

με τη χρήση νανοεπιστημών και νανοτεχνολογίας στην αλυσίδα τροφίμων και ζωοτροφών, καθώς και στην υγεία των ανθρώπων και των ζώων. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση νέων τροφίμων, προσθέτων τροφίμων/ζωοτροφών, υλικών επαφής με τρόφιμα και φυτοφαρμάκων, μεταξύ άλλων εφαρμογών, εντός των ορίων που ορίζει η EFSA. Η αναθεωρημένη κατευθυντήρια γραμμή, γνωστή πλέον ως Οδηγία Επιστημονικής Επιτροπής για την αξιολόγηση νανοκινδύνων (SC Guidance on Nano-RA), έχει διερευνήσει σημαντικές επιστημονικές έρευνες που παρέχουν πληροφορίες για τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των νανοϋλικών, την αξιολόγηση της έκθεσης και τον χαρακτηρισμό κινδύνου, καθώς και τις εφαρμοστέες περιοχές τους (EFSA Scientific Committee et al., 2021).

3.3.1. Αλλεργίες από νανοσωματίδια

Η εμφάνιση αλλεργιών σε σχέση με τη νανοτεχνολογία στα τρόφιμα και στις συσκευασίες τροφίμων αποτελεί ένα ανησυχητικό φαινόμενο που απασχολεί την επιστημονική και ιατρική κοινότητα. Με τη συνεχή εξέλιξη της νανοτεχνολογίας και την αυξανόμενη χρήση νανοσωματιδίων στα τρόφιμα, η πιθανότητα εμφάνισης αλλεργικών αντιδράσεων έχει επίσης αυξηθεί. Τα νανοσωματίδια, λόγω του μικρού τους μεγέθους και της υψηλής δραστηριότητάς τους, μπορούν να διεισδύσουν στο ανθρώπινο σώμα μέσω της κατανάλωσης ή της εισπνοής. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αλληλεπιδράσεις με το ανοσοποιητικό σύστημα, οδηγώντας σε αλλεργικές αντιδράσεις. Παρά την ανάπτυξη σύγχρονων μεθόδων και τεχνικών για τη διάγνωση και την αντιμετώπιση αλλεργιών, η ακριβής αιτία και η μηχανισμός εμφάνισης αλλεργιών λόγω της νανοτεχνολογίας παραμένουν ακόμη ανεξερεύνητα. Επομένως, η κατανόηση των πιθανών κινδύνων και η ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων πρόληψης αποτελούν προτεραιότητα για τη διασφάλιση της υγείας των καταναλωτών. Οι καταναλωτές με προϋπάρχουσες αλλεργίες ή ευαισθησίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι όταν εκτίθενται σε προϊόντα που περιέχουν νανοσωματίδια.

Αυτές οι αντιδράσεις εκδηλώνονται κυρίως σε μορφή φλεγμονών στα πνευμόνια και σε αυξημένη παραγωγή ενεργών οξυγόνου και άλλων αντιοξειδωτικών ουσιών. Είδη νανοσωματιδίων όπως τα νανοσωματίδια άνθρακα και τα νανοσωματίδια SiO₂ έχουν καταγραφεί να ενεργοποιούν αυτούς τους μηχανισμούς αλλεργιογόνου αντίδρασης. Ειδικότερα, τα νανοσωματίδια άνθρακα είναι γνωστά για την προκαλούν αλλεργικών φλεγμονών στους πνεύμονες, ενώ τα νανοσωματίδια SiO₂ μπορούν να προκαλέσουν αλλεργικές ανοσοαποκρίσεις τύπου Th₂ σε επίπεδο ζωντανού οργανισμού. Αυτές οι αναφερόμενες επιπτώσεις επισημαίνουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και προσοχή στη χρήση νανοσωματιδίων στα τρόφιμα, προκειμένου να αναλυθούν οι πιθανές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Οι καταναλωτές με προϋπάρχουσες αλλεργίες ή ευαισθησίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι όταν εκτίθενται σε προϊόντα που περιέχουν νανοσωματίδια (He & Hwang, 2016).

3.4. Εφαρμογές στην αγροτική παραγωγή και επιπτώσεις

Από το 2003, η νανοτεχνολογία έχει αρχίσει να εφαρμόζεται στη γεωργία και τη βιομηχανία τροφίμων, κυρίως μετά τη δημοσίευση του πρώτου οδικού χάρτη από το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών τον Σεπτέμβριο του 2003 (He et al., 2019). Μια αξιολόγηση των δεδομένων από τη βιβλιογραφική έρευνα δείχνει ότι περισσότερο από τα δύο τρίτα των εφαρμογών αφορούν τη χρήση στα τρόφιμα (88%), ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό απευθύνεται στη γεωργία (9%) και τις ζωοτροφές (3%). Στη διάρκεια της γεωργικής παραγωγής, τα νανοπαρασκευάσματα φυτοφαρμάκων και άλλα αγροχημικά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα σε σχέση με τα παραδοσιακά προϊόντα. Η επίτευξη αυτού επιτυγχάνεται με τη μείωση του μεγέθους των ενεργών συστατικών και άλλων ενώσεων σε νανοεπίπεδο, την ενσωμάτωσή τους σε νανοκάψουλες, ή την ανάμιξή τους σε άλλα φορέα νανομεγέθους. Τα νανοκαψουλώματα με βάση τη χιτοζάνη, που προέρχεται από τη χιτίνη, έχουν εξεταστεί για διάφορες εφαρμογές στον τομέα των αγροχημικών. Σύμφωνα με τα παραπάνω τα νανοκαψουλώματα φορτώνονται υψηλά με μυκητοκτόνα, με απελευθέρωση που συμβαίνει σταδιακά, ενώ παράλληλα προκαλούν μειωμένη επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών σε σύγκριση με τα κυρίαρχα εμπορικά προϊόντα. Πέραν της προστασίας από τα παράσιτα, η νανοτεχνολογία ενδέχεται επίσης να βελτιώσει την παραγωγή και την ποιότητα των καλλιεργειών, με τη δυνατότητα μείωσης της ποσότητας του λιπάσματος που απαιτείται. Επιπλέον, η παρουσία νανοσωματιδίων στο έδαφος μπορεί να επηρεάσει θετικά την απορρόφηση θρεπτικών συστατικών από τις ρίζες των φυτών και τη μεταφορά του νερού (Peters et al., 2016).

Η χρήση νανογεωργικών υλικών έχει πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Ο πρώτος κίνδυνος προκύπτει από τη βιομεγέθυνσή τους στην τροφική αλυσίδα, με την πιθανότητα να επηρεάσουν τον άνθρωπο σε υψηλότερο τροφικό επίπεδο. Επιπλέον, τα νανοϋλικά μπορεί να παρουσιάζουν επαγγελματικούς κινδύνους, το γεγονός του οποίου δικαιολογεί τη διενέργεια οικοτοξικολογικής έρευνας που λαμβάνει υπόψη την έκθεση, τις επικίνδυνες συμπεριφορές, τις σχέσεις δόσης-απόκρισης, καθώς και την περιβαλλοντική μοίρα. Τα νανοσωματίδια ενδέχεται να μετατραπούν σε τοξική ή αντίρροπη μορφή στο περιβάλλον, προκαλώντας ακόμα περαιτέρω διαταραχές στη μικροβιακή οικολογία του εδάφους (Agora et al., 2022). Οι ανησυχίες σχετικά με την περιβαλλοντική ασφάλεια προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των νανοϋλικών, όπως τα νανολιπάσματα, τα νανοζιζανιοκτόνα και οι λιγότερο πιθανοί ακινητοποιημένοι νανοαισθητήρες, με το περιβάλλον. Η συμπεριφορά και η μεταβίβαση των νανοϋλικών στο περιβάλλον εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών συνθηκών δυσκολεύει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και της μεταφοράς των νανοϋλικών. Επομένως, η παρακολούθηση και η ανίχνευση της κατανομής των νανοϋλικών στο περιβάλλον είναι δύσκολη λόγω των πολύπλοκων νανο-βιο-οικολογικών αλληλεπιδράσεων (He et al., 2019).

3.4.1. Περιβαλλοντολογικές Επιπτώσεις

Οι συσκευασίες ναοτροφίμων εγείρουν ανησυχίες για την περιβαλλοντική ασφάλεια, καθώς τα ναοσωματίδια που χρησιμοποιούνται στα υλικά συσκευασίας ενδέχεται να ενέχουν κινδύνους (Ahmad et al., 2024). Τα δεδομένα σχετικά με τη βιομηχανική παραγωγή ναοσωματιδίων δεν έχουν ακόμη ενσωματωθεί εκτενώς σε μελέτες, όπως η ποσότητα που ελευθερώνεται σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής αυτών των υλικών και οι μορφές με τις οποίες αυτά απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Τα ναοσωματίδια μπορεί να αλλάξουν χημική και φυσική μορφή αμέσως μετά την απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον, και μπορεί να έχουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες σε σχέση με την αρχική τους μορφή (Naseer et al., 2018). Τα ναοσωματίδια μπορεί να εκτίθενται στο περιβάλλον σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους, όπως κατά την παραγωγή τους, τις διαρροές κατά την κατασκευή, τη μεταφορά, την αποθήκευση, τη βιομηχανική και καταναλωτική τους χρήση, και τη διάθεση των αποβλήτων. Επιπλέον, η κατεύθυνση των ναοσωματιδίων στο περιβάλλον εξαρτάται από την κινητικότητά τους σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως το έδαφος, το νερό και ο αέρας, καθώς και από την ικανότητά τους να υποστούν βιοαποικοδότηση ή χημική μετατροπή (Ashraf et al., 2021). Τα ναοσωματίδια μπορούν να εισχωρήσουν στο περιβάλλον απόκρυφα μέσω του νερού, του εδάφους και του αέρα κατά τη διάρκεια διαφόρων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Αυτό προκαλεί αυξανόμενη ανησυχία από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη (Khan et al., 2019).

Παρά τις πολλές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για την ανίχνευση των ναοβιο-οικολογικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ναοϋλικών και του βιοτικού και αβιοτικού περιβάλλοντος σε ένα συνδεδεμένο οικοσύστημα, απαιτούνται εκτενείς οικοτοξικολογικές μελέτες για να αξιολογηθεί η καθυστερημένη επίδραση των ναοσωματιδίων στην περιβαλλοντική υγεία. Προκειμένου να βελτιώσουμε την ασφάλεια της χρήσης ναοσωματιδίων για το περιβάλλον και άλλους μη-στοχευμένους οργανισμούς, όπως ο άνθρωπος, τα ζώα και η υδρόβια ζωή, είναι απαραίτητο να αναπτύξουμε ναοσωματίδια με πιο αυστηρό έλεγχο περιβαλλοντικής ασφάλειας (Ashraf et al., 2021). Επιπλέον, η έλλειψη τυποποιημένων μεθόδων διάθεσης για τα υλικά συσκευασίας ναοτροφίμων μπορεί να επιδεινώσει τις περιβαλλοντικές προκλήσεις (Aroga et al., 2022). Η ανακύκλωση αυτών των υλικών αποτελεί πρόκληση. Αν δεν ανακυκλωθούν σωστά, υπάρχει κίνδυνος να διαρρεύσουν στο οικοσύστημα, προκαλώντας δυνητικά βλάβες στη χλωρίδα και την πανίδα, να διαταράξουν τους φυσικούς κύκλους και να προκαλέσουν τοξικότητα σε διάφορους οργανισμούς. Τέλος, ως μην ξεχνάμε και την διαχείριση των αποβλήτων που περιέχουν ναοϋλικά, η οποία απαιτεί νέες μεθόδους και υποδομές, οι οποίες μπορεί να μην είναι ακόμη διαθέσιμες ή οικονομικά βιώσιμες (Chaudhry et al., 2017).

Η χρήση ναοσωματιδίων (NP) στη γεωργία αναδεικνύει την ανάγκη για προσεκτική αξιολόγηση των επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον μέσω τοξικολογικών μελετών. Τα ναοσωματίδια (NP) που χρησιμοποιούνται στη γεωργία απαιτούν προσεκτική αξιολόγηση λόγω της εισβολής τους στα κύτταρα λόγω του μικρότερου μεγέθους και της μεγαλύτερης

λιποφιλικότητας. Η τοξικότητά τους ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η συγκέντρωση, το σχήμα και η δομή. Για παράδειγμα, οι γεωργικές εφαρμογές του οξειδίου του γραφενίου θεωρούνται ασφαλείς, αλλά η υπεροξειδωση της λιγνίνης από μύκητες μπορεί να το μετατρέψει σε φιλικό προς το περιβάλλον. Τα νανοσωματίδια επίσης μπορεί να προκαλέσουν σχηματισμό ενδοκυτταρικών αντιδραστικών ειδών οξυγόνου στα φυτά και να επηρεάσουν δυσμενώς τη μικροβιακή ποικιλότητα και τη σύνθεση του εδάφους, καθιστώντας τα κύριους ρύπους. Έτσι, η χρήση νανογεωργικών χημικών ουσιών πρέπει να περιοριστεί για την επισιτιστική ασφάλεια χωρίς να προκαλεί ρύπανση (Arora et al., 2022).

3.5 Βιοσυσσώρευση και Βιομεγέθυνση

Η βιοσυσσώρευση και η βιομεγέθυνση είναι δύο σημαντικές διαδικασίες και αποτελούν σημαντικό θέμα έρευνας και ανησυχίας στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Η βιοσυσσώρευση αναφέρεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των ουσιών μέσα στους οργανισμούς με την πάροδο του χρόνου, ενώ η βιομεγέθυνση αφορά την αύξηση της συγκέντρωσης των ουσιών καθώς αυτές μεταφέρονται σε ανώτερα τροφικά επίπεδα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι ουσίες αυτές είναι τα νανοσωματίδια και μπορούν να προκαλέσουν επιπτώσεις στην διατροφική αλυσίδα και στον άνθρωπο (Zheng & Nowack, 2022).

Τα νανοσωματίδια έχουν φθάσει στο περιβάλλον (όπως αέρας, λύματα, γλυκό νερό, έδαφος, φυτά κ.λπ.) ηθελημένα ή ακούσια και εισέρχονται στους ζωντανούς οργανισμούς μέσω διαφορετικών μηχανισμών. Ανάλογα με τη φύση των νανοσωματιδίων και το περιβάλλον τους, αυτά μπορεί να αφομοιωθούν από τα φυτά μέσω των ριζών κατά τη διάρκεια της φυτοανάπτυξης (Murali et al., 2022) ή να εισέλθουν στα ζώα μέσω της κατανάλωσης των φυτών που τα περιέχουν, καθώς επίσης και μέσω της αναπνοής, της κατανάλωσης τροφής ή μέσω της επαφής με το δέρμα. Μόλις τα νανοσωματίδια εισέλθουν στον οργανισμό, μπορούν να συσσωρευτούν σε διάφορα όργανα και ιστούς. Για παράδειγμα, τα νανοσωματίδια αργύρου (AgNPs) έχουν παρατηρηθεί ότι βιοσυσσωρεύονται στα ψάρια, οδηγώντας σε οξειδωτικό στρες και βλάβες στα βράγχια και στους ιστούς του ήπατος. Ομοίως, οι γαιοσκώληκες που εκτίθενται σε νανοσωματίδια σε μολυσμένο έδαφος μπορούν να συσσωρεύσουν αυτά τα σωματίδια στους ιστούς τους, επηρεάζοντας την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή τους.

Οι μηχανισμοί μέσω των οποίων τα νανοσωματίδια συσσωρεύονται και μεταφέρονται στους οργανισμούς περιλαμβάνουν:

1. **Φυσικοχημική Αλληλεπίδραση:** Τα νανοσωματίδια μπορούν να προσκολλώνται σε κυτταρικές μεμβράνες και να διαπερνούν τα κύτταρα. Διασχίζουν βιολογικούς φραγμούς πιο εύκολα από τα μεγαλύτερα σωματίδια λόγω του μικρού μεγέθους τους και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους.

2. **Ενδοκυττάρωση:** Οι οργανισμοί μπορούν να καταπίνουν νανοσωματίδια μέσω της ενδοκυττάρωσης, όπου τα κύτταρα καταπίνουν εξωκυτταρικά υλικά.
3. **Διατροφική Έκθεση:** Τα νανοσωματίδια μπορούν να καταναλωθούν από οργανισμούς μέσω μολυσμένης τροφής και να μεταφερθούν σε ανώτερα τροφικά επίπεδα μέσω της τροφικής αλυσίδας. Μόλις καταποθούν ή απορροφηθούν, μπορούν να αλληλεπιδράσουν με κυτταρικά συστατικά, συμπεριλαμβανομένων των πρωτεϊνών, των λιπιδίων και των νουκλεϊκών οξέων. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό συμπλεγμάτων NP-πρωτεΐνης, τα οποία μπορεί να ενισχύσουν τη σταθερότητα και τη διατήρηση των νανοσωματιδίων εντός του οργανισμού (Zheng & Nowack, 2022).

3.5.1 Επιπτώσεις στην διατροφική αλυσίδα και τον άνθρωπο

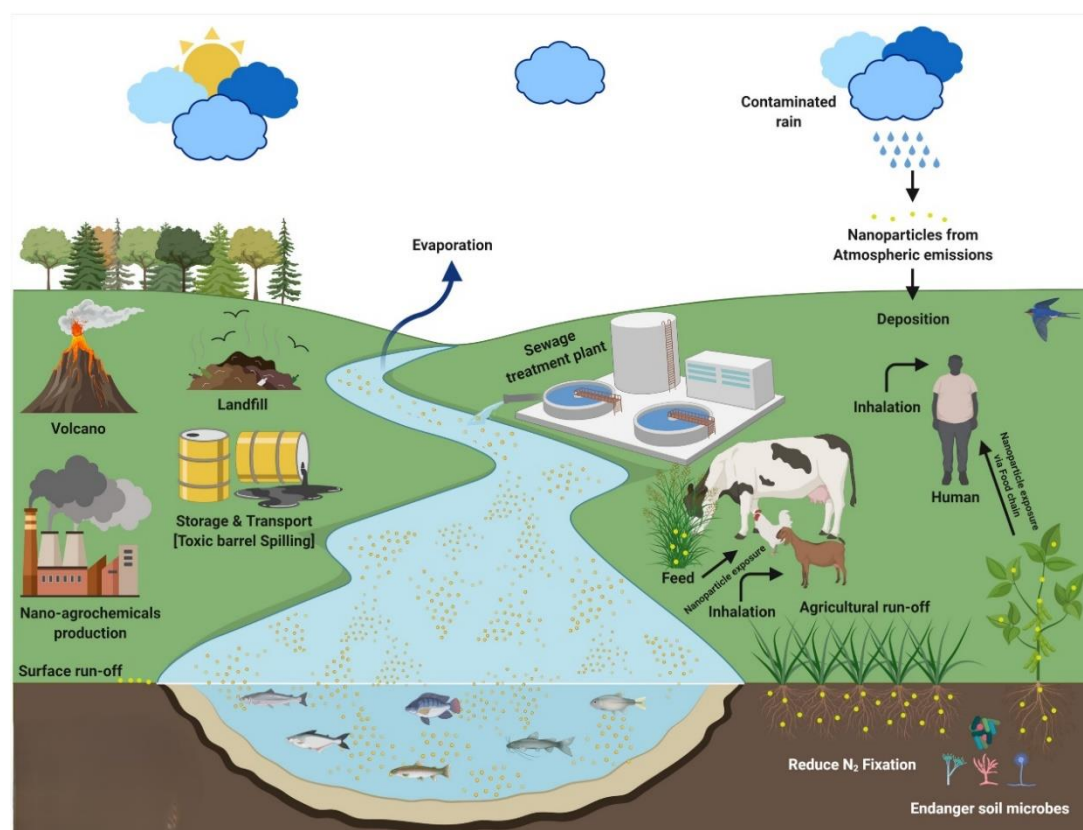
Η συσσώρευση νανοσωματιδίων στην τροφική αλυσίδα μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για τον άνθρωπο. Καθώς τα νανοσωματίδια εισέρχονται σε οργανισμούς σε χαμηλότερα τροφικά επίπεδα, όπως το φυτοπλαγκτόν και τα μικρά θαλάσσια ζώα, αρχίζουν να συσσωρεύονται στους ιστούς τους. Όταν αυτοί οι μικρότεροι οργανισμοί καταναλώνονται από μεγαλύτερα ζώα, τα νανοσωματίδια μεταφέρονται και συσσωρεύονται περαιτέρω στους νέους ξενιστές. Αυτός ο μηχανισμός, γνωστός ως βιομεγέθυνση, προκαλεί την αύξηση των συγκεντρώσεων των νανοσωματιδίων καθώς κάποιος κινείται προς τα πάνω στην τροφική αλυσίδα.

Οι άνθρωποι, ως κορυφαίοι καταναλωτές στην τροφική αλυσίδα, διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να εκτεθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων μέσω της κατανάλωσης θαλασσινών και άλλων ζωικών προϊόντων. Τα νανοσωματίδια μπορούν να διεισδύσουν στους ιστούς και τα όργανα των ζώων, συμπεριλαμβανομένων των ειδών που καταναλώνονται από τον άνθρωπο. Η αυξημένη έκθεση σε νανοσωματίδια μπορεί να έχει διάφορες επιπτώσεις στην υγεία, όπως να προκαλέσει τοξικές αντιδράσεις και να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης αλλεργιών, καθώς επίσης προκαλούν οξειδωτικό στρες, φλεγμονή και κυτταροτοξικότητα στα ανθρώπινα κύτταρα. Επιπλέον, μπορούν να διασχίσουν τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό, εγείροντας ανησυχίες για τις πιθανές νευροτοξικές τους επιδράσεις. (Shi et al., 2020).

Η βιοσυσσώρευση νανοσωματιδίων μπορεί να επηρεάσει και το περιβάλλον (Zheng & Nowack, 2022). Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα με είναι η παραμονή τους στο περιβάλλον. Σε αντίθεση με πολλές φυσικές ουσίες, τα νανοσωματίδια μπορούν να παραμείνουν στο έδαφος και στο νερό για παρατεταμένες περιόδους χωρίς να διασπώνται. Αυτή η επιμονή αυξάνει την πιθανότητα μακροχρόνιας έκθεσης και συσσώρευσης σε οργανισμούς, οδηγώντας σε χρόνιες επιπτώσεις που μπορεί να μην είναι άμεσα εμφανείς όπως της διατάραξη της λειτουργίας των οικοσυστημάτων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών ειδών. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί η ικανότητα τους να «ταξιδεύουν» σε διαφορετικά περιβαλλοντικά

διαμερίσματα μέσω της απορροής και όχι μόνο, χαρακτηριστικά παραδείγματα στην Εικόνα 3.2, μεταδίδοντας την μόλυνση.

Εικόνα 3.2: Οι πιθανές πορείες των νανοσωματιδίων



Πηγή: Murali et al., 2022

Η κατανόηση και η διαχείριση των κινδύνων που σχετίζονται με τη βιοσυσσώρευση και τη βιομεγέθυνση νανοσωματιδίων είναι κρίσιμης σημασίας για την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Οι κανονισμοί και οι πρακτικές που στοχεύουν στον περιορισμό της έκθεσης σε νανοσωματίδια, καθώς και στην ενθάρρυνση της έρευνας για τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις τους, είναι απαραίτητες για την ασφάλεια των τροφίμων και την υγεία των καταναλωτών. Αυτοί οι κανονισμοί πρέπει να περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της παρουσίας νανοσωματιδίων στα τρόφιμα και το περιβάλλον, την αξιολόγηση των κινδύνων που σχετίζονται με τη χρήση τους και την ανάπτυξη στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης των ανθρώπων και των οικοσυστημάτων σε αυτά τα υλικά.

Σε αυτό το πλαίσιο, είναι αναγκαίο να ενισχυθεί η έρευνα για την κατανόηση των μηχανισμών της βιοσυσσώρευσης και της βιομεγέθυνσης των νανοσωματιδίων, καθώς και των επιπτώσεών τους στους ανθρώπους και τα οικοσυστήματα. Με την ανάπτυξη και την εφαρμογή των κατάλληλων μεθόδων ανάλυσης και αξιολόγησης, μπορούμε να προχωρήσουμε σε πιο ασφαλείς και αποτελεσματικές εφαρμογές της

νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων, προωθώντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και την ευημερία της κοινωνίας(Shi et al., 2020).

Κεφάλαιο 4^ο Κοινωνικά και νομικά θέματα

4.1. Κοινωνικά και ηθικά ζητήματα

Η νανοτεχνολογία, αν και πολλά υποσχόμενη, προκαλεί ποικίλες αντιδράσεις από το κοινό. Οι αντιλήψεις του κοινού για τη νανοτεχνολογία στα τρόφιμα και την υγεία επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η ενημέρωση, η εκπαίδευση, η πολιτιστική προέλευση και οι προσωπικές εμπειρίες. Είναι μια σύγχρονη τεχνολογία που δεν είναι ευρέως γνωστή στο ευρύ κοινό, κάτι που καθιστά σημαντική την ενημέρωση των συμμετοχόντων σχετικά με τα συγκεκριμένα τρόφιμα που παράγονται με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας. Χωρίς επαρκείς πληροφορίες, ο όρος "νανοτεχνολογία" μπορεί να μην έχει συγκεκριμένο νόημα για τον πληθυσμό και δεν αναγνωρίζεται η σημασία της με αποτέλεσμα οι καταναλωτές να έχουν αυξημένες ανησυχίες και σκεπτικισμό (Alfei et al., 2020). Η κατανόηση των κοινωνικο-ψυχολογικών, πολιτιστικών και συναισθηματικών παραγόντων που επηρεάζουν τις αντιδράσεις των καταναλωτών στη νανοτεχνολογία είναι επίσης κρίσιμη. Αυτό θα διευκολύνει την ανάπτυξη προϊόντων που θα ανταποκρίνονται στις προσδοκίες και τις προτιμήσεις τους, βελτιώνοντας έτσι την αποδοχή και την υιοθέτησή τους (Giles et al., 2015). Η αποδοχή της νανοτεχνολογίας στα τρόφιμα διαφέρει αισθητά μεταξύ διαφόρων χωρών και πολιτισμών. Στην Ευρώπη, οι καταναλωτές συχνά εμφανίζονται επιφυλακτικοί, εκφράζοντας ανησυχίες για την υγεία και την ασφάλεια, και συσχετίζουν τη νανοτεχνολογία με τα γενετικά τροποποιημένα τρόφιμα. Πολλοί Ευρωπαίοι ζητούν μεγαλύτερη διαφάνεια και εκτενή έρευνα πριν αποδεχθούν αυτά τα προϊόντα λόγω των ενδεχόμενων κινδύνων. Αντίθετα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, η στάση του κοινού είναι γενικά πιο θετική, αν και πολλοί δεν γνωρίζουν πολλά για τη νανοτεχνολογία (Chaudhry et al., 2017).

Η ανησυχία και η αντίληψη του κοινού σχετικά με τη νανοτεχνολογία επηρεάζουν σημαντικά και την εφαρμογή των νέων προϊόντων και τεχνολογιών στην αγορά. Οι καταναλωτές ανησυχούν κυρίως για την ασφάλεια της νανοτεχνολογίας. Η τοξικότητα των νανοσωματιδίων και οι πιθανές επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία είναι θέματα που προκαλούν ανησυχία. (Alfei et al., 2020). Η αποδοχή της νανοτεχνολογίας από τους καταναλωτές είναι πιο πιθανή όταν χρησιμοποιείται για τη δημιουργία καινοτόμων συσκευασιών με εμφανή οφέλη. Σε αυτή την περίπτωση, οι καταναλωτές είναι πιο πρόθυμοι να αποδεχτούν τη νανοτεχνολογία, καθώς οι συσκευασίες παρέχουν ορατά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη προστασία και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των προϊόντων. Αντίθετα, όταν η νανοτεχνολογία ενσωματώνεται άμεσα σε τρόφιμα ή γεωργικά προϊόντα, οι καταναλωτές είναι πιο επιφυλακτικοί λόγω του πιθανού αντίκτυπου στην υγεία και το περιβάλλον (Giles et al., 2015).

Η αντίληψη του κοινού σχετικά με την αποτελεσματικότητα των ρυθμιστικών οργάνων στην παρακολούθηση και τον έλεγχο της νανοτεχνολογίας επηρεάζει την εμπιστοσύνη τους στην αγορά και την χρήση νανοϋλικών. Η ανάγκη για ισχυρά και διαφανή ρυθμιστικά πλαίσια είναι επιτακτική, καθώς μπορεί να βελτιώσει την αίσθηση

της ασφάλειας και να μειώσει τις ανησυχίες του κοινού σχετικά με τη χρήση της νανοτεχνολογίας σε προϊόντα καθημερινής χρήσης. Σε αυτό το πλαίσιο, η ανάπτυξη μιας πολιτικής που να ενισχύει τη διαφάνεια, την ενημέρωση και τον έλεγχο της νανοτεχνολογίας είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοχή και την επιτυχή υιοθέτηση της τεχνολογίας από το κοινό (Alfei et al., 2020), (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Συχνά, τα μέσα ενημέρωσης επικεντρώνονται στις αρνητικές πτυχές και τους κινδύνους της, αυξάνοντας τον φόβο και την αβεβαιότητα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική ανησυχία και απόρριψη της τεχνολογίας χωρίς επαρκή επιστημονική βάση. Η υπεύθυνη και ισορροπημένη ενημέρωση είναι απαραίτητη για τη σωστή κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των κινδύνων της νανοτεχνολογίας. Τέλος, ερευνητές και οι εταιρείες πρέπει να φέρουν ευθύνη για την ασφάλεια και την επικοινωνία των επιπτώσεων των προϊόντων τους. Οι επιστημονικές μελέτες πρέπει να διεξάγονται με υψηλά πρότυπα δεοντολογίας και να διασφαλίζουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των προϊόντων. Η διαφάνεια στις ερευνητικές διαδικασίες και η επιμέλεια στην αναφορά των αποτελεσμάτων είναι ουσιώδεις για την αξιοπιστία των επιστημονικών ερευνών και την εμπιστοσύνη του κοινού (Nile et al., 2020).

4.1.2 Αντίληψη καταναλωτών

Οι αντιλήψεις του κοινού για τη νανοτεχνολογία είναι πολυδιάστατες και επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Η ενημέρωση και η εκπαίδευση παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση αυτών των αντιλήψεων. Οι πολιτιστικές διαφορές, οι ανησυχίες για την υγεία και την ασφάλεια, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες, ο ρόλος των μέσων μαζικής ενημέρωσης, οι προσωπικές εμπειρίες και η εμπιστοσύνη στους ρυθμιστικούς οργανισμούς συνιστούν βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την αποδοχή της νανοτεχνολογίας από το κοινό. Η κατανόηση και η διαχείριση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητες για την προώθηση της ασφαλούς και υπεύθυνης χρήσης της νανοτεχνολογίας στα τρόφιμα και την υγεία.

Μελέτη που είχε ως στόχο να διερευνήσει τις γνώσεις, τις απόψεις και την αποδοχή της νανοτεχνολογίας στα προϊόντα διατροφής των Ισπανών καταναλωτών έδωσε στους ερευνητές βασικά ευρήματα:

1. Περίπου το 50% των Ισπανών ερωτηθέντων ανέφεραν κάποιες γνώσεις σχετικά με τη νανοτεχνολογία.
2. Ένα παρόμοιο ποσοστό αποτίμησε τη νανοτεχνολογία θετικά ή πολύ θετικά, με μόνο το 0,5% να εκφράζει αρνητικές απόψεις.

Συνολικά, οι ερωτηθέντες έδειξαν υψηλό επίπεδο αποδοχής και προθυμίας να αγοράσουν τρόφιμα που χρησιμοποιούν νανοτεχνολογία. Μεταξύ των διαφόρων προϊόντων, το συσκευασμένο κρέας με νανοτεχνολογία ενσωματωμένο στη συσκευασία για ένδειξη ποιότητας/ασφάλειας έλαβε την υψηλότερη έγκριση. Αυτή η προτίμηση δείχνει ότι οι καταναλωτές είναι πιο ευνοϊκοί για εφαρμογές «νανο-εξωτερικών», δηλαδή νανοτεχνολογία στη συσκευασία παρά στα ίδια τα τρόφιμα.

Η μελέτη βρήκε ένα ενδιαμέσο επίπεδο νεοφοβίας μεταξύ των ερωτηθέντων, με διακυμάνσεις ανάλογα με την ηλικία και τα επίπεδα γνώσης. Οι νεότεροι

συμμετέχοντες και όσοι ήταν πιο ενημερωμένοι για τις νέες τεχνολογίες εμφάνισαν λιγότερη νεοφοβία. Η μελέτη υποδηλώνει ότι οι ενημερωτικές εκστρατείες από τομειακούς οργανισμούς ή επίσημους φορείς θα μπορούσαν να συμβάλουν στη μείωση της απόρριψης της ναυοτεχνολογίας στα τρόφιμα. Σε αντίθεση με άλλες νέες τεχνολογίες, η ναυοτεχνολογία δεν επηρεάζει αρνητικά την εικόνα των προϊόντων διατροφής στον ερωτηθέντα ισπανικό πληθυσμό.

Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά για τις βιομηχανίες τροφίμων που εξετάζουν την εφαρμογή ναυοτεχνολογιών, αν και συνιστώνται μελλοντικές μελέτες να καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα προϊόντων και να περιλαμβάνουν περισσότερους ηλικιωμένους συμμετέχοντες που μπορεί να έχουν υψηλότερα επίπεδα νεοφοβίας. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να αξιολογήσουν τον μοναδικό αντίκτυπο της ναυοτεχνολογίας συγκρίνοντας προϊόντα με και χωρίς ναυοτεχνολογία. Περαιτέρω έρευνα θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει ένα ευρύτερο δημογραφικό στοιχείο για την καλύτερη κατανόηση των αντιλήψεων των ηλικιωμένων πληθυσμών σχετικά με τη ναυοτεχνολογία στα τρόφιμα.

Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι ενώ υπάρχει γενικό άνοιγμα στη ναυοτεχνολογία στα τρόφιμα μεταξύ των Ισπανών καταναλωτών, οι στοχευμένες ενημερωτικές εκστρατείες θα μπορούσαν να ενισχύσουν περαιτέρω την αποδοχή, ιδιαίτερα μεταξύ των ηλικιωμένων και λιγότερο ενημερωμένων τμημάτων του πληθυσμού (Gómez-Llorente et al., 2022).

4.1.3 Δεοντολογικά θέματα σχετικά με τη ναυοτεχνολογία και τα τρόφιμα

Η ναυοτεχνολογία στα τρόφιμα αν και έχει ανοίξει νέους ορίζοντες και δυνατότητες όσα αφορά την βελτίωση της ποιότητας, ασφάλειας και θρεπτικής αξίας των προϊόντων, έχει παράλληλα εγείρει δεοντολογικά ζητήματα που αγειρούν την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και την κοινωνική εμπιστοσύνη.

Ένα από τα κύρια δεοντολογικά ζητήματα αφορά την ασφάλεια των ναυοϋλικών που χρησιμοποιούνται στα τρόφιμα. Λόγω του μικρού τους μεγέθους και της υψηλής επιφανειακής δραστηριότητας, τα ναυοϋλικά μπορούν εύκολα να διεισδύσουν στους ιστούς του ανθρώπινου σώματος και να προκαλέσουν απρόβλεπτες τοξικές αντιδράσεις καθώς και θεωρείται ότι ορισμένα ναυοϋλικά μπορούν να προκαλέσουν φλεγμονή, οξειδωτικό στρες και γονιδιακή βλάβη (Sharma et al., 2020) (Mwaanga P., 2018). Η έλλειψη επαρκούς επιστημονικής γνώσης σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της κατανάλωσης ναυοϋλικών καθιστά την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας στον τομέα των τροφίμων ιδιαίτερα αμφιλεγόμενη. Αυτό εντείνεται από την απουσία ομοιόμορφων κανονισμών και προτύπων ασφαλείας σε διεθνές επίπεδο, γεγονός που δυσκολεύει την αξιολόγηση και την έγκριση νέων ναυοτεχνολογικών προϊόντων. Επιπλέον, η διαφάνεια και η ενημέρωση του κοινού είναι σημαντικά ζητήματα δεοντολογίας. Η έλλειψη επαρκών πληροφοριών σχετικά με τα ναυοϋλικά που χρησιμοποιούνται στα τρόφιμα μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη εμπιστοσύνης εκ μέρους των καταναλωτών. Η διαφάνεια στη διαδικασία παραγωγής και η ετικετοποίηση των προϊόντων που περιέχουν ναυοϋλικά είναι ζωτικής σημασίας

για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης. Οι καταναλωτές έχουν το δικαίωμα να γνωρίζουν τι περιέχει το φαγητό τους και να μπορούν να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την κατανάλωσή τους. Η έλλειψη αυτών των πληροφοριών μπορεί να προκαλέσει ανησυχία και αντίσταση στη χρήση ναυτεχνολογίας στα τρόφιμα, παρά τα πιθανά οφέλη (Mwaanga P., 2018).

Τέλος, μείζον πρόβλημα θεωρείται ότι είναι η ανάγκη για αυστηρούς κανονισμούς και πρότυπα για τη διασφάλιση της ασφάλειας των ναυοϋλικών στα τρόφιμα. Οι υφιστάμενοι κανονισμοί για τα τρόφιμα ενδέχεται να μην καλύπτουν πλήρως τις ιδιαιτερότητες των ναυοϋλικών, απαιτώντας την ανάπτυξη νέων ρυθμιστικών πλαισίων που θα προστατεύουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (Sharma et al., 2020). Αυτό περιλαμβάνει την καθιέρωση διαδικασιών ελέγχου, αξιολόγησης και ετικετοποίησης για τα ναυοϋλικά, προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφάλειας.

Η δίκαιη κατανομή των πλεονεκτημάτων και των κινδύνων της ναυτεχνολογίας είναι ένα κρίσιμο ζήτημα ηθικής. Οι τεχνολογικές εξελίξεις δεν πρέπει να ωφελούν μόνο μια μικρή ομάδα, αλλά να διασφαλίζουν ότι οι κοινωνίες στο σύνολό τους επωφελούνται από τις καινοτομίες χωρίς να εκτίθενται σε δυσανάλογους κινδύνους (Mwaanga P., 2018). Η εισαγωγή της ναυτεχνολογίας στα τρόφιμα πρέπει να γίνεται με βάση την αρχή της δικαιοσύνης, εξασφαλίζοντας ότι οι οικονομικά ασθενέστερες κοινωνίες δεν υφίστανται αθέμιτη επιβάρυνση από τους πιθανούς κινδύνους. Συνοψίζοντας, η ναυτεχνολογία στα τρόφιμα προσφέρει πολλές υποσχέσεις, αλλά η εφαρμογή της πρέπει να γίνει με προσεκτική εξέταση ηθικών θεμάτων, διασφαλίζοντας ασφάλεια, διαφάνεια, δίκαιη κατανομή οφελών και εμπιστοσύνη του κοινού. Οι προοπτικές βελτίωσης της διατροφικής αξίας και της ασφάλειας των τροφίμων είναι σημαντικές, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ηθικές ανησυχίες και οι κοινωνικές επιπτώσεις για να επιτευχθεί μια ισορροπημένη και υπεύθυνη χρήση της ναυτεχνολογίας στον τομέα των τροφίμων.

4.2. Νομοθεσία και ρυθμιστικά μέτρα

Η ναυτεχνολογία θεωρείται βασική τεχνολογία ενεργοποίησης (KET) από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Είναι μια ευνοϊκή τεχνολογία, η οποία σχετίζεται με πολλούς τομείς, όπως τα χημικά, τα καταναλωτικά προϊόντα, η υγεία, η ενέργεια και το περιβάλλον. Κατά συνέπεια, το κανονιστικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), το οποίο αποτελείται ρύθμιση των ναυτεχνολογιών καλύπτεται τόσο από την οριζόντια νομοθεσία όσο και από την κάθετη νομοθεσία (Cushen et al., 2012). Διάφοροι ρυθμιστικοί φορείς όπως οι Επιστημονικές Επιτροπές και Οργανισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η κοινή FAO (Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας)/ΠΟΥ (Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας), Συνάντηση για τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων (JMPR), Κοινή Επιτροπή Εμπειρογνομώνων FAO/ΠΟΥ για τα πρόσθετα τροφίμων, η Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων των Ηνωμένων Πολιτειών, ο Διεθνής Οργανισμός Προτύπων (ISO), ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) υπάρχουν σε

όλο τον κόσμο (Saritha et al., 2022) και λειτουργούν για την παροχή κατευθυντήριων γραμμών και τη δημιουργία πολιτικών και ρυθμιστικών πλαισίων για την ασφαλή χρήση των ναυοπροϊόντων. Στις ΗΠΑ, τα ναυοπρόσθετα, τα ναυοϋλικά συσκευασίας και τα ναυοσυμπληρώματα έχουν εγκριθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Φαρμάκων και Τροφίμων για ασφαλή εμπορική χρήση. Αναφέρει ότι κάθε προϊόν διατροφής που είναι γενικά αναγνωρισμένο ως ασφαλές δεν απαιτεί πρόσθετη άδεια πριν από τη χρήση στην αγορά (Saritha et al., 2022). Η υφιστάμενη οριζόντια νομοθεσία, παρότι δεν αναφέρεται ειδικά στις ναυοτεχνολογίες, περιλαμβάνει χαρακτηριστικά που σχετίζονται με αυτές. Αντίθετα, η κάθετη νομοθεσία επικεντρώνεται συγκεκριμένα στις ναυοτεχνολογίες και τις σχετικές βιομηχανίες, προσφέροντας πιο εφαρμόσιμες λύσεις στους χρήστες αυτών των τεχνολογιών (Cushen et al., 2012).

Ευρωπαϊκή οριζόντια νομοθεσία

Η ταξινόμηση, η επισήμανση και η συσκευασία ουσιών και μειγμάτων ρυθμίζονται από τον κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 1272/2008 (Regulation, E. 2008 No 1272/2008). Είναι πρόσθετο στον κανονισμό που παρέχεται από το REACH (Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals). Οι χρήστες επικίνδυνων ουσιών και μειγμάτων πρέπει να ενημερώνονται για τους κινδύνους μέσω ενός νέου συστήματος επισήμανσης που θα περιλαμβάνει νέα σύμβολα ασφαλείας. Τα δελτία δεδομένων ασφαλείας πρέπει επίσης να διατίθενται στους χρήστες. Εάν μια ουσία αρχίσει να παράγεται σε ναυοκλίμακα, αυτό θα μπορούσε να επιφέρει αλλαγή στις ιδιότητες της ουσίας και συνεπώς αλλαγή στην ταξινόμησή της. Από τον Δεκέμβριο του 2010 αυτού του είδους οι πληροφορίες πρέπει να αναφέρονται στον ECHA (European Chemicals Agency). Μολονότι τα ναυοϋλικά δεν αναφέρονται ρητά, αυτός ο κανονισμός είναι επομένως ένα νέο εμπόδιο που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι παραγωγοί χημικών προκειμένου να παράγουν νέες ουσίες (Cushen et al., 2012).

Τα βιοκτόνα, ουσίες και παρασκευάσματα καλύπτονται από την Οδηγία σχετικά με τη διάθεση βιοκτόνων στην αγορά (98/8/ΕΚ). Τα ναυοϋλικά δεν αναφέρονται συγκεκριμένα καθώς χρονολογούνται από το 1998. Η ανάγκη για αναθεώρηση σε αυτό το θέμα συζητείται με ιδιαίτερη αναφορά στις ειδικές στρατηγικές και μεθόδους δοκιμών (Cushen et al., 2012).

Ευρωπαϊκή κάθετη νομοθεσία

Το 2008, η Επιτροπή δημοσίευσε μια ανακοίνωση που αναφέρεται στις ρυθμιστικές πτυχές των ναυοϋλικών (COM(2008) 366). Στην ανακοίνωση αυτή, αναλύθηκαν τα κύρια θέματα που αφορούν τη χρήση ναυοτεχνολογιών, εξετάστηκαν οι ευκαιρίες και οι κίνδυνοι που παρουσιάζονται από αυτές, και αξιολογήθηκε η ισχύουσα νομοθεσία για τη ρύθμισή τους. Η ισχύουσα νομοθεσία εκείνη την εποχή κρίθηκε επαρκής για τη ρύθμιση των ναυοτεχνολογιών. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το 2009, εξέφρασε αμφισβήτηση για την άποψη της Επιτροπής ότι η υφιστάμενη

νομοθεσία ήταν επαρκής, και η Επιτροπή, το ίδιο έτος, εξέδωσε τη δεύτερη έκθεση εφαρμογής σχετικά με το "Σχέδιο Δράσης για την Ευρώπη 2005–2009" (COM(2005) 243). Στην έκθεση αυτή, αναγνωρίστηκε η ανάγκη προσαρμογής της νομοθεσίας για τη ρύθμιση των νανοτεχνολογιών και ανακοινώθηκε ότι το 2011 θα εκδοθεί επικαιροποιημένη έκθεση που θα λαμβάνει υπόψη τις εξελίξεις στην έρευνα και θα προσφέρει νέες νομοθετικές προτάσεις (Cushen et al., 2012).

Ο κανονισμός για τα υλικά και τα είδη που προορίζονται για επαφή με τρόφιμα, (ΕΚ) αριθ. 1935/2004, αναφέρεται ειδικά στα νανοϋλικά. Επιτρέπει τη χρήση ενεργών και έξυπνων συσκευασιών τροφίμων υπό συγκεκριμένους όρους που αφορούν την ασφάλεια, την ποιότητα και τη διάρκεια ζωής των τροφίμων. Ο κίνδυνος μετανάστευσης υλικών στα τρόφιμα αντιμετωπίζεται, και προσδιορίζεται ότι τα υλικά δεν πρέπει να απελευθερώνουν ουσίες που θα μπορούσαν να βλάψουν την υγεία ή να αλλοιώσουν την ποιότητα των τροφίμων. Ο κανονισμός επιτρέπει επίσης την αλλαγή της σύνθεσης των τροφίμων, αλλά υπό την προϋπόθεση ότι συμμορφώνονται με την ισχύουσα νομοθεσία για τα τρόφιμα. Η επισήμανση των τροφίμων που χρησιμοποιούν αυτούς τους κανονισμούς πρέπει να συμμορφώνεται με την Οδηγία για τα Πρόσθετα Τροφίμων (89/109/ΕΚ).

Η Οδηγία για τα Πρόσθετα Τροφίμων (89/109/ΕΚ) που ψηφίστηκε τον Δεκέμβριο του 2008, είναι το πρώτο νομοσχέδιο που αναφέρει ρητά τις νανοτεχνολογίες. Καθορίζει διαδικασίες για την αξιολόγηση ασφάλειας και την έγκριση νέων τροφίμων που περιλαμβάνουν νανοτεχνολογίες. Επιπλέον, ο κανονισμός με τίτλο Ενεργά και Ευφυή Υλικά και Αντικείμενα που Προορίζονται για Επαφή με Τρόφιμα προβλέπει ότι τα νανοϋλικά δεν πρέπει να υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο ανεξάρτητα από την πηγή (Cushen et al., 2012).

Σε συνέχεια το 2015, η νομοθεσία αναφέρεται στο άρθρο 31 του κανονισμού (ΕΕ) 2015/2283 της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναφέρεται στις απαιτήσεις επισήμανσης για τα τρόφιμα που περιέχουν νανοδομημένα. Σύμφωνα με αυτό το άρθρο, η ετικέτα πρέπει να δηλώνει ότι το προϊόν περιέχει νανοδομημένα, προσδιορίζοντας τη φύση των νανοδομημάτων με τον όρο "nano" σε παρένθεση, π.χ. "νανοδομημένα τιτανίου". Επίσης, πρέπει να παρέχεται πληροφορία σχετικά με τον λόγο χρήσης των νανοδομημάτων και τυχόν παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στην ασφάλεια και την υγεία.

Τέλος, ο κανονισμός 2018/848 της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναφέρεται στην οργάνωση της παραγωγής τροφίμων και της γεωργίας στην ΕΕ. Αν και δεν αναφέρεται ειδικά στην νανοτεχνολογία, περιλαμβάνει διατάξεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε τρόφιμα που περιέχουν νανοτεχνολογία και την αναγνώριση του σε αυτά. Για παράδειγμα, προβλέπει προσεκτικό έλεγχο των προϊόντων που εισέρχονται στην αγορά, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων, για να διασφαλίσει την ασφάλεια και την ποιότητά τους. Επίσης, θέτει απαιτήσεις για την επισήμανση των τροφίμων, ώστε οι καταναλωτές να ενημερώνονται για τα χαρακτηριστικά του προϊόντος που καταναλώνουν, πιθανώς και για τη χρήση νανοτεχνολογίας. Συνεπώς, αν και δεν

αναφέρεται απευθείας στη νανοτεχνολογία, επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην παραγωγή και εμπορία τροφίμων που ενδέχεται να περιέχουν νανοτεχνολογία (Ευρωπαϊκός Κανονισμός 2018/848, 2018).

Οι κανονισμοί και οι νομοθεσίες που αφορούν τη νανοτεχνολογία στα τρόφιμα πρέπει να εξεταστούν και να ενημερωθούν διαρκώς με τα πιο πρόσφατα επιστημονικά δεδομένα και εξελίξεις, ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια, η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητά τους. Επιπλέον, απαιτείται η ενίσχυση των μέτρων ελέγχου και επιθεώρησης, καθώς και η ενημέρωση των ενδιαφερομένων μερών σχετικά με τους κινδύνους και τα οφέλη της νανοτεχνολογίας στον τομέα των τροφίμων. Μόνον έτσι θα μπορέσουμε να διασφαλίσουμε τη βιώσιμη και υπεύθυνη εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας για το κοινό καλό και την προαγωγή της καινοτομίας στον τομέα των τροφίμων.

Κεφάλαιο 5^ο Συζήτηση

5.1. Συζήτηση

Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην παραγωγή τροφίμων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προοπτική της τεχνολογίας που θα επηρεάσει σημαντικά την βιομηχανία τροφίμων και όχι μόνο. Η χρήση νανοτεχνολογίας μπορεί να προσφέρει καινοτομίες που θα βελτιώσουν σημαντικά την ασφάλεια, τη διατροφική αξία και την ανθεκτικότητα των τροφίμων, ενώ παράλληλα μπορεί να συμβάλει στη μείωση της σπατάλης τροφίμων και στην αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων παραγωγής. Οι χρήστες αυτής της τεχνολογίας επιδιώκουν την βελτίωση της ποιότητας, της επεξεργασίας, της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας των προϊόντων. Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα είναι η δημιουργία διαφόρων ειδών συσκευασιών είτε με νανοαισθητήρες μικροκλίμακας που επιτρέπουν την ανίχνευση παθογόνων μικροοργανισμών και μυκοτοξινών είτε με την ικανότητα να απελευθερώνουν ή να απομακρύνουν τις ανάλογες ουσίες κατά την επεξεργασία ή την αποθήκευση των τροφίμων, προσφέροντας έτσι καλύτερο έλεγχο της ποιότητας και της γεύσης. Παρόλα αυτά, η χρήση νανოსωματιδίων μπορεί να συνοδεύεται από πιθανούς κινδύνους. Ένας από τους κύριους προβληματισμούς είναι η νανοτοξικότητα μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο DNA, υπερβολική διέγερση των κυττάρων, κυτταροτοξικότητα και ακόμα σχηματισμό καρκίνου. Η τοξικότητα των νανოსωματιδίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος και η σύνθεσή τους, η έκταση της έκθεσης και η μέθοδος απορρόφησής τους από τον οργανισμό. Επιπλέον, υπάρχει η ανησυχία για τη δυνατότητα συσσώρευσης νανοςωματιδίων στο περιβάλλον και στους οργανισμούς, καθώς και για την πιθανότητα ανάπτυξης ανθεκτικότητας από τους μικροοργανισμούς.

Κατά την έρευνα αποκαλύφθηκε μια γκάμα πιθανών επιπτώσεων από την χρήση και εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην βιομηχανία τροφίμων. Στην θετική πλευρά, η νανοτεχνολογία επιτρέπει την προσθήκη θρεπτικών συστατικών και βιοδραστικών ενώσεων στα τρόφιμα χωρίς να επηρεάζεται η βασική τους μορφολογία, ενισχύοντας την εμφάνιση και τη δομή τους με αποτέλεσμα να διατηρεί τις δραστικές ενώσεις σε σταθερό επίπεδο για εκτεταμένο χρονικό διάστημα και να αυξάνει τον χρόνο αποθήκευσης. Επιπλέον, προσδίδει μικροβιακό έλεγχο των τροφίμων μέσω αισθητήρων και δεικτών που ανιχνεύουν παθογόνους μικροοργανισμούς και χημικές ουσίες σε πραγματικό χρόνο, αλλά και τη αυτονομία στην συσκευασία να προσαρμόζει γρήγορα και άμεσα στο περιβάλλον της χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση όπως επίσης και να στέλνει ενημερώσεις για την κατάσταση του προϊόντος. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν στις συσκευασίες των τροφίμων, επιτρέποντας την άμεση προσαρμογή στο περιβάλλον τους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Οι έξυπνες συσκευασίες μπορούν επίσης να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του προϊόντος, όπως η φρεσκάδα και η ασφάλεια του τροφίμου. Τέλος, όσο αφορά την χρήση των νανοϋλικών στην γεωργία αυξάνει την αποδοτικότητα της παραγωγής, βελτιώνει τα χαρακτηριστικά των φυτών και μειώνει την χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων. Νανολιπάσματα και νανοφυτοφάρμακα μπορούν να προσφέρουν πιο

αποτελεσματική θρέψη και προστασία των φυτών, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις απώλειες θρεπτικών συστατικών. Μπορεί επιπροσθέτως να βοηθήσει στην αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η ανεπαρκής πρόσβαση στο νερό και οι κλιματικές αλλαγές, παρέχοντας καινοτόμες λύσεις για την αειφόρο παραγωγή τροφίμων. Για παράδειγμα τα νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία νερού μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της μόλυνσης και στην ανακύκλωση των υδάτων.

Παρά τα θετικά της νανοτεχνολογίας, υπάρχουν και αρνητικές επιπτώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μία από αυτές είναι η πιθανή μετανάστευση των νανοσωματιδίων από τις συσκευασίες στο προϊόν και κατά συνέπεια, στον καταναλωτή, με αρνητικές επιδράσεις στην υγεία του όπως βλάβη του DNA ή βλάβη οργάνων, τοξικότητα στα κύτταρα και ενδεχομένως καρκινογένεση. Η ανησυχία για τη μεταφορά νανοσωματιδίων αφορά ιδιαίτερα τη χρήση νανοϋλικών στις συσκευασίες τροφίμων, που μπορεί να οδηγήσει σε ακούσια έκθεση του καταναλωτή. Επίσης, η επίδραση των νανοσωματιδίων στο περιβάλλον και στους οργανισμούς που εκτίθενται σε αυτά είναι ακόμα μη γνωστή και απαιτεί περαιτέρω έρευνα. Τα νανοσωματίδια μπορούν να συσσωρευτούν στο περιβάλλον, επηρεάζοντας αρνητικά τη χλωρίδα και την πανίδα. Η τοξικότητα των νανοσωματιδίων στο περιβάλλον περιλαμβάνει πιθανές βλάβες στα υδάτινα οικοσυστήματα και στους οργανισμούς που ζουν σε αυτά, προκαλώντας βιοσυσσώρευση και τροφική αλυσίδα. Άλλες αρνητικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν τυχόν ανεπιθύμητες αλλεργικές αντιδράσεις ή αντίσταση μικροοργανισμών σε νανοκατασκευές. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ νανοϋλικών και κυττάρων, ζώων, ανθρώπων και περιβάλλοντος είναι πολύπλοκες και δεν έχουν ακόμα κατανοηθεί πλήρως. Οι πιθανές αλλεργικές αντιδράσεις μπορεί να προκύψουν από την έκθεση σε νανοσωματίδια, που μπορεί να διεισδύσουν στο σώμα μέσω της εισπνοής, της κατάποσης ή της δερματικής επαφής.

Τέλος, η ακριβής επίδραση των νανοσωματιδίων στα φυτά και στην παραγωγικότητά τους δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητή. Υπάρχει επίσης η ανησυχία για τυχόν ακαταποτάστους ρύπους που προκύπτουν από τη χρήση των νανοσωματιδίων στη γεωργία, οι οποίοι μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του εδάφους και του υδάτινου περιβάλλοντος. Τα νανοσωματίδια μπορούν να διαταράξουν τη μικροβιακή κοινότητα του εδάφους, επηρεάζοντας την υγεία των φυτών και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Επιπλέον, η ανάπτυξη ανθεκτικότητας σε νανοσωματίδια σε φυτά μπορεί να δημιουργήσει αντίσταση στα φυτοφάρμακα, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητά τους και δυσχεραίνοντας τον έλεγχο των εντόμων και των ασθενειών των φυτών.

Συνοψίζοντας, η νανοτεχνολογία στην παραγωγή τροφίμων αποτελεί μια σημαντική καινοτομία με πολλές υποσχόμενες εφαρμογές, όπως η βελτίωση της ποιότητας, της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας των προϊόντων, καθώς και η ενίσχυση της αποδοτικότητας στη γεωργία. Ωστόσο, παρά τα οφέλη της, δεν πρέπει να παραβλέπονται οι πιθανοί κίνδυνοι και οι ηθικές ανησυχίες. Η τοξικότητα των νανοσωματιδίων, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και η αβεβαιότητα γύρω από τις

μακροπρόθεσμες συνέπειες απαιτούν περαιτέρω έρευνα και προσεκτική ρύθμιση. Η ισορροπημένη προσέγγιση στη χρήση της νανοτεχνολογίας, με έμφαση στην ασφάλεια και τη βιωσιμότητα, θα είναι καθοριστική για την αξιοποίησή της προς όφελος της κοινωνίας και του περιβάλλοντος.

5.2. Προοπτικές

Η νανοτεχνολογία, ως μια από τις πιο καινοτόμες επιστημονικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών, έχει ήδη αρχίσει να αφήνει το αποτύπωμά της στη βιομηχανία τροφίμων. Έχει φέρει επανάσταση στους τομείς της επιστήμης και έρευνας των τροφίμων, επιτρέποντας την παρακολούθηση, ανίχνευση και παρέμβαση για τη διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων. Αυτή προσφέρει μοναδικές λύσεις, όπως η δημιουργία νανοδομημένων συσκευασιών που ανιχνεύουν και εξουδετερώνουν παθογόνους μικροοργανισμούς και μυκοτοξίνες, βελτιώνοντας την ασφάλεια των τροφίμων και δεν περιορίζεται από παράγοντες όπως η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού ή η οικονομική απαιτητικότητα. Παρόλο που ορισμένα νανοδομημένα συστήματα βρίσκονται σε αρχικά στάδια ανάπτυξης, η έρευνα στη βιομηχανία τροφίμων επιτρέπει ευρεία εφαρμογή. Οι ευκαιρίες και οι απειλές για την ασφάλεια μπορούν να αξιολογηθούν ταυτόχρονα. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν νανοδομημένα αργύρου για προστασία των τροφίμων από ψυχοτροφικούς μικροοργανισμούς και μυκήτες, οξειδίο του ψευδαργύρου για διατήρηση της φρεσκάδας των χυμών και λευκώματος αυγού, και οξειδίο του τιτανίου για προστασία των φρούτων. Η χρήση οξειδίου του τιτανίου για την προστασία των φρούτων αποτελεί επίσης μια καινοτόμο προσέγγιση που έχει αρχίσει να εφαρμόζεται.

Η έξυπνη συσκευασία και ο συνδυασμός νανοδομημένων συστημάτων για νανοδομημένες μεμβράνες είναι μερικές από τις καινοτόμες ιδέες που έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται. Οι βιοαποδομήσιμες ενώσεις με ουδέτερο άνθρακα υπόσχονται να αλλάξουν το μέλλον της συσκευασίας τροφίμων, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της βιομηχανίας. Οι βιοαισθητήρες τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούν ασύρματη τεχνολογία προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία, επιτρέποντας την ταχύτερη προσθήκη επιπλέον συσκευών και έχοντας χαμηλότερο κόστος. Εξαιτίας της αύξησης της κατανάλωσης τροφίμων λόγω της αυξανόμενης παγκόσμιας πληθυσμιακής αύξησης τις τελευταίες δεκαετίες, η τεχνητή νοημοσύνη έχει ενσωματώσει την προηγμένη τεχνολογία στον τομέα των τροφίμων. Οι ευφυείς συσκευές και συστήματα είναι σε θέση να εκτελούν πολυάριθμες λειτουργίες, όπως η αξιολόγηση της ποιότητας, η κατηγοριοποίηση και ο έλεγχος των τροφίμων, καθώς και η παροχή προβλέψεων αυξάνοντας τη ζήτηση για αυτές τις τεχνολογίες στον τομέα των τροφίμων. Η συνδυαστική χρήση νανοτεχνολογίας και τεχνητής νοημοσύνης δημιουργεί νέες προοπτικές για την αειφόρο παραγωγή, τη βελτίωση της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων και τη μείωση των αποβλήτων. (R. Singh et al., 2023) .

Η αποδοχή της νανοτεχνολογίας από τους καταναλωτές είναι κρίσιμη για την επιτυχία και ευρεία διάδοση αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών. Οι έρευνες έχουν

δείξει ότι οι καταναλωτές συχνά εκφράζουν ανησυχίες όταν πρόκειται για νέες τεχνολογίες, ιδίως όσον αφορά τα τρόφιμα. Παρ' όλα αυτά, η εκπαίδευση και η ενημέρωση των καταναλωτών μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην αλλαγή των απόψεών τους. Είναι απαραίτητο οι καταναλωτές να γνωρίζουν τα οφέλη και τα επίπεδα ασφαλείας που προσφέρει η νανοτεχνολογία στις συσκευασίες τροφίμων (R. Singh et al., 2023).

Σε παρόμοιο πνεύμα, η επίτευξη εκτεταμένων ερευνητικών γνώσεων θα μπορούσε να διαλευκάνει τη δυνατότητα των νανοϊνών στον τομέα της συσκευασίας τροφίμων και τις αλληλεπιδράσεις πολλών συστατικών τροφίμων κατά τη διάρκεια της νανο-ενθυλάκωσης. Αυτές οι νανοΐνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη έξυπνων συσκευασιών που ανιχνεύουν αλλοιώσεις και αυξάνουν τη διάρκεια ζωής των προϊόντων, προστατεύοντας ταυτόχρονα από εξωτερικούς ρύπους. Επιπλέον, έχει την δυνατότητα να βοηθήσει στην ανίχνευση φυτοφαρμάκων, παθογόνων και τοξινών, που χρησιμεύουν στην αλυσίδα παρακολούθησης και ιχνηλάτησης ποιότητας τροφίμων (He & Hwang, 2016). Οι νανοαισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν στις συσκευασίες για την ανίχνευση συγκεκριμένων χημικών ουσιών, προειδοποιώντας τους καταναλωτές για πιθανούς κινδύνους. Τα επόμενα χρόνια, τα τρόφιμα που παράγονται με χρήση νανοτεχνολογίας έχουν καλές πιθανότητες να επεκτείνουν το φάσμα των δυνατοτήτων για τη δημιουργία και παρασκευή λειτουργικών γευμάτων. Η νανοτεχνολογία μπορεί να προσφέρει νέες μεθόδους για την ενίσχυση της θρεπτικής αξίας των τροφίμων, προσθέτοντας μικροσκοπικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών που απορροφώνται καλύτερα από τον οργανισμό. Είναι πιθανό ότι η νανοτεχνολογία μπορεί να κατακτήσει τον τομέα της επεξεργασίας τροφίμων εάν θεσπιστούν ορισμένοι νόμοι και κανονισμοί που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλειά της. Οι ρυθμιστικές αρχές θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι τα νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων είναι ασφαλή και ότι οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία είναι καλά κατανοητές.

Η νανοτεχνολογία αναμένεται να εξελιχθεί ραγδαία και να γίνει η κυρίαρχη τεχνολογία έως το έτος 2050, σύμφωνα με πρόσφατες προβλέψεις. Οι επιστήμονες αναμένουν ότι οι νέες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας θα μεταμορφώσουν την παραγωγή και κατανάλωση τροφίμων, καθιστώντας την πιο αποτελεσματική και βιώσιμη. Αυτές οι εξελίξεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια νέα εποχή στην οποία η ασφάλεια, η ποιότητα και η θρεπτική αξία των τροφίμων θα είναι καλύτερα ελεγχόμενες και διασφαλισμένες, επωφελώνοντας τόσο τους παραγωγούς όσο και τους καταναλωτές (R. Singh et al., 2023).

Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εξετάζει την εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων και στη γεωργία, καθώς και τις επιπτώσεις της τόσο στον ανθρώπινο οργανισμό όσο και στο περιβάλλον. Μέσα από μια εκτενή ανασκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας και ερευνητικών δεδομένων, αναλύθηκαν τα πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις που συνοδεύουν την ενσωμάτωση νανοσωματιδίων σε υλικά συσκευασίας, γεωργικά προϊόντα και τρόφιμα. Στα επόμενα σημεία συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα και οι κύριες παρατηρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση αυτή, δίνοντας έμφαση τόσο στις θετικές όσο και στις αρνητικές επιπτώσεις της νανοτεχνολογίας.

Η νανοτεχνολογία παρέχει σημαντικά οφέλη στη βιομηχανία τροφίμων και στη γεωργία, βελτιώνοντας την ποιότητα, την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των παραγωγικών διαδικασιών. Σε αυτό το πλαίσιο, η νανοτεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη νέων τύπων υλικών συσκευασίας που προσφέρουν καλύτερη προστασία από εξωτερικούς παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία και το οξυγόνο. Οι νέες αυτές συσκευασίες συμβάλλουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής των προϊόντων και στη διατήρηση της φρεσκάδας τους, ενώ παράλληλα μειώνουν την ανάγκη για συντηρητικά. Επιπλέον, οι νανοαισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν γρήγορα και αποτελεσματικά παθογόνους μικροοργανισμούς και τοξίνες, μειώνοντας την πιθανότητα τροφιμογενών ασθενειών. Οι νανοαισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν στις συσκευασίες, προσφέροντας έναν επιπλέον μηχανισμό προστασίας και ειδοποίησης για την κατάσταση του προϊόντος.

Στη γεωργία, η χρήση νανολιπασμάτων και νανοεντομοκτόνων μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτική χρήση των πόρων και σε μειωμένη χρήση χημικών, προστατεύοντας έτσι το περιβάλλον και μειώνοντας το κόστος για τους αγρότες. Τα νανολιπάσματα παρέχουν τα θρεπτικά συστατικά στα φυτά με πιο στοχευμένο τρόπο, μειώνοντας τις απώλειες και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της λίπανσης. Επίσης, τα νανοεντομοκτόνα μπορούν να παρέχουν προστασία από τα παράσιτα με μικρότερη ποσότητα χημικών ουσιών, μειώνοντας τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Παράλληλα, οι νανοτεχνολογικές εφαρμογές μπορούν να συμβάλλουν στην παρακολούθηση της κατάστασης των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την άμεση παρέμβαση όταν χρειάζεται, και μειώνοντας έτσι τις απώλειες παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, η νανοτεχνολογία μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων που σχετίζονται με την αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης για τρόφιμα και τη μείωση των διαθέσιμων φυσικών πόρων.

Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν σοβαρές ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των νανοσωματιδίων για την ανθρώπινη υγεία. Οι επιστημονικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα νανοσωματίδια μπορούν να διαπεράσουν βιολογικούς φραγμούς, όπως οι μεμβράνες των κυττάρων, και να συσσωρευτούν σε διάφορα όργανα. Αυτή η συσσώρευση μπορεί να οδηγήσει σε κυτταροτοξικότητα, βλάβες στο DNA, και σε

ορισμένες περιπτώσεις, να οδηγήσει ακόμη και σε καρκίνο. Ο κίνδυνος των ναοσωματιδίων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του ναουλικού, η διάρκεια της έκθεσης και η ποσότητα των ναοσωματιδίων που απορροφώνται από τον οργανισμό. Επιπλέον, η επιφανειακή δραστικότητα των ναοσωματιδίων παίζει σημαντικό ρόλο στην τοξικότητά τους. Είναι κρίσιμο να συνεχιστούν οι έρευνες για την κατανόηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των ναοσωματιδίων στην υγεία και να καθοριστούν αυστηρά πρότυπα ασφάλειας για την χρήση τους στα τρόφιμα και τη γεωργία.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι η μετανάστευση των ναοσωματιδίων από τα υλικά συσκευασίας στα τρόφιμα. Παρόλο που η σωστή ενσωμάτωση των ναοσωματιδίων στη μήτρα του πολυμερούς μπορεί να μειώσει τις πιθανότητες μετανάστευσης, εξωτερικοί παράγοντες όπως η θερμότητα και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν αυτή τη διαδικασία. Οι επιστήμονες προτείνουν ότι η μελέτη της μετανάστευσης, της τοξικότητας και των αλληλεπιδράσεων των ναοσωματιδίων με το πολυμερές είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη ασφαλών ναοσύνθετων υλικών συσκευασίας. Αυτό απαιτεί τη δημιουργία προτύπων και κανονισμών που να ορίζουν τα επιτρεπόμενα όρια μετανάστευσης και να εξασφαλίζουν την ασφάλεια των καταναλωτών. Επιπρόσθετα, η ναοτοξικότητα είναι ένας τομέας που απαιτεί περισσότερη προσοχή. Τα ναοσωματίδια μπορούν να προκαλέσουν αλλεργικές αντιδράσεις και φλεγμονώδεις αποκρίσεις, οι οποίες μπορεί να είναι πιο σοβαρές από τις αντιδράσεις σε παραδοσιακά υλικά. Η τοξικότητα των ναοσωματιδίων εξαρτάται από την χημική τους σύνθεση, το μέγεθος, το σχήμα και την επιφανειακή τους δραστικότητα.

Επιπλέον, ορισμένα ανόργανα ναουλικά, όπως οι ναοσωλήνες άνθρακα και τα οξειδία μετάλλων, έχουν αποδειχθεί ότι προκαλούν απρόβλεπτους κινδύνους για την υγεία, όπως αναπνευστικά προβλήματα και τοξικές αντιδράσεις. Είναι σημαντικό να διεξαχθούν περισσότερες έρευνες για την κατανόηση των μηχανισμών τοξικότητας των ναοσωματιδίων και να αναπτυχθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων. Η χρήση ναοτεχνολογίας στη γεωργία μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την απόδοση των καλλιεργειών, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα ναοσωματίδια που χρησιμοποιούνται σε λιπάσματα και εντομοκτόνα μπορούν να συσσωρευτούν στο έδαφος και στους υδάτινους πόρους, προκαλώντας ρύπανση και διαταραχή των οικοσυστημάτων. Τα ναοσωματίδια μπορούν να επηρεάσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος, η οποία είναι κρίσιμη για την υγεία του εδάφους και την ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, η συσσώρευση ναοσωματιδίων σε φυτά και ζώα μπορεί να οδηγήσει σε βιοσυσσώρευση και βιομεγέθυνση, αυξάνοντας τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία μέσω της διατροφικής αλυσίδας. Η βιοσυσσώρευση και η βιομεγέθυνση είναι δύο σημαντικοί μηχανισμοί που εξηγούν πώς τα ναοσωματίδια συσσωρεύονται και μεταφέρονται στους οργανισμούς. Η βιομεγέθυνση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις ναοσωματιδίων σε ανώτερα τροφικά επίπεδα, αυξάνοντας τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία.

Για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις και οι κίνδυνοι της νανοτεχνολογίας, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν αποτελεσματικά μέτρα ρύθμισης και ελέγχου. Οι κυβερνήσεις και οι οργανισμοί πρέπει να συνεργαστούν για την ανάπτυξη κανονισμών που να εξασφαλίζουν την ασφάλεια των καταναλωτών και την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η έρευνα πρέπει να συνεχιστεί για την κατανόηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των νανοσωματιδίων και την ανάπτυξη ασφαλέστερων νανοϋλικών. Η διαφάνεια και η ενημέρωση του κοινού είναι κρίσιμες για την αποδοχή της νανοτεχνολογίας. Οι καταναλωτές πρέπει να ενημερώνονται για τα οφέλη και πιθανούς κινδύνους.

Συνοψίζοντας, η νανοτεχνολογία προσφέρει επαναστατικές δυνατότητες για την βελτίωση της ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων καθώς και για την αύξηση της αποδοτικότητας στην γεωργία. Ωστόσο, η ενσωμάτωση αυτών των προηγμένων υλικών απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση των δυνητικών κινδύνων και συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η κατανόηση των μηχανισμών βιοσυσσώρευσης και βιομεγέθυνσης, καθώς και η εφαρμογή αυστηρών κανονιστικών πλαισίων, είναι απαραίτητες για την ασφαλή και βιώσιμη χρήση της νανοτεχνολογίας. Η συνεχής έρευνα και η διαφάνεια προς το κοινό θα διασφαλίσουν ότι οι νέες τεχνολογίες θα χρησιμοποιηθούν με τρόπους που προάγουν την υγεία και την ευημερία, προσφέροντας παράλληλα σημαντικά οφέλη στην παραγωγή και κατανάλωση τροφίμων.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Φρούντζας Μ, Καρανίκη Ε, Τούτουζα Ο, Σωτηράκης Δ, Σχίζας Δ, Θεοφίλης Π, Τουσούλης Δ, Τούτουζας Κ.Γ. Διερεύνηση της επίδρασης του κυανιδίνης-3-γλυκοζίτη στις φλεγμονώδεις ασθένειες του εντέρου: Διερεύνηση νέων μηχανισμών για αναδυόμενες παρεμβάσεις. *International Journal of Molecular Sciences* . 2023; 24(11):9399. <https://doi.org/10.3390/ijms24119399>

Ξένη

Adams, F. C., & Barbante, C. (2013). Nanoscience, nanotechnology and spectrometry. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, 86, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2013.04.008>

Aguirre-Joya, J. A., De Leon-Zapata, M. A., Alvarez-Perez, O. B., Torres-León, C., Nieto-Oropeza, D. E., Ventura-Sobrevilla, J. M., Aguilar, M. A., Ruelas-Chacón, X., Rojas, R., Ramos-Aguiñaga, M. E., & Aguilar, C. N. (2018). Basic and applied concepts of edible packaging for foods. In *Food Packaging and Preservation* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811516-9.00001-4>

Ahmad, K., Li, Y., Tu, C., Guo, Y., Yang, X., Xia, C., & Hou, H. (2024). Nanotechnology in food packaging with implications for sustainable outlook and safety concerns. *Food Bioscience*, 103625, 103625. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103625>

Alfei, S., Marengo, B., & Zuccari, G. (2020). Nanotechnology application in food packaging: A plethora of opportunities versus pending risks assessment and public concerns. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 137(109664), 109664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109664>

Ariyaratna, I. R., Rajakaruna, R. M. P. I., & Karunaratne, D. N. (2017). The rise of inorganic nanomaterial implementation in food applications. *Food Control*, 77, 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.016>

Arora, S., Murmu, G., Mukherjee, K., Saha, S., & Maity, D. (2022). A comprehensive overview of nanotechnology in sustainable agriculture. *Journal of Biotechnology*, 355, 21–41. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.06.007>

Ashfaq, A., Khursheed, N., Fatima, S., Anjum, Z., & Younis, K. (2022). Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7(100270), 100270. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270>

Ashraf, S. A., Siddiqui, A. J., Elkhalfifa, A. E. O., Khan, M. I., Patel, M., Alreshidi, M., Moin, A., Singh, R., Snoussi, M., & Adnan, M. (2021). Innovations in nanoscience for the sustainable development of food and agriculture with implications on health and environment. *The Science of the Total Environment*, 768(144990). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144990>

Biswas, R., Alam, M., Sarkar, A., Haque, M. I., Hasan, M. M., & Hoque, M. (2022). Application of nanotechnology in food: processing, preservation, packaging and safety assessment. *Heliyon*, 8(11), e11795. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11795>

Chaudhry, Q., Watkins, R., & Castle, L. (2017). Nanotechnologies in food: What, why and how? In *Nanotechnologies in Food* (pp. 1–19). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782626879-00001>

Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., & Cummins, E. (2012). Nanotechnologies in the food industry – Recent developments, risks and regulation. *Trends in Food Science & Technology*, 24(1), 30–46. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.10.006>

Darbre, P. D. (2023). Nanomaterials. In *Personal Care Products and Human Health* (pp. 67–78)

EFSA Scientific Committee, More, S., Bampidis, V., Benford, D., Bragard, C., Halldorsson, T., Hernández-Jerez, A., Hougaard Bennekou, S., Koutsoumanis, K., Lambré, C., Machera, K., Naegeli, H., Nielsen, S., Schlatter, J., Schrenk, D., Silano (deceased), V., Turk, D., Younes, M., Castenmiller, J., Schoonjans, R. (2021). Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain: human and animal health. *EFSA Journal*, 19(8). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6768>

European Commission (2007). Directive 2007/19/EC. Official Journal of the European Union, L 91/1717–36.

European Commission (2018). Directive 2018/848/EC. Official Journal of the European Union L 150/1

Giles, E. L., Kuznesof, S., Clark, B., Hubbard, C., & Frewer, L. J. (2015). Consumer acceptance of and willingness to pay for food nanotechnology: a systematic review. *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology*, 17(12). <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3270-4>

Gómez-Llorente, H., Hervás, P., Pérez-Esteve, É., Barat, J. M., & Fernández-Segovia, I. (2022). Nanotechnology in the agri-food sector: Consumer perceptions. *NanoImpact*, 26(100399), 100399. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100399>

Gupta, R. K., Gawad, F. A. E., Ali, E. A. E., Karunanithi, S., Yugiani, P., & Srivastav, P. P. (2024). Nanotechnology: Current applications and future scope in food packaging systems. *Measurement: Food*, 13(100131), 100131. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2023.100131>

He, X., Deng, H., & Hwang, H.-M. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>

He, X., & Hwang, H.-M. (2016). Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(4). <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.06.001>

Huang, J.-Y., Li, X., & Zhou, W. (2015). Safety assessment of nanocomposite for food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.002>

Jiménez, A., Requena, R., Vargas, M., Atarés, L., & Chiralt, A. (2018). Food hydrocolloids as matrices for edible packaging applications. In *Role of Materials Science in Food Bioengineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811448-3.00008-5>

Karimi, M., Sadeghi, R., & Kokini, J. (2018). Human exposure to nanoparticles through trophic transfer and the biosafety concerns that nanoparticle-contaminated foods pose to consumers. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.012>

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>

Kumar, H., Gaur, A., & Karuna, M. S. (2023). Synthesis of biodegradable carboxymethyl cellulose film-loaded magnesium nanoparticles. *Emergent Materials*, 6(2), 561–571. <https://doi.org/10.1007/s42247-023-00473-4>

Kusuma, H. S., Yugiani, P., Himana, A. I., Aziz, A., & Putra, D. A. W. (2024). Reflections on food security and smart packaging. *Polymer Bulletin (Berlin, Germany)*, 81(1), 87–133. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04734-4>

Kuswandi, B., & Moradi, M. (2019). Improvement of food packaging based on functional nanomaterial. In *Nanotechnology: Applications in Energy, Drug and Food* (pp. 309–344). Springer International Publishing.

Magnuson, B., Munro, I., Abbot, P., Baldwin, N., Lopez-Garcia, R., Ly, K., McGirr, L., Roberts, A., & Socolovsky, S. (2013). Review of the regulation and safety assessment of food substances in various countries and jurisdictions. *Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 30(7), 1147–1220. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.795293>

Murali, M., Gowtham, H. G., Singh, S. B., Shilpa, N., Aiyaz, M., Alomary, M. N., Alshamrani, M., Salawi, A., Almoshari, Y., Ansari, M. A., & Amruthesh, K. N. (2022). Fate, bioaccumulation and toxicity of engineered nanomaterials in plants: Current challenges and future prospects. *The Science of the Total Environment*, 811(152249), 152249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152249>

Mohd. Aamir Mirza¹, Mohammad Jameel, Mukhtar Azam Khan, Zeenat Iqbal (2015). Nanoemulsion technology in unani medicine Page 70-74.

Mwaanga, P. (2018). Risks, uncertainties, and ethics of nanotechnology in agriculture. In Ö. Çelik (Ed.), *New Visions in Plant Science*. InTech. Doi:10.5772/intecopen.76590

Naseer, B., Srivastava, G., Qadri, O. S., Faridi, S. A., Islam, R. U., & Younis, K. (2018). Importance and health hazards of nanoparticles used in the food industry. *Nanotechnology Reviews*, 7(6), 623–641. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0076>

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., & Issaabadi, Z. (2019). An Introduction to Nanotechnology. In *Interface Science and Technology* (pp. 1–27) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00001-8>

Nile, S. H., Baskar, V., Selvaraj, D., Nile, A., Xiao, J., & Kai, G. (2020). Nanotechnologies in food science: Applications, recent trends, and future perspectives. *Nano-Micro Letters*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0383-9>

Onyeaka, H., Passaretti, P., Miri, T., & Al-Sharify, Z. T. (2022). The safety of nanomaterials in food production and packaging. *Current Research in Food Science*, 5, 763–774. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.04.005>

Ortega, F., Versino, F., López, O. V., & García, M. A. (2022). Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products. *Emergent Materials*, 5(3), 873–921. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00319-x>

Peters, R. J. B., Bouwmeester, H., Gottardo, S., Amenta, V., Arena, M., Brandhoff, P., Marvin, H. J. P., Mech, A., Moniz, F. B., Pesudo, L. Q., Rauscher, H., Schoonjans, R., Undas, A. K., Vettori, M. V., Weigel, S., & Aschberger, K. (2016). Nanomaterials for products and application in agriculture, feed and food. *Trends in Food Science & Technology*, 54, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.06.008>

Pinzon, M. I., Sanchez, L. T., Garcia, O. R., Gutierrez, R., Luna, J. C., & Villa, C. C. (2020). Increasing shelf life of strawberries (*Fragaria ssp*) by using a banana starch-chitosan-Aloe vera gel composite edible coating. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(1), 92–98. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14254>

Pirsa, S., Sani, I. K., & Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 31(100789), 100789. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100789>

Regulation, E. (2008). No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006. OJ L, 353(31.12).

Poeta, E., Liboà, A., Mistrali, S., Núñez-Carmona, E., & Sberveglieri, V. (2023). Nanotechnology and E-sensing for food chain quality and safety. *Sensors* (Basel, Switzerland), 23(20), 8429. <https://doi.org/10.3390/s23208429>

Robledo, N., Vera, P., López, L., Yazdani-Pedram, M., Tapia, C., & Abugoch, L. (2018). Thymol nanoemulsions incorporated in quinoa protein/chitosan edible films; antifungal effect in cherry tomatoes. *Food Chemistry*, 246, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.032>

Sahoo, M., Vishwakarma, S., Panigrahi, C., & Kumar, J. (2021). Nanotechnology: Current applications and future scope in food. *Food Frontiers*, 2(1), 3–22. <https://doi.org/10.1002/fft2.58>

Saritha, G. N. G., Anju, T., & Kumar, A. (2022). Nanotechnology - Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture? *Journal of Agriculture and Food Research*, 10(100457), 100457. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100457>

Sharma, S., Rawat, N., Kumar, S., Mir, Z., & Gaikwad, K. (2020). Nanotechnology for food: Regulatory issues and challenges. In *Advances in Agri-Food Biotechnology* (pp. 367–389). Springer Singapore https://doi.org/10.1007/978-981-15-2874-3_14

Shi, Q., Wang, C. L., Zhang, H., Chen, C., Zhang, X., & Chang, X.-L. (2020). Trophic transfer and biomagnification of fullerene nanoparticles in an aquatic food chain. *Environmental Science. Nano*, 7(4), 1240–1251. <https://doi.org/10.1039/c9en01277j>

Singh, D. P., & Packirisamy, G. (2023). Applications of nanotechnology to combat the problems associated with modern food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(2), 479–487. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12146>

Singh, T., Shukla, S., Kumar, P., Wahla, V., Bajpai, V. K., & Rather, I. A. (2017). Application of nanotechnology in food science: Perception and overview. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01501>

Trajkovska Petkoska, A., Daniloski, D., D’Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 140(109981), 109981. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>

Wyrwa, J., & Barska, A. (2017). Innovations in the food packaging market: active packaging. *European Food Research and Technology*, 243(10), 1681–1692. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2878-2>

Yousuf, B., & Qadri, O. S. (2020). Preservation of fresh-cut fruits and vegetables by edible coatings. In *Fresh-Cut Fruits and Vegetables* (pp. 225–242). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816184-5.00011-2>

Yu, H., Park, J.-Y., Kwon, C. W., Hong, S.-C., Park, K.-M., & Chang, P.-S. (2018). An overview of nanotechnology in food science: Preparative methods, practical applications, and safety. *Journal of Chemistry*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/5427978>

Zheng, Y., & Nowack, B. (2022). Meta-analysis of bioaccumulation data for nondissolvable engineered nanomaterials in freshwater aquatic organisms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(5), 1202–1214. <https://doi.org/10.1002/etc.5312>

Yuan, T., Zeng, J., Wang, B., Cheng, Z., Gao, W., Xu, J., & Chen, K. (2021). Silver nanoparticles immobilized on cellulose nanofibrils for starch-based nanocomposites with high antibacterial, biocompatible, and mechanical properties. *Cellulose (London, England)*, 28(2), 855–869. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03567-y>