

Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΣΤΑ ΤΡΟΦΙΜΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΛΕΙΩ ΦΟΙΝΙΚΙΑΔΟΥ

Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων

Σχολή Περιβάλλοντος

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ



Αργοστόλι Κεφαλληνίας

Ιούνιος 2024

Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΣΤΑ ΤΡΟΦΙΜΑ

Η πτυχιακή εργασία εγκρίθηκε από:

Ευσταθία Σκώττη

Γεωργία Λιοσάτου

Αθηναΐδα Μουρελάτου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο αναδυόμενος τομέας της νανοτεχνολογίας έχει προσφέρει καινοτόμες λύσεις σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας τροφίμων, όπως η επεξεργασία τροφίμων, η συσκευασία και η μακροχρόνια αποθήκευση, ενώ ταυτόχρονα έχει συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων ενισχύοντας τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους και τη διατροφική τους αξία. Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει τις κατηγορίες των νανοσωματιδίων που εφαρμόζονται στη βιομηχανία τροφίμων. Επιπλέον συνοψίζει τις πιθανές εφαρμογές τους όταν τροποποιούνται και ελέγχονται ποιοτικά καθώς και όταν παράγονται νέα πρόσθετα/συμπληρώματα τροφίμων και άλλα πιο υγιή προϊόντα. Τέλος εξετάζονται εν συντομία οι ανησυχίες για την ασφάλεια των καταναλωτών, οι εκτιμήσεις κινδύνου και η ισχύουσα νομοθεσία και οι ρυθμιστικές αρχές σχετικά με τη χρήση της νανοτεχνολογίας στα τρόφιμα.

ABSTRACT

The emerging field of nanotechnology has offered innovative solutions to various sectors of the food industry, including food processing and quality production, packaging, and long-term storage while simultaneously it has effectively contributed to the improvement of food quality by enhancing its organoleptic characteristics and nutritional value. This thesis presents the categories of nanoparticles applied in the food industry. In addition, it summarizes their potential applications when they are modified, and quality control as well as when new food additives/supplements and other healthier products are produced. Finally, consumer safety concerns, risk assessments, and current legislation and regulatory policies regarding the use of nanotechnology in food are briefly reviewed.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή στη Νανοτεχνολογία.....	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	2
1.2 Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας.....	4
Κεφάλαιο 2 ^ο : Νανοϋλικά και Τρόφιμα	7
2.1 Νανοςωματίδια (Nanoparticles).....	10
2.1.A Ανόργανα Νανοςωματίδια	11
2.1.B Οργανικά Νανοςωματίδια	14
2.2 Λιπιδικά Νανοςωματίδια	15
2.2.A Στερεά Λιπιδικά Νανοςωματίδια (Solid Lipid Nanoparticles)	15
2.2.B Νανογαλακτώματα (Nanoemulsions)	16
2.2.Γ Λιποσώματα	17
2.3 Τεχνολογία Επεξεργασίας Νανοϋλικού - Τροφίμου	18
2.3.A Νανoenθυλάκωση	19
2.3.B Νανοδόμηση	21
2.3.Γ Νανοπολυστρωματοποίηση (Nanolamination)	21
Κεφάλαιο 3 ^ο : Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας στη Βιομηχανία Τροφίμων.....	24
3.1 Επεξεργασία Τροφίμων.....	25
3.1.A Θρεπτική Αξία.....	26
3.1.B Υφή, Γεύση και Εμφάνιση Τροφίμων	27
3.1.Γ Διάρκεια Ζωής Τροφίμων	28
3.2 Συσκευασία Τροφίμων	29
3.2.A. Ενεργά Συστήματα Συσκευασίας Τροφίμων.....	31
3.2.B Έξυπνα Συστήματα Συσκευασίας.....	31
3.3.Γ Σήμανση Συσκευασιών	33
3.3. Ασφάλεια Τροφίμων και Βιοαισθητήρες	33
3.3.A Νανοαισθητήρες στην ανίχνευση τοξινών	36
3.3.B Νανοαισθητήρες στην ανίχνευση μικροβίων.....	36
3.3.Γ Νανοαισθητήρες για ανίχνευση φυτοφαρμάκων και χημικών.....	38
4.1 Εκτιμήσεις Επικινδυνότητας της Τοξικότητας.....	40
4.2 Υπάρχοντα κενά ως προς τις γνώσεις αναφορικά με τα νανοϋλικά.....	42
4.3 Ισχύουσα Νομοθεσία.....	43
4.3.A Ρυθμιστικές Αρχές του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου	44
Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές.....	47
Βιβλιογραφία	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας

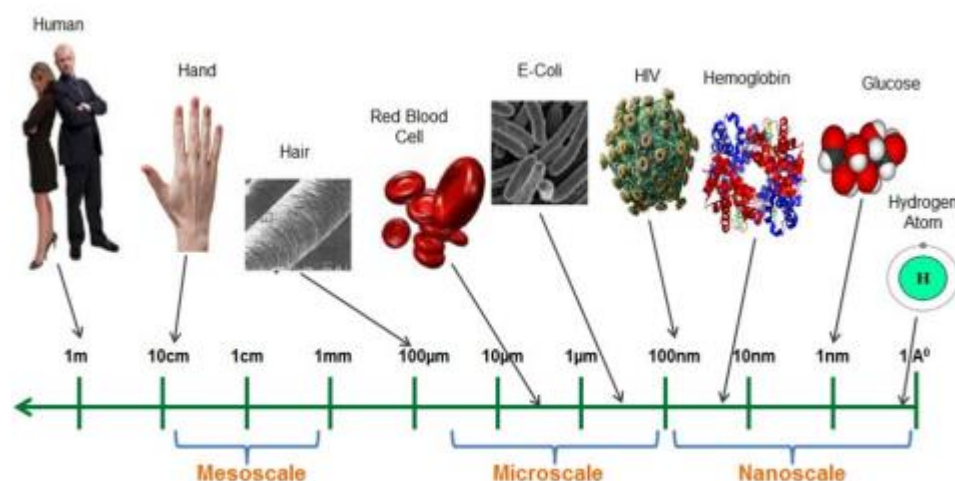
Σελίδα

Πίνακας 1.1. Σημαντικοί ιστορικοί σταθμοί για την εξέλιξη της νανοτεχνολογίας.....	3
Πίνακας 2.1: Επισκόπηση διαφόρων εφαρμογών των νανοϋλικών στη βιομηχανία τροφίμων.....	9
Πίνακας 2.2: Διαφορετικές νανοτεχνικές και νανোসυστήματα για την ενθυλάκωση βιοενεργών συστατικών.....	20
Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με διάφορες εφαρμογές των νανοαισθητήρων οι οποίοι έχουν ως στόχο τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων.....	34

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στη Νανοτεχνολογία

Η Νανοτεχνολογία αποτελεί μια νέα επιστήμη και ασχολείται με την ύλη σε ατομικό και μοριακό επίπεδο. Στην επιστήμη και την τεχνολογία το πρόθεμα «νανο» (“*nano*” στα αγγλικά) προέρχεται από την ελληνική λέξη νάνος και σημαίνει 1 δισεκατομμυριοστό. Το πρόθεμα χρησιμοποιείται από το Διεθνές Σύστημα Μονάδων όπου 1 νανόμετρο ισούται με 1 δισεκατομμυριοστό του μέτρου ($10^{-9} = 0,000000001$). Στη νανοτεχνολογία οι δομικές μονάδες της ύλης αναπτύσσονται στην νανοκλίμακα για την δημιουργία συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν νέες ιδιότητες σε σχέση με τα τυπικά υλικά. Τα υλικά που δημιουργούνται και μελετώνται στην νανοκλίμακα καλούνται νανοϋλικά και χαρακτηρίζονται από φυσικές και χημικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές που έχουν τα ίδια υλικά σε μεγαλύτερη κλίμακα. Ο λόγος που παρουσιάζουν μεταβολή ως προς τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους αποδίδεται στην αυξημένη επιφάνειά τους ανά μονάδα βάρους.

Σύμφωνα με την Εθνική Πρωτοβουλία για την Νανοτεχνολογία / National Nanotechnology Initiative (NNI), η Νανοτεχνολογία αφορά στην κατανόηση και τον έλεγχο της ύλης στην νανοκλίμακα, σε διαστάσεις περίπου 1-100 nm, όπου μοναδικά φαινόμενα επιτρέπουν νέες εφαρμογές (“*Nanotechnology is the understanding and control of matter at the nanoscale, at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications*”) (<https://www.nano.gov/about-nanotechnology>, εξακρίβωση: 22/3/2024).



Εικόνα 1.1: Σύγκριση μήκους διαφορετικής κλίμακας στη βιολογία και τη μηχανική (Καζιάνης, 2016).

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η Νανοτεχνολογία άρχισε να εδραιώνεται τα τελευταία χρόνια, ωστόσο σύμφωνα με αρχαιολογικά ευρήματα εφαρμογές της έχουν εντοπιστεί σε διαδικασίες που εφαρμόστηκαν πριν από αιώνες στους πολιτισμούς των Μάγια και της Μεσοποταμίας. Σύμφωνα με μελέτες ήδη από τα τέλη του 12^{ου} αιώνα π.Χ. χρησιμοποιούσαν χρωστικές που εφάρμοζαν σε γυαλί και κεραμικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κύπελο του Λυκούργου (Εικόνα 1.2), το οποίο παρουσιάζει έναν διχρωϊσμό καθώς όταν φωτίζεται εξωτερικά έχει ένα διαφανές πράσινο - κίτρινο χρώμα, το οποίο είναι αποτέλεσμα ανακλώμενου φωτός, ενώ όταν φωτίζεται εσωτερικά έχει ένα διαφανές ρουμπινί χρώμα, ως αποτέλεσμα του φωτός που διαπερνά το κύπελο από το εσωτερικό του προς τον εξωτερικό χώρο. Λεπτομερείς αναλύσεις δείχνουν πως το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη παρουσία μεταλλικών νανοκρυστάλλων με διάμετρο 50 - 100 nm στο εσωτερικό του γυαλιού, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τα διαφορετικά χρώματα που παίρνει το κύπελο κάτω από τις διάφορες συνθήκες φωτισμού (Καζιάνης, 2016).



Εικόνα 1.2: Το κύπελλο του Λυκούργου με εξωτερικό φωτισμό (αριστερή φωτογραφία) και εσωτερικό φωτισμό (δεξιά φωτογραφία)
(<https://www.archaiologia.gr/blog/2012/04/27/είχαν-οι-αρχαίοι-γνώσεις-νανοτεχνολογίας/>, εξακρίβωση: 22/3/2024).

Η πρώτη επίσημη επιστημονική αναφορά για την νανοτεχνολογία έγινε από τον νομπελίστα φυσικό Richard Feynman όπου στη διάλεξη με τίτλο «Υπάρχει αρκετός χώρος στο βάθος» (“There’s plenty of room at the bottom”), αν και δεν ανέφερε ποτέ

τον όρο της νανοτεχνολογίας, εξήγησε ότι σε πολύ μικρές διαστάσεις υπάρχει χώρος για πολλή επιστημονική μελέτη, ενώ μάλιστα επεσήμανε ότι θα μπορούσαν να σχεδιαστούν υλικά άτομο προς άτομο χωρίς να παραβιάζονται οι νόμοι της φυσικής.

Ο όρος νανοτεχνολογία δόθηκε το 1974 από τον Norio Tanigushi για να περιγράψει υλικά που έχουν διαστάσεις 1000 φορές μικρότερες από τη διάμετρο του θύλακα της ανθρώπινης τρίχας. Η επιστήμη αυτή παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου των χαρακτηριστικών ενός υλικού στην κλίμακα 10^{-9} m και τη δημιουργία λειτουργικών υλικών και συστημάτων μέσω ελέγχου της μάζας στη μονάδα της νανοκλίμακας. Η προσπάθεια εκλαΐκευσης του όρου με σκοπό να περιγράψει ένα κόσμο μικροσκοπικών μηχανών και συστημάτων σε διαστάσεις νανομέτρων, συγκρίσιμων σε μέγεθος με τα ανθρώπινα κύτταρα, που μπορούν και λειτουργούν σε όλα τα επίπεδα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, σηματοδότησε την έναρξη επιστημονικών μελετών με σκοπό την παροχή καινοτόμων επιχειρηματικών δραστηριοτήτων που θα επηρεάσουν την παραγωγή, την ποιότητα και τον τρόπο ζωής των ανθρώπων. Ταυτόχρονα, η αναγνώριση και η ένταξη ενός νέου κλάδου στην καθημερινότητα των ανθρώπων απαίτησε την ανάπτυξη νέων νομοθετικών πλαισίων προστασίας τόσο της υγείας των καταναλωτών όσο και των δικαιωμάτων τους. (Καζιάνης, 2016), (Demetzos, 2016a).

Πίνακας 1.1: Σημαντικοί ιστορικοί σταθμοί για την εξέλιξη της νανοτεχνολογίας (Jain & Jain, 2008).

Χρονολογία	Γεγονός
1905	Ο Αϊνστάιν δημοσιεύει εργασία στην οποία προσδιορίζεται η διάσταση του μορίου της γλυκόζης, περίπου 1 nm.
1959	R. Feynman, κάτοχος βραβείου Nobel, δίνει ομιλία με τίτλο “There’s Plenty of Room at the Bottom”, στην επιστημονική συνάντηση της Αμερικάνικης Εταιρίας Φυσικών Επιστημών.
1974	Ο Norio Tanigushi εισάγει τον όρο νανοτεχνολογία.
1981	Ο E. Dexler αναφέρει την ιδέα του σχεδιασμού μοριακών μηχανών ανάλογων των ενζύμων και των ριβοσωμάτων.
1991	Ανακάλυψη των νανοσωλήνων άνθρακα.
1994	Νανোসυστήματα μεταφοράς βιοδραστικών μορίων.

1995	Έγκριση από τον FDA του φαρμάκου Doxil, το οποίο είναι λιποσωμική μορφή αντικαρκινικού μορίου δοξορουβικίνης για ενδοφλέβια χορήγηση για την αντιμετώπιση του σαρκώματος Kaposi.
2005	Έγκριση από τον FDA του φαρμάκου Abraxane. Το φάρμακο αφορά στη νανοφαρμακοτεχνολογική μορφή της κατηγορίας ταξανών (taxane), για τη θεραπεία του καρκίνου του μαστού.

Η βιομηχανική παραγωγή νανοϋλικών ξεκίνησε τον 20^ο αιώνα. Νανοσωματίδια από μαύρο άνθρακα (αιθάλη ελαστικών) χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή ελαστικών αυτοκινήτων από τις αρχές του αιώνα αυτού, ενώ χρωστικές ουσίες όπως το SiO₂ και TiO₂ παρασκευάστηκαν με μέθοδο καύσης υψηλής θερμοκρασίας. Από τη δεκαετία του 1970 η καινοτόμος ανάπτυξη των νανοσωματιδίων οφείλεται σε έναν συνδυασμό θεωρίας και πειραμάτων στους τομείς της επιστήμης των υλικών, της χημείας, της φυσικής αλλά και των βιοεπιστημών. Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων έχουν προσφέρει νέες δυνατότητες στα διάφορα πεδία και έχουν την δυνατότητα να παραχθούν σε υψηλή ποιότητα σε βιομηχανική κλίμακα καθώς απαιτούν μία φθηνή και απλή διαδικασία σύνθεσης (Horikoshi, 2013).

1.2 Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας

Η δυνατότητα δημιουργίας και ελέγχου νανοϋλικών με τις επιθυμητές ιδιότητες έχει ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας και της εφαρμογής της σε διάφορους κλάδους. Ένας από τους σημαντικότερους κλάδους στον οποίο έχει άμεση εφαρμογή η νανοτεχνολογία είναι η ιατρική / φαρμακευτική. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα έχει καθιερωθεί ο όρος *Νανοϊατρική*, ο οποίος αναφέρεται στην εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην ιατρική. Στον τομέα αυτό στόχος είναι η χρήση νανοϋλικών για την ενίσχυση της βιοσυμβατότητας των εμφυτευμάτων μετά την επικάλυψή τους με αυτά, την κατασκευή τεχνητών οργάνων με την επιλογή των κατάλληλων βιομιμητικών υλικών (bio-mimetic materials) με δυνατότητες αυτο-οργάνωσης (self-organization) και αυτο-ομοιότητας (self-similarity), την έγκυρη και έγκαιρη ανίχνευση, διάγνωση και θεραπεία ασθενειών όπως ο καρκίνος με την χρήση των “theragnostics” (διαγνωστικο-θεραπευτικά προϊόντα), και την επιτυχή μεταφορά φαρμάκων μέσω αντίστοιχων συστημάτων

μεταφοράς (drug delivery systems) (Emerich & Thanos, 2003). Μέχρι σήμερα, οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει κι εφαρμόσει με επιτυχία πολλά συστήματα στηριζόμενα στην νανοτεχνολογία και στα νανοϋλικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εμβόλιο της Pfizer-BioNTech, το οποίο χορηγήθηκε με στόχο την αντιμετώπιση της πανδημίας που προκλήθηκε από τον ιό SARS-CoV-2 το 2020. Μάλιστα η τεχνολογία που στηρίχθηκαν οι επιστήμονες για την ανάπτυξή του είχε οδηγήσει στην ανάπτυξη δύο προγενέστερων εμβολίων, για την αντιμετώπιση της Ηπατίτιδας Α και της γρίπης τη δεκαετία του 1990, επιβεβαιώνοντας την χρησιμότητα του κλάδου αυτού στον τομέα της υγείας (Vardaxi et al., 2021). Αξίζει να σημειωθεί πως η φαρμακευτική νανοτεχνολογία έχει επίσης προσφέρει σημαντικές λύσεις σε βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως την ελεγχόμενη χορήγηση φαρμάκων και αποδέσμευση βιοδραστικών μορίων, προσφέροντας τη μέγιστη βιοδιαθεσιμότητα και αποτελεσματικότητα, την διάγνωση και απεικόνιση νόσων μέσω της ανάπτυξης νέας γενεάς διαγνωστικών μέσων νανο-μεγέθους τα οποία παρέχουν σε σύντομο χρονικό διάστημα ακριβή δεδομένα, την ανίχνευση και διάκριση μοριακών αλλαγών με στόχο να προλάβουν την μεταλλαγή από προκαρκινικά κύτταρα σε καρκινικά κ.α. (Demetzos, 2016a).

Εκτός του τομέα της ιατρικής και της φαρμακευτικής, η νανοτεχνολογία εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία στον τομέα της πληροφορίας όπου σε συνδυασμό με την κβαντομηχανική τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν ανοίξει νέοι δρόμοι στη μεταφορά πληροφοριών. Επιπρόσθετα, στον τομέα της ενέργειας η νανοτεχνολογία έχει ανοίξει νέους δρόμους στην συλλογή και αποθήκευση ενέργειας με την χρήση ηλιακών και φωτοβολταϊκών πάνελ και βιοκαυσίμων. Η αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί μέσω στερεών νανοδομών πολύ μικρού βάρους και υψηλού δυναμικού αποθήκευσης ενέργειας. Στον τομέα της ένδυσης, κάποια από τα καθημερινά ρούχα έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε ούτε να τσαλακώνονται αλλά ούτε και να ξεθωριάζουν και να μπορούν να καθαρίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Υπάρχουν ενδύματα αποτελούμενα από νανοκλωστές που λειτουργούν ως αντλίες ιδρώτα, απορροφώντας την υγρασία του δέρματος και εξωθώντας την στην επιφάνεια του ρούχου. Σε παρόμοια λογική έχουν αναπτυχθεί αυτο-καθαριζόμενες επιφάνειες στη βιομηχανία (self-cleaning or easy-to-clean surfaces), αποτελούμενες από νανοσωματίδια κεραμικού υλικού τα οποία όταν έρχονται σε επαφή με νερό επιτρέπουν την απομάκρυνσή του με ταυτόχρονη απομάκρυνση του ρύπου (Sawhney et al., 2008). Στην οδοντιατρική η νανοτεχνολογία εφαρμόζεται με τη χρήση νανορομποτ

(nanorobotics), νανοδιαγνωστικών συσκευών (nanodiagnostics) και νανοϋλικών που βοηθούν στην επούλωση πληγών, την μεταφορά φαρμάκων και την ενίσχυση της βιοσυμβατότητας των ορθοδοντικών εμφυτευμάτων μέσω της επίστρωσής τους με αυτά (Panchbhai 2019). Στην κοσμητολογία έχουν αναπτυχθεί αντιγυραντικές κρέμες αποτελούμενες από νανοσωματίδια χρυσού, μάσκες και κρέμες ματιών τα οποία κατασκευάζονται με την χρήση νανοσωματιδίων από ορυκτά όπως ο χαλαζίας και αντηλιακές κρέμες ενισχυμένες με νανοσωματίδια βιταμινών, οξείδια τιτανίου ή ψευδαργύρου (Hameed et al., 2019). Τέλος, τα τελευταία χρόνια η νανοτεχνολογία εφαρμόζεται με επιτυχία στη γεωργία όπου γίνεται χρήση διαγνωστικών αισθητήρων κατασκευασμένων από νανοσωλήνες για την ανίχνευση ορμονικών αλλαγών στα ζώα, την μεταφορά DNA μέσω νανοσωματιδίων στα φυτά για την βελτιστοποίηση της φυτικής καλλιέργειας και την χρήση νανοδιαγνωστικών συσκευών για την ανίχνευση παθογόνων μικροοργανισμών και ασθενειών τόσο στα ζώα όσο στα τρόφιμα (<http://mepolyaplalugia.blogspot.com/2015/11/ta.html>, εξακρίβωση: 22/3/2024).

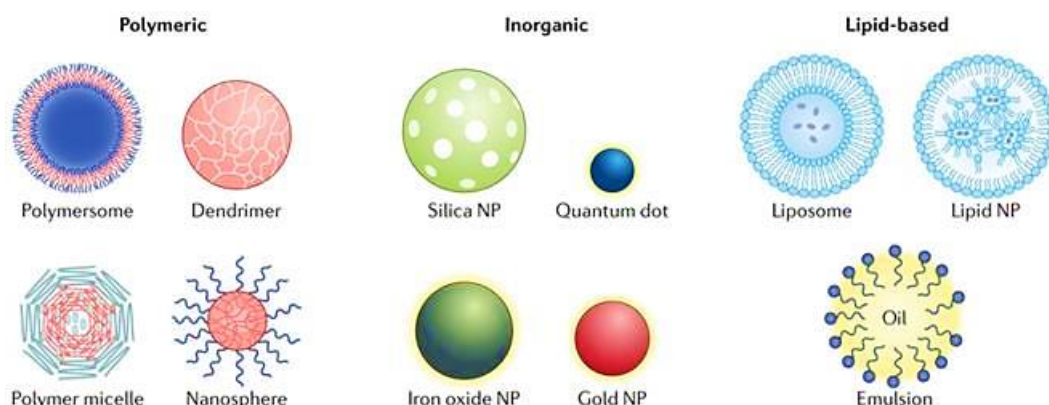
Κεφάλαιο 2^ο: Νανοϋλικά και Τρόφιμα

Η χρήση της νανοτεχνολογίας εισάγει δυνατότητες παραγωγής καινοτόμων προϊόντων και σε τομείς όπως η τεχνολογία τροφίμων και αγροχημικών προϊόντων. Στη βιομηχανία των τροφίμων τα νανοϋλικά χρησιμοποιούνται με στόχο την βελτιστοποίηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων, όπως για παράδειγμα την τροποποίηση του χρώματος και της γεύσης ενός προϊόντος, αλλά και της θρεπτικής του αξίας, την αύξηση της διάρκειας ζωής των προϊόντων διατροφής και την παρακολούθηση της ακεραιότητάς τους κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας, συσκευασίας και μεταφοράς τους.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2011) ένα τρόφιμο που έχει καλλιεργηθεί, παραχθεί, επεξεργαστεί ή συσκευαστεί με τη χρήση της νανοτεχνολογίας ή περιέχει στη σύστασή του συνθετικά νανοϋλικά, ορίζεται ως νανο-τρόφιμο. Τα νανο-τρόφιμα είναι ικανά να βελτιώσουν την πρόσληψη, την απορρόφηση και τη βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών και των μικρο-θρεπτικών συστατικών στον οργανισμό σε σύγκριση με τα συμβατικά τρόφιμα.

Στην κατηγορία των νανοϋλικών που εφαρμόζονται στην βιομηχανία των τροφίμων και μελετώνται συχνότερα από τους επιστήμονες ανήκουν τα νανοσωματίδια (nanoparticles), οι νανოსωλήνες (nanotubes), οι νανοδιασπορές (nanodispersions), τα λιποσώματα κ.α. (Εικόνα 2.1). Τα νανοϋλικά ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες σύμφωνα με το υλικό κατασκευής, για παράδειγμα πολυμερές, μέταλλο, λιπίδιο κ.α., τη δομή και την αρχιτεκτονική τους, τις φυσικοχημικές ιδιότητες και κατ' επέκταση τον επιθυμητό τόπο και τον τρόπο δράσης κι εφαρμογής τους. Ο παράγοντας που διαδραματίζει όμως έναν από τους πιο σημαντικούς ρόλους είναι το μέγεθος του συστήματος, καθώς κάποιες εφαρμογές τους στα τρόφιμα συνδέονται άμεσα με την απελευθέρωσή τους σε περιβαλλοντικά μέσα όπως αυτό του ανθρώπου. Το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει άμεσα την παροχή οποιασδήποτε βιοδραστικής ένωσης σε διάφορα σημεία εντός του σώματος καθώς σε ορισμένες κυτταρικές σειρές μόνο τα νανοσωματίδια με μέγεθος μικρότερο της κλίμακας του μικρομέτρου μπορούν να απορροφηθούν αποτελεσματικά και όχι τα μικροσωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους. (Ezhilarasi et al., 2013). Επιπλέον, στην επιλογή του μεγέθους πρέπει να συνεκτιμηθεί το γεγονός ότι ο ανθρώπινος οργανισμός διαθέτει φυσιολογικούς φραγμούς των οποίων ο στόχος είναι να αναγνωρίζουν ξένα σε

αυτόν οργανισμό και ουσίες και να τα απορρίπτουν μέσω κατάλληλων διεργασιών (Zhao et al., 2016).



Εικόνα 2.1: Διαφορετικοί τύποι νανοσωματιδίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα μεταφοράς βιοδραστικών ουσιών (<https://www.medsci.org/v18p2943.htm> , εξακρίβωση 22/3/2024).

Τα συστήματα των νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της θρεπτικής αξίας των τροφίμων μέσω της απελευθέρωσης θρεπτικών συστατικών όπως οι βιταμίνες και οι πρωτεΐνες μετά την κατανάλωσή τους ανήκουν στην κατηγορία των συστημάτων μεταφοράς. Η ικανότητα ενθυλάκωσης βιοδραστικών μορίων, η διατήρηση της σταθερότητάς τόσο των ίδιων όσο και του ολικού συστήματος και η ελεγχόμενη αποδέσμευσή τους καθιστά τα νανοϋλικά ως πολλά υποσχόμενα συστήματα. Μάλιστα, η ικανότητα αυτή είναι ο σπουδαιότερος λόγος που η νανοτεχνολογία εφαρμόζεται με επιτυχία και στην ιατρική και τη φαρμακευτική. Το ιδανικό σύστημα παράδοσης θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ιδιότητες όπως η ικανότητα απελευθέρωσης της δραστικής ένωσης στον επιθυμητό τόπο δράσης, η εξασφάλιση διαθεσιμότητας σε συγκεκριμένο χρόνο και με συγκεκριμένο ρυθμό, και η αποτελεσματικότητα διατήρησης των δραστικών ενώσεων σε κατάλληλα επίπεδα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, σε κατάσταση αποθήκευσης (Bratovčić et al., 2015).

Η ορθή επιλογή του συστήματος μεταφοράς για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί την κατανόηση τόσο των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του στην νανοκλίμακα, τα οποία μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από αυτά σε συνθήκες μεγαλύτερης κλίμακας, όσο και την φύση του ίδιου του τροφίμου στο οποίο θα ενσωματωθεί. Ακόμα, δεν πρέπει να παραληφθεί η ολοκληρωμένη μελέτη και κατανόηση των μορίων τα οποία πρόκειται να μεταφερθούν. Για να ελεγχθεί αποτελεσματικά η σταθερότητα του ενθυλακωμένου συστατικού, είτε χημική, είτε φυσική, έχει μεγάλη σημασία να ταυτοποιηθούν τυχόν

μηχανισμοί υποβάθμισης που μπορεί να κυριαρχούν και να μελετηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την υποβάθμιση τόσο του ίδιου του συστατικού όσο και του συστήματος. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι είτε ενδογενείς, όπως το pH, το οξυγόνο και η παρουσία ενζύμων είτε εξωγενείς όπως αλλαγές στη θερμοκρασία και η έκθεση στο φως. Οι νανοφορείς απαιτείται να είναι σταθεροί αλλά και να διατηρούν τη σταθερότητα του ενθυλακωμένου συστατικού, μη τοξικοί, και βιοσυμβατοί. Οι πολυσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια είναι τα πιο γνωστά υλικά-φορείς στον τομέα των τροφίμων καθώς χαρακτηρίζονται ασφαλή και αποτελεσματικά (Augustin & Hemar, 2009).

Πίνακας 2.1: Επισκόπηση διαφόρων εφαρμογών των νανοϋλικών στη βιομηχανία τροφίμων (Shafiq et al., 2020).

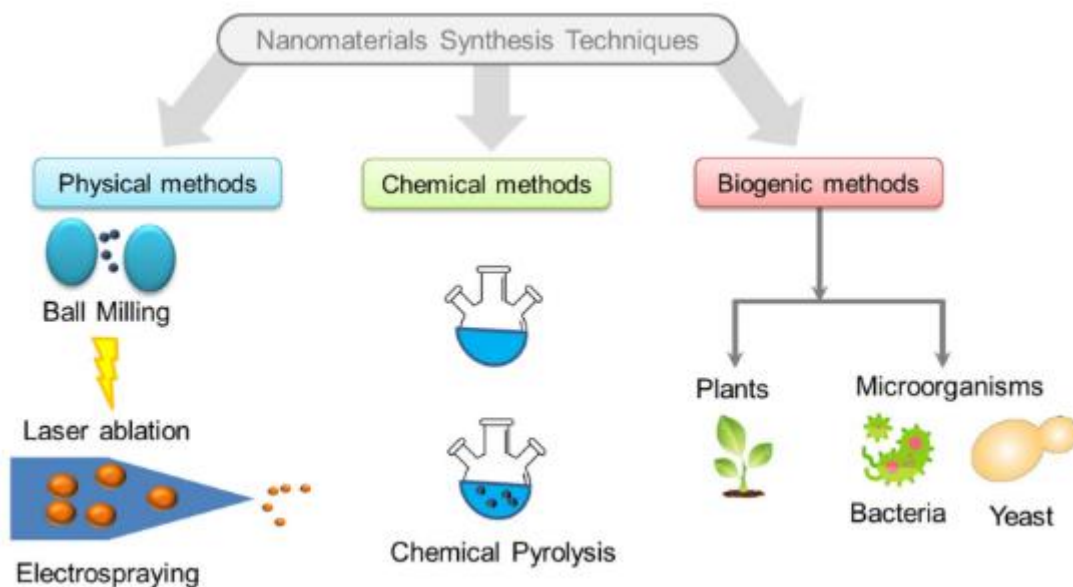
Νανοϋλικά	Τύπος των νανοϋλικών	Εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων
Νανოსωματίδια	Ag, ZnO, Mg, SiO ₂	Συσκευασία τροφίμων, οξείδωση ρύπων, αντιβακτηριδιακή εφαρμογή
Νανοκόσκινο (nanosieve)	Συγκεκριμένα νανოსωματίδια	Απομάκρυνση παθογόνων ή ρύπων
Νανοκάψουλες	Βιοδραστικές ενώσεις	Αυξημένη αποτελεσματικότητα και υδατοδιαλυτότητα, τοπική και ελεγχόμενη απελευθέρωση
Νανογαλακτώματα	Τροποποιημένο άμυλο, σόγια, καζεϊνικά άλατα	Ενθυλάκωση τροφίμων, επεξεργασία και αποθήκευση τροφίμων, αντιμικροβιακή εφαρμογή
Νανοςφαίρες	Νανόσφαιρα αμύλου	Ενθυλάκωση τροφίμων, συνθετικές κόλλες
Νανοσένσορες	Aptasensors	Ανίχνευση μικροοργανισμών, έλεγχος αλλοίωσης των τροφίμων
Νανοσύνθετα	Fe-Cr/Al ₂ O ₃ Ni/Al ₂ O ₃	Βελτιωμένη διάρκεια ζωής τροφίμων, προστασία τροφίμων και συσκευασία τροφίμων
Νανομικύλλια	Aquanova, novasol	Υγρός φορέας, ενισχυμένη διαλυτότητα

2.1 Νανοσωματίδια (Nanoparticles)

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization) ορίζει ως νανοσωματίδια τα σωματίδια που η διάμετρός τους εκτείνεται από 1 - 100 nm, ενώ το Βρετανικό Ίδρυμα Προτύπων (British Standards Institution) ως νανοσωματίδια ορίζει αυτά στα οποία όλα τα πεδία ή οι διάμετροι βρίσκονται στο εύρος νανοκλίμακας. Γενικότερα ο επικρατέστερος όρος αναφέρει πως ως νανοσωματίδια (nanoparticles) ορίζονται τα σωματίδια αυτά των οποίων και οι τρεις εξωτερικές τους διαστάσεις είναι στην νανοκλίμακα, σε αντίθεση με τα νανοϋλικά των οποίων τουλάχιστον μία εξωτερική διάσταση είναι στην νανοκλίμακα (Horikoshi & Serpone, 2013).

Τα νανοσωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος, τη μορφολογία, τις φυσικές και τις χημικές τους ιδιότητες. Μερικά από αυτά είναι νανοσωματίδια με βάση τον άνθρακα, κεραμικά νανοσωματίδια, νανοσωματίδια μετάλλων, νανοσωματίδια πολυμερών (και βιοπολυμερών) και νανοσωματίδια με βάση τα λιπίδια. Ωστόσο, συνήθως χωρίζονται σε δύο ευρύτερες ομάδες: τα οργανικά και τα ανόργανα. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει μικκύλια, δενδριμερή, λιποσώματα, υβριδικά και πολυμερικά νανοσωματίδια, ενώ η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει φουλερένια (fullerenes), κβαντικές κουκκίδες (quantum dots), πυρίτιο και νανοσωματίδια μετάλλων. Στη βιομηχανία των τροφίμων απαντώνται τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα νανοσωματίδια καθώς έχουν πληθώρα εφαρμογών. (https://www.nanowerk.com/what_are_synthetic_nanoparticles.php, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024).

Τα νανοσωματίδια μπορούν να συντεθούν χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων φυσικών, χημικών και βιογονικών μεθόδων (Εικόνα 2.2), όπως η άλεση με σφαιρίδια, ο ηλεκτροψεκασμός, τα μικροκύματα, η εκκένωση σπινθήρα ή η αφαίρεση με λέιζερ, η συμπύκνωση αδρανούς αερίου, το sol-gel, η χημική και φυσική εναπόθεση ατμών και το νανογαλάκτωμα ενώ παράγονται επίσης με τη βοήθεια βιολογικών πηγών όπως βακτήρια, φύκια, μύκητες κλπ.



Εικόνα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα απεικόνισης της φυσικής, χημικής και βιολογικής μεθόδου σύνθεσης των νανοσωματιδίων.

2.1.A Ανόργανα Νανοσωματίδια

Μια από τις κατηγορίες νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται σε υλικά τροφίμων αποτελείται κυρίως από ανόργανα υλικά, όπως ο άργυρος, το διοξείδιο του πυριτίου, το οξείδιο του σιδήρου, το διοξείδιο του τιτανίου ή το οξείδιο του ψευδαργύρου (Pietroiusti et al., 2016). Αυτά τα νανοσωματίδια είναι είτε κρυσταλλικής φύσης είτε άμορφα στερεά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και η δομή τους μπορεί να είναι είτε σφαιρική είτε μη σφαιρική με διαφορετικά χαρακτηριστικά επιφάνειας και μεγέθη ανάλογα με τα πρόδρομα υλικά και τις συνθήκες παρασκευής. Τα ανόργανα νανοσωματίδια έχουν την τάση να διαλύονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες διαλύματος, σύμφωνα δηλαδή με το pH και την ιοντική ισχύ και υπό την επίδραση ορισμένων χημικών αντιδράσεων, οι οποίες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα επίπεδα τοξικότητας που μπορούν να εκδηλωθούν κατά την παρουσία τους στα όργανα του γαστρεντερικού συστήματος.

Τα νανοσωματίδια αργύρου (AgNPs) έχουν αντιμικροβιακές ιδιότητες και επομένως χρησιμοποιούνται συνήθως ως αντιμικροβιακά μέσα σε συσκευασίες προϊόντων διατροφής, σανίδες κοπής, δοχεία αποθήκευσης, ψυγεία και συμπληρώματα υγείας. Λόγω της ιδιότητας αυτής τα νανοσωματίδια αργύρου έχουν χρησιμοποιηθεί από κατασκευαστές στις Ηνωμένες Πολιτείες με σκοπό την παραγωγή δοχείων τροφίμων με αυξημένες αντιμικροβιακές ιδιότητες προκειμένου να παραμένουν τα τρόφιμα που αποθηκεύονται

μέσα σε αυτά αναλλοίωτα για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, το βασικό δοχείο αποθήκευσης τροφίμων της Kinetic Go Green περιείχε νανοσωματίδια αργύρου, όπως και τα δοχεία αποθήκευσης φρέσκων τροφίμων Oso Fresh και οι πλαστικές σακούλες αποθήκευσης της εταιρείας FresherLonger.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές μελέτες σχετικές με την χρήση νανοσωματιδίων αργύρου σε υλικά συσκευασίας. Η ομάδα του Emamifar, για παράδειγμα, (Emamifar et al., 2011) παρασκεύασε σύνθετες μεμβράνες LDPE (low-density polyethylene) που περιείχαν νανοσωματίδια Ag και ZnO (οξείδια του ψευδαργύρου) για την αποθήκευση χυμού από πορτοκάλι. Ο χυμός πορτοκαλιού αποστειρώθηκε, εμβολιάστηκε με *Lactobacillus plantarum*, τοποθετήθηκε στις συσκευασίες και αποθηκεύτηκε στους 4 °C, η δε μικροβιακή του σταθερότητα αξιολογήθηκε μετά από 7, 28, 56, 84 και 112 ημέρες αποθήκευσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης ο ρυθμός μικροβιακής ανάπτυξης μειώθηκε σημαντικά με τη χρήση αυτού του νανοςύνθετου υλικού συσκευασίας.

Μια άλλη κατηγορία ανόργανων νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα σε συμπληρώματα και λειτουργικά τρόφιμα (functional foods) είναι αυτά με ψευδάργυρο (Zn) και οξείδια ψευδαργύρου (ZnO). Η αναγνώρισή τους ως πολλά υποσχόμενα νανοσωματίδια έγκειται στο γεγονός ότι ο ψευδάργυρος είναι ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο που απαιτείται για τη διατήρηση της ανθρώπινης υγείας και ευημερίας, ενώ μελέτες σε κυτταρικές σειρές έχουν δείξει ότι τα οξείδια ψευδαργύρου αποτελούν βιοσυμβατά νανοϋλικά. Τα νανοσωματίδια οξειδίων ψευδαργύρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συσκευασίες προϊόντων διατροφής ως αντιμικροβιακά μέσα, για την αποτροπή της μόλυνσης των τροφίμων από επιβλαβή βακτήρια όπως το *Escherichia coli* (Όπως στην μελέτη των Tankhiwale & Bajpai [2012] όπου δοκιμάστηκε φιλμ πολυαιθυλενίου επικαλυμμένο με νανοσωματίδια ZnO) ενώ ενδιαφέρουσα είναι και η ικανότητα που έχουν να απορροφούν το υπεριώδες φως (UV) και επομένως να είναι χρήσιμα για την προστασία των τροφίμων από την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, όταν τα τρόφιμα είναι ευαίσθητα σε αυτή.

Το διοξείδιο του τιτανίου (TiO₂) και τα νανοσωματίδιά του έχουν έντονο λευκό χρώμα και εξαιτίας αυτού έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε πλήθος προϊόντων στις βιομηχανίες χρωμάτων, πλαστικών ειδών, χαρτοβιομηχανίες, φαρμακοβιομηχανίες και βιομηχανίες καλλυντικών αλλά και στις βιομηχανίες που σχετίζονται με τρόφιμα. Ως πρόσθετο τροφίμων έχει τον αριθμό E171 και έχει χρησιμοποιηθεί τόσο για το χρώμα του

όσο και για τις χαρακτηριστικές οπτικές ιδιότητές του, όπως ισχυρή ικανότητα απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας και αντοχή στο υπεριώδες φως. Έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως πρόσθετο σε προϊόντα διατροφής και ως αντιμικροβιακός παράγοντας στη συσκευασία και αποθήκευσή τους.

Σχετικά με την δράση του διοξειδίου του τιτανίου ως αντιμικροβιακός παράγοντας, χαρακτηριστική είναι η μελέτη των Yemmireddy & Hung (2015) κατά την οποία έγινε μια προσπάθεια να προσδιοριστεί η επίδραση διαφορετικών συνδετικών ουσιών (binders) τόσο στη βακτηριοκτόνο δράση νανοεπικαλύψεων TiO_2 όσο και στη σταθερότητα των επικαλύψεων σε επιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα. Κατά τη διάρκεια της μελέτης παρασκευάστηκαν διάφορα εναιωρήματα επικάλυψης, με ανάμιξη νανοσωματιδίων διοξειδίου του τιτανίου με τρεις διαφορετικούς τύπους συνδετικών ουσιών (Shellac, πολυουρεθάνη και πολυκρυλικό) προκειμένου να αξιολογηθεί η βακτηριοκτόνος δράση αυτών των επικαλύψεων απέναντι στο βακτήριο *Escherichia coli* και σε τρεις διαφορετικές εντάσεις φωτός UV-A, ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης TiO_2 σε επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα, με σκοπό τη διασφάλιση ασφαλούς περιβάλλοντος επεξεργασίας τροφίμων. Η μελέτη έδειξε πως ναι μεν έχει βακτηριοκτόνο δράση το TiO_2 , ο τύπος της συνδετικής ουσίας που χρησιμοποιείται στην επικάλυψη όμως έχει σημαντική επίδραση στη βακτηριοκτόνο αυτή δράση, ενώ κάποιες επικαλύψεις είναι πιο σταθερές και ικανές να διατηρήσουν την αρχική τους βακτηριοκτόνο ιδιότητα σε πειράματα επαναλαμβανόμενης χρήσης (1, 3, 5 και 10 φορές). Πέρα από την βακτηριοκτόνο δράση η μελέτη έδειξε πως, όπως ήταν αναμενόμενο, κάποιες από τις επικαλύψεις του TiO_2 με τις συνδετικές ουσίες επιδεικνύουν υψηλότερη αντοχή πρόσφυσης και αντοχή στις γρατσουνιές (Η πολυουρεθάνη, στην συγκεκριμένη μελέτη). Γενικά, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν πολλά υποσχόμενα για την ανάπτυξη ανθεκτικών επικαλύψεων TiO_2 με ισχυρή φωτοκαταλυτική βακτηριοκτόνο ιδιότητα σε επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα.

Πριν κλείσει η αναφορά μας στο διοξείδιο του τιτανίου πρέπει να σημειώσουμε πως λόγω της πιθανότητας καρκινογόνων επιδράσεων των νανοσωματιδίων του έχει απαγορευτεί η χρήση του ως πρόσθετου τροφίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση από το 2022, αν και δεν έχει συμβεί το ίδιο σε άλλες χώρες, όπως οι ΗΠΑ.

Η νανοτεχνολογία έχει δύο ακόμη υλικά, τα οποία είναι πιθανό να έχουν αντίκτυπο στη βιομηχανία τροφίμων, τις νανοϊνες (nanofibers) και τους νανοσωλήνες (nanotubes). Οι νανοϊνες συνήθως έχουν λίγες εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων,

ωστόσο οι προσπάθειες παραγωγής αυξάνονται και η χρήση τους είναι πιθανή στο μέλλον. Οι νανοϊνες έχουν μικρές διαμέτρους, με μέγεθος από 10 έως 1000 nm, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για να χρησιμεύσουν ως πλατφόρμα για βακτηριακές καλλιέργειες (Guo, 2015) καθώς επίσης και ως δομική μήτρα για τεχνητά τρόφιμα και υλικά συσκευασίας τροφίμων τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Παρόμοια με τις νανοϊνες, η χρήση των νανοσωλήνων είναι κυρίως για μη εδωδίδες εφαρμογές. Οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται συνήθως ως αγωγοί χαμηλής αντίστασης και δοχεία καταλυτικής αντίδρασης. Ορισμένες σφαιρικές πρωτεΐνες γάλακτος μπορούν να αυτοσυναρμολογηθούν σε παρόμοια δομημένους νανοσωλήνες σε ορισμένες κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες (Graveland-Bikker 2006).

Τέλος, στην κατηγορία των ανόργανων νανοσωματιδίων, τα νανοσωματίδια διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) χρησιμοποιούνται σε ορισμένα τρόφιμα σε σκόνη ως αντιπηκτικά. Το διοξείδιο του πυριτίου και ο άνθρακας με μέγεθος σωματιδίων στην περιοχή μερικών εκατοντάδων nm μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρόσθετα τροφίμων αλλά και στη συσκευασία για την ενίσχυση της διατηρησιμότητάς τους (Ameta et al., 2020).

Αν και τα πλεονεκτήματα των νανοσωματιδίων αυτών είναι φανερά, δεν θα πρέπει να παραλειφθεί το γεγονός πως λόγω της ανόργανης φύσης τους οι πιθανότητες για εκδήλωση τοξικότητας είναι σημαντικές. Συνεπώς, προτού αξιοποιηθούν σε βιομηχανική κλίμακα, οι εκάστοτε παραγωγικές εταιρίες είναι απαραίτητο να ελέγχουν αφενός την πιθανότητα μετανάστευσής τους από τις συσκευασίες στα τρόφιμα και την πιθανή κατάποσή τους από τον άνθρωπο και αφετέρου όλες τις πιθανές παρενέργειες που μπορεί να επιφέρουν στον οργανισμό, συμπεριλαμβανομένου της τοξικότητας. (Echegoyen & Nerin, 2013).

2.1.B Οργανικά Νανοσωματίδια

Τα οργανικά νανοσωματίδια αποτελούνται από οργανικές ουσίες, όπως οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες, τα μικύλλια και τα πολυμερικά νανοσωματίδια. Αυτές οι ουσίες είναι υγρές, ημιστερεής ή στερεάς κατάστασης (η δομή των οποίων είναι είτε κρυσταλλική είτε άμορφη). Ωστόσο οι συνθήκες στις οποίες εκτίθενται, όπως διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας, τιμές pH, ιοντικής ισχύος καθώς και ο τρόπος σύνθεσης και οι συνθήκες επεξεργασίας τους διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο τόσο στην φυσικοχημική τους κατάσταση όσο και στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους.

Τα νανοσωματίδια πρωτεϊνών, συμπεριλαμβανομένων ιών και σωματιδίων που μοιάζουν με ιούς, αλλά και τα σύμπλοκα πρωτεϊνών με άλλα νανοσωματίδια όπως νανοσωματίδια πολυμερών, λιπιδίων και πολυσακχαριτών έχουν δείξει τα τελευταία χρόνια μεγάλες δυνατότητες σε πολλά πεδία, όπως η κατάλυση, η σύνθεση υλικών, η διανομή φαρμάκων, η ανάπτυξη εμβολίων και η βιοαπεικόνιση. Νανοσωματίδια πρωτεϊνών βρίσκονται επίσης σε τρόφιμα, όπως τα μικκύλια καζεΐνης, τα οποία είναι διαθέσιμα στο γάλα και σε άλλα γαλακτοκομικά προϊόντα. Αυτά δεν είναι παρά μικρές συστάδες μορίων καζεΐνης και ιόντων φωσφορικού ασβεστίου.

2.2 Λιπιδικά Νανοσωματίδια

Τα λιπιδικά νανοσωματίδια (lipid-based nanoparticles) ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των οργανικών νανοσωματιδίων και υπάρχουν σε πολλά εμπορικά προϊόντα διατροφής. Τα λιπίδια και τα νανοσωματίδια λιπιδίων χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον ως φορείς μεταφοράς φαρμάκων, δηλαδή ως συστήματα χορήγησης από το στόμα για διαφορετικά φάρμακα και άλλα δραστικά συστατικά καθώς εξασφαλίζουν την σταθερότητα των ενθυλακωμένων συστατικών και την ελεγχόμενη αποδέσμευσή τους στο επιθυμητό σημείο δράσης. Επιπλέον είναι βιοσυμβατά καθώς δεν αναγνωρίζονται ως ξένοι οργανισμοί από το ανοσοποιητικό σύστημα. Αυξάνουν την απορρόφηση του φαρμάκου στη γαστρεντερική οδό λόγω του μικρού τους μεγέθους και της αύξησης του χρόνου παραμονής τους σε αυτή λόγω προσκόλλησης στη βλεννογόνο. Επιπρόσθετα, τα νανοσωματίδια λιπιδίων μπορούν να προστατεύουν κάποια φάρμακα, τα οποία είτε είναι συζευγμένα στην επιφάνειά τους είτε ενθυλακωμένα στο εσωτερικό τους, από διάφορες διαδικασίες αποικοδόμησης και επιτρέπουν την απελευθέρωση των μορίων του φαρμάκου από το λιπιδικό τμήμα τους προς το αίμα με σταδιακό τρόπο, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό σε βελτιωμένα θεραπευτικά προφίλ σε σύγκριση με τα προφίλ των αντίστοιχων ελεύθερων φαρμάκων (Severino et al., 2012).

2.2.A Στερεά Λιπιδικά Νανοσωματίδια (Solid Lipid Nanoparticles)

Στην κατηγορία των λιπιδικών νανοσωματιδίων συναντώνται και αυτά που ορίζονται ως στερεά λιπιδικά νανοσωματίδια (Solid Lipid Nanoparticles / SLN) και χαρακτηρίζονται ως καινοτόμα συστήματα μεταφοράς. Τα νανοσωματίδια αυτά παρουσιάζουν παρόμοια δομή με τα νανογαλακτώματα με τη διαφορά ότι η υγρή ελαιώδης

φάση των νανογαλακτωμάτων έχει αντικατασταθεί από λιπαρά συστατικά, στερεά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως κερί ή παραφίνη. Τα SLN είναι επί της ουσίας γαλακτώματα τύπου ελαίου-σε-νερό στα οποία η λιπαρή φάση έχει μερικά ή εξ' ολοκλήρου στερεοποιηθεί.

Τα SLN έχουν πληθώρα πλεονεκτημάτων όπως σταθερότητα, βιοσυμβατότητα και χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με νανοφορείς που βασίζονται σε βιοπολυμερή, ενώ επίσης παρέχουν την δυνατότητα ελεγχόμενης και στοχευμένης αποδέσμευσης του εγκλωβισμένου μορίου. Τα SLN έχουν την δυνατότητα να προστατεύουν τα ενθυλακωμένα λιπόφιλα συστατικά από χημική υποβάθμιση λόγω της ικανότητας της λιπιδικής φάσης να αποτρέπει διαδικασίες μοριακής διάχυσης. (Weiss et al., 2008).

2.2.B Νανογαλακτώματα (Nanoemulsions)

Τα εδώδιμα νανογαλακτώματα έχουν εφαρμογή στη βιομηχανία προϊόντων διατροφής και ποτών καθώς ενθυλακώνουν, προστατεύουν και μεταφέρουν τόσο υδρόφιλα όσο και λιπόφιλα συστατικά με λειτουργικές ιδιότητες, όπως τα καροτενοειδή, τα φλαβονοειδή, οι φυτοστερόλες, οι λιποδιαλυτές ή υδατοδιαλυτές βιταμίνες και διάφορα αντιοξειδωτικά. Είναι μορφές κολλοειδών αποτελούμενες από δύο μη αναμίξιμα υγρά (συνήθως νερό και λάδι) και επιφανειοδραστικές ουσίες. Κατηγοριοποιούνται σε νανογαλακτώματα τύπου έλαιο-σε νερό (O/W) και νερό-σε-έλαιο (W/O) ανάλογα με την φύση της διεσπαρμένης φάσης στο σύστημα. Είναι διαυγή ή ελαφρώς θολά και η μια φάση διασπείρεται στην άλλη με μορφή σταγονιδίων, μεγέθους συνήθως 50-200 nm. Χαρακτηρίζονται από καλή σταθερότητα, ταχεία απορρόφηση σε λήψη δια στόματος και ταχεία πεπτικότητα, προστασία από την αποικοδόμηση, ελεγχόμενη απελευθέρωση, ενώ επίσης το μέγεθός τους είναι υπεύθυνο για την ενίσχυση της βιοδιαθεσιμότητας των διαφορετικών βιοδραστικών συνήθως μορίων τα οποία βρίσκονται εγκλωβισμένα.

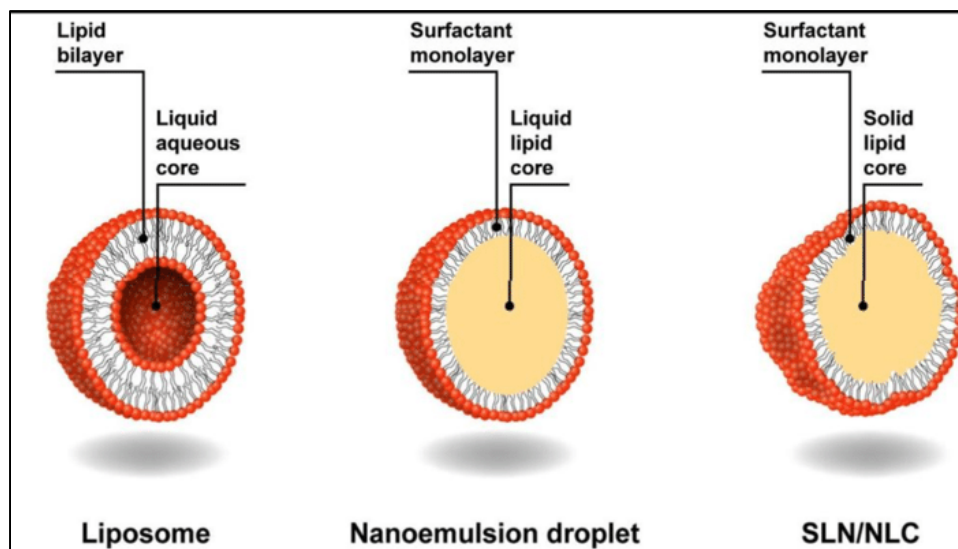
Τα νανογαλακτώματα μπορούν να κατασκευαστούν σε βιομηχανική κλίμακα με μεγάλη ευελιξία για την παροχή διαφορετικών συστημάτων, κατάλληλων ως μέσο μεταφοράς ουσιών. Η ελαιώδης φάση μπορεί να διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους λιπιδίων και ελαίων, όπως τριγλυκερίδια και αιθέρια έλαια, για την παραγωγή νανογαλακτωμάτων διαφορετικών φυσικοχημικών και βιολογικών ιδιοτήτων, ενώ παράλληλα το υδατικό τμήμα θα μπορούσε επίσης να τροποποιηθεί με την προσθήκη διαφορετικών υδατοδιαλυτών συστατικών. Σε γενικότερο πλαίσιο θεωρούνται κινητικά

σταθερά συστήματα και οι ευέλικτες ιδιότητές τους τα καθιστούν αποδεκτά για χρήση σε τρόφιμα. Στην βιομηχανία τροφίμων υπάρχει πληθώρα εφαρμογών μακρογαλακτωμάτων με πιο γνωστά στον καταναλωτή, τη μαγιονέζα (παράδειγμα γαλακτώματος τύπου έλαιο-σε-νερό (o/w)), τη μαργαρίνη και το βούτυρο (παράδειγμα γαλακτώματος τύπου νερό σε-έλαιο (w/o)).

Σύμφωνα με μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι τα πρόσθετα επηρεάζουν τις ιδιότητες του νανογαλακτώματος. Οι Hung et al. σχεδίασαν ένα γαλάκτωμα τοκόλης φορτωμένο με ρεσβερατρόλη με προσθήκη βιταμίνης E και λαδιού καρύδας, το οποίο παρουσίαζε υψηλότερη σταθερότητα για 30 ημέρες στους 37°C σε σύγκριση με το νανογαλάκτωμα που παρασκευάστηκε χωρίς αυτά τα πρόσθετα (Hung et al., 2007).

2.2.Γ Λιποσώματα

Τα λιποσώματα ανήκουν στην κατηγορία των κολλοειδών που χρησιμοποιούνται με επιτυχία ως συστήματα μεταφοράς βιοδραστικών μορίων. Οι διαστάσεις των λιποσωμάτων, ανάλογα με την μέθοδο παρασκευής τους και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των δομικών τους μονάδων, κυμαίνονται από την τάξη των νανομέτρων μέχρι μερικών μικρομέτρων. Τα λιποσώματα κατά τον σχεδιασμό τους είναι παρόμοια με τα λιπιδικά νανοσωματίδια. Εν τούτοις, τα λιποσώματα είναι κυστίδια αποτελούμενα από διπλοστιβάδα λιπιδίων με εσωτερική υδατική κοιλότητα από φωσφολιπίδια. Φορτισμένα φωσφολιπίδια μπορούν να συζευχθούν στην επιφάνειά τους για να τους προσδώσουν θετικό ή αρνητικό φορτίο ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παγίδευση υδροφιλικών μορίων (π.χ. φάρμακα ή βιοδραστικές ουσίες) στον πυρήνα υδατικού διαλύματος ή για φόρτωση υδρόφοβων/λιπόφιλων μορίων στις λιπιδικές στοιβάδες. Με άλλα λόγια, τα λιποσώματα είναι κλειστές, συνεχείς, διστρωματικές δομές οι οποίες παρομοιάζονται με αυτές του «κρεμμυδιού» και μπορούν να παρασκευαστούν με θέρμανση χωρίς τη χρήση επιβλαβών χημικών ή κάποιας πολύπλοκης διαδικασίας (Vardaxi et al., 2021). Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης λιποσωμάτων στην βιομηχανία προϊόντων διατροφής είναι ότι μπορούν να σχηματιστούν από φυσικά συστατικά όπως φυσικά λιπίδια, και κυρίως φωσφολιπίδια και στερόλες. Παρόλο που έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, τα χαμηλά ποσοστά απόδοσης κατά την ενθυλάκωση, η μικρή σταθερότητα σε συνθήκες αποθήκευσης, η ευαισθησία σε συνθήκες οξείδωσης και ο μικρός χρόνος αποδέσμευσης της βιοδραστικής ουσίας είναι κάποιοι από τους περιορισμούς κατά την εφαρμογή τους (Kamaly et al., 2012).



Εικόνα 2.3: Σύγκριση μεταξύ λιποσωμάτων (liposomes), νανογαλακτωμάτων (nanoemulsion) και νανοσωματιδίων στερεών λιπιδίων (solid lipid nanoparticles (SLN))/ νανοδομημένων λιπιδικών φορέων (nanostructured lipid carriers (NLC)) (Balamurugan & Chintamani, 2018).

2.3 Τεχνολογία Επεξεργασίας Νανοϋλικού - Τροφίμου

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα προκειμένου να γίνει επιτυχημένη ενσωμάτωση διαφόρων ειδών θρεπτικών συστατικών όπως τα ιχνοστοιχεία, οι βιταμίνες, τα λιπαρά οξέα, τα φλαβονοειδή και τα καροτενοειδή σε λειτουργικά τρόφιμα και ποτά προκειμένου να βελτιωθεί η ανθρώπινη υγεία μέσω της διατροφής. Από την άλλη, ακόμα και οι ίδιοι οι καταναλωτές αναζητούν είτε συμπληρώματα διατροφής είτε προτιμούν τρόφιμα με ενισχυμένες θρεπτικές αξίες προκειμένου να ενισχύσουν και να βελτιώσουν την υγεία τους. Είναι γνωστό πως ορισμένα από τα θρεπτικά συστατικά όπως οι βιταμίνες και τα ιχνοστοιχεία είναι βασικά για την λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού ενώ άλλες βιοδραστικές ουσίες προσφέρουν επιπρόσθετα οφέλη στην υγεία του ανθρώπου. Πολλά από τα θρεπτικά συστατικά δεν είναι εφικτό να ενσωματωθούν στην αρχική τους μορφή στα προϊόντα τροφίμων είτε λόγω της φύσης του ίδιου του τροφίμου είτε λόγω της μοριακής και φυσικοχημικής φύσης των θρεπτικών συστατικών, όπως για παράδειγμα εξαιτίας της χαμηλής διαλυτότητας σε λάδι ή/και σε νερό. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης είναι φραγμοί όπως φυσικές, χημικές ή ενζυμικές αντιδράσεις που είναι ικανές να υποβαθμίσουν τα τρόφιμα κατά τη

διάρκεια της επεξεργασίας, αποθήκευσης, μεταφοράς ή προετοιμασίας τους και κρίνεται αναγκαίο να προστατευθούν από αυτά. Μάλιστα, οι χημικές αντιδράσεις μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στην μοριακή δομή των θρεπτικών συστατικών, οι οποίες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε αισθητές αλλαγές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες αλλά και στα θρεπτικά τους χαρακτηριστικά. Παραδείγματα χημικής υποβάθμισης αυτού του είδους είναι η οξείδωση, η υδρόλυση και η ισομερίωση, αντιδράσεις που μπορούν να καταλυθούν από ένζυμα που υπάρχουν στα τρόφιμα (Βεντούρη, 2018).

Δεδομένου των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι επιστήμονες κατά την προσπάθεια ενίσχυσης της θρεπτικής αξίας των τροφίμων, η νανοτεχνολογία είναι ικανή να προσφέρει λύσεις ενισχύοντας τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων και τη βιοδιαθεσιμότητά τους, να επιμηκύνει την διατήρησή τους κατά τις διάφορες μεθόδους αποθήκευσης, αλλά και να προσδώσει καλύτερη διάθεση και διασπορά των θρεπτικών συστατικών. Για να επιτευχθούν βέβαια τα προαναφερθέντα, τα διάφορα είδη νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται αναλόγως την προοριζόμενη εφαρμογή, επεξεργάζονται με συγκεκριμένες τεχνικές, εκ των οποίων οι δύο επικρατέστερες είναι η νανοενθυλάκωση (nanoencapsulation) και η νανοδόμηση (nanostructuring).

2.3.A Νανοενθυλάκωση

Η νανοενθυλάκωση είναι μια τεχνική η οποία αφορά την ενσωμάτωση ενός δραστικού συστατικού μέσα σε μια συγκεκριμένη νανοδομή, παρέχοντας ενισχυμένη λειτουργικότητα στο τελικό προϊόν. Η τεχνική της νανοενθυλάκωσης εφαρμόζεται στην τεχνολογία τροφίμων προκειμένου να καλύψει ανεπιθύμητες οσμές και γεύσεις, να ελέγξει τις αλληλεπιδράσεις των ενεργών συστατικών στο τρόφιμο και την αποδέσμευση των ενεργών παραγόντων στον οργανισμό. Επιπρόσθετα, εξασφαλίζει ελεγχόμενη απελευθέρωση των βιοδραστικών ουσιών από τον πυρήνα και κατ' επέκταση της διαθεσιμότητας του συστατικού σε συγκεκριμένο χρόνο και με καθορισμένο ρυθμό, προστατεύοντας τα από συνθήκες υγρασίας, θερμότητας, χημικής και βιολογικής υποβάθμισης κατά την επεξεργασία, χρήση και αποθήκευσή τους. Παράλληλα, η διεργασία αυτή, μέσω της οποίας τα νανοσυστήματα που παράγονται ανήκουν στην κατηγορία των συστημάτων μεταφοράς, επιτρέπει στις βιοδραστικές ουσίες να διασπείρονται σε περιβάλλοντα αντίθετης πολικότητας (Sekhon, 2010).

Βιοενεργά συστατικά, όπως το συνένζυμο Q₁₀, οι βιταμίνες, ο σίδηρος, το ασβέστιο, η κουρκουμίνη κλπ., έχουν δοκιμαστεί ευρέως σε νανοσυστήματα μεταφοράς (He & Hwang, 2016). Νανοσυστήματα κολλοειδούς συσχέτισης, νανοκάψουλες (nanocapsules) με βάση τα λιπίδια, νανογαλακτώματα και βιοπολυμερικά νανοσωματίδια έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να αυξήσουν τη βιοδιαθεσιμότητα των ενθυλακωμένων βιοδραστικών μορίων μετά από χορήγηση δια στόματος, επιτρέποντας ταυτοχρόνως τον έλεγχο της απελευθέρωσης των γεύσεων στον επιθυμητό χρόνο και παρέχοντας προστασία της υποβάθμισης αυτών των γεύσεων κατά την επεξεργασία και την αποθήκευση (Yu et al., 2010).

Πίνακας 2.2: Διαφορετικές νανοτεχνικές και νανοσυστήματα για την ενθυλάκωση βιοενεργών συστατικών (Singh et al., 2010).

Νανοτεχνική	Χαρακτηριστικό	Παράδειγμα
Βρώσιμες επικαλύψεις	Διατήρηση της ποιότητας των φρέσκων τροφίμων κατά τη διάρκεια της παρατεταμένης Αποθήκευση	- Βρώσιμα επιχρίσματα με βάση τη ζελατίνη που περιέχουν νανοκρυστάλλους κυτταρίνης - Επιστρώσεις χιτοζάνης/νανοπυριτίου - Φιλμ χιτοζάνης με νανο-SiO₂ - Επικαλύψεις αλγινικού/νανολαμινικού άλατος λυσοζύμης
Υδρογέλες	Τοποθετούνται εύκολα σε κάψουλες, προστατεύουν τα ενεργά συστατικά από ακραία περιβάλλοντα και τα παραδίδουν ως αποτέλεσμα απόκρισης σε περιβαλλοντικά ερεθίσματα όπως το pH και η θερμοκρασία	Υδρογέλες κατασκευασμένες από πρωτεΐνες
Πολυμερικά Μικύλλια	Διαλυτοποίηση αδιάλυτων στο νερό ενώσεων στο υδρόφοβο εσωτερικό, υψηλή διαλυτότητα, χαμηλή τοξικότητα	- PEO-b-PCL πολυμερικά μικύλλια κατά συστάδες πολυ(αιθυλενογλυκόλης)-b- πολυ(καπρολακτόνης) - Πολυμερικά μικκύλλια παλμιτικής μεθοξυ πολυ(αιθυλενογλυκόλης).

Νανογαλακτώματα	Μεγαλύτερη σταθερότητα στη συσσώρευση σταγονιδίων και στον βαρυτικό διαχωρισμό, υψηλή οπτική διαύγεια και αυξημένη από του στόματος βιοδιαθεσιμότητα	Νανογαλάκτωμα με βάση το β-καροτένιο
Λιποσώματα	Παράδοση υδρόφοβων μορίων (μέσω της διπλής στιβάδας) ή υδρόφιλων μορίων (που περιέχονται στο υδατικό εσωτερικό)	Λιποσώματα με ενσωματωμένα κατιονικά λιπίδια τροποποιημένα με ένα ασταθές σε οξύ πολυμερές, υπερ-διακλαδισμένη πολυ(γλυκιδόλη) (HPG)
Ανόργανα νανοσωματίδια	Καλή ικανότητα ενθυλάκωσης κι ελεγχόμενη λειτουργικότητα λόγω των άκαμπτων επιφανειών	Μεσοπορώδη νανοσωματίδια πυριτίου

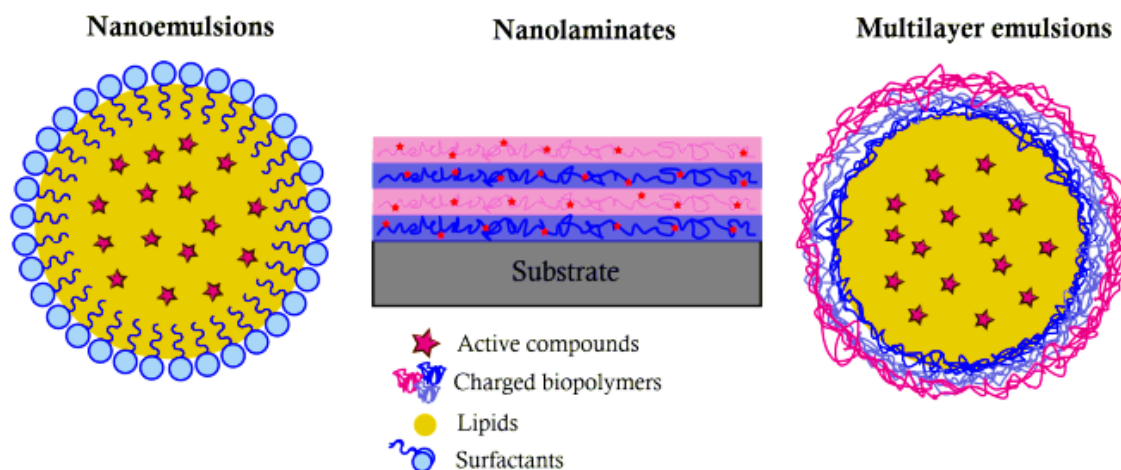
2.3.B Νανοδόμηση

Η νανοδόμηση αντιπροσωπεύει την διεργασία της εισαγωγής κατάλληλων νανοϋλικών στα συστατικά ενός τροφίμου. Η νανοδόμηση των φυσικών συστατικών των τροφίμων μπορεί λόγω χάρη να επιτρέψει τη μείωση των λιπαρών σε ένα τρόφιμο χωρίς να επηρεάσει ωστόσο τις οργανοληπτικές του ιδιότητες. Σύμφωνα με έρευνες η νανοδόμηση μπορεί δυνητικά να επιτρέψει την παραγωγή τροφίμων με ικανοποιητική γεύση και υφή που όμως περιέχουν σημαντικά λιγότερα λιπαρά (Chaudhry et al., 2017)

2.3.Γ Νανοπολυστρωματοποίηση (Nanolamination)

Εκτός από την νανοενθυλάκωση και τη νανοδόμηση, μια άλλη τεχνική νανοκλίμακας η οποία χρησιμοποιείται εμπορικά στη βιομηχανία προϊόντων διατροφής είναι η νανοπολυστρωματοποίηση. Οι νανοπολυστρώσεις (nanolaminates) που παρασκευάζονται μέσω της τεχνικής αυτής αποτελούνται από δύο ή περισσότερες στρώσεις υλικού σε νανοδιαστάσεις δημιουργώντας ένα εξαιρετικά λεπτό φιλμ τροφίμων (food-grade film) πάχους 1–100 nm ανά στρώση. Η συναρμολόγηση στρώση προς στρώση (layer-by-layer) μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω πολλών χημικών αλληλεπιδράσεων, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτροστατικών δεσμών, δεσμών υδρογόνου, υδρόφοβων αλληλεπιδράσεων, αλληλεπιδράσεων μεταφοράς φορτίου, ομοιοπολικού δεσμού. Μέχρι

στιγμής, οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις είναι ο μόνος μηχανισμός που έχει διερευνηθεί για την παρασκευή νανοπολυστρώσεων στον τομέα των τροφίμων. Η διαδικασία ξεκινά με την προσρόφηση ενός φορτισμένου είδους (π.χ. πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες ή νανοσωματίδια) σε ένα υπόστρωμα που έχει επίσης ηλεκτρικό φορτίο. Το πρώτο στάδιο προσρόφησης οδηγεί σε αντιστροφή φορτίου στην επιφάνεια επιτρέποντας έτσι την προσρόφηση ενός άλλου αντίθετα φορτισμένου είδους. Μετά από κάθε συναρμολόγηση στρώσης, απαιτείται ένα βήμα πλύσης για την απομάκρυνση της περίσσειας του μη δεσμευμένου υλικού, ρυθμίζοντας έτσι το πάχος της στρώσης. Η διαδοχική προσρόφηση δομικών στοιχείων αντίθετου φορτίου συνήθως επαναλαμβάνεται για να ληφθούν οι πολυστρωματικές δομές.



Εικόνα 2.4: Νανοδομημένα συστήματα τροφίμων για την ενθυλάκωση ενεργών συστατικών με πιθανές εφαρμογές σε ποτά ή βρώσιμα επιστρώματα (Acevedo-Fani et al., 2017)

Οι νανοπολυστρώσεις έχουν μια σειρά από σημαντικές εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων λόγω της συμβολής τους στην παρασκευή βρώσιμων μεμβρανών. Τέτοιες εδώδιμες μεμβράνες υπάρχουν σε ένα ευρύ φάσμα τροφίμων όπως η σοκολάτα, οι καραμέλες, τα φρούτα, τα λαχανικά, τα κρέατα, τα αρτοσκευάσματα, οι τηγανητές πατάτες κλπ. (Pavlath & Orts, 2009). Αυτές οι μεμβράνες παρέχουν προστασία στα τρόφιμα από τα αέρια, την υγρασία και τα λιπίδια. Επιπλέον είναι ικανά να βελτιώσουν την υφή των τροφίμων και να χρησιμεύσουν ως φορείς χρωμάτων, γεύσεων, θρεπτικών συστατικών, αντιοξειδωτικών και αντιμικροβιακών παραγόντων καθώς και ως δεξαμενές δραστικών ενώσεων με υδροφιλικό και λιόφιλο χαρακτήρα.

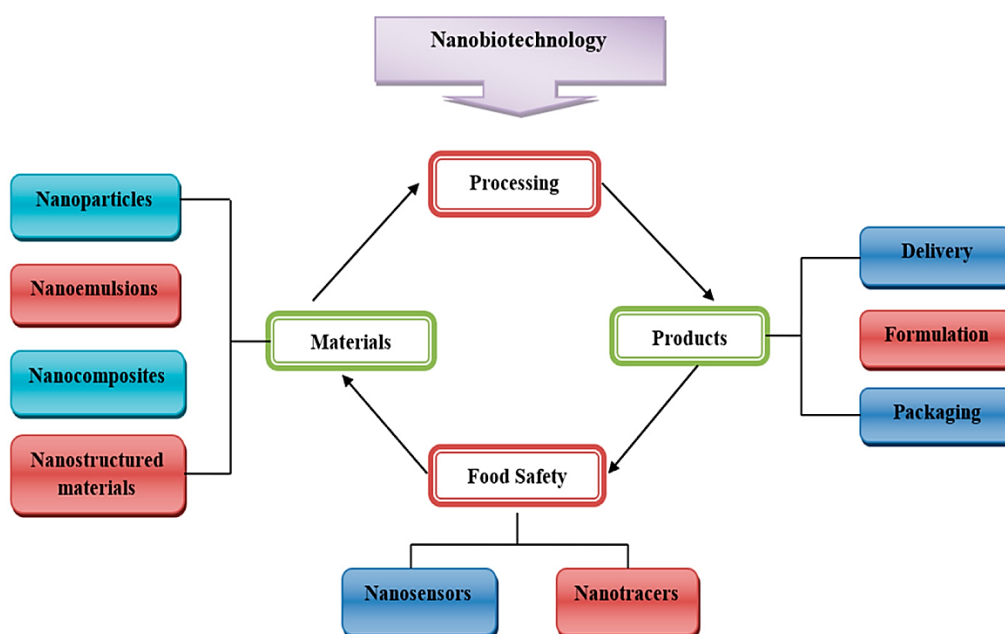
Επί του παρόντος, αυτές οι εδώδιμες νανοπολυστρώσεις παρασκευάζονται από πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες και λιπίδια. Οι μεμβράνες με βάση τους πολυσακχαρίτες και τις πρωτεΐνες προσφέρουν ικανοποιητική προστασία από το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά δυστυχώς δεν προστατεύουν από την υγρασία. Ενώ οι νανοπολυστρώσεις με βάση τα λιπίδια παρέχουν αρκετά καλή προστασία των τροφίμων από την υγρασία, έχουν περιορισμένη αντίσταση στα αέρια και παρουσιάζουν κακή μηχανική αντοχή. Ως εκ τούτου, ούτε οι πολυσακχαρίτες και οι πρωτεΐνες αλλά ούτε τα λιπίδια παρέχουν όλες τις ιδιότητες μιας ικανοποιητικής εδώδιμης επικάλυψης κι έτσι αναζητούνται καινούρια πρόσθετα που μπορούν να βελτιώσουν αυτές τις ιδιότητες, π.χ. πολυόλες. Τα τρόφιμα μπορούν να επικαλυφθούν με νανοπολυστρώσεις είτε βουτώντας τα σε μια σειρά διαλυμάτων που περιέχουν τα συστήματα αυτά είτε ψεκάζοντας την επιφάνεια του τροφίμου με σπρέι που τα περιέχει (Shit & Shah, 2014). Ο βαθμός προσρόφησης οποιασδήποτε ουσίας εξαρτάται από τη φύση της επιφάνειας του τροφίμου καθώς και από τη φύση της ίδιας της ουσίας. Διάφορες προσροφητικές ουσίες μπορούν να σχηματίσουν διαφορετικά στρώματα μιας νανοπολύστρωσης, μεταξύ των οποίων οι πολυηλεκτρολύτες (πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες), τα φορτισμένα λιπίδια και τα κολλοειδή σωματίδια. Τέλος, διαφορετικές νανοπολυστρώσεις περιλαμβάνουν ποικίλους λειτουργικούς παράγοντες όπως γεύσεις, χρώματα, αντιμικροβιακά, αντιοξειδωτικά, ένζυμα κλπ (Ameta, 2020).

Κεφάλαιο 3^ο: Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας στη Βιομηχανία Τροφίμων

Οι αυξανόμενες ανησυχίες των καταναλωτών αναφορικά με την ποιότητα των τροφίμων και τα οφέλη για την υγεία τους ωθούν τους ερευνητές να βρουν εναλλακτικούς τρόπους που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων επιδρώντας παράλληλα στη διατροφική τους αξία. Τα τρόφιμα υφίστανται ποικίλες τροποποιήσεις μετά τη συγκομιδή και την επεξεργασία που είναι πιθανό να επηρεάσουν τα βιολογικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά τους. Η νανοτεχνολογία έχει συνδράμει αποτελεσματικά σε όλα αυτά τα στάδια τροποποιήσεων των τροφίμων προσφέροντας καινοτόμες λύσεις, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας των τροφίμων και του ποιοτικού ελέγχου καθώς και της παραγωγής νέων προσθέτων/συμπληρωμάτων τροφίμων και άλλων πιο υγιεινών προϊόντων. Στη βιομηχανία προϊόντων διατροφής η νανοτεχνολογία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή συσκευασιών με βελτιωμένες θερμικές ή/και μηχανικές ιδιότητες. Μάλιστα, η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στη γεωργία και στις βιομηχανίες τροφίμων παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2003 σε σχέδιο δράσης από το Τμήμα Γεωργίας του Υπουργείου Ηνωμένων Πολιτειών (USDA). Έχει προβλεφθεί ότι η νανοτεχνολογία θα μεταμορφώσει πλήρως την βιομηχανία τροφίμων, αλλάζοντας τον τρόπο παραγωγής, επεξεργασίας, συσκευασίας, μεταφοράς και κατανάλωσής τους. Μία σχετικά πρόσφατη έκθεση είχε επισημάνει ότι τα τρόφιμα που συνδέονται με τη νανοτεχνολογία θα αντιπροσωπεύουν περίπου το 50% των συνολικών προϊόντων διατροφής το 2020 (Jiménez et al., 2016).

Αναμφίβολα, η νανοτεχνολογία έχει φέρει επανάσταση στη βιομηχανία τροφίμων. Οι περισσότερες από τις αναφερόμενες εφαρμογές των νανοδομών περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων, τον βιοενεργό εμπλουτισμό, την ελεγχόμενη απελευθέρωση βιοδραστικών ενώσεων με χρήση ενθυλάκωσης σε νανοφορέα, την τροποποίηση των δομών και υφών των τροφίμων και την ανίχνευση και εξουδετέρωση βιοχημικών, μικροβιολογικών και χημικών αλλοιώσεων με τη χρήση ευφυών συστημάτων συσκευασίας. (Εικόνα 3.1). Γενικότερα οι εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στον τομέα των τροφίμων μπορούν να συνοψιστούν σε δύο κύριες ομάδες στις οποίες περιλαμβάνονται τα νανοδομημένα συστατικά τροφίμων και η ανίχνευση ουσιών μέσω νανοαισθητήρων. Τα νανοδομημένα συστατικά τροφίμων καλύπτουν μια ευρεία περιοχή από την επεξεργασία τροφίμων έως τη συσκευασία τους. Στην επεξεργασία τροφίμων, αυτές οι νανοδομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα, φορείς για έξυπνη παροχή θρεπτικών ουσιών,

αντιμικροβιακά μέσα, πληρωτικά μέσα για τη βελτίωση της μηχανικής αντοχής και ανθεκτικότητας του υλικού συσκευασίας κλπ, ενώ οι νανοαισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη καλύτερης αξιολόγησης της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Ezhilarasi et al., 2013). Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των εφαρμογών της νανοτεχνολογίας στην βιομηχανία τροφίμων, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι με γνώμονα την τροποποίηση, αν πραγματοποιείται δηλαδή εσωτερικά, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του τροφίμου, ή αν πραγματοποιείται εξωτερικά, δηλαδή στην συσκευασία.



Εικόνα 3.1: Ο ρόλος της νανοτεχνολογίας σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας τροφίμων (Shafiq et al., 2020).

3.1 Επεξεργασία Τροφίμων

Η επεξεργασία τροφίμων (food processing) ασχολείται με τη μετατροπή γεωργικών/ζωικών προϊόντων σε τρόφιμα καθώς και με κάθε μορφή επεξεργασίας τροφίμων, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται λόγω χάρη το άλεσμα των δημητριακών, η παρασκευή ωμού αλεύρου για το μαγείρεμα στο σπίτι καθώς και πιο πολύπλοκες βιομηχανικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τροφίμων ευκολίας. Η διαδικασία της επεξεργασίας των τροφίμων προσφέρει δυνατότητες βελτίωσης όσον αφορά τις πτυχές της έξυπνης παροχής θρεπτικών ουσιών μέσω της νανοενθυλάκωσης, του βιοδιαχωρισμού των πρωτεϊνών και της ταχείας δειγματοληψίας βιολογικών και χημικών

ρύπων. Μάλιστα σε όλους αυτούς τους εναλλακτικούς τρόπους παρέμβασης κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τροφίμων, η νανοτεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί παρέχοντας εξαιρετικά αποτελέσματα. Η νανοτεχνολογία μπορεί επιπρόσθετα να συμβάλει στην ανάπτυξη λειτουργικών τροφίμων (functional foods), τα οποία ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του ανθρώπινου σώματος και μπορούν να προσφέρουν τα θρεπτικά συστατικά με πιο αποτελεσματικούς τρόπους. Με άλλα λόγια, η σημασία της νανοτεχνολογίας στην επεξεργασία τροφίμων μπορεί να αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη τον ρόλο της στη βελτίωση των προϊόντων διατροφής όσον αφορά την υφή των τροφίμων, την εμφάνισή τους, τη γεύση, τη θρεπτική αξία και τη διάρκεια ζωής τους.

3.1.A Θρεπτική Αξία

Το μεγαλύτερο ποσοστό των βιοδραστικών ενώσεων, στα οποία συνυπολογίζονται τα λιπίδια, οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και οι βιταμίνες χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία σε όξινα περιβάλλοντα και στην ενζυμική δραστηριότητα του στομάχου και του δωδεκαδακτύλου. Ως εκ τούτου, η ενθυλάκωση αυτών των βιοδραστικών ενώσεων όχι μόνο τους επιτρέπει να αντιστέκονται σε τέτοιες δυσμενείς συνθήκες, αλλά τους δίνει τη δυνατότητα να απελευθερωθούν στο σωστό σημείο δράσης, χωρίς να χάσουν τη σταθερότητα και τις θρεπτικές τους αξίες. Με άλλα λόγια, η διαδικασία της ενθυλάκωσής τους ενισχύει την αφομοίωσή τους, κάτι που είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί όταν αυτές οι βιοδραστικές ενώσεις βρίσκονται σε μη ενθυλακωμένη μορφή, εξαιτίας της χαμηλής υδατοδιαλυτότητας που τις χαρακτηρίζει. Μεταξύ των βρώσιμων καψουλών, τα πολυμερή νανοσωματίδια είναι κατάλληλοι υποψήφιοι ναοφορείς για την ενθυλάκωση βιοδραστικών ενώσεων (π.χ. φλαβονοειδή και βιταμίνες) με απώτερο στόχο την προστασία και τη μεταφορά τους στα επιθυμητά σημεία απελευθέρωσης (Yan & Gilbert, 2004).

Διάφορες ερευνητικές ομάδες αναπτύσσουν νέες τροφές οι οποίες θα παραμείνουν αδρανείς στο σώμα και θα παρέχουν θρεπτικά συστατικά στα κύτταρα όταν αυτά απαιτούνται. Η ιδέα αυτή στηρίζεται στην δημιουργία ναοκαψουλών στις οποίες εσωκλείονται ενισχυτικά γεύσης ή και πρόσθετα θρεπτικά στοιχεία (όπως βιταμίνες) τα οποία θα παραμείνουν αδρανή στα τρόφιμα επιτρέποντας την απελευθέρωση των ενθυλακωμένων συστατικών μόνο όταν ενεργοποιηθούν κατά τη διαδικασία της κατανάλωσής τους (Amin et al., 2015). Τα προβιοτικά, τα οποία είναι γνωστό ότι συναντώνται στο γάλα που έχει υποστεί ζύμωση, τα γιαούρτια, τα τυριά, οι πουτίγκες, τα

ποτά με βάση τα φρούτα κ.α., μπορούν μέσω της νανοενθυλάκωσης να δημιουργήσουν συστήματα των οποίων ο στόχος θα είναι να χορηγηθούν σε ορισμένα μέρη του γαστρεντερικού σωλήνα όπου αλληλεπιδρούν με συγκεκριμένους υποδοχείς. Αυτά τα επώνυμα προβιοτικά παρασκευάσματα με νανοκάψουλες μπορούν να λειτουργήσουν ως «*de novo*» εμβόλια, με την ικανότητα να ρυθμίζουν τις ανοσολογικές αποκρίσεις (Momin et al., 2013). Ένα άλλο παράδειγμα που όχι μόνο αναφέρεται στην βιβλιογραφία αλλά βρίσκεται στην αγορά περιλαμβάνει την προσθήκη νανοσωματιδίων σε υπάρχοντα τρόφιμα με απώτερο στόχο την αυξημένη απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών όταν αυτά καταναλωθούν. Ένα αρτοποιείο στη Δυτική Αυστραλία κατάφερε με επιτυχία να ενσωματώσει ιχθυέλαιο τόνου, το οποίο αποτελεί σημαντική πηγή ωμέγα-3 λιπαρών οξέων, σε νανοκάψουλες οι οποίες μετέπειτα ενσωματώθηκαν στο ψωμί. Οι νανοκάψουλες είναι σχεδιασμένες να ανοίγουν μόνο όταν φτάσουν στο στομάχι, αποφεύγοντας έτσι τη δυσάρεστη γεύση του ιχθυελαίου και ταυτοχρόνως ενισχύοντας τις θρεπτικές αξίες που λαμβάνει ο καταναλωτής κατά την κατανάλωση του ψωμιού. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως το προϊόν αυτό, το οποίο πωλείται με το όνομα Tip-Top Up Bread (Tip Top The One Bread Omega 3) έχει καταγράψει μεγάλο αριθμό πωλήσεων, γεγονός που προσδίδει θετική χροιά στην προτίμηση των καταναλωτών σε προϊόντα επεξεργασμένα με τη χρήση της νανοτεχνολογίας (Bund, 2008). Το «Nanogreen» τσάι, τα συμπληρώματα διατροφής σε μορφή καψουλών «Neosino», το λάδι «Canola Active» καθώς και οι νανοταξινομημένες συγκεντρωμένες υγρές δομές (NSSL) της επιχείρησης «Nutralease», οι οποίες μεταφέρουν τις θρεπτικές ουσίες μέσα στα μόρια των κυττάρων, είναι κάποια από τα εμπορεύσιμα προϊόντα που βασίζονται στην νανοτεχνολογία. Επίσης, οι εμπλουτισμένοι χυμοί φρούτων, τα θρεπτικά ποτά βρώμης και τα slim shakes είναι κάποια από τα εμπορικά διαθέσιμα επεξεργασμένα τρόφιμα τα οποία συναντώνται στις αγορές των ΗΠΑ, της Αυστραλίας, της Κίνας και της Ιαπωνίας και κάνουν χρήση της νανοτεχνολογίας (Nile et al., 2020).

3.1.B Υφή, Γεύση και Εμφάνιση Τροφίμων

Όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές προηγουμένως η νανοτεχνολογία προσφέρει μια σειρά από επιλογές που αποσκοπούν στην βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων και την ενίσχυση της γεύσης τους μέσω τεχνικών όπως η νανοενθυλάκωση. Οι Zhang et al., σχεδίασαν και κατασκεύασαν πολυλειτουργικούς νανοφορείς για προστασία και διανομή βιοενεργών μορίων. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποίησαν την μέθοδο της νανοενθυλάκωσης προκειμένου να εσωκλείσουν τις εξαιρετικά ασταθείς φυτικές χρωστικές ανθοκυανίνες που

έχουν διάφορες βιολογικές δραστηριότητες με σκοπό την σταθεροποίησή τους. Κατάφεραν να βελτιώσουν τη θερμική σταθερότητα και τη φωτοσταθερότητα μορίων κυανιδίνης-3-O-γλυκοζίτη (C3G) μέσω της ενθυλάκωσης των μορίων εντός της εσωτερικής κοιλότητας της υπομονάδας H-2 της φερριτίνης (rH-2) σπόρων ανασυνδυασμένης σόγιας (Zhang et al., 2014). Παρόμοια είναι και η περίπτωση της ρουτίνης, η οποία είναι ένα γνωστό διατροφικό μόριο που ανήκει στην κατηγορία των φλαβονοειδών και χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες φαρμακολογικές δραστηριότητες. Ωστόσο, εξαιτίας της κακής διαλυτότητάς της η εφαρμογή της στη βιομηχανία τροφίμων είναι περιορισμένη. Η ενθυλάκωση της ρουτίνης σε «νανοκιβώτια» (nanocages) φερριτίνης ενίσχυσε τη διαλυτότητα, τη θερμική απορρόφηση και τη σταθερότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία της παγιδευμένης ρουτίνης σε σύγκριση με την ελεύθερη ρουτίνη (Yang et al., 2015). Τέλος, αρκετά μεταλλικά οξείδια όπως το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) έχουν χρησιμοποιηθεί ως παράγοντες χρώματος σε διάφορα είδη διατροφής. Μεταξύ αυτών, τα νανοϋλικά με βάση το διοξείδιο του πυριτίου είναι πιο γνωστά για τη χρήση τους ως φορείς αρωμάτων ή γεύσης σε προϊόντα διατροφής.

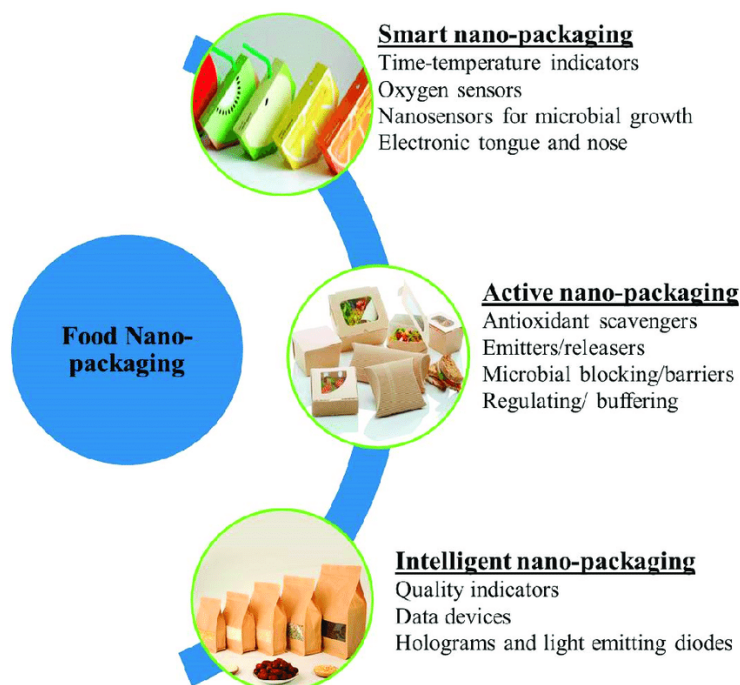
3.1.Γ Διάρκεια Ζωής Τροφίμων

Στον κλάδο της επεξεργασίας τροφίμων η νανοτεχνολογία προσφέρει καινοτόμες λύσεις ως προς την αύξηση της διάρκειας ζωής των ίδιων των προϊόντων ή ακόμα και στην παραγωγή υγιεινότερων τροφίμων που περιέχουν χαμηλά λιπαρά, ζάχαρη και αλάτι για την αποφυγή τροφιογενών ασθενειών. Για να αυξηθεί η διάρκεια της ζωής τους αρκετές φορές τα τρόφιμα επικαλύπτονται με νανοσωματίδια των οποίων ο στόχος είναι να διατηρήσουν την σταθερότητά τους και να αποτρέψουν την επιμόλυνσή τους από παθογόνους οργανισμούς. Επιπλέον, οι βρώσιμες νανοεπικαλύψεις σε διάφορα υλικά τροφίμων θα μπορούσαν να αποτελέσουν εμπόδιο στην ανταλλαγή υγρασίας και αερίων και να προσφέρουν χρώματα, γεύσεις, αντιοξειδωτικά, ένζυμα και παράγοντες κατά του μαυρίσματος και θα μπορούσαν επίσης να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής των βιομηχανοποιημένων τροφίμων, ακόμη και μετά το άνοιγμα της συσκευασίας (Singh, T., (2017). Παράλληλα, με τις διαδικασίες της νανοενθυλάκωσης λειτουργικών συστατικών είναι δυνατόν να επιτευχθεί επιβράδυνση των διεργασιών χημικής αποδόμησης, διαμορφώνοντας τις ιδιότητες του διεπιφανειακού στρώματος που τα περιβάλλει. Για παράδειγμα, η κουρκουμίνη, η οποία αποτελεί το πιο ενεργό και λιγότερο σταθερό βιοδραστικό συστατικό του κουρκουμά, χορηγείται ως συμπλήρωμα διατροφής μέσω

λιποσωμάτων με βελτιωμένη θεραπευτική αποτελεσματικότητα κι ενισχυμένη θρεπτική αξία (<https://www.doctorsformulas.com/product/curcumin-200mg.htm>, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024), ενώ αυξημένη διάρκεια ζωής της τομάτας έχει επιτευχθεί μέσω χορήγησης ε αυτή βιοκανοκαψυλιωμένης κερσετίνης (Yadav, 2017). Παρόμοιες διαδικασίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε άλλα τρόφιμα όπως τα λαχανικά και τα φρούτα προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια της ζωής τους.

3.2 Συσκευασία Τροφίμων

Η συσκευασία διαδραματίζει καίριο ρόλο στη βιομηχανία τροφίμων, με νέες τεχνικές και πλέον εξελιγμένα υλικά. Είναι η πιο σημαντική διαδικασία για τη συντήρηση των τροφίμων μεταξύ του σταδίου της παραγωγής και της κατανάλωσης. Οι εφαρμογές νανοτεχνολογίας στον τομέα της συσκευασίας προϊόντων διατροφής προσφέρουν καινοτόμες ιδέες οι οποίες στοχεύουν στην βέλτιστη αποτελεσματικότητα των συσκευασιών και χρησιμοποιούνται πλέον στις συσκευασίες τροφίμων τόσο τα νανοσωματίδια όσο και νανοπληρωτικά (nanofillers).



Εικόνα 3.2: Κατηγορίες συσκευασίας τροφίμων με βάση τη νανοτεχνολογία (Arroyo et. al., 2019).

Τα νανοσωματίδια, όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές, χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία ως φορείς για την εισαγωγή ενζύμων, αντιοξειδωτικών, παραγόντων κατά της ενζυμικής αμαύρωσης (anti-browning agents), γεύσεων και άλλων βιοενεργών υλικών για τη βελτίωση της διάρκειας ζωής ακόμη και μετά το άνοιγμα μιας συσκευασίας. Μεταξύ των πολλών κατηγοριών που υπάρχουν, κάποια είδη μετάλλων και οξειδίων μετάλλων (υπό την μορφή νανοσωματιδίων), συγκεκριμένα ο σίδηρος, ο άργυρος, τα οξείδια ψευδαργύρου, ο άνθρακας, τα οξείδια του μαγνησίου, τα οξείδια του τιτανίου και το διοξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται ευρέως ως αντιμικροβιακά και σε ορισμένες συνθήκες ως συστατικά τροφίμων (He et al., 2019). Για παράδειγμα, τα οξείδια του ψευδαργύρου ενσωματώνονται στην ενεργό συσκευασία υλικών τροφίμων καθώς τις ενισχύουν με αντιοξειδωτικές ιδιότητες, οι οποίες είναι σημαντικές προκειμένου να αποτραπεί η αντίδραση της οξείδωσης που συμβαίνει στα τρόφιμα και η οποία έχει ως απόρροια την περιορισμένη διατήρησή τους (Clemente et al., 2015), ενώ νανοσωματίδια με αιθέριο έλαιο σκόρδου επικαλυμμένα με PEG (πολύ-αιθυλενογλυκόλη) μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον περιορισμό των παρασίτων των προϊόντων αποθήκευσης (Yang et al., 2009). Με την χρήση τέτοιων νανοςύνθετων υλικών είναι εφικτό να επιτευχθεί βελτιωμένη αντοχή στη θερμότητα, χαμηλό βάρος και αυξημένη μηχανική αντοχή, καθώς και αυξημένες ικανότητες φραγής έναντι του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα, της υγρασίας, της υπερϊώδους ακτινοβολίας και των πτητικών ουσιών.

Μια άλλη κατηγορία νανοσωματιδίων που είναι αρκετά διαδεδομένη στην συσκευασία τροφίμων είναι οι πολυμερικές μήτρες, αποτελούμενες από θερμοπλαστικά πολυμερή και νανοσωματίδια άνθρακα, αργίλου, ρητίνης κ.α. Η συμπερίληψη ενεργών νανοσωματιδίων στις πολυμερικές μήτρες αυξάνει την απόδοση του υλικού συσκευασίας παρέχοντας λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως αντιοξειδωτικές και αντιμικροβιακές ικανότητες και δημιουργώντας φραγμούς στα αέρια, τις πτητικές ουσίες και την υγρασία ενισχύοντας κι παρατείνοντας έτσι την διάρκεια ζωής των συσκευασμένων προϊόντων (Sorrentino et al., 2007). Υπάρχουν πάρα πολλά παραδείγματα σχετικών μελετών τα τελευταία 20 και πλέον χρόνια, όπως η μελέτη των Lagaron et al οι οποίοι έδειξαν πως με την ενσωμάτωση νανοσωματιδίων αργίλου στο συμπολυμερές αιθυλενίου-βινυλικής αλκοόλης και βιοπολυμερούς πολυγαλακτικού οξέος (PLA) βελτιώνεται το φράγμα του οξυγόνου και αυξάνεται η διάρκεια ζωής των τροφίμων (Lagaron et al., 2005). Σε συνέχεια της μελέτης αυτής, μία άλλη έρευνα απέδειξε ότι το βιονανοςύνθετο PLA, το οποίο παρήχθη από την ενσωμάτωση νανοπληρωτικών στο βιοαποικοδομήσιμο πολυμερές PLA,

επέδειξε πιο γρήγορη βιοαποικοδόμηση από το αντίστοιχο PLA χωρίς νανοπληρωτικά (Ray et al., 2006).

3.2.A. Ενεργά Συστήματα Συσκευασίας Τροφίμων

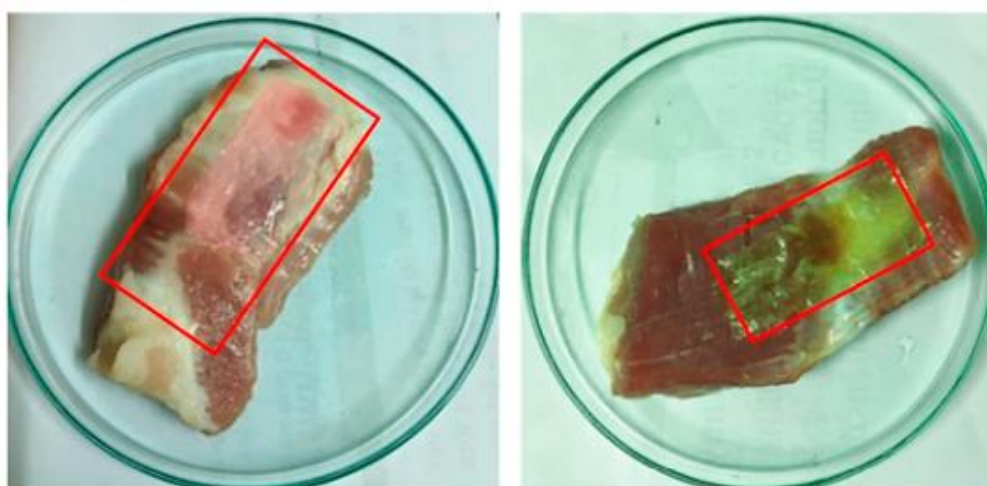
Τα ενεργά συστήματα συσκευασίας τροφίμων (active food packaging systems) γενικά έχουν ως στόχο την ενίσχυση της διάρκειας ζωής και της διατήρησης των συσκευασμένων προϊόντων και αναπτύσσονται με γνώμονα τον σκοπό της αποθήκευσης. Παράγοντες όπως η οξείδωση των λιπιδίων, η αφυδάτωση, ο αποχρωματισμός και η απώλεια αρώματος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε πολλές περιπτώσεις προϊόντων διατροφής, μεταξύ άλλων και των περιπτώσεων επεξεργασμένου κρέατος.

Τα ενεργά συστήματα συσκευασίας τροφίμων περιλαμβάνουν νανοσωματίδια με αντιμικροβιακές δραστηριότητες και ικανότητες δέσμευσης οξυγόνου, συσκευασίες τροφίμων που ενσωματώνουν νανοαισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύουν μικροβιακές και βιοχημικές αλλοιώσεις, συσκευασίες τροφίμων που μπορούν να απελευθερώνουν αντιμικροβιακές ή/και αντιοξειδωτικές ουσίες, ένζυμα, αρωματικές ουσίες και θρεπτικές ουσίες για παράταση της διάρκειας ζωής των συσκευασμένων τροφίμων (Jafarizadeh-Malmiri et al., 2019). Μεταξύ των ενεργών συστημάτων, τα συστήματα συσκευασίας «overwrap» εφαρμόζονται σε περιπτώσεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης με ψύξη, ενώ τα συστήματα συσκευασίας τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP/modified atmosphere packaging), οι συσκευασίες κενού και τα συστήματα MAP που χρησιμοποιούν 100% CO₂ χρησιμοποιούνται για μακροχρόνια αποθήκευση με απλή ψύξη.

3.2.B Έξυπνα Συστήματα Συσκευασίας

Τα έξυπνα συστήματα συσκευασίας (smart/intelligent packaging systems) είναι ικανά να ανταποκρίνονται στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα ειδοποιώντας πολλές φορές τον καταναλωτή σχετικά με τη μόλυνση ή την παρουσία παθογόνων παραγόντων στο προς κατανάλωση προϊόν. Στην ανάπτυξη των νανοαισθητήρων για την ανίχνευση των ρύπων, των γεύσεων ή των χρωμάτων και την ανάλυσή τους χρησιμοποιούνται τα νανοσωματίδια. Τα έξυπνα συστήματα συσκευασίας με νανοαισθητήρες χρησιμοποιούνται επιπλέον για την παρακολούθηση και την παροχή πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα των συσκευασμένων τροφίμων κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά. Οι νανοαισθητήρες θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στην επόμενη υποενότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα

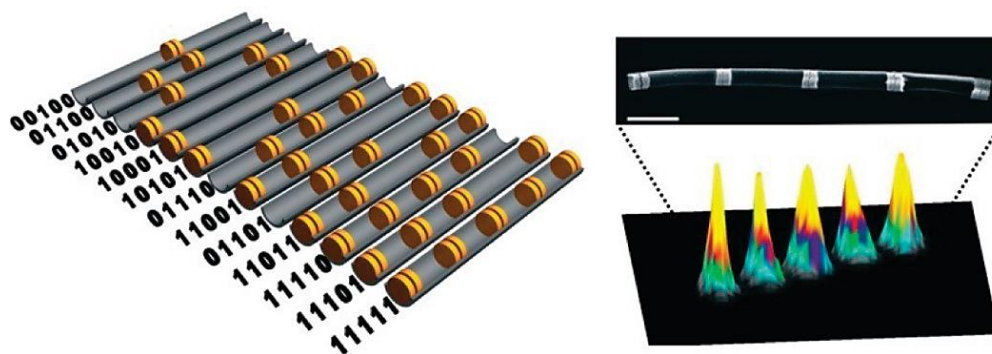
έξυπνης συσκευασίας αποτελεί η μεμβράνη συσκευασίας τροφίμων που αναπτύχθηκε από τους Vo et al και είναι κατασκευασμένη από όσο το δυνατόν περισσότερο ανανεώσιμα και βιοδιασπώμενα συστατικά. Ως εκ τούτου, η χιτοζάνη (CS) επιλέχθηκε να αντικαταστήσει μερικώς την πολυβινυλική αλκοόλη (PVA) στο φιλμ συσκευασίας και η ανθοκυανίνη (ATH) ως χρωστική τροφίμων για την ενεργή παρακολούθηση της αλλαγής στις τιμές του pH του συσκευασμένου τροφίμου. Οι μεμβράνες πολυβινυλικής αλκοόλης / χιτοζάνης / ανθοκυανίνης (PVA/CS/ATH) οι οποίες χυτεύθηκαν επιτυχώς από υδρογέλες με ανάμειξη 1% διαλύματος PVA και 1% διαλύματος CS σε διάφορες αναλογίες όγκου κι εμποτίστηκαν με ATH, παρουσίασαν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες και ταχεία αλλαγή χρώματος στα ρυθμιστικά διαλύματα pH. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του για την μερική περιτύλιξη φέτες χοιρινής κοιλιάς και την επακόλουθη έκθεση στον αέρα του περιβάλλοντος για 12 ώρες και 24 ώρες έδειξαν με επιτυχία μια σειρά από χρωματικές αλλαγές σε σχέση με το χρόνο έκθεσης, που αντιστοιχούν στην παρατήρηση για την αλλοίωση των τροφίμων (Εικόνα 3.3) (Vo et al., 2019).



Εικόνα 3.3: Αλλαγή χρώματος των μεμβρανών PVA/CS/ATH που εσωκλείουν φέτες ωμής κοιλιάς χοιρινού κρέατος και είναι εκτεθειμένες στον αέρα του περιβάλλοντος για 12 ώρες (αριστερά) και 24 ώρες (δεξιά). Μετά από 12 ώρες, η μεμβράνη περιτυλίγματος γίνεται ροζ, υποδεικνύοντας μια όξινη κατάσταση με pH κοντά στο 5–6 στην επιφάνεια των φετών χοιρινού κρέατος. Με περαιτέρω έκθεση για άλλες 12 ώρες, το χοιρινό κρέας έγινε σκούρο καφέ και μαλακότερο, ενώ η ενδεικτική μεμβράνη έγινε κιτρινοπράσινη, υποδεικνύοντας ελαφρά αλκαλικό pH (Vo et al., 2019).

3.3.Γ Σήμανση Συσκευασιών

Στη βιομηχανία των προϊόντων διατροφής καίριο ρόλο διαδραματίζει η ασφάλειά τους. Σύμφωνα με μια πρόσφατη έρευνα, περισσότερο από το 45% των επεξεργασμένων και συσκευασμένων τροφίμων είναι επιρρεπή σε υποβάθμιση και μόλυνση (Monteiro et al., 2018). Μέσω της νανοτεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί δυσδιάστατοι μοναδικοί αόρατοι γραμμικοί κώδικες που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για τον οπτικό έλεγχο της ταυτότητας των προϊόντων. Αν και οι κώδικες αυτοί προϋπήρχαν, δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς ήταν επιρρεπείς σε αλλοίωση, παραποίηση ή ακόμα και καταστροφή. Η λειτουργία των κωδικών αυτών στηρίζεται στην παρουσία νανοσωματιδίων και νανοδίσκων, μοναδικών για κάθε προϊόν, οι οποίοι όταν σαρωθούν με μικροσκόπιο Raman προσδίδουν ένα μοναδικό σήμα το οποίο σχετίζεται με την ταυτότητα του εκάστοτε προϊόντος (Qin et al., 2009).



Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση (αριστερά) δεκατριών πιθανών κωδικών νανοδίσκων (NDC/ Nanodisc Codes) με 5 ζεύγη δίσκων με αντίστοιχους δυαδικούς κωδικούς και (δεξιά) 3D σάρωσης ενός NDC 11111 (Qin et al., 2009).

3.3. Ασφάλεια Τροφίμων και Βιοαισθητήρες

Οι νανοαισθητήρες αποτελούν βιοαναλυτικές συσκευές που αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας διάφορα νανοϋλικά και βιολογικούς υποδοχείς. Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία τροφίμων καθώς βοηθούν στην ανίχνευση των φυσικών, χημικών και βιολογικών τροποποιήσεων κατά την επεξεργασία των υλικών, προσελκύοντας έτσι μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω της ικανότητάς τους για ταχείες ανιχνεύσεις, της ακεραιότητάς τους και της αποδοτικότητάς τους (Gálvez et al., 2007). Οι νανοαισθητήρες επιτρέπουν την ανίχνευση παθογόνων οργανισμών στα τρόφιμα, την ποσοτικοποίηση των συστατικών, την προειδοποίηση των καταναλωτών και των

διανομέων σχετικά με την κατάσταση ασφάλειας των τροφίμων. Επιπλέον λειτουργούν ως δείκτες που ανταποκρίνονται σε αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υγρασία ή η θερμοκρασία στους χώρους αποθήκευσης, η μικροβιακή μόλυνση ή η υποβάθμιση των προϊόντων. Ως εκ τούτου, λόγω της υψηλής ευαισθησίας και της εκλεκτικής ακρίβειας που παρέχουν είναι πολλά υποσχόμενες συσκευές που θα προσφέρουν πολλά οφέλη στην βιομηχανία των προϊόντων διατροφής.

Οι νανοβιοαισθητήρες έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο και εξαιρετικές οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες λόγω της σύζευξης με διάφορους τύπους νανοϋλικών όπως νανοσωλήνες άνθρακα, νανοσωματίδια (μεταλλικά, μη μεταλλικά και οξείδια μετάλλων), νανοσωματίδια ημιαγωγών, νανοράβδους, νανοςύρματα, νανοβιομεμβράνες, νανοϊνες και κβαντικές κουκκίδες (Duncan, 2011), (Shivakumar et al., 2018). Διάφορες νανοδομές όπως λεπτές μεμβράνες, νανοράβδοι, νανοσωματίδια και νανοϊνες έχουν ήδη εξεταστεί για τις πιθανές εφαρμογές τους σε βιοαισθητήρες. Οι οπτικοί ανοσοαισθητήρες οι οποίοι στηρίζονται σε μια λεπτή μεμβράνη για την ανίχνευση μικροβιακών ουσιών ή κυττάρων έχουν προσφέρει γρήγορα και εξαιρετικά ευαίσθητα συστήματα ανίχνευσης. Σε αυτούς τους ανοσοαισθητήρες, ειδικά αντισώματα, αντιγόνα ή μόρια πρωτεΐνης ακινητοποιούνται σε λεπτές νανομεμβράνες ή τσιπ αισθητήρων που εκπέμπουν σήματα για την ανίχνευση μορίων-στόχων (Singh, 2017). Επί του παρόντος, οι νανοαισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση παθογόνων μικροοργανισμών που μεταδίδονται στα τρόφιμα, ουσιών που προκαλούν νόθευση, τοξινών, χημικών και φυτοφαρμάκων. Χρησιμοποιούνται επίσης για την παρακολούθηση της φρεσκάδας των τροφίμων και της ακεραιότητας της συσκευασίας (Kuswandi & Moradi, 2019).

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με διάφορες εφαρμογές των νανοαισθητήρων οι οποίοι έχουν ως στόχο τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων [Shafiq M. et. al., 2020].

Εφαρμογές με βάση τους νανοαισθητήρες	Νανοϋλικό	Αναλύτης	Μέθοδος Ανίχνευσης
Ανίχνευση Τοξινών	Μαγνητικά νανοσωματίδια	Μυκοτοξίνες	Ανοσοδοκιμασία και ενζυμική

			ανοσοπροσροφητική δοκιμασία
	Ιονικά υγρά (οξείδιο χρυσού και γραφενίου), διοξείδιο δημητρίου και νανοσωματίδια οξειδίου ψευδαργύρου	Ωχρατοξίνη-A	Κυκλική βολταμετρία και αντίσταση
	Χρυσός, οξείδιο του σιδήρου και υπερπαραμαγνητικά νανοσωματίδια	Αφλατοξίνες B1 και αφλατοξίνη M1	Ανοσοπροσδιορισμός και ενζυμική ανοσοπροσροφητική δοκιμασία
	Νανοσωματίδια τύπου κέλυφος- πυρήνας (σεληνιούχο κάδμιο επικαλυμμένο με θειώδες ψευδάργυρο)	E. coli και S. typhimurium	Μικροσκόπιο φθορισμού
Ανίχνευση μικροβίων	Χρυσά νανοσωματίδια	E. coli, Staphylococcus aureus, Vibrio parahaemolyticus, Salmonella enterica και Salmonella typhi	Κυκλική βολταμετρία, συντονισμός επιφανειακού πλασμονίου και διαφορική βολταμετρία παλμών
	Νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος	Salmonella infantis και E. coli	Τρανζίστορ πεδίου (Field-effect transistor) και μικροσκοπία φθορισμού
Ανίχνευση φυτοφαρμάκων και χημικών	Πολυ(αιθυλενογλυκόλη διμεθακρυλική-N μεθακρυλοϋλο-l-ιστιδίνη μεθυλεστέρας)	Χλωραμφενικόλη	Επιφανειακός συντονισμός πλασμονίου και φασματοσκοπία υπεριώδους-ορατού

Νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων, νανοσωματίδια οξειδίου του σιδήρου και γραφένιο	Sudan-I	Κυκλική βολταμετρία και υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης
Νανοσωματίδια αργύρου και χρυσού	Μελαμίνη	Φασματοσκοπία υπεριώδους-ορατού και φασματοσκοπία φθορισμού

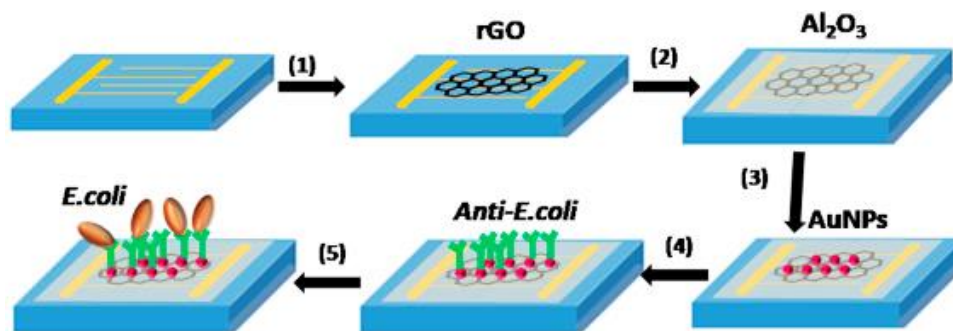
3.3.A Νανοαισθητήρες στην ανίχνευση τοξινών

Επί του παρόντος οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες και βιοαισθητήρες βασισμένοι σε νέα νανοϋλικά, όπως νανοσωλήνες άνθρακα (μονών ή/και πολλαπλών τοιχωμάτων, / single and multi-walled), μεταλλικά νανοσωματίδια από ασήμι, χρυσό, πλατίνα, χαλκό και ψευδάργυρο και υπερπαραμαγνητικά νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται με επιτυχία για την ανίχνευση διαφόρων τοξινών που υπάρχουν στα τρόφιμα (Rai et al., 2012). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανίχνευση αφλατοξινών, οι οποίες αποτελούν ομάδα τοξικών και καρκινογόνων ενώσεων που έχουν βρεθεί σε τρόφιμα μολυσμένα με *Aspergillus flavus* και *Aspergillus parasiticus*. Για την ανίχνευση της αφλατοξίνης B1 έχουν χρησιμοποιηθεί νανοσωματίδια χρυσού ενισχυμένα με αντισώματα κατά της αφλατοξίνης αυτής. Ομοίως, υπερπαραμαγνητικά σφαιρίδια που περιέχουν αντισώματα κατά της αφλατοξίνης M1 και νανοανιχνευτές χρυσού έχουν εφαρμοστεί με σκοπό την ανίχνευση της αφλατοξίνης M1 σε δείγματα γάλακτος (Sharma et al., 2010), (Radoi et al., 2008). Τέλος, η παλιτοξίνη, η οποία είναι η θαλάσσια τοξίνη που περιέχεται στα μολυσμένα θαλασσινά, είναι δυνατόν να ανιχνευθεί με τη χρήση αισθητήρων ηλεκτροχημιφωταύγειας με βάση νανοσωλήνες άνθρακα (Zamolo et al., 2012).

3.3.B Νανοαισθητήρες στην ανίχνευση μικροβίων

Η νανοτεχνολογία επιτρέπει την εφαρμογή νανοαισθητήρων χαμηλού κόστους στη συσκευασία των τροφίμων για την ανίχνευση διαφορετικών παθογόνων μικροοργανισμών που μπορεί να υπάρχουν σε διάφορα προϊόντα διατροφής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεσματικού νανοβιοαισθητήρα αποτελεί το σπρέι

νανοβιοφωταύγειας το οποίο παράγει μια οπτική λάμψη για την εύκολη ανίχνευση παθογόνων στελεχών σε διάφορα προϊόντα διατροφής. Αυτό το σπρίν αποτελείται από διαφορετικά μαγνητικά νανοσωματίδια τα οποία όταν έρθουν σε επαφή με ορισμένους παθογόνους μικροοργανισμούς μετά το ψέκασμα αντιδρούν παράγοντας ένα χρώμα που μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί οπτικά, υποδηλώνοντας ως εκ τούτου άμεσα την παρουσία των μικροοργανισμών αυτών στο προϊόν (Arshak et al., 2007). Αντίστοιχα, νανοσωματίδια μαγνητικού οξειδίου του σιδήρου έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομόνωση του DNA του παθογόνου βακτηρίου του γάλακτος *Listeria monocytogenes* (Yang et al., 2010). Ακόμα, νανοαισθητήρες με βάση το πυρίτιο συζευγμένοι με πρωτεΐνες οι οποίες είναι ικανές να δονούνται σε διαφορετικές συχνότητες ανάλογα με τη βιομάζα τους έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση παθογόνων σε διάφορα μικτά συστήματα υγρών τροφίμων (Wang et al., 2011). Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί διάφορες νέες πλατφόρμες ανίχνευσης με βάση νανοσωματίδια, όπως ταινίες δοκιμών ανοσολογικής πλευρικής ροής με νανοσωματίδια παλλαδίου κατά της *Klebsiella* (Tominaga, 2018) και τρανζίστορ πεδίου (field-effect transistor / FET) με νανοσωματίδια γραφενίου για την ανίχνευση του *Escherichia coli* (Εικόνα 3.5). Η πλατφόρμα FET με βάση το θερμικά ανηγμένο οξείδιο του γραφενίου (rGO) είναι τροποποιημένη με αντισώματα κατά του *Escherichia coli* (anti-*E. coli*) για την ανίχνευση μεμονωμένων βακτηρίων *E. coli*. Ο μηχανισμός ανίχνευσης των FET με βάση το γραφένιο βασίζεται στην αλλαγή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του καναλιού rGO κατά τη σύνδεση με το *E. coli* επειδή το *E. coli* έχει καθαρό αρνητικό φορτίο γύρω από τη μεμβράνη του, το οποίο ρυθμίζει την αγωγιμότητα του rGO στο FET. Για την παθητικοποίηση του καναλιού rGO, το FET τροποποιείται με στρώμα Al_2O_3 πάχους λίγων νανομέτρων, αναστέλλοντας έτσι οποιαδήποτε άμεση επαφή νερού ή ανεπιθύμητων ειδών με την επιφάνεια rGO χωρίς να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του FET, γεγονός που βελτιώνει την αναπαραγωγιμότητα και τη σταθερότητα του αισθητήρα. Αυτή η πλατφόρμα αισθητήρων είναι ικανή να ανιχνεύσει ένα μόνο κύτταρο *E. coli*. Ο αισθητήρας θα μπορούσε επίσης να ανιχνεύσει *E. coli* σε δείγμα νερού ποταμού, γεγονός που αποδεικνύει τις δυνατότητές του για πρακτικές εφαρμογές στην ανίχνευση σημείου χρήσης (Thakur et al., 2018).



Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων για την κατασκευή αντι- *E.coli*/ AuNPs/ Al_2O_3 / rGO αισθητήρα τρανζίστοερ πεδίου (FET). (1) Αυτοσυναρμολόγηση του θερμικά ανηγμένου οξειδίου του γραφενίου (rGO), (2) Εναπόθεση του στρώματος Al_2O_3 , (3) Εναπόθεση των νανοσωματιδίων χρυσού (AuNPs), (4) Ακινητοποίηση των anti-*E. coli*, (5) Ανίχνευση του *Escherichia coli* (Thakur et al., 2018).

3.3.Γ Νανοαισθητήρες για ανίχνευση φυτοφαρμάκων και χημικών

Οι νανοαισθητήρες έχουν εφαρμοστεί επίσης σε περιπτώσεις ανίχνευσης φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων και άλλων τοξικών χημικών ουσιών που εντοπίζονται σε ποικιλία προϊόντων που προορίζονται για διατροφή. Λόγου χάρη, χρωματομετρικοί και φθορομετρικοί νανοαισθητήρες συζευγμένοι με νανοσωματίδια χρυσού έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση οργανοφωσφορικών και καρβαμιδικών φυτοφαρμάκων ενώ φθορίζοντες νανοαισθητήρες, οι οποίοι είναι συζευγμένοι με νανοσωματίδια χρυσού, εφαρμόζονται για την ανίχνευση παρασιτοκτόνων (Liu et al., 2012).

Στην κατηγορία των βλαβερών χημικών ανήκουν επίσης και οι χρωστικές και τα συντηρητικά τροφίμων τα οποία αποτελούν τοξικές ενώσεις όταν χρησιμοποιούνται σε ποσότητες μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια. Νανοσύνθετα με νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση χρωστικών τροφίμων όπως το Sudan-I, το οποίο αποτελεί μια καρκινογόνο κόκκινη χρωστική ουσία που έχει χρησιμοποιηθεί ως νοθευτικό σε σκόνη τσίλι (Yang et al., 2010), (Majidi et al., 2013). Παράλληλα, έχουν αναφερθεί νανοσωματίδια οξειδίου ψευδαργύρου συζευγμένα με νανοσωλήνες άνθρακα για την ταυτόχρονη ανίχνευση της δισφαινόλης A, η οποία αποτελεί μια τοξική οργανική ένωση που απελευθερώνεται από πλαστικά δοχεία, και της χρωστικής Sudan-I. Τέλος, έχει αναφερθεί η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων για τη δημιουργία αισθητήρων που σε συνδυασμό με νανοσύνθετα πυριτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ιόντων καδμίου (Bagheri et al., 2013).

Κεφάλαιο 4^ο: Ζητήματα Τοξικότητας, Ασφάλειας και Νομοθεσίας

Ενώ ο κλάδος της νανοτεχνολογίας ολοένα διευρύνεται προσφέροντας πολλά πιθανά οφέλη, ταυτόχρονα αυξάνονται οι ανησυχίες των καταναλωτών ως προς την τοξικότητα των νανοϋλικών και τις πιθανές παρενέργειες που μπορεί να έχει η έκθεση σε αυτά, τόσο σε ατομικό επίπεδο όσο και σε περιβαλλοντικό. Τα νανοσωματίδια τα οποία είναι πιθανώς αδιάλυτα και βιο-ανθετικά, τα οποία είναι και ως σκληρά νανοϋλικά, είναι αυτά τα οποία προκαλούν αμφιβολίες ως προς την ασφάλεια. Βέβαια, τα νανοσωματίδια που εντοπίζονται στην επιφάνεια ενός υλικού συσκευασίας και δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τα προϊόντα, δεν είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο. Όμως, η μετατόπισή τους και η ενσωμάτωσή τους στα τρόφιμα μπορεί να επηρεάσει την ανθρώπινη υγεία. Με άλλα λόγια, η ανησυχία τόσο των καταναλωτών όσο και των επιστημόνων που τα μελετούν έγκειται στο γεγονός ότι, όταν εισέλθουν στο σώμα, τα νανοσωματίδια με μεγάλες ενεργές επιφάνειες μπορεί να διασχίσουν βιολογικούς φραγμούς για να φτάσουν σε μέρη του σώματος που, κατά τα άλλα, προστατεύονται από την είσοδο μεγαλύτερων σωματιδιακών υλικών. Τα νανοσωματίδια εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω διαφόρων οδών όπως της διείσδυσης στο δέρμα, της κατάποσης, της εισπνοής, των ενδοφλέβιων ενέσεων ή μέσω εμφυτευμένης ιατρικής συσκευής. Έτσι, η είσοδος, η απορρόφηση και η κατανομή τους στο ανθρώπινο σώμα έχει ως άμεση συνέπεια την αλληλεπίδρασή τους με τα κύτταρα και τα βιολογικά μακρομόρια και ως εκ τούτου είναι δυνατόν να συνδεθούν με την εκδήλωση κυτταροτοξικότητας και γονοτοξικότητας. Εν κατακλείδι, για να γίνουν αντιληπτοί οι μηχανισμοί τοξικότητας των διαφόρων νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να εξετασθούν αφενός τα ίδια τα νανοϋλικά κι αφετέρου οι διάφοροι οδοί έκθεσης και εισόδων προκειμένου να εκτιμηθούν τα πιθανά όργανα του ανθρώπινου οργανισμού που τίθενται σε μεγαλύτερο κίνδυνο (Teow et al., 2011).

Ο σημαντικότερος παράγοντας που ευθύνεται για την εκδήλωση της τοξικότητας είναι το μέγεθος του ίδιου του σωματιδίου. Όσο μειώνεται το μέγεθός του τόσο αυξάνεται ο κίνδυνος εκδήλωσης τοξικότητας γιατί παράλληλα αυξάνονται οι πιθανότητες διείσδυσής του στους ιστούς και τα τριχοειδή αγγεία. Επιπλέον, τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά όπως το σχήμα, το επιφανειακό φορτίο και η φύση του ίδιου του νανοσωματιδίου είναι παράγοντες άμεσα συνδεδεμένοι με την τοξικότητα. Νανοσωματίδια με σφαιρικό σχήμα ενσωματώνονται πιο εύκολα στην κυκλοφορία του αίματος σε σύγκριση με αυτά με ραβδοειδές σχήμα τα οποία εξαγγειώνονται από την κυκλοφορία του αίματος με ταχύ ρυθμό. Από την άλλη, αυτά χωρίς επίστρωση (coating) ή με θετικό φορτίο είναι πιο

επιρρεπή στην ταχεία αναγνώρισή τους από τα μακροφάγα κύτταρα. Για παράδειγμα, τα νανοσωματίδια αργύρου είναι πιο τοξικά από τα νανοσωματίδια χρυσού καθώς η κατανομή τους στο συκώτι είναι πολύ μεγαλύτερη, το μικρότερο μέγεθος των νανοσωματιδίων χρυσού ωστόσο μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερα επίπεδα τοξικότητας. Αντίστοιχα, οι νανοσωλήνες άνθρακα, ενισχυμένοι με πολυ-αιθυλενογλυκόλη (PEG) για να αυξηθεί η βιοδιαθεσιμότητα του συστήματος, μετά την απελευθέρωση του φαρμάκου μπορούν να συσσωρευτούν στο συκώτι προκαλώντας τοξικότητα, ενώ είναι πιθανό να επηρεάσουν αρνητικά και τα νεφρά, την ουρήθρα και τα πνευμόνια. Επιπρόσθετα, ορισμένα νανοσωματίδια συνδέονται με πρωτεΐνες και ένζυμα με αποτέλεσμα τη διέγερση της παραγωγής δραστικών μορφών οξυγόνου (Reactive oxygen species / ROS) και του οξειδωτικού στρες, τα οποία με τη σειρά τους σε περιπτώσεις συσσώρευσης ROS οδηγούν στον εκφυλισμό των μιτοχονδρίων και την απόπτωση (Demetzos, 2016b), (Hajipour et al., 2012).

4.1 Εκτιμήσεις Επικινδυνότητας της Τοξικότητας

Δεδομένου του ότι οι γνώσεις για τις δυνητικές επιπτώσεις των νανοϋλικών στην υγεία και το περιβάλλον υστερούν σημαντικά έναντι του ρυθμού ανάπτυξης της αγοράς και των ταχύτατων εξελίξεων στον τομέα των νανοϋλικών, εγείρονται θεμελιώδη ερωτήματα και προβληματισμοί από τους καταναλωτές καθώς είναι δύσκολη η αξιολόγηση της επικινδυνότητας κατά την έκθεση στα νανοϋλικά. Για παράδειγμα, τα προϊόντα που περιέχουν φυσικές νανοδομές (ή αλλιώς «μαλακά» νανοϋλικά) τροφίμων, που είναι πιθανό να υποστούν πέψη/αποικοδόμηση στο γαστρεντερικό σωλήνα, ενδέχεται να μην απαιτούν λεπτομερή παρουσίαση της συμπεριφοράς τους σε σύγκριση με προϊόντα που περιέχουν αδιάλυτα και βιοανθεκτικά νανοϋλικά. Λόγω λοιπόν των επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσει η έκθεσή του οργανισμού στα νανοσωματίδια, κατηγοριοποιούνται σε τρεις περιπτώσεις για την ορθή αξιολόγησή τους.

- Τομείς που προκαλούν λιγότερη ανησυχία: Τα τρόφιμα περιέχουν επεξεργασμένες (φυσικές) νανοδομές τροφίμων, οι οποίες είτε πέπτονται είτε διαλυτοποιούνται στον γαστρεντερικό σωλήνα και δεν παρουσιάζουν βιοανθεκτικότητα.
- Τομείς που προκαλούν κάποια ανησυχία: Τα τρόφιμα περιέχουν πρόσθετα τροφίμων (όπως χρωστικές ή συντηρητικά ή και βιταμίνες) ενθυλακωμένα σε φορείς νανομεγέθους, τα οποία μπορεί από την μία να μην είναι βιοανθεκτικά, είναι όμως πιθανό να μεταφέρουν τα ενθυλακωμένα πρόσθετα σε όλη την

γαστρεντερική οδό. Σε μια τέτοια περίπτωση η κατανομή των πρόσθετων στους ιστούς μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή οδηγώντας σε συνθήκες που υπερβαίνουν την αποδεκτή ημερήσια τιμή πρόσληψης (acceptable daily intake value) για το πρόσθετο. Αυτό μπορεί να ισχύει ακόμη και στην περίπτωση των βιταμινών καθώς η αυξημένη βιοδιαθεσιμότητα βιταμινών και μετάλλων μπορεί να μην είναι πάντα ευεργετική για την υγεία των καταναλωτών.

- Τομείς μείζονος ανησυχίας: Τα τρόφιμα περιέχουν αδιάλυτα, δύσπεπτα και δυνητικά βιοανθεκτικά νανοπρόσθετα (π.χ. μέταλλα ή οξείδια μετάλλων). Τέτοιες κατηγορίες ενδέχεται να ενέχουν κίνδυνο έκθεσης των καταναλωτών σε «σκληρά» νανοϋλικά σε τομείς για τους οποίους οι τοξικολογικές ιδιότητες δεν είναι πλήρως γνωστές επί του παρόντος.

Προκειμένου να γίνει ορθή αξιολόγηση της επικινδυνότητας της έκθεσης των οργανισμών στους διάφορους τύπους νανοϋλικών θα πρέπει να γίνουν επαρκείς πειραματικές μελέτες σε πειραματόζωα. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα υλικά με υψηλή τοξικότητα δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στα τρόφιμα. Συνεπώς, τυχόν προβληματισμοί σχετικά με την ασφάλεια των καταναλωτών αφορούν κυρίως σε μακροπρόθεσμες ή απρόβλεπτες επιβλαβείς επιπτώσεις της έκθεσης στα νανοϋλικά.

Οι περισσότερες από τις μελέτες τοξικότητας που έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την μελέτη της τοξικότητας των νανοσωματιδίων απέδειξαν ότι η έκθεση στα νανοσωματίδια μπορεί να προκαλέσει ισχυρή τοξικότητα σε διάφορα όργανα (ήπαρ, νεφρά) και στο ανοσοποιητικό σύστημα. Για την αξιολόγηση της τοξικότητας των νανοϋλικών ο Οργανισμός Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ (FDA) και η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έδωσαν έγκριση για τη χρήση του ψαριού ζέβρα (zebrafish) για την αξιολόγηση της τοξικότητας των νανοϋλικών (Jeevanandam et al., 2019). Η ήδη ολοκληρωμένη αξιολόγηση διευκρινίζει ότι τα νανοϋλικά δεν προκαλούν αναπτυξιακά ελαττώματα, θνησιμότητα ή αλλοίωση στη συμπεριφορά των ψαριών ζέβρα. Επιπλέον, η ανάλυση πρόσληψης και βιοκατανομής των νανοδομών αποκαλύπτει ότι υπάρχουν σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο σώμα (d'Amora et al., 2018).

Για τις αξιολογήσεις βιοασφάλειας και βιοκινητικής μεταλλικών νανοσωματιδίων όπως ο χρυσός, ο άργυρος και η πλατίνα, τα πρωτόκολλα δοκιμών περιλαμβάνουν το ποντίκι ως πρότυπο οργανισμού. Η μελέτη επιβεβαίωσε την ενισχυμένη απέκκριση των νανοσωματιδίων μέσω της νεφρικής οδού λόγω του μικρού τους μεγέθους ενώ η βιοασφάλεια όλων των μεταλλικών νανοσωματιδίων αξιολογήθηκε πλήρως και στα ψάρια

ζέβρα προκειμένου να υπάρχει ολιστική έκθεση της συμπεριφοράς και των πιθανών παρενεργειών των μεταλλικών νανοσωματιδίων σε ολόκληρο το σώμα (Cassano et al., 2019).

Η εκδήλωση βιοσυσώρευσης νανοϋλικών που προέρχονται είτε από νανοσυσκευασίες είτε από νανοεπεξεργασμένα προϊόντα έχει ήδη επιβεβαιωθεί στα τρόφιμα και στον άνθρωπο. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο οι διαδικασίες εκτίμησης κινδύνου να ακολουθούνται αυστηρά κατά την επεξεργασία των τροφίμων και η πολιτεία να παραμένει ενημερωμένη σχετικά με πιθανές παρενέργειες προκειμένου να θεσπίζει άμεσα καινούριους νόμους με γνώμονα την προστασία της υγείας των πολιτών και του περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα, δεν θα πρέπει να παραλείπεται σε αυτό το πλαίσιο η εκπαίδευση του καταναλωτικού κοινού σχετικά με τους πιθανούς κινδύνους που συνδέονται με τα νανοϋλικά. Αρκετές χώρες εντός κι εκτός της ΕΕ έχουν σχεδιάσει διάφορα ρυθμιστικά πλαίσια για την ορθή χρήση των νανοϋλικών προκειμένου να διασφαλίσουν την ασφάλεια των νανοπροϊόντων στους τομείς των ζωοτροφών, της γεωργίας και των τροφίμων. Επιπλέον, εποπτικές αρχές όπως η FDA και η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA) έχουν κάνει αρκετές τροποποιήσεις σε διάφορα κριτήρια που προορίζονται για εμπορεύσιμα τρόφιμα όσον αφορά την υγεία και την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων (Kookana et al., 2014), (Amenta et al., 2015).

4.2 Υπάρχοντα κενά ως προς τις γνώσεις αναφορικά με τα νανοϋλικά

Η χρήση των νανοϋλικών στη βιομηχανία των προϊόντων διατροφής παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτήματα. Ωστόσο μεταξύ των μειονεκτημάτων που έχουν περιλαμβάνονται ορισμένα κενά σε επίπεδο γνώσεων που χρήζουν περαιτέρω έρευνα. Αυτά περιλαμβάνουν: [Sekhon, 2010]

- Απαίτηση για σαφή και κατάλληλο ορισμό των νανοϋλικών και των νανοτεχνολογιών. Αυτό εξετάζεται επί του παρόντος στο πλαίσιο της αναδιατύπωσης των νόμων για τα τρόφιμα στην Ευρώπη. Επιπλέον, έχουν υιοθετηθεί ορισμένοι (αλλά όχι τελικοί) ορισμοί για διάφορους όρους που σχετίζονται με τις νανοτεχνολογίες για τους σκοπούς των συζητήσεων των φορέων FAO / WHO / CODEX.

- Απαίτηση για διαθέσιμες επικυρωμένες μεθόδους ανίχνευσης και χαρακτηρισμού των νανοϋλικών στα τρόφιμα. Σήμερα, λίγα ερευνητικά προγράμματα φαίνεται να αντιμετωπίζουν αυτή την ανάγκη.
- Απαίτηση για τοξικολογική έρευνα σχετικά με την ασφάλεια των νανοϋλικών, η οποία πρέπει να γίνεται συνεχώς και οποιαδήποτε νέα αποτελέσματα να συγκεντρώνονται για να αναθεωρούνται περιοδικά τα υπάρχοντα δεδομένα.
- Οι μακροπρόθεσμες συνέπειες (εάν υπάρχουν) για την υγεία λόγω της πρόσληψης μη διαλυτών και βιοανθεκτικών (σκληρών) νανοσωματιδίων μέσω των τροφίμων, δεν είναι γνωστές μέχρι σήμερα. Επίσης, οι επιπτώσεις των νανοσωματιδίων που δεν είναι ευδιάλυτα ή βιοαποικοδομήσιμα θα πρέπει να μελετώνται πριν αρχίσει η παραγωγή και διάθεση αυτών των σωματιδίων στην αγορά.

4.3 Ισχύουσα Νομοθεσία

Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων παρέχει ποικίλες και καινοτόμες λύσεις κατά τη διαδικασία παραγωγής, συσκευασίας, ανάλυσης και ενίσχυσης των προϊόντων διατροφής. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα νανοσωματίδια αλληλοεπιδρούν με το σύστημα τροφίμων και κατά συνέπεια με τους ζωντανούς οργανισμούς εγείρει ανησυχία για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων. Ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαίο να θεσπιστούν νόμοι και να δοθούν κατευθυντήριες γραμμές και πολιτικές, τα οποία αφενός θα προσφέρουν τη δυνατότητα ενημέρωσης του καταναλωτικού κοινού για τα τρόφιμα επεξεργασμένα με τη νανοτεχνολογία, αφετέρου θα το προστατεύει από τυχούσες ανεπιθύμητες παρενέργειες.

Η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των τροφίμων (EFSA) (<https://www.efsa.europa.eu/el/topics/topic/nanotechnology#>, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024) παρακολουθεί από το 2006 τις εξελίξεις στην νανοτεχνολογία σε σχέση με τα τρόφιμα και τις ζωοτροφές. Ως εκ τούτου έχει υιοθετήσει μια ασφαλή και υπεύθυνη προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει τα εξής:

- Δημιουργία του Παρατηρητήριου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα Νανοϋλικά (European Union Observatory for Nanomaterials / EUON) τον Ιούνιο του 2017 από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Χημικών Προϊόντων (European Chemicals Agency / ECHA). Το Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο για τα Νανοϋλικά έχει ως στόχο την παρακολούθηση των θεμάτων αναφορικά με την ασφάλεια των τροφίμων ενώ

επιπλέον διεξάγει διάλογο με τα κράτη μέλη της ΕΕ (<https://euon.echa.europa.eu/>, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024) .

- Αναθεώρηση και προσαρμογή της ευρωπαϊκής νομοθεσίας, όπως για παράδειγμα τη σύσταση επιτροπής για τον ορισμό του νανοϋλικού, τον Οκτώβριο του 2011.
- Τα θέματα έρευνας της Νανοτεχνολογίας ελέγχονται και εγκρίνονται από το Κοινό Κέντρο Ερευνών (Joint Research Centre / JRC) το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με το Πρόγραμμα κατευθυντήριων γραμμών δοκιμών του ΟΟΣΑ. Τον Μάιο του 2020 ξεκίνησε από τον ΟΟΣΑ ένα τριετές έργο, το Nanomet, το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και έχει στόχο τον εντοπισμό και την ανάπτυξη τυποποιημένων μεθόδων δοκιμών ασφαλείας για τα νανοϋλικά (<https://www.oecd.org/chemicalsafety/nanomet/>, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024) .

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση οι κανονισμοί της επισημαίνουν ότι τόσο τα συστατικά τροφίμων που βασίζονται στη νανοτεχνολογία όσο και τα νανοϋλικά που προορίζονται να έλθουν σε επαφή με τρόφιμα θα πρέπει να υποβάλλονται σε αξιολόγηση ασφαλείας πριν εγκριθούν για ανθρώπινη χρήση. Αρμόδιος φορέας για την αξιολόγηση αυτή είναι η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA). Η αξιολόγηση αποσκοπεί στον προσδιορισμό τυχόν κινδύνων που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από τη χορήγηση άδειας χρήσης των νανοϋλικών και διενεργείται από τις επιστημονικές επιτροπές της EFSA, τις οποίες απαρτίζουν ανεξάρτητοι εμπειρογνώμονες από ολόκληρη την Ευρώπη. Στην άδεια που ενδέχεται να χορηγηθεί κατόπιν της αξιολόγησης καθορίζονται οι όροι χρήσης των νανοϋλικών και τυχόν απαιτήσεις επισήμανσης (<https://euon.echa.europa.eu/el/food>, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024). Οι κανονισμοί περιλαμβάνουν και το πρόγραμμα επαναξιολόγησης από την EFSA , για τα νανοπρόσθετα και τα υλικά συσκευασίας τροφίμων η χρήση των οποίων έχει εγκριθεί πριν από το 2009. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ η Ιαπωνία και η Κίνα είναι οι κύριες χώρες παραγωγής νανοϋλικών, δεν διαθέτουν κατάλληλους κανονισμούς που αφορούν τη νανοτεχνολογία (O'Brien & Cummins, 2010), (Nile et al., 2020).

4.3.A Ρυθμιστικές Αρχές του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου

Στις 7 Φεβρουαρίου 2008 πραγματοποιήθηκε σύσταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με γνώμονα τον κώδικα δεοντολογίας για υπεύθυνη έρευνα στον τομέα των νανοεπιστημών και νανοτεχνολογιών (N&N) (κοινοποιηθείσα υπό τον αριθμό E(2008)

424 (2008/345/EK)). Οι απαγορεύσεις, οι περιορισμοί ή όρια που δόθηκαν αναφέρουν μεταξύ άλλων ότι (<https://eur-lex.europa.eu/>, εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024):

- Οι οργανισμοί χρηματοδότησης N&N έρευνας δεν πρέπει να χρηματοδοτούν δραστηριότητες έρευνας σε πεδία που ενέχουν κίνδυνο παραβίασης των θεμελιωδών δικαιωμάτων ή των θεμελιωδών αρχών ηθικής και δεοντολογίας, είτε στο στάδιο της έρευνας είτε στο στάδιο της ανάπτυξης (π.χ. τεχνητοί, δυνητικά παθογόνοι ιοί) (4.1.15.) .
- Οι ερευνητικοί οργανισμοί που διεξάγουν N&N έρευνα δεν πρέπει να αναλαμβάνουν ερευνητικές δραστηριότητες που αποβλέπουν σε μη θεραπευτική βελτίωση του ανθρώπου και οδηγούν σε εθισμούς, ή που έχουν ως μόνο αντικείμενο τη βελτίωση, με αθέμιτα μέσα, των επιδόσεων του ανθρώπινου σώματος (4.1.16.).
- Ενόσω δεν διατίθενται μελέτες εκτίμησης κινδύνων για τη μακροπρόθεσμη ασφάλεια, πρέπει να αποφεύγονται οι δραστηριότητες έρευνας που περιλαμβάνουν εσκεμμένη παρείσδυση νανο-αντικειμένων στο ανθρώπινο σώμα ή ενσωμάτωσή τους σε τρόφιμα (ιδίως σε βρεφικές τροφές), ζωοτροφές, παιχνίδια, καλλυντικά και άλλα προϊόντα, οι οποίες ενδέχεται να εκθέσουν σε κινδύνους τον άνθρωπο ή το περιβάλλον (4.1.17.).

Στην Έκθεση σχετικά με τις Ρυθμιστικές Πτυχές των Νανοϋλικών η Επιτροπή Περιβάλλοντος, Δημόσιας Υγείας και Ασφάλειας των Τροφίμων μεταξύ άλλων (<https://www.europarl.europa.eu/> , εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024) :

- Εκφράζει την πεποίθηση ότι η χρήση των νανοϋλικών πρέπει να ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες των πολιτών και ότι τα οφέλη τους μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με ασφαλή και υπεύθυνο τρόπο εντός σαφούς ρυθμιστικού πλαισίου πολιτικής (νομοθετικές και λοιπές διατάξεις) που προορίζεται σαφώς για υφιστάμενες και αναμενόμενες εφαρμογές των νανοϋλικών καθώς και για τον ιδιαίτερο χαρακτήρα των πιθανών προβλημάτων για την υγεία, το περιβάλλον και την ασφάλεια καθ' όλο τον κύκλο της ζωής τους.
- Εφιστά την προσοχή στο γεγονός ότι διαφορετικές κατηγορίες ατόμων ενδέχεται να εκτεθούν σε κίνδυνο σε διαφορετικά στάδια της διάρκειας ζωής των προϊόντων: στο στάδιο της παραγωγής και του χειρισμού, της συσκευασίας, της μεταφοράς και της συντήρησης, κατά την απόρριψη και την καταστροφή, και όπου εμπλέκονται δευτερεύοντες και τελικοί χρήστες, και καταναλωτές.

- Καλεί την Επιτροπή να αναθεωρήσει όλη τη σχετική νομοθεσία εντός δύο ετών ώστε να εφαρμόζεται η αρχή "της απαγόρευσης μη καταχωρημένων ουσιών" ("no data, no market") για όλες τις εφαρμογές νανοϋλικών σε προϊόντα με πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, το περιβάλλον ή την ασφάλεια καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους και να διασφαλίσει ότι οι νομοθετικές διατάξεις και τα μέσα εφαρμογής αντικατοπτρίζουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των νανοϋλικών στα οποία ενδέχεται να εκτίθενται οι εργαζόμενοι, οι καταναλωτές και/ή το περιβάλλον.
- Θεωρεί ιδιαίτερα σημαντικό να εντάσσονται τα νανοϋλικά αποκλειστικά στο πεδίο εφαρμογής τουλάχιστον της νομοθεσίας για χημικά προϊόντα (REACH, βιοκτόνα), τρόφιμα (είδη διατροφής, πρόσθετα τροφίμων, τρόφιμα και ζωοτροφές από γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς), της συναφούς νομοθεσίας για την προστασία των εργαζομένων, καθώς και της νομοθεσίας για την ποιότητα της ατμόσφαιρας, των υδάτων και τα απόβλητα.

Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Αναμφίβολα, η νανοτεχνολογία διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον τομέα των προϊόντων διατροφής καθώς προσφέρει καινοτόμες λύσεις ως προς την ποιοτική παραγωγή τροφίμων, την επεξεργασία, τη συσκευασία και τη μακροχρόνια αποθήκευση ενώ ταυτόχρονα συμβάλει αποτελεσματικά στη βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων ενισχύοντας τη γεύση, το χρώμα και την υφή τους. Τα νανοϋλικά και οι νανοαισθητήρες, επιπλέον, βοηθούν τους καταναλωτές ως προς την ενημέρωση της κατάστασης ενός τροφίμου καθώς μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικές με το αν το τρόφιμο έχει υποστεί αλλοιώσεις λόγω επιμόλυνσης από βιοχημικά, μικροβιολογικά ή χημικά μέσα. Ταυτόχρονα, μέσω των αποτελεσματικών συστημάτων ενθυλάκωσης και παροχής βιοδραστικών μορίων, τα τρόφιμα εμπλουτίζονται βιοενεργά κι ενισχύονται ως προς την θρεπτικής τους αξία, καλύπτοντας ως εκ τούτου τις απαιτήσεις των καταναλωτών για κατανάλωση τροφίμων με ενισχυμένη ποιότητα που συνεισφέρουν ευεργετικά στον οργανισμό.

Εκτός των πλεονεκτημάτων της εφαρμογής της νανοτεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων, τα μειονεκτήματα που οδηγούν στην μη ορθή εφαρμογή της είναι αρκετά. Παρά το γεγονός ότι τα νανোসωματίδια κατασκευάζονται σε όλο τον κόσμο, πολύ λίγες χώρες διαθέτουν τους τυπικούς ρυθμιστικούς κανόνες για τη χρήση της νανοτεχνολογίας στα τρόφιμα. Επιπρ/οσθετα, η ανεπαρκής επιστημονική μελέτη των νανοσυστημάτων ως προς τις ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις όπως η τοξικότητα δημιουργεί δυσκολίες στην εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους. Ως εκ τούτου θα πρέπει να συνυπολογιστεί η πιθανή έμμεση έκθεση των οργανισμών στα νανοϋλικά, καθώς είναι δυνατόν να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα μέσω του αέρα, του νερού και του εδάφους κατά την κατασκευή και χρήση τους, οδηγώντας σε βλάβες του DNA, διαταραχές των κυτταρικών μεμβρανών και κυτταρικό θάνατο. Ωστόσο, μέχρι στιγμής λίγες *in vivo* μελέτες έχουν διεξαχθεί σχετικά με τις επιπτώσεις των νανοτροφών στην υγεία του ανθρώπου και των ζώων, κι έτσι δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τις επιπτώσεις τους στους ζωντανούς οργανισμούς.

Καταλυτικά, για την εμπορία προϊόντων διατροφής που έχουν επεξεργαστεί μέσω της νανοτεχνολογίας θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη επισήμανση και κανονισμοί προκειμένου να συμβάλουν στην αύξηση της αποδοχής των καταναλωτών. Έτσι, η χρήση αυτών των νανοτεχνολογιών, εάν διαχειριστεί και ρυθμιστεί σωστά, είναι δυνατό να

διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της επεξεργασίας των τροφίμων και της ποιότητας των προϊόντων με κύριο γνώμονα την ενίσχυση της ανθρώπινης υγείας και ευημερίας και με ταυτόχρονο σεβασμό ως προς το περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

Καζιάνης, 2016	Καζιάνης, Λ. (2016). Νανοϋλικά για φιλικές προς το περιβάλλον εφαρμογές (No. GRI-2016-17796). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
Demetzos, 2016a	Demetzos, C. (2016). Introduction to Nanotechnology. In: Pharmaceutical Nanotechnology. Adis, Singapore.
Jain & Jain, 2008	Jain, K. K., & Jain, K. K. (2008). The handbook of nanomedicine (Vol. 404). Totowa: Humana Press.
Horikoshi, 2013	Horikoshi, S., & Serpone, N. (Eds.). (2013). Microwaves in nanoparticle synthesis: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.
Emerich & Thanos, 2003	Emerich, D. F., & Thanos, C. G. (2003). Nanotechnology and medicine. Expert Opinion on Biological Therapy, 3(4), 655–663.
Vardaxi et al., 2021	Vardaxi, A., Athanasiadou V., Vakouftsi, A., C., Kaligosi, D., (2021), Lipid-based Nanovaccines, Pharmakeftiki, 33, III, 190-199.
Sawhney et al., 2008	Sawhney, A. P. S., Condon, B., Singh, K. V., Pang, S. S., Li, G., & Hui, D. (2008). Modern Applications of Nanotechnology in Textiles. Textile Research Journal, 78(8), 731–739.
Panchbhai 2019	Panchbhai, A. (2019). Nanotechnology in dentistry. In Applications of Nanocomposite Materials in Dentistry (pp. 191-203). Woodhead Publishing.
Hameed et al., 2019	Hameed, A., Fatima, G. R., Malik, K., Muqadas, A., & Fazal-ur-Rehman, M. (2019). Scope of nanotechnology in cosmetics: dermatology and skin care products. J. Med. Chem. Sci, 2(1), 1-40.
Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2019	Ευρωπαϊκή Επιτροπή, (2011), Τι είναι τα «νανοϋλικά»; Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή διανοίγει νέες προοπτικές χάρη σε κοινό ορισμό, Διαθέσιμο : http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-1202_el.html Εξακρίβωση: 11 Μαΐου 2024.
Ezhilarasi et al., 2013	Ezhilarasi, P. N., Karthik, P., Chhanwal, N., and Anandharamakrishnan, C. (2013). Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: a review. Food Bioprocess Technol. 6, 628–647.
Zhao et al., 2016	Zhao, H., Lin, Z. Y., Yildirimer, L., Dhinakar, A., Zhao, X., & Wu, J. (2016). Polymer-based nanoparticles for protein delivery: design, strategies and applications. Journal of Materials Chemistry B, 4(23), 4060-4071.
Bratovčić et al., 2015	Bratovčić, A., Odobašić, A., Čatić, S., & Šestan, I. (2015). Application of polymer nanocomposite materials in food packaging. Croatian journal of food science and technology, 7(2), 86-94.
Augustin & Hemar, 2009	Augustin, M. A., & Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. Chemical society reviews, 38(4), 902-912.
Shafiq et al., 2020	Shafiq, M., Anjum, S., Hano, C., Anjum, I., & Abbasi, B. H. (2020). An overview of the applications of nanomaterials and nanodevices in the food industry. Foods, 9(2), 148.
Horikoshi & Serpone, 2013	Horikoshi, S., & Serpone, N. (2013). Introduction to Nanoparticles. Microwaves in Nanoparticle Synthesis, 1–24.
Pietroiusti et al., 2016	Pietroiusti A, Magrini A, Campagnolo L (2016) New frontiers in nanotoxicology: Gutmicrobiota/microbiome-mediated effects of engineered nanomaterials. Toxicol Appl Pharmacol 299:90–95.
Emamifar et al., 2011	Emamifar A, Kadivar M, Shahedi M, Soleimani-Zad S (2011) Effect of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on inactivation of Lactobacillus plantarum in orange juice. Food Control 22:408–413.
Echegoyen & Nerin, 2013	Echegoyen Y, Nerin C (2013) Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers. Food Chem Toxicol 62:16–22.
Tankhiwale & Bajpai, 2012	Tankhiwale R, Bajpai SK (2012) Preparation, characterization and antibacterial applications of ZnO-nanoparticles coated polyethylene films for food packaging. Colloids Surf B: Biointerfaces 90:16–20.
Yemmireddy & Hung, 2015	Yemmireddy VK, Hung Y-C (2015) Effect of binder on the physical stability and bactericidal property of titanium dioxide (TiO ₂) nanocoatings on food contact surfaces. Food Control 57:82–8.
Guo, 2015	Guo KW (2015) Current relevant nanotechnologies for the food industry. In: Bagchi D, Swaroop A, Bagchi M (eds) Genomics, proteomics and

	metabolomics in nutraceuticals and functional foods. Wiley, Chichester, p 629.
Graveland-Bikker 2006	Graveland-Bikker JF, Kruif de CG (2006) Unique milk protein based nanotubes: food and nanotechnology meet. Trends Food Sci Technol 17(5):196–203.
Ameta et al., 2020	Ameta, S. K., Rai, A. K., Hiran, D., Ameta, R., & Ameta, S. C. (2020). Use of nanomaterials in food science. In Biogenic nano-particles and their use in agro-ecosystems (pp. 457-488). Springer, Singapore.
Severino et al., 2012	Severino P, Andreani T, Macedo AS, Fanguiero JF, Santana MHA, Silva AM, Souto EB (2012) Current state-of-art and new trends on lipid nanoparticles (SLN and NLC) for oral drug delivery. J Drug Deliv 2012:1–10.
Weiss et al., 2008	Weiss, J., Decker, E. A., McClements, D. J., Kristbergsson, K., Helgason, T., & Awad, T. (2008). Solid lipid nanoparticles as delivery systems for bioactive food components. Food biophysics, 3(2), 146-154.
Hung et al., 2007	Hung, C.-F., Fang, C.-L., Liao, M.-H., & Fang, J.-Y. (2007). The effect of oil components on the physicochemical properties and drug delivery of emulsions: Tocol emulsion versus lipid emulsion. International Journal of Pharmaceutics, 335(1-2), 193–202.
Kamaly et al., 2012	Kamaly, N., Xiao, Z., Valencia, P. M., Radovic-Moreno, A. F., & Farokhzad, O. C. (2012). Targeted polymeric therapeutic nanoparticles: design, development and clinical translation. Chemical Society Reviews, 41(7), 2971-3010.
Balamurugan & Chintamani, 2018	Balamurugan, K., & Chintamani, P. (2018). Lipid nano particulate drug delivery: An overview of the emerging trend. Pharma Innov. J, 7, 779-789.
Βεντούρη, 2018	Βεντούρη, Ό. (2018). Εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στον τομέα των τροφίμων: μελέτη σκοπιμότητας για την ανάπτυξη νέου προϊόντος με βάση το μέλι (Master's thesis).
Sekhon, 2010	Sekhon BS (2010) Food nanotechnology – an overview. Nanotechnol Sci Appl 3:1–15.
He & Hwang, 2016	He X, Hwang HM (2016) Nanotechnology in food science: functionality, applicability, and safety assessment. J Food Drug Anal 24:671–681.
Yu et al., 2018	Yu H, Park JY, Kwon CW, Hong SC, Park KM, Chang PS (2018) An overview of nanotechnology in food science: preparative methods, practical applications, and safety. J Chem 2018:1–10.
Singh et al., 2017	Singh T, Shukla S, Kumar P, Wahla V, Bajpai VK and Rather IA (2017) Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview. Front. Microbiol. 8:1501.
Chaudhry et al., 2017	Chaudhry, Q., Watkins, R., & Castle, L. (2017). Nanotechnologies in food: What, why and how?
Acevedo-Fani et al., 2017	Acevedo-Fani, A., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2017). Nanostructured emulsions and nanolaminates for delivery of active ingredients: Improving food safety and functionality. Trends in Food Science & Technology, 60, 12-22.
Pavlath & Orts, 2009	Pavlath AE, Orts W. (2009) Edible films and coatings: why, what, and how? In: Embuscado ME, Huber KC (eds) Edible films and coatings for food applications. Springer, Berlin.
Shit & Shah, 2014	Shit SC, Shah PM (2014) Edible polymers: challenges and opportunities. J Polym 2014:1–13.
Jiménez et al., 2016	Jiménez, D., de Miguel-Díez, J., Guijarro, R., Trujillo-Santos, J., Otero, R., Barba, R., Muriel, A.; Meyer, G.; Yusen, R.D.; Monreal, M. (2016). Trends in the management and outcomes of acute pulmonary embolism: analysis from the RIETE registry. Journal of the American College of Cardiology, 67(2), 162-170.
Ezhilarasi et al., 2013	Ezhilarasi, P. N., Karthik, P., Chhanwal, N., and Anandharamakrishnan, C. (2013). Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: a review. Food Bioprocess Technol. 6, 628–647.
Yan & Gilbert, 2004	Yan, S. S., and Gilbert, J. M. (2004). Antimicrobial drug delivery in food animals and microbial food safety concerns: an overview of in vitro and in

	vivo factors potentially affecting the animal gut microflora. <i>Adv. Drug Deliv. Rev.</i> 56.
Amin et al., 2015	Amin AA, Salama MF, Seliem EI, Mahmoud KF (2015) Encapsulation of nano carotenoids; evaluation of stability and safety. <i>Int J Curr Microbiol App Sci</i> 4(2):1017–1029.
Momin et al., 2013	Momin, J. K., Jayakumar, C., & Prajapati, J. B. (2013). Potential of nanotechnology in functional foods. <i>Emirates journal of food and agriculture</i> , 25(1), 10-19.
Bund, 2008	Bund (2008) Ausdem Labor auf den Teller: Die Nutzung der Nanotechnologie im Lebensmittelsektor. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/nanotechnologie_aus_dem_labor_auf_den_teller.pdf . Εξάκριβωση: 11 Μαΐου 2024.
Nile et al., 2020	Nile, S. H., Baskar, V., Selvaraj, D., Nile, A., Xiao, J., & Kai, G. (2020). Nanotechnologies in food science: applications, recent trends, and future perspectives. <i>Nano-micro letters</i> , 12(1), 1-34.
Zhang et al., 2014	Zhang, T., Lv, C., Chen, L., Bai, G., Zhao, G., and Xu, C. (2014). Encapsulation of anthocyanin molecules within a ferritin nanocage increases their stability and cell uptake efficiency. <i>Food Res. Int.</i> 62, 183–192.
Yang et al., 2015	Yang, R., Zhou, Z., Sun, G., Gao, Y., Xu, J., Strappe, P., et al. (2015). Synthesis of homogeneous protein-stabilized rutin nanodispersions by reversible assembly of soybean (<i>Glycine max</i>) seed ferritin. <i>RSC Adv.</i> 5, 31533–31540.
Yadav, 2017	Yadav, S. K. (2017). Tissue science & engineering realizing the potential of nanotechnology for agriculture and food technology. <i>J. Tissue Sci. Eng.</i> 8, 8-11.
Arroyo et al., 2019	Arroyo, B. J., Santos, A. P., de Melo, E. D. A., Campos, A., Lins, L., & Boyano-Orozco, L. C. (2019). Bioactive compounds and their potential use as ingredients for food and its application in food packaging. In <i>Bioactive compounds</i> (pp. 143-156). Woodhead Publishing.
He et al., 2019	He, X., Deng, H., & Hwang, H. M. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. <i>Journal of food and drug analysis</i> , 27(1), 1-21.
Clemente et al., 2015	Clemente, J.C.; Pehrsson, E.C.; Blaser, M.J.; Sandhu, K.; Gao, Z.; Wang, B.; Magris, M.; Hidalgo, G.; Contreras, M.; Noya-Alarcón, Ó., (2015). The microbiome of uncontacted Amerindians. <i>Science advances</i> , 1(3), e1500183.
Yang et al., 2009	Yang, F. L., Li, X. G., Zhu, F., & Lei, C. L. (2009). Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against <i>Tribolium castaneum</i> (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). <i>Journal of agricultural and food chemistry</i> , 57(21), 10156-10162.
Sorrentino et al., 2007	Sorrentino, A., Gorrasi, G., & Vittoria, V. (2007). Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. <i>Trends in food science & technology</i> , 18(2), 84-95.
Lagaron et al., 2005	Lagaron, J. M., Cabedo, L., Cava, D., Feijoo, J. L., Gavara, R., & Gimenez, E. (2005). Improving packaged food quality and safety. Part 2: Nanocomposites. <i>Food Additives and Contaminants</i> , 22(10), 994-998.
Ray et al., 2006	Ray, S., Quek, S. Y., Easteal, A., & Chen, X. D. (2006). The potential use of polymer-clay nanocomposites in food packaging. <i>International Journal of Food Engineering</i> , 2(4).
Jafarizadeh-Malmiri et al., 2019	Jafarizadeh-Malmiri, H., Sayyar, Z., Anarjan, N., & Berenjian, A. (2019). Nanobiotechnology in food packaging. In <i>Nanobiotechnology in food: concepts, applications and perspectives</i> (pp. 69-79). Springer, Cham
Vo et al., 2019	Vo, T. V., Dang, T. H., & Chen, B. H. (2019). Synthesis of intelligent pH indicative films from chitosan/poly (vinyl alcohol)/anthocyanin extracted from red cabbage. <i>Polymers</i> , 11(7), 1088.
Monteiro et al., 2018	Monteiro, C. A., Cannon, G., Moubarac, J. C., Levy, R. B., Louzada, M. L. C., & Jaime, P. C. (2018). The UN Decade of Nutrition, the NOVA food classification and the trouble with ultra-processing. <i>Public health nutrition</i> , 21(1), 5-17.

Qin et al., 2007	Qin, L., Banholzer, M. J., Millstone, J. E., & Mirkin, C. A. (2007). Nanodisk codes. <i>Nano letters</i> , 7(12), 3849-3853.
Lin et al., 2012	Lin, C.; Jungmann, R.; Leifer, A.M.; Li, C.; Levner, D.; Church, G.M.; Shih, W.M.; Yin, P. (2012). Submicrometre geometrically encoded fluorescent barcodes self-assembled from DNA. <i>Nature chemistry</i> , 4(10), 832-839.
Gálvez et al., 2007	Gálvez, A., Abriouel, H., López, R. L., & Omar, N. B. (2007). Bacteriocin-based strategies for food biopreservation. <i>International journal of food microbiology</i> , 120(1-2), 51-70.
Duncan, 2011	Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. <i>Journal of colloid and interface science</i> , 363(1), 1-24.
Shivakumar et al., 2018	Shivakumar, N., Madhusudan, P., & Daniel, S. K. (2018). Nanomaterials for smart food packaging. <i>Handbook of nanomaterials for industrial applications</i> , 260-270.
Kuswandi & Moradi, 2019	Kuswandi, B., & Moradi, M. (2019). Improvement of food packaging based on functional nanomaterial. In <i>Nanotechnology: applications in energy, drug and food</i> (pp. 309-344). Springer, Cham.
Rai et al., 2012	Rai, M., Gade, A., Gaikwad, S., Marcato, P. D., & Durán, N. (2012). Biomedical applications of nanobiosensors: the state-of-the-art. <i>Journal of the Brazilian Chemical Society</i> , 23, 14-24.
Sharma et al., 2010	Sharma, A., Matharu, Z., Sumana, G., Solanki, P. R., Kim, C. G., & Malhotra, B. D. (2010). Antibody immobilized cysteamine functionalized-gold nanoparticles for aflatoxin detection. <i>Thin Solid Films</i> , 519(3), 1213-1218.
Radoi et al., 2008	Radoi, A., Targa, M., Prieto-Simon, B., & Marty, J. L. (2008). Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) based on superparamagnetic nanoparticles for aflatoxin M1 detection. <i>Talanta</i> , 77(1), 138-143.
Zamolo et al., 2012	Zamolo, V. A., Valenti, G., Venturelli, E., Chaloin, O., Marcaccio, M., Boscolo, S., Castagnola, V.; Sosa, S.; Berti, F.; Fontanive, G. (2012). Highly sensitive electrochemiluminescent nanobiosensor for the detection of palytoxin. <i>ACS nano</i> , 6(9), 7989-7997.
Arshak et al., 2007	Arshak, K., Adley, C., Moore, E., Cunniffe, C., Campion, M., & Harris, J. (2007). Characterisation of polymer nanocomposite sensors for quantification of bacterial cultures. <i>Sensors and Actuators B: Chemical</i> , 126(1), 226-231.
Wang et al., 2011	Wang, L., Luo, J., Shan, S., Crew, E., Yin, J., Zhong, C. J., Wallek, B., Wong, S. S. (2011). Bacterial inactivation using silver-coated magnetic nanoparticles as functional antimicrobial agents. <i>Analytical chemistry</i> , 83(22), 8688-8695.
Thakur et al., 2018	Thakur, B., Zhou, G., Chang, J., Pu, H., Jin, B., Sui, X., Yuan, X.; Yang, C.-H.; Magruder, M., Chen, J. (2018). Rapid detection of single E. coli bacteria using a graphene-based field-effect transistor device. <i>Biosensors and Bioelectronics</i> , 110, 16-22.
Tominaga, 2018	Tominaga, T. (2018). Rapid detection of <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Raoultella ornithinolytica</i> and other related bacteria in food by lateral-flow test strip immunoassays. <i>Journal of microbiological methods</i> , 147, 43-49.
Liu et al., 2012	Liu, D., Chen, W., Wei, J., Li, X., Wang, Z., & Jiang, X. (2012). A highly sensitive, dual-readout assay based on gold nanoparticles for organophosphorus and carbamate pesticides. <i>Analytical chemistry</i> , 84(9), 4185-4191.
Yang et al., 2010	Yang, D., Zhu, L., & Jiang, X. (2010). Electrochemical reaction mechanism and determination of Sudan I at a multi wall carbon nanotubes modified glassy carbon electrode. <i>Journal of Electroanalytical Chemistry</i> , 640(1-2), 17-22.
Majidi et al., 2013	Majidi, M. R., Fadakar Bajeh Baj, R., & Naseri, A. (2013). Carbon nanotube–ionic liquid (CNT–IL) nanocomposite modified sol-gel derived carbon-ceramic electrode for simultaneous determination of sunset yellow and tartrazine in food samples. <i>Food analytical methods</i> , 6(5), 1388-1397.

Bagheri et al., 2013	Bagheri, H., Afkhami, A., Shirzadmehr, A., Khoshsafar, H., Khoshsafar, H., & Ghaedi, H. (2013). Novel potentiometric sensor for the determination of Cd ²⁺ based on a new nano-composite. <i>International Journal of Environmental Analytical Chemistry</i> , 93(5), 578-591.
Teow et al., 2011	Teow, Y., Asharani, P. V., Hande, M. P., & Valiyaveetil, S. (2011). Health impact and safety of engineered nanomaterials. <i>Chemical communications</i> , 47(25), 7025-7038.
Demetzos, 2016b	Demetzos, C. (2016). Nanotoxicity and Biototoxicity. In <i>Pharmaceutical Nanotechnology</i> (pp. 175-188). Adis, Singapore.
Hajipour et al., 2012	Hajipour, M. J., Fromm, K. M., Ashkarran, A. A., de Aberasturi, D. J., de Larramendi, I. R., Rojo, T., Mahmoudi, M. (2012). Antibacterial properties of nanoparticles. <i>Trends in biotechnology</i> , 30(10), 499-511.
Chaudhry & Castle, 2011	Chaudhry, Q., & Castle, L. (2011). Food applications of nanotechnologies: an overview of opportunities and challenges for developing countries. <i>Trends in Food Science & Technology</i> , 22(11), 595-603.
Jeevanandam et al., 2019	Jeevanandam, J., San Chan, Y., & Danquah, M. K. (2019). Zebrafish as a model organism to study nanomaterial toxicity. <i>Emerging Science Journal</i> , 3(3), 195-208.
d'Amora et al., 2018	d'Amora, M., Cassano, D., Pocoví-Martínez, S., Giordani, S., & Voliani, V. (2018). Biodistribution and biocompatibility of passion fruit-like nano-architectures in zebrafish. <i>Nanotoxicology</i> , 12(8), 914-922.
Cassano et al., 2019	Cassano, D., Mapanao, A. K., Summa, M., Vlamidis, Y., Giannone, G., Santi, M., Guzzolino, E.; Pitto, L.; Polisenio, L.; Bertorelli, R. (2019). Biosafety and biokinetics of noble metals: the impact of their chemical nature. <i>ACS Applied Bio Materials</i> , 2(10), 4464-4470.
Kookana et al., 2014	Kookana, R. S., Boxall, A. B., Reeves, P. T., Ashauer, R., Beulke, S., Chaudhry, Q., Cornelis, G.; Fernandes, T.F.; Gan, J.; Kah, M. (2014). Nanopesticides: guiding principles for regulatory evaluation of environmental risks. <i>Journal of agricultural and food chemistry</i> , 62(19), 4227-4240.
Amenta et al., 2015	Amenta, V., Aschberger, K., Arena, M., Bouwmeester, H., Moniz, F. B., Brandhoff, P., Gottardo, S.; Marvin, H.J.; Mech, A.; Pesudo, L.Q. (2015). Regulatory aspects of nanotechnology in the agri/feed/food sector in EU and non-EU countries. <i>Regulatory Toxicology and Pharmacology</i> , 73(1), 463-476.
O'Brien & Cummins, 2010	O'Brien, N., & Cummins, E. (2010). Ranking initial environmental and human health risk resulting from environmentally relevant nanomaterials. <i>Journal of Environmental Science and Health Part A</i> , 45(8), 992-1007.
Nile et al., 2020	Nile, S. H., Baskar, V., Selvaraj, D., Nile, A., Xiao, J., & Kai, G. (2020). Nanotechnologies in food science: applications, recent trends, and future perspectives. <i>Nano-micro letters</i> , 12(1), 1-34.