



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής  
Σχολή Επιστημών Τροφίμων  
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
**ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Νάνο και Μικρομηχανικές Δομές για Ενίσχυση Σταθερότητας και  
Ελεγχόμενη Μεταφορά Βιοδραστικών Συστατικών**

MSc Thesis

**Nano and Microengineered Structures for Enhancing Stability and  
Controlled Transportation of Bioactive Compounds**

Διευθυντής

**Καθ. Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων (ΠΑ.Δ.Α) Βασιλεία Σινάνο-  
γλου**

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ/NAME OF STUDENT

Γεωργία Κρεμεζή

Georgia Kremezi

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ/NAME OF THE SUPERVISOR

Σπυρίδων Κοντελής

Spiridon Konteles

ΑΙΓΑΛΕΩ/AIGALEO 2023

~ 1 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου



Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)

Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 1/74

~ 2 ~

---

## Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



**Κωδικός εγγράφου:** 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 2/74



Faculty of Food Sciences  
Department of Food Science and Technology

Master of Science  
**FOOD INNOVATION, QUALITY AND SAFETY**

MSc THESIS

**Nano and Microengineered Structures for Enhancing Stability and  
Controlled Transportation of Bioactive Compounds**

GEORGIA KREMEZI  
21017

tzortzina735@gmail.com

SUPERVISOR  
SPIRIDON KONTELES

AIGALEO 2023

~ 3 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 3/74

## Επιτροπή Αξιολόγησης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Οι υπογράφοντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (master thesis) με τίτλο **‘Νάνο και Μικρομηχανικές Δομές για Ενίσχυση Σταθερότητας και Ελεγχόμενη Μεταφορά Βιοδραστικών Συστατικών’** που παρουσιάστηκε από την **Κρεμεζή Γεωργία**, υποψηφίου για τον μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών στην ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

### **Κοντελής Σπυρίδων**

Όνομα επιβλέποντος  
Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Ψηφιακή Υπογραφή

### **Χωριανόπουλος Νίκος**

Όνομα μέλους επιτροπής  
Αναπληρωτής Καθηγητής Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

Ψηφιακή Υπογραφή

### **Παπαδοπούλου Όλγα**

Όνομα μέλους επιτροπής  
Ακαδημαϊκός Υπόστροφος Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Ψηφιακή Υπογραφή

~ 4 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου



Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)

Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 4/74

## Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Εργασίας

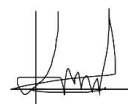
Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η **Κρεμεζή Γεωργία** του **Θεόδωρου**, με αριθμό μητρώου **21017** φοιτητής/τρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «**Καινοτομία, Ποιότητα και Ασφάλεια Τροφίμων**» του Τμήματος **Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων** της Σχολής **Επιστημών Τροφίμων** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι **6 μήνες** και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο/Η Δηλών/ούσα



~ 5 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



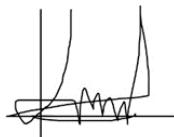
Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 5/74

## Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright

Έχοντας πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικής ιδιοκτησίας, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστική συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλώνω, επίσης, ότι αναλαμβάνω όλες τις συνέπειες, όπως αυτές νομίμως ορίζονται, στην περίπτωση που διαπιστωθεί διαχρονικά ότι η εργασία μου αυτή ή τμήμα αυτής αποτελεί προϊόν λογοκλοπής.

Γεωργία Κρεμεζή



~ 6 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 6/74

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και συγκεκριμένα το Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, που έκαναν δεκτή την αίτησή μου για ένταξη στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Καινοτομία, Ποιότητα και Ασφάλεια Τροφίμων» και που μου έδωσαν τη δυνατότητα να εμβαθύνω στον τομέα αυτό και να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Σπυρίδωνα Κοντελέ, που μου εμπιστεύτηκε το συγκεκριμένο θέμα και πίστεψε στις γνώσεις μου, καθώς και για την άριστη επικοινωνία, συνεργασία και κατανόηση που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου, που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζουν σε όποιο στόχο θέσω να φέρω εις πέρας.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Γεωργία Κρεμεζή

~ 7 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 7/74

## Συντομογραφίες

ADME (Absorption, Distribution, Metabolism, Excretion)

Απορρόφηση, Διανομή, Μεταβολισμός, Απέκκριση

AITC	Ισοθειοκυανικό αλλύλιο
CZ	Ζεΐνη καλαμποκιού
EDTA	Αιθυλενοδιάμινο Τετραοξικό Οξύ
EGCG	Επιγαλοκατεχίνη
ENMs	Τεχνητά νανοϋλικά
H.L.B	Υδρόφιλη-Λιπόφιλη Ισορροπία
LCT	Τριγλυκερίδια μακράς αλυσίδας
LMP	Χαμηλή μεθοξυπηκτίνη
MCT	Τριγλυκερίδια μέσης αλυσίδας
MLVs	Μεγάλα κυστίδια πολλών στρωμάτων
NLCs	Νανοδομημένοι Λιπιδικοί Μεταφορείς
SCT	Τριγλυκερίδια βραχείας αλυσίδας
SLNs	Λιπιδικά Νανοσωματίδια
SLVs	Μικρά κυστίδια μονού στρώματος
SPI	Απομονωμένη πρωτεΐνη σόγιας
WPI	Απομονωμένη πρωτεΐνη ορού γάλακτος

~ 8 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 8/74



## Περίληψη

Οι σύγχρονες ανάγκες στον κλάδο των τροφίμων απαιτούν καινοτόμες και εφαρμόσιμες τεχνολογίες για την κάλυψη των καταναλωτικών και βιομηχανικών αναγκών. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθούν οι Νάνο και Μικρομηχανικές δομές που χρησιμοποιούνται στα τρόφιμα για την ενίσχυση της σταθερότητας και την ελεγχόμενη μεταφορά βιοδραστικών συστατικών στα τρόφιμα. Πιο συγκεκριμένα θα μελετηθούν νανοδομές και μικροδομές οι οποίες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στον τομέα των τροφίμων καθώς και τεχνολογίες όπως η ηλεκτροϊονοποίηση που έχει ως στόχο την απελευθέρωση βιοδραστικών ενώσεων με την παραγωγή νανοϊνών. Επιπλέον, θα μελετηθούν Μίκρο και Νάνο Επιφάνειες, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της λειτουργικότητας των υλικών συσκευασίας ή να εφαρμοστούν απευθείας σε επιφάνειες τροφίμων με στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Θα γίνει έρευνα για μεθόδους και υλικά για την παραγωγή μικροσωματιδίων και νανοσωματιδίων, καθώς και πλήρης ανάλυση της εκτίμησης των δομών αυτών στη σταθερότητα, μαζί με ανάλυση πεδίων που βρίσκουν εφαρμογή.

**Λέξεις – Κλειδιά:** Συστήματα Νανοπαραγωγής, Βιοδραστικές Ενώσεις, Ενίσχυση Σταθερότητας, Νάνο – Μίκρο Μηχανικές Δομές

~ 9 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 9/74

## Abstract

Recent needs in the food industry require innovative and applicable technologies to meet consumer and industrial needs. The aim of this thesis is to examine the Nano and Micromechanical structures used in the food matrix for the enhancement of the stability and controlled transfer of bioactive ingredients in food. More specifically, a variety of nanostructures and microstructures which find great application in the food sector will be studied, as well as technologies such as electrospinning which aims to release bioactive compounds through the production of nanofibers. In addition, Micro and Nano Surfaces will be studied, where they can be used for the enhancement of the functionality of packaging materials or be applied directly to food surfaces, with the aim of increasing their shelf life. Methods and materials for the production of microparticles and nanoparticles will be researched, as well as a full analysis of the stability assessment of these structures, together with an analysis of fields of application.

**Key words:** Delivery Systems, Bioactive Compounds, Stability Enhancement, Nano-Micro Engineered Structures

~ 10 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 10/74

## Περιεχόμενα

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright .....	6
Ευχαριστίες .....	7
Συντομογραφίες.....	8
Περίληψη.....	9
Abstract .....	10
Κατάλογος εικόνων .....	13
<b>Κεφάλαιο 1 .....</b>	<b>15</b>
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Νανοτεχνολογία.....	16
1.3 Βιοδραστικές Ενώσεις.....	18
<b>Κεφάλαιο 2 .....</b>	<b>20</b>
2.1 Συστήματα Νανοπαραγωγής .....	20
2.1.1 Νανογαλακτώματα (Nanoemulsions).....	20
2.1.2 Λιποσώματα .....	22
2.1.3 Πολυμεροσώματα.....	23
2.1.4 Νανοκρύσταλλοι .....	24
2.1.5 Λιπιδικά Νανოსωματίδια.....	25
2.1.6 Πολυμερικά Νανοςωματίδια.....	26
2.2 Ιδιότητες των Συστημάτων Νανοπαραγωγής με σημασία στις Νάνο-Βίο Αλληλεπιδράσεις.....	27
2.3 Απορρόφηση, Διανομή, Μεταβολισμός και Απέκκριση Νανοςωματιδίων (ADME).....	29
2.3.1 Έγχυση στο στομάχι .....	29
2.3.2 Απορρόφηση.....	30
2.3.3 Κατανομή και Μεταβολισμός .....	30
2.3.4 Απέκκριση .....	31
2.4 Κατάληξη της βιοενεργής ουσίας.....	31
<b>Κεφάλαιο 3 .....</b>	<b>33</b>
3.1 Γραμμικές Νανοδομές και Μικροδομές (1D Δομές) (Linear Nano and Microstructures) .....	33
3.1.1 Ίνες και Νανοσωλήνες (Fibres and Nanotubes).....	33
3.1.2 Υλικά και Μέθοδοι Παραγωγής Γραμμικών Κατασκευών.....	33
3.1.2.1 Ηλεκτροϊννοποίηση (Electrospinning) .....	33
3.1.3 Εφαρμογές γραμμικών κατασκευών.....	36
3.2 Μικροεπιφάνειες και Νανοεπιφάνειες (Δισδιάστατες Δομές) .....	37
3.2.1 Μεμβράνες και επιστρώσεις (Films and Coatings).....	37

~ 11 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 11/74

3.2.2 Μεμβράνες και επιστρώσεις για ενεργή συσκευασία .....	39
3.3 Δομές.....	41
3.3.1 Μέθοδοι και Υλικά για την Παραγωγή Μικροσωματιδίων και Νανοσωματιδίων .....	41
3.4 Εφαρμογές Τρισδιάστατων Δομών.....	53
3.4.1 Απελευθέρωση καφεΐνης από νανοσωματίδια πρωτεΐνης.....	53
3.4.2 Τα ελαιοπήγματα ως αντικαταστάτες λίπους.....	54
3.4.3 Γαλακτώματα-Bigels με βάση τα ελαιοπήγματα .....	56
3.5 Τρισδιάστατη Εκτύπωση Τροφίμων .....	58
3.5.1 Τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων και διαθέσιμα συστήματα.....	60
3.6 Τοξικολογική Εκτίμηση Μίκρο και Νάνο Μηχανικών Δομών.....	61
<b>Κεφάλαιο 4 .....</b>	<b>63</b>
4.1 Θέματα ασφαλείας στη χρήση νανοϋλικών στη βιομηχανία τροφίμων.....	63
4.2 Συμπεριφορά μίκρο και νανοσυστημάτων σε μοντέλα τροφίμων .....	64
4.2.1 Προσομοιωτές – Μοντέλα τροφίμων .....	64
4.2.2 Μήτρες τροφίμων .....	65
<b>Κεφάλαιο 5 .....</b>	<b>68</b>
5.1 Συμπεράσματα.....	68
5.2 Μελλοντική έρευνα.....	70
<b>Αναφορές .....</b>	<b>71</b>

~ 12 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 12/74

## Κατάλογος εικόνων

**Εικόνα 1:** Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην ασφάλεια των τροφίμων, τη συσκευασία τροφίμων και την επεξεργασία τροφίμων.

**Εικόνα 2:** Είδη βιοδραστικών ενώσεων.

**Εικόνα 3:** Ταξινόμηση συστημάτων νανοπαράδοσης.

**Εικόνα 4:** Γενική απεικόνιση των νανογαλακτωμάτων.

**Εικόνα 5:** Μεγεθυμένη απεικόνιση τμήματος της διπλοστοιβάδας από φωσφολιπίδια ενός λιποσώματος με παρουσίαση των υδρόφιλων ομάδων της κεφαλής και το υδρόφοβο τμήμα.

**Εικόνα 6:** Γενική απεικόνιση των πολυμεροσωμάτων.

**Εικόνα 7:** Γενική δομή νανοκρυστάλλων.

**Εικόνα 8:** Γενική δομή λιπιδικών νανοσωματιδίων.

**Εικόνα 9:** Γενική δομή πολυμερικών νανοσωματιδίων. Το βέλος υποδηλώνει την ύπαρξη βιοδραστικής ουσίας στο εσωτερικό του νανοσωματιδίου.

**Εικόνα 10:** Διάγραμμα ροής της διαδρομής που ακολουθεί ένα νανοσωματίδιο μέσα στο σώμα.

**Εικόνα 11:** Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της ηλεκτροϊονοποίησης (πάνω) και σχηματική απεικόνιση από μικροσκόπιο των ινών που σχηματίζονται (κάτω).

**Εικόνα 12:** Σχηματική απεικόνιση της αυτοσυναρμολόγησης.

**Εικόνα 13:** Σχηματισμός νανοκαψουλών με ενθυλακωμένη ουσία κάνοντας χρήση μίας αρνητικά φορτισμένης ένωσης, μίας θετικά φορτισμένης ένωσης και ενός αντίθετου ιόντος άλας.

**Εικόνα 14:** Αναπαράσταση της κατακρήμνισης με αντιδιαλύτη μοριακού διαλύματος ζεΐνης (σε υδατική αιθανόλη) με αραιώση σε νερό προς λήψη σφαιρικών κολλοειδών σωματιδίων. Εικόνα μικροσκοπίας διέλευσης των σωματιδίων της κλίμακας 500 nm.

**Εικόνα 15:** Αναπαράσταση αυθόρμητης συμπλοκοποίησης, αριστερά αλκαλοειδής βερβερίνη, μέση διάλυμα EGCG (επιγαλοκατεχίνη), δεξιά κολλοειδές σύμπλοκο.

**Εικόνα 16:** Απεικονίσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διέλευσης των σωματιδίων του κολλοειδούς συμπλόκου που παρασκευάστηκε στην **Εικόνα 15** κλίμακας 500nm (A) και 200nm (B).

**Εικόνα 17:** Υδρόφιλη – λιπόφιλη ισορροπία και η επίδρασή της στον γαλακτωματοποιητή.

**Εικόνα 18:** Εικόνα γαλακτώματος (αριστερά) και εικόνα cryo-SEM (δεξιά) με κλάσμα όγκου φάσης διασποράς 0,82, που παρουσιάζει τα κολλοειδή σύμπλοκα που σχηματίζονται στην επιφάνεια των σταγονιδίων ελαίου.

**Εικόνα 19:** Αριστερά σε ουδέτερο pH, σταθερό γαλάκτωμα – Μέση σε όξινο pH, αφρώδες γαλάκτωμα – Δεξιά μετά από εξουδετέρωση, σταθερό γαλάκτωμα.



**Εικόνα 20:** Εικόνες μικροσκοπίας με το μέγεθος των σταγονιδίων των παραπάνω γαλακτωμάτων (από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα). Κλίμακα μέτρησης: 50μm, 100μm, 50μm..

**Εικόνα 21:** Καμπύλη κατανομής μεγέθους των σωματιδίων των κολλοειδών συμπλόκων μεθυλοκυτταρίνης και πολυφαινολικού ταννικού οξέος. Αριστερά: κολλοειδής διασπορά ενός τέτοιου συμπλόκου. Δεξιά: TEM εικόνα της διασποράς κλίμακας 200nm.

**Εικόνα 22:** Συνεστιακή μικροσκοπία, γαλακτώματα αφρού κλίμακας 250mm και 25mm. Απεικονίζονται οι φυσαλίδες αέρα ως σκούρες κηλίδες και οι σταγόνες ελαίου ως γκρι κηλίδες. Πάνω δεξιά: μία φυσαλίδα αέρα που περιβάλλεται από τα σταγονίδια ελαίου σε τρισδιάστατη μορφή.

**Εικόνα 23:** Απεικόνιση σχηματισμού ελαιοπήγματος ενός γαλακτωματοποιημένου υγρού ελαίου που έχει υποστεί αποξήρανση και διάτμηση. Τα κίτρινα σταγονίδια που απεικονίζονται είναι σταγονίδια γαλακτώματος με προσροφημένο στρώμα ζελατίνης (κόκκινο χρώμα) και φύλλα κόμμεως ξανθάνης (πράσινο χρώμα). Με μπλε απεικονίζεται το νερό που απομακρύνεται με ξήρανση και οδηγούνται τα σταγονίδια ελαίου σε σφιχτό πακετάρισμα. Συσκευασμένα σταγονίδια σχηματίζονται μετά από διάτμηση του αποξηραμένου ελαίου που οδηγεί σε σχηματισμό ελαιοπήγματος.

**Εικόνα 24:** Τήξη παγωτών με 4g/100g λίπους, παρασκευασμένα με κρέμα γάλακτος (MC4), με ηλιέλαιο (SO4), με ελαιογέλη με 8g/100g ζελατινοποιητές (OG4\_8) και με ελαιογέλη με 12g/100g ζελατινοποιητές (OG4\_12). Η λήψη των εικόνων πραγματοποιείται στην αρχή των δοκιμών(T0), μετά από 30 λεπτά(T30), μετά από 60 λεπτά (T60) και μετά από 90 λεπτά (T90).

**Εικόνα 25:** Απεικόνιση φωτεινού πεδίου Bigels με διαφορετικούς πιθανούς συνδυασμούς σύνθεσης των σκευασμάτων.

**Εικόνα 26:** (A) Απεικόνιση εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων, (B) Κεφαλή εκτύπωσης.

~ 14 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 14/74

## Κεφάλαιο 1

### 1.1 Εισαγωγή

Οι βιοενεργές ενώσεις υπάρχουν ως φυσικά συστατικά στα τρόφιμα, με τα πιο κοινά να είναι τα αντιοξειδωτικά, τα προβιοτικά, τα πολυακόρεστα, ακόμα και οι πρωτεΐνες και προσφέρουν θρεπτική αξία στο προϊόν, καθώς επίσης και πολλαπλά οφέλη στην υγεία του ανθρώπου. Οι βιοδραστικές ενώσεις ή όπως ορίστηκε το 1979 από τον Stephan DeFelice ο όρος «nutraceuticals», αντικατοπτρίζει την ύπαρξή τους στην διατροφή του ανθρώπου και τη βιολογική τους δραστηριότητα. Ως nutraceuticals μπορεί να είναι είτε μεμονωμένα θρεπτικά συστατικά και συμπληρώματα διατροφής, είτε γενετικά τροποποιημένα τρόφιμα, φυτικά προϊόντα, ή ακόμα και επεξεργασμένα τρόφιμα όπως δημητριακά, ποτά και σούπες. Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για διατροφικά προϊόντα με βιοενεργές ουσίες οφείλεται στα μέσα ενημέρωσης, από τα οποία ο καταναλωτής ενημερώνεται για επιστημονικές μελέτες που αποδεικνύουν ότι τα προϊόντα αυτά είναι πιο ωφέλιμα για την υγεία του [Biesalski 2009].

Οι περισσότερες μελετημένες βιοδραστικές ενώσεις είναι τα φλαβονοειδή, η κουρκουμίνη, τα καροτενοειδή και το ασκορβικό οξύ όπου μέσω κλινικών μελετών σε ανθρώπους, επιβεβαιώθηκε η ισχύς που εμφανίζουν αυτές οι βιοδραστικές ενώσεις στη διατήρηση της ανθρώπινης υγείας [Patil 2009].

Τα βιοενεργά τρόφιμα είναι γνωστά για την πρόληψη που μπορεί να προσφέρουν έναντι της γήρανσης, του καρκίνου ακόμα και άλλων ασθενειών, με αποτέλεσμα την βελτίωση της υγείας των καταναλωτών. Το μέλλον της βιοδραστικής ένωσης και το που θα καταλήξει εξαρτάται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες που παρουσιάζει (μέγεθος, φορτίο, υδροφοβικότητα, μόρια στόχευσης), καθώς και από τη θέση στην οποία θα απελευθερωθεί. Η ασφάλεια όμως των συστημάτων αυτών για χρήση στα τρόφιμα δεν είναι γνωστή. Για το λόγο αυτό χρειάζονται μελέτες και πειράματα in vivo, in vitro και in silico ώστε να μελετηθεί εκτενώς η ασφάλεια των συστημάτων αυτών με εφαρμογές στα τρόφιμα και στη γεωργία [Borel 2014].

~ 15 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 15/74

## 1.2 Νανοτεχνολογία

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής η Εθνική Πρωτοβουλία Νανοτεχνολογίας έχει ορίσει τη νανοτεχνολογία ως «η κατανόηση και ο έλεγχος της ύλης σε νανοκλίμακα όπου μοναδικά φαινόμενα επιτρέπουν νέες εφαρμογές». Τα νανοϋλικά ορίζονται ως ουσίες με μέγεθος της τάξης των 1-100 nm που παρουσιάζουν φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες, οι οποίες δεν βρίσκονται σε μαζικά δείγματα του ίδιου υλικού. Το μέγεθός τους που είναι μικρό και η επιφάνειά τους που είναι μεγάλη, προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή, καλύτερη σταθερότητα καθώς και χημικές και βιολογικές δραστηριότητες [National Nanotechnology Initiative]. Είναι μία καινούργια και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που έχει πλέον ενταχθεί σε διάφορους τομείς, όπως η ιατρική, η γεωργία και η βιομηχανία τροφίμων [Singh 2017].

Στη βιομηχανία τροφίμων, η νανοτεχνολογία εμφανίζει μεγάλο ενδιαφέρον ως ανερχόμενη τεχνολογία στον τομέα της επεξεργασίας, της ασφάλειας και της συσκευασίας των τροφίμων (**Εικόνα 1**). Μπορεί να γίνει χρήση της στην επεξεργασία τροφίμων με στόχο τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας των τροφίμων, περιλαμβάνοντας και τη γεύση, το άρωμα και τη βιοδιαθεσιμότητα, ενώ ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με στόχο την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων. Για παράδειγμα, οι νανοκάψουλες χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της βιοδιαθεσιμότητας των θρεπτικών ουσιών ενώ η νανοενθυλάκωση της γεύσης χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της γεύσης των τροφίμων και οι νανοσωλήνες μπορούν να κάνουν χρήση νανοσωματιδίων ως παράγοντες ζελατινοποίησης και ιξώδους. Επιπλέον, τα νανογαλακτώματα και τα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της βιοδιαθεσιμότητας και της απελευθέρωσης των θρεπτικών ουσιών [Mohammad 2022].

Για την ασφάλεια των τροφίμων, η νανοτεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ανιχνευθούν παθογόνοι μικροοργανισμοί και τοξίνες στα τρόφιμα ή ακόμα και για την ενίσχυση των ιδιοτήτων φραγμού. Στη συσκευασία από την άλλη, γίνεται χρήση της νανοτεχνολογίας ως αντιμικροβιακό όπως και για την παραγωγή έξυπνων συσκευασιών. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μικροβιακής μόλυνσης, τη βελτίωση της βιοδιαθεσιμότητας των θρεπτικών ουσιών και τη βελτίωση μηχανικών φραγμών. Από αυτή την άποψη, βρίσκονται ήδη σε ισχύ εφαρμογές βιοενεργού ενθυλάκωσης στον τομέα της απελευθέρωσης ή της παροχής θρεπτικών ουσιών [Mohammad 2022].

~ 16 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

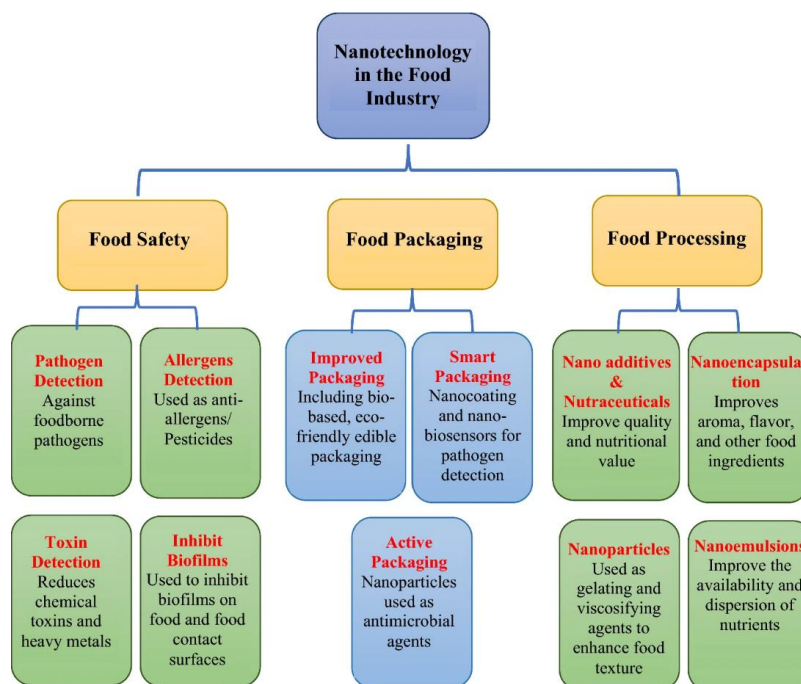
Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 16/74





**Εικόνα 1:** Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην ασφάλεια των τροφίμων, τη συσκευασία τροφίμων και την επεξεργασία τροφίμων [Mohammad 2022].

Η νανοτεχνολογία θεωρείται μια προσέγγιση για την πρόληψη και τη θεραπεία διαφόρων επιπλοκών της ανθρώπινης υγείας, συμπεριλαμβανομένης της καταπολέμησης των παθοφυσιολογικών καταστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, νέοι τρόποι χορήγησης από του στόματος φαρμάκων ερευνώνται και αναπτύσσονται επί του παρόντος με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας. Έχει γίνει σπουδαία έρευνα τα τελευταία χρόνια για να ελεγχθεί η εισροή που παρέχεται από νανοϋλικά και νανοσωματίδια σε ένα εύρος παθοφυσιολογικών καταστάσεων. Τα νανοσωματίδια έχουν συμβάλει μέχρι στιγμής στην προστασία των ενθυλακωμένων βιοδραστικών ενώσεων από την αποικοδόμηση λόγω της γαστρεντερικής πέψης και του κυτταρικού μεταβολισμού, επιτρέποντας την ελεγχόμενη απελευθέρωσή τους, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η βιοκατανομή των βιοδραστικών ουσιών και να επιτρέπεται η στόχευση σε ιστούς που πάνω τους επιδρούν βιολογικές επιπλοκές [Martínez-Ballesta 2018].

Στην πραγματικότητα, χρειάζεται να γίνει κατανόηση των προβλημάτων που αφορούν τη βιοδιαθεσιμότητα μίας συγκεκριμένης ένωσης ώστε να βρεθούν λύσεις που θα οδηγήσουν στην υπέρβαση των προβλημάτων αυτών. Η ύπαρξη καινούργιων τεχνολογιών με στόχο την αποτελεσματική και ασφαλή χορήγηση νέων βιοενεργών ενώσεων, έχει προκαλέσει ενδιαφέρον για δημιουργία και απόκτηση νέων «έξυπνων» συστημάτων χορήγησης, τα οποία βοηθούν στη βελ-



τίωση των ιδιοτήτων των ενώσεων που χορηγούνται. Για το λόγο αυτό, μία μελέτη που έχει ως στόχο την αποτροπή της χαμηλής βιοδιαθεσιμότητας και της συχνής τοξικότητας και η οποία σχετίζεται κάπως με τη χρήση ξένων σωματιδίων σαν φορείς των βιοδραστικών ενώσεων που είναι υπό ενδιαφέρον, είναι η χρήση νανοσωματιδίων τα οποία κατασκευάζονται με ασφαλή υλικά όπως είναι τα πολυμερή νανοσωματίδια και τα λιποσώματα. Η χρήση αυτών των φορέων, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα που αφορούν την παραδοσιακή συστηματική χορήγηση, μιας και η προσέγγιση αυτή προσφέρεται ως ένα σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της προσφοράς βιοδραστικών παραγόντων στις θέσεις στόχους [Martínez-Ballesta 2018].

### 1.3 Βιοδραστικές Ενώσεις

Η ανάπτυξη τομέων όπως της σύγχρονης βιολογίας, χημείας, μοριακής βιολογίας και βιοχημείας επέτρεψε την απομόνωση βιοδραστικών ενώσεων όπως επίσης και τη διερεύνηση των ευεργετικών επιπτώσεων τους στον οργανισμό του ανθρώπου [de Souza Simões 2017]. Ως βιοδραστική ένωση νοείται ένα είδος χημικής ουσίας που βρίσκεται σε μικρές ποσότητες σε φυτά και σε μερικά τρόφιμα, όπως είναι τα φρούτα, τα λαχανικά, οι ξηροί καρποί, τα έλαια και τα δημητριακά ολικής αλέσεως. Οι βιοδραστικές ενώσεις εμφανίζουν δράσεις στο σώμα που μπορεί να προσφέρουν καλή υγεία. Παραδείγματα βιοδραστικών ενώσεων είναι το λυκοπένιο, η ρεσβερατρόλη, η λιγνάνη, οι τανίνες και οι ινδόλες [National Cancer Institute].

Οι βιοδραστικές ενώσεις αποτελούν μόρια που προσφέρουν διάφορα οφέλη στην υγεία του ανθρώπου κυρίως με το να προλαμβάνουν ή να καθυστερούν την εμφάνιση διαφόρων ασθενειών. Τέτοιες ενώσεις είναι αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις ή αντικαρκινικές (**Εικόνα 2**). Για το λόγο αυτό, οι ιδιότητες που προσφέρουν οι ενώσεις αυτές χρειάζεται να διατηρούνται μέχρι τη στιγμή που θα χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένο σημείο [de Souza Simões 2017].

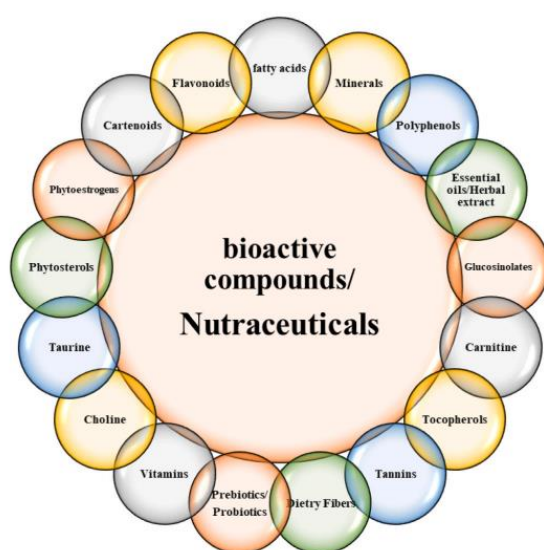
Στα τρόφιμα, ενώσεις όπως τα αντιοξειδωτικά, τα αντιμικροβιακά, οι βιταμίνες, τα προβιοτικά, τα πρεβιοτικά, τα μέταλλα, και οι πολυφαινόλες, δεν έχουν τη δυνατότητα να προστεθούν σε καθαρή κατάσταση στις μήτρες αυτών, διότι εμφανίζουν ευαισθησία στη φυσική, χημική και ενζυμική αποικοδόμηση κατά τις διαδικασίες της επεξεργασίας, της μεταφοράς και της αποθήκευσης, ή ακόμα κάποιες φορές και εξαιτίας της χαμηλής υδατοδιαλυτότητας που εμφανίζουν. Η αποτελεσματικότητα των ουσιών αυτών, υπάρχει περίπτωση να επηρεαστεί από συνθήκες όπως η έκθεση στο φως, η θερμότητα, το νερό και το οξυγόνο, με αποτέλεσμα τη μειωμένη δραστηριότητα ή ακόμα και τη μειωμένη διάρκεια ζωής τους. Επίσης, η αποικοδόμηση που μπορεί να υποστούν μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση της γεύσης ή και του χρώματος των τροφίμων που προστίθενται [de Souza Simões 2017].

Παράδειγμα του τελευταίου αφορούν ανόργανα μέταλλα όπως σίδηρο και ψευδάργυ-



ρο, τα οποία μπορεί να αντιδράσουν με άλλα συστατικά μέσα στο τρόφιμο με τρόπο που να προκαλέσει αλλαγές στη βιοδραστικότητα και τη σταθερότητά τους. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η ενθυλάκωσή τους για την προσθήκη σε τρόφιμα με μεγάλη συγκέντρωση νερού, ενώ ταυτόχρονα θα μπορούν να διατηρούν τη βιοδιαθεσιμότητά τους και να αποτραπούν πιθανές ανεπιθύμητες συνέπειες [de Souza Simões 2017].

Στα τρόφιμα, η προσθήκη ενθυλακωμένων ενώσεων μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή πιθανών θρεπτικών απωλειών που μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ή της αποθήκευσης των τροφίμων. Επιπροσθέτως, η ενθυλάκωση είναι επιθυμητό να προσφέρει προστασία κατά την πέψη και την εντερική καταπόνηση ώστε να υπάρξει βέλτιστη απορρόφηση από το λεπτό έντερο μέχρι να φτάσουν στο αίμα οι επιθυμητές βιοενεργές ουσίες [de Souza Simões 2017].



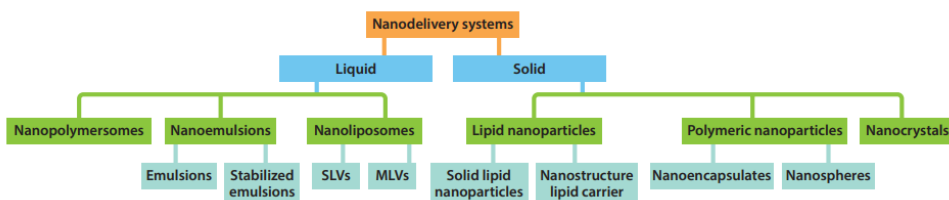
**Εικόνα 2:** Είδη βιοδραστικών ενώσεων [Rashidi 2021].



## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Συστήματα Νανοπαραγωγής

Με τη διαδικασία της νανοπαραγωγής προσφέρεται έλεγχος της σταθερότητας, της διαλυτότητας και της βιοδιαθεσιμότητας όπως επίσης και έλεγχος στην μεταφορά βιοδραστικών ενώσεων στα τρόφιμα. Τα συστήματα νανοπαραγωγής (**Εικόνα 3**) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα υγρά και στα στερεά. Στα υγρά συστήματα ανήκουν τα νανογαλακτώματα, τα νανολιποσώματα και τα νανοπολυμεροσώματα, ενώ στα στερεά ανήκουν οι νανοκρύσταλλοι, τα νανοσωματίδια λιπιδίων και τα πολυμερή νανοσωματίδια. Η ομάδα των λιπιδικών νανοσωματιδίων χωρίζεται σε στερεά λιπιδικά νανοσωματίδια (SLNs) και νανοδομημένους λιπιδικούς μεταφορείς (NLCs). Τα πολυμερή νανοσωματίδια από την άλλη, μπορούν να σχηματίσουν τη μορφή τόσο νανοσφαιρών αλλά και νανοκαψουλών. Και οι δύο αυτές κατηγορίες προσφέρουν αντίστοιχα οφέλη ανάλογα με τη συμβατότητα που εμφανίζουν οι ιδιότητες των νανοσωματιδίων με εκείνες της βιοενεργής ένωσης και με βάση την εφαρμογή που επιθυμείται [Borel 2014].



**Εικόνα 3:** Ταξινόμηση συστημάτων νανοπαράδοσης [Borel 2014].

#### 2.1.1 Νανογαλακτώματα (Nanoemulsions)

Η εφαρμογή νανογαλακτωμάτων είναι η πιο πρόσφατα ανεπτυγμένη εφαρμογή στην τεχνολογία τροφίμων. Μέχρι στιγμής, η εφαρμογή των νανογαλακτωμάτων έχει περιοριστεί στο σχεδιασμό νέων λειτουργικών τροφίμων, μιας και η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη ρύθμιση της απελευθέρωσης βιοδραστικών θρεπτικών ουσιών και μη θρεπτικών ουσιών που εμφανίζουν κακή υδατοδιαλυτότητα [Martínez-Ballesta 2018].

Ένα τυπικό νανογαλάκτωμα περιέχει λάδι, νερό και γαλακτωματοποιητή. Η προσθήκη ενός γαλακτωματοποιητή είναι σημαντική γιατί δημιουργούνται σταγονίδια μικρού μεγέθους, κάτι που οδηγεί σε μείωση της διεπιφανειακής τάσης ανάμεσα στη φάση του ελαίου και στη φάση του νερού, ενώ επίσης συμβάλλει και στη σταθεροποίηση των νανογαλακτωμάτων [Gurta 2016].

Τα νανογαλακτώματα έχουν πιθανή εφαρμογή στα τρόφιμα για την παροχή θρεπτικών ουσιών, χρωστικών και αρωματικών παραγόντων, και αντιμικροβιακών. Υδατικά διαλύματα λιπι-

~ 20 ~



δικών σταγονιδίων που έχουν μέγεθος 100 nm, παρασκευάζονται με διαφορετικές μεθόδους με στόχο την παρασκευή νανογαλακτωμάτων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι η ομογενοποίηση υψηλής πίεσης, η οποία βοηθάει στο να μην επιτευχθεί συσσωμάτωση των σωματιδίων και διαχωρισμός των ενώσεων λόγω βαρύτητας [Martínez-Ballesta 2018].

Πιο συγκεκριμένα, οι λειτουργικές ενώσεις των νανογαλακτωμάτων εμφανίζουν προστασία σε πιθανή αντίδραση με τη μήτρα των τροφίμων, κάτι που βοηθάει στη διατήρηση των οργανοληπτικών ιδιοτήτων αυτών με ταυτόχρονη ενίσχυση της βιοδιαθεσιμότητας των βιοδραστικών ενώσεων χάρη στην ευνοϊκή παθητική μεταφορά με βιολογικές μεμβράνες. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι κατά τη διαδικασία της πέψης, η νανοενθυλάκωση οδηγεί σε αύξηση της διαλυτότητας των βιοενεργών θρεπτικών αλλά και μη συστατικών και βοηθάει στην απορρόφηση τόσο σε εντερικό όσο και σε γαστρικό επίπεδο. Επιπλέον, η χρήση των ενώσεων αυτών με τη βοήθεια νανογαλακτωμάτων προσφέρει ενισχυμένη προστασία, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο μεταβολισμός τους και η δραστηριότητα που έχουν οι μεταφορείς εκροής [Martínez-Ballesta 2018].

Παρά όμως τα στοιχεία που υπάρχουν για τα υλικά αυτά, η χρήση τους φαίνεται να είναι περιορισμένη εξαιτίας της κακής βιοδιαθεσιμότητας που εμφανίζουν. Για τον περιορισμό αυτό ωστόσο υπάρχει η εναλλακτική λύση χρήσης κατάλληλης σύνθεσης γαλακτωματοποιητών που έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την προστασία αυτών των ενώσεων από πιθανές χημικές και ενζυμικές διαταραχές σε εντερικό επίπεδο και ως αποτέλεσμα να προσφέρει ενισχυμένη απορρόφηση και βιοδιαθεσιμότητα. Συνεπώς, ο σωστός συνδυασμός υδρόφοβων και υδρόφιλων γαλακτωματοποιητών μπορεί να βοηθήσει στον περιορισμό αυτό. Συγκεκριμένα ένα παράδειγμα είναι νανογαλακτώματα από λεκιθίνη, που έχουν την ικανότητα να εγκλωβίζουν ρεσβερατρόλη στον πυρήνα των νανοσωματιδίων με τη βοήθεια υδρόφοβων δυνάμεων, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της διάρκειας ζωής των βιοενεργών μορίων και της βιοδιαθεσιμότητάς τους, καθώς και την αύξηση της εντερικής απορρόφησης και της κυτταρικής πρόσληψης [Martínez-Ballesta 2018].

Ένα ακόμα κρίσιμο ζήτημα ωστόσο είναι και η σταθερότητα που προσφέρουν τα νανογαλακτώματα και η οποία επηρεάζεται από συνθήκες όπως είναι το pH, η θερμοκρασία, η ισχύς των ιόντων όπως επίσης και ιδιότητες που προσφέρουν τα σκευάσματα όπως είναι η συγκέντρωση του γαλακτωματοποιητή ή ακόμα και η χρήση πρόσθετων ουσιών οι οποίες πρέπει να επιδέχονται προσεχτική ρύθμιση ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργικότητα των νανογαλακτωμάτων. Επιπλέον, για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μέγεθος των νανογαλακτωμάτων. Για να επιλεγεί το κατάλληλο μέγεθος θα μπορούσε να γίνει χρήση βοηθητικών ουσιών, αφού έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση σταγονιδίων τα οποία είναι παρασκευασμένα από έλαια χαμηλού ιξώδους μπορούν να αγγίξουν τη νανοκλίμακα [Martínez-Ballesta 2018].

~ 21 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

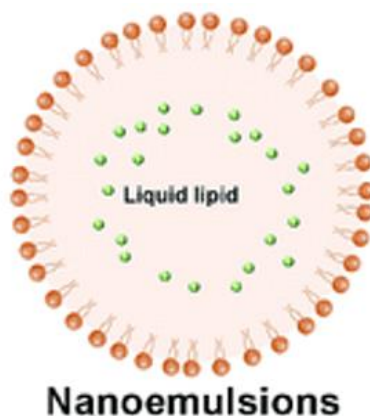
Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 21/74

Παραδείγματα που μπορούν να αναφερθούν στον τομέα αυτόν είναι η **χρήση γαλακτωμάτων ελαιόλαδου που έχουν σταθεροποιηθεί με καζεϊνικό νάτριο, συμπυκνώματος πρωτεΐνης ορού γάλακτος και εστέρα πολυγλυκερίνης που χρησιμοποιήθηκαν με στόχο την αντικατάσταση του ζωικού λίπους στα προϊόντα κρέατος**. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το **κόμμα από χαρούπι για σάλτσες σε σαλάτες και επιδόρπια με μειωμένα λιπαρά**. Αναπτύσσονται επίσης **γαλακτώματα λεμονελαίου για αρώματα τροφίμων και ποτών** [Borel 2014].



**Εικόνα 4:** Γενική απεικόνιση των νανογαλακτωμάτων [Nie 2020].

### 2.1.2 Λιποσώματα

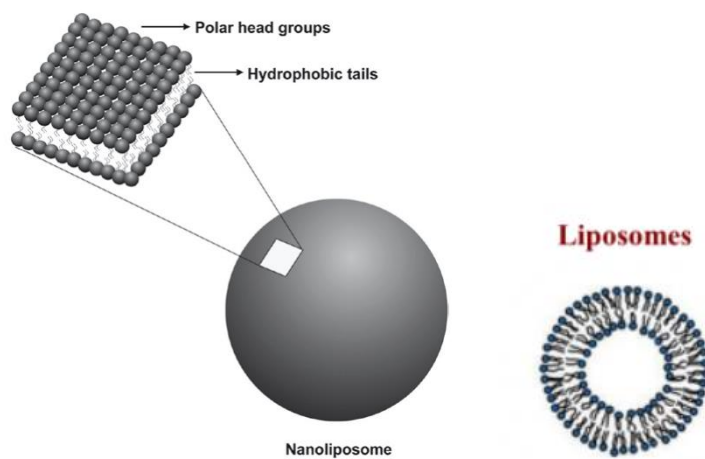
Τα λιποσώματα είναι σωματίδια νανοκλίμακας τα οποία αυτοσυναρμολογούνται και τα οποία δημιουργούνται από φωσφολιπίδια που έχουν τη μορφή διπλοστοιβάδας. Επιπλέον, προσφέρουν τη δυνατότητα μεταφοράς υδρόφιλων μορίων χάρη στο πολικό περιβάλλον που διαθέτει το κυστίδιο. Ταυτόχρονα όμως, είναι πιθανή η μεταφορά υδρόφοβων μορίων, αφού έχουν παγιδευτεί στη διπλοστοιβάδα, κάνοντας χρήση λιποσωμάτων (**Εικόνα 5**). Τα υλικά εκείνα που ενθυλακώνονται με λιποσώματα προστατεύονται από τις εξωτερικές συνθήκες. Επίσης, τα λιποσώματα πλεονεκτούν έναντι άλλων, εξαιτίας της ικανότητας που έχουν να κατασκευάζονται χωρίς τη βοήθεια οργανικών διαλυτών [Borel 2014].

Τα λιποσώματα μπορεί να αποτελούνται από μία μόνο στοιβάδα ή από πολλές στοιβάδες και αναφέρονται αντίστοιχα ως μικρά κυστίδια μονού στρώματος (SLVs) που βρίσκονται στα 100 nm και μεγάλα κυστίδια πολλών στρωμάτων (MLVs), τα οποία βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ των 500 nm και 5 μm. Για τον σχηματισμό λιποσωμάτων χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι: η ήπια ενυδάτωση και η ηλεκτροστατική εναπόθεση που πραγματοποιείται σε κάθε στρώμα ξεχωριστά. Η χρήση των λιποσωμάτων αναπτύχθηκε με στόχο τον **εμπλουτισμό του γάλακτος με σί-**

~ 22 ~



δηρο, και την ταυτόχρονη προσφορά αντιοξειδωτικών και βιταμινών E και C με χυμούς πορτοκάλι [Borel 2014].

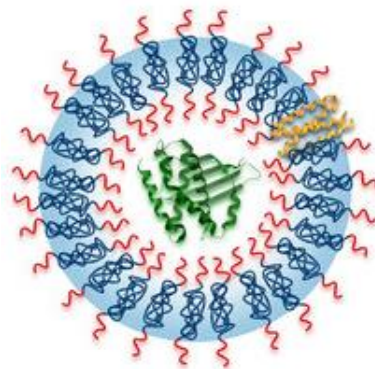


**Εικόνα 5:** Μεγεθυμένη απεικόνιση τμήματος της διπλοστοιβάδας από φωσφολιπίδια ενός λιποσώματος με παρουσίαση των υδρόφιλων ομάδων της κεφαλής και το υδρόφοβο τμήμα [Mozafari 2010].

### 2.1.3 Πολυμεροσώματα

Τα πολυμεροσώματα είναι περίπου ίδια με τα λιποσώματα. Είναι κυστίδια που δημιουργούνται από μία διπλοστοιβάδα, η οποία περιέχει συμπολυμερή τόσο με υδρόφιλο όσο και με λιπόφιλο τμήμα και η οποία περιέχει βιοδραστικές ενώσεις που βρίσκονται εγκλωβισμένες στην κοιλότητα που έχει δημιουργηθεί (**Εικόνα 6**). Όπως και τα λιποσώματα, έτσι και τα πολυμεροσώματα έχουν τη δυνατότητα να εγκλωβίζουν και υδρόφιλες αλλά και υδρόφοβες ουσίες. Αυτό όμως που τα κάνει να ξεχωρίζουν είναι η ελεγχόμενη μεταφορά σε συνδυασμό με την μεγάλη σταθερότητα και την ευελιξία. Για τη σύνθεσή τους χρησιμοποιούνται τρία συμπολυμερή (πολυκαπρολακτόνη-πολυαιθυλενογλυκόλη-πολυκαπρολακτόνη) και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιούνται και για τη σύνθεση των πολυμερικών νανοσωματιδίων [Borel 2014].





## Polymersomes

**Εικόνα 6:** Γενική απεικόνιση των πολυμεροσωμάτων [Moncalvo 2020].

### 2.1.4 Νανοκρύσταλλοι

Ένας νανοκρύσταλλος αποτελείται από ένα σύνολο από αρκετές εκατοντάδες ως και δεκάδες χιλιάδες άτομα τα οποία συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα κρυσταλλικό σωματίδιο. Το σωματίδιο αυτό έχει τουλάχιστον μία διάσταση μεταξύ 10 και 400 nm. Παραδείγματα νανοκρυστάλλων περιλαμβάνουν το άμυλο, το λυκοπένιο και ορισμένα λιπαρά οξέα [Newton 2019].

Οι νανοκρύσταλλοι περιέχουν μία βιοενεργή ουσία η οποία έχει ως περιβλημά της μία επιφανειοδραστική ουσία (**Εικόνα 7**). Έχουν τη δυνατότητα, με αύξηση στην αναλογία της επιφάνειας προς τον όγκο να αυξάνουν τον ρυθμό με τον οποίο διαλύεται η βιοενεργή ουσία in vivo, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαλυτότητας των ουσιών εκείνων που είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους ωστόσο είναι ότι το φορτίο τους είναι εξ ολοκλήρου βιοενεργό. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να παράγονται χωρίς τη χρήση οργανικών διαλυτών, ενώ προσφέρουν καλύτερη διαλυτότητα και καλύτερη κυτταρική αλληλεπίδραση της βιοενεργής ουσίας σε μορφή νανοκρυστάλλου [Borel 2014].

Η παρασκευή νανοκρυστάλλων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μηχανικές είτε με χημικές μεθόδους. Στους νανοκρυστάλλους άμυλου χρησιμοποιείται συνήθως όξινη υδρόλυση, υπέρηχοι και ανάδευση, με στόχο τον διασκορπισμό τους και ταυτόχρονα την αποφυγή συσσώρευσής τους. Για τη μείωση του μεγέθους με ταυτόχρονη αύξηση της ομοιομορφίας των κρυστάλλων, συνήθως χρησιμοποιείται υγρή άλεση, ενώ η νανοκαθίζηση είναι μία ακόμα διαδικασία σχηματισμού νανοκρυστάλλων [Borel 2014].

~ 24 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

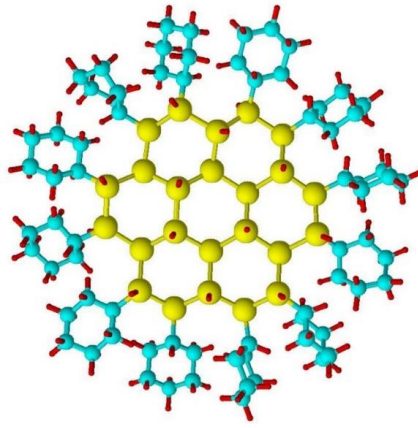
Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο docs.gov.gr/validate



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 24/74





**Εικόνα 7:** Γενική δομή νανοκρυστάλλων [National Institute of Standards and Technology].

### 2.1.5 Λιπιδικά Νανოსωματίδια

Τα λιπιδικά νανοςωματίδια μοιάζουν πολύ με τα γαλακτώματα, με τη διαφορά ότι τα νανοςωματίδια είναι σε στερεή φάση, ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως εξαιτίας της φυσικής σύστασης που εμφανίζουν και της βιοσυμβατότητάς τους. Τέτοια νανοςωματίδια μπορεί να αποτελούνται από διάφορα λιπίδια, όπως είναι τα λιπαρά οξέα, τα στεροειδή, ακόμα και μονογλυκερίδια, διγλυκερίδια και τριγλυκερίδια [Martínez-Ballesta 2018]. Τα λιπίδια της στερεής φάσης έχουν τη δυνατότητα να πέπτονται πιο αργά σε σχέση με εκείνα που βρίσκονται σε υγρή φάση. Τα νανοςωματίδια αυτά έχουν το πλεονέκτημα να προσφέρουν ένα μέσο το οποίο εγκλωβίζει λιπόφιλα μόρια σε σταθερά σωματίδια χωρίς να χρησιμοποιεί οργανικούς διαλύτες (**Εικόνα 8**) [Borel 2014].

Επιπλέον, χάρη στη χαμηλή κινητικότητα του βιοενεργού συστατικού στη στερεή μήτρα, προσφέρουν ελεγχόμενη απελευθέρωση διαφορετικών υδρόφοβων συστατικών. Από την άλλη όμως, τα σωματίδια αυτά δεν έχουν μεγάλη απόδοση φόρτωσης, με αποτέλεσμα η ουσία να απομακρύνεται κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, όπου πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός της κρυσταλλικής δομής. Στη νανοπαγωγή, χρησιμοποιούνται λιπιδικά νανοςωματίδια που έχουν κρυσταλλωμένη και υγρή φάση λιπιδίου ή αλλιώς NLC. Η υγρή φάση που βρίσκεται στο εσωτερικό, προσφέρει χημική σταθερότητα, ελεγχόμενη απελευθέρωση και μεγάλη απόδοση φόρτωσης, μέσα από τη διάλυση και τον εγκλωβισμό του βιοδραστικού συστατικού [Borel 2014].

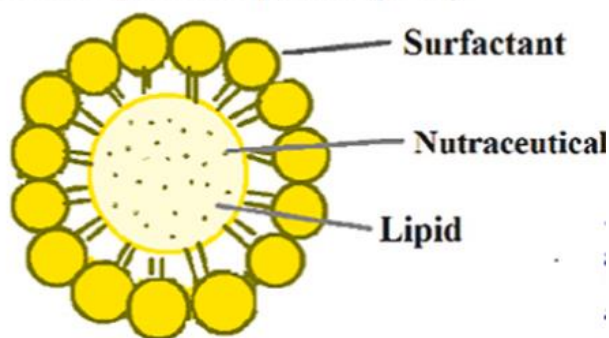
Ένα χαρακτηριστικό των λιπιδικών νανοςωματιδίων που εμφανίζει μεγάλο ενδιαφέρον είναι ότι λαμβάνονται από φυσικά λιπίδια, τα οποία είναι βιοδιασπώμενα, βιολογικά ανενεργά και χωρίς καμία τοξικότητα, είτε αυτή είναι αντιγονική, πυρετογόνος ή εγγενής. Οι ενώσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό των νανοςωματιδίων αυτών, προστατεύονται από πιθανές διαταραχές



από εξωτερικούς παράγοντες, όπως είναι ένζυμα και αναστολείς που βρίσκονται στο γαστρεντερικό σύστημα [Martínez-Ballesta 2018].

Τόσο για το σχηματισμό λιπιδικών νανοσωματιδίων στερεής φάσης, όσο και για τα υγρής φάσης, χρησιμοποιούνται μέθοδοι υψηλής ενέργειας, όπως είναι η μικρορευστοποίηση και οι υπέρηχοι, ενώ ακόμα και η θερμή και ψυχρή ομογενοποίηση μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό αυτό. Το μέγεθος των σωματιδίων στερεής φάσης αλλά και η σταθερότητά τους αλλάζει ανάλογα με τη σύνθεση των λιπιδίων, τη συγκέντρωση της τασιενεργούς ουσίας αλλά και τις ιδιότητες του επιφανειοδραστικού. Πιο συγκεκριμένα, αν η συγκέντρωση αυτή είναι πιο μεγάλη ή πιο μικρή, τότε τα σωματίδια συσσωματώνονται. Η ανάπτυξη των σωματιδίων αυτών σε εφαρμογές τροφίμων έγινε για να βελτιωθεί η διάρκεια ζωής της γκουάβας και να βελτιωθεί η σταθερότητα της κερκετίνης, της β-καροτίνης, ακόμα και της α-τοκοφερόλης [Borel 2014].

### Solid Lipid Nanopartile (SLN)



**Εικόνα 8:** Γενική δομή λιπιδικών νανοσωματιδίων [Rashidi 2021].

#### 2.1.6 Πολυμερικά Νανοσωματίδια

Τα νανοσωματίδια αυτά είναι μήτρες πολυμερών και εγκλωβισμένων μορίων που έχουν για περίβλημα εξωτερικά έναν γαλακτωματοποιητή ή μία επιφανειοδραστική ουσία. Οι νανοκάψουλες από πολυμερή είναι νανοσωματίδια των οποίων το πολυμερές δημιουργεί ένα τοίχωμα γύρω από τον εγκλωβισμένο πυρήνα ο οποίος διαθέτει μέσα τη βιοδραστική ουσία. Τα νανοσωματίδια και οι νανοκάψουλες δημιουργήθηκαν με στόχο την προστασία της εγκλωβισμένης βιοδραστικής ουσίας από πιθανή διάλυση (**Εικόνα 9**) [Borel 2014].

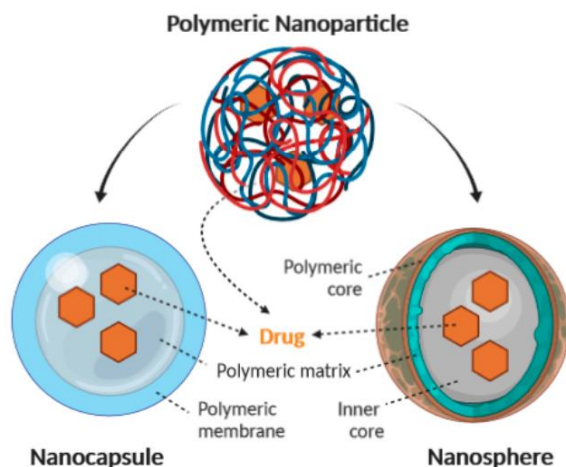
Τα πολυμερικά νανοσωματίδια έχουν τη δυνατότητα σχηματισμού με ενισχυμένη εντερική διαπερατότητα. Επιπλέον, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον σχηματισμό τους είναι μέθοδοι εκτόπισης διαλύτη ή νανοκαθίζησης ή αποδιάλυσης, εξάτμισης και εξάτμισης γαλακτώ-

~ 26 ~



ματος. Κάποιες ακόμα και οι οποίες χρησιμοποιούνται στο σχηματισμό νανοσωματιδίων για πρωτεΐνες και υδροκολλοειδή, είναι ο κύκλος του pH, η θερμική επεξεργασία, ο ψεκασμός, ακόμα και η χρήση υπερκρίσιμων υγρών [Borel 2014].

Παράδειγμα της **δυνατότητας που προσφέρουν τα πολυμερικά νανοσωματίδια να ενθυλακώνουν υδρόφιλες ενώσεις**, είναι οι **ανθοκυανίνες<sup>1</sup>**, οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι είναι **πρότυπες φυτοχημικές ουσίες** με τις οποίες αξιολογείται η δυνατότητα αυτή [Martínez-Ballesta 2018].



**Εικόνα 9:** Γενική δομή πολυμερικών νανοσωματιδίων. Το βέλος υποδηλώνει την ύπαρξη βιοδραστικής ουσίας στο εσωτερικό του νανοσωματιδίου [Zielinska 2020].

## 2.2 Ιδιότητες των Συστημάτων Νανοπαράδοσης με σημασία στις Νάνο-Βίο Αλληλεπιδράσεις

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα συστήματα χορήγησης μπορεί να επηρεάσουν τις διαδικασίες της απορρόφησης, της κατανομής, του μεταβολισμού και της απέκκρισης (ADME), οι οποίες είναι σημαντικές για τη ρύθμιση της *in vivo* δραστικότητας που παρουσιάζει το βιοδραστικό συστατικό που χορηγείται. Οι ιδιότητες που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη σπουδαιότητα *in vivo* είναι το μέγεθος, το φορτίο, η υδροφοβικότητα καθώς και οι ιδιότητες στόχευσης [Borel 2014].

Το μέγεθος είναι υπεύθυνο για την είσοδο στα κύτταρα, τη διέγερση των κυττάρων που ανήκουν στο ανοσοποιητικό σύστημα καθώς και την καθαριότητα αυτών, ενώ ακόμα και οι μη-

<sup>1</sup> Οι ανθοκυανίνες είναι κατηγορία φυτοχημικών ουσιών, οι οποίες δίνουν το χαρακτηριστικό κόκκινο, μπλε, και μωβ χρώμα σε πολλές ποικιλίες μούρων, όπως ακόμα και σε διάφορα άλλα είδη φρούτων, λαχανικών και λουλουδιών.



χανισμοί παραλαβής κυττάρων έχουν εξάρτηση από το μέγεθος. Η διαδικασία της ενδοκυττάρωσης αφορά νανοσωματίδια που εισρέουν στα κύτταρα. Η διαδικασία αυτή εισροής είναι υπεύθυνη για τη μετακίνηση του μορίου που έχει εγκλωβιστεί στο ενδοσώμα. Μέσα από την ενδοκυττάρωση, τα κυστίδια που δημιουργούνται έχουν κοινό μέγεθος από 60 nm μέχρι 1.000 nm. Ωστόσο, τα κυστίδια εκείνα των οποίων το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από 500 nm δεν έχουν τη δυνατότητα ενδοκυττάρωσης από εντεροκύτταρα, με αποτέλεσμα να αποβάλλονται πριν καταλήξουν στο αίμα [Borel 2014].

Το μέγεθος, επίσης, μπορεί να έχει επιρροή στην ανοσολογική απόκριση. Έτσι, όταν το σωματίδιο είναι μεγάλο, η πιθανότητα να συμβεί απόκριση αυτού από τα κύτταρα του συστήματος στα μονοκύτταρα φαγοκύτταρα είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου κυκλοφορίας του αίματος των νανοσωματιδίων. Από την άλλη, αυξημένος χρόνος κυκλοφορίας οφείλεται σε νανοσωματίδια με μέγεθος από 30 nm μέχρι 100 nm, τα οποία έχουν το μέγεθος αυτό που τους επιτρέπει να αποφεύγουν το σύστημα των μονοκύτταρων φαγοκύτταρων και την διάλυση από τα κύτταρα μακροφάγων [Borel 2014].

Το φορτίο έχει σπουδαίο ρόλο στην είσοδο στα κύτταρα, στη διέγερση που παθαίνουν τα κύτταρα του ανοσοποιητικού, στις πρωτεΐνες του πλάσματος και στην τοξικότητα. Τα φορτία εκείνα που είναι θετικά είναι πιο πιθανό να οδηγήσουν σε μία ανοσολογική απόκριση σε σχέση με τα αρνητικά ή τα ουδέτερα. Εκείνα ωστόσο που δεν έχουν καθόλου φορτίο έχουν τη δυνατότητα παραμονής στην κυκλοφορία του αίματος για μεγαλύτερη διάρκεια από τα υπόλοιπα, ενώ τα αρνητικά φορτία προσφέρουν αυτή τη δυνατότητα στην κυκλοφορία του αίματος των ποντικών [Borel 2014].

Η υδροφοβικότητα εμφανίζει επιρροή στην κυτταρική πρόσληψη, την κατανομή, την αλληλεπίδραση με τα κύτταρα του ανοσοποιητικού και τις πρωτεΐνες του πλάσματος, καθώς και με την αποβολή από το σώμα. Τα σωματίδια που εμφανίζουν υδροφοβικότητα διασκορπίζονται στα επιθηλιακά κύτταρα με μεγαλύτερη ευκολία από εκείνα που εμφανίζουν υδρόφιλο τμήμα, εξαιτίας του μεγάλου συντελεστή δραστηριότητας που εμφανίζουν τα πρώτα. Τα μακροφάγα του συστήματος μονοκύτταρων φαγοκύτταρων που βρίσκονται στο αίμα, αναγνωρίζουν τα υδρόφοβα νανοσωματίδια ως ξένες ουσίες και για αυτό γίνεται απόκριση αυτών μέσω της χολής. Τα υδρόφιλα νανοσωματίδια έχουν τη δυνατότητα απόκρισης από το νεφρό αν το μέγεθός τους είναι μικρότερο από 10 nm και για αυτό το λόγο δεν είναι το ίδιο πιθανό να τα αναγνωρίσει το αίμα ως ξένες ουσίες. Επιπλέον, τα υδρόφιλα νανοσωματίδια διαπερνάνε τη βλέννα πιο γρήγορα από ότι τα υδρόφοβα νανοσωματίδια εξαιτίας των υδρόφοβων αλληλεπιδράσεων που δημιουργούνται στο στρώμα της βλέννας [Borel 2014].

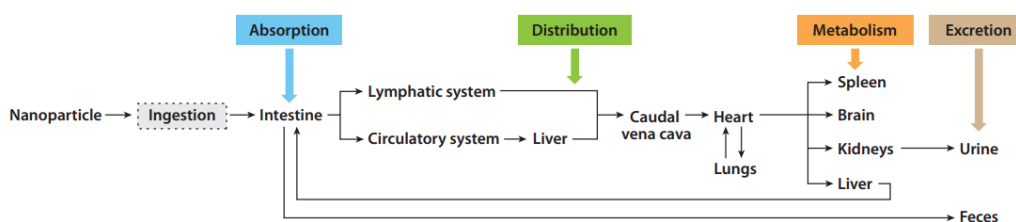
Η στόχευση εμφανίζει επιρροή στην κατανομή των νανοσωματιδίων και στην ανοσολογική απόκριση. Τα μόρια που πραγματοποιούν στόχευση υπάρχει πιθανότητα να εκμεταλλεύο-



νται τους υποδοχείς με στόχο την είσοδο σε συγκεκριμένα κύτταρα. Το μέγεθος και το φορτίο των μορίων αυτών επιδρούν στην ανοσολογική απόκριση [Borel 2014].

## 2.3 Απορρόφηση, Διανομή, Μεταβολισμός και Απέκκριση Νανοσωματιδίων (ADME)

Οι εφαρμογές αυτές των νανοσωματιδίων καθορίζονται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος, το φορτίο, την υδροφοβικότητα και τη στόχευση και οι οποίες ιδιότητες με τη σειρά τους καθορίζονται από το σύστημα παροχής. Το νανοσωματίδιο με τις παραπάνω εφαρμογές είναι υπεύθυνο για την πιθανή τοξικότητα που θα εμφανίσει αυτό. Η διαδικασία της απορρόφησης αφορά την επαφή των νανοσωματιδίων με τον βλεννογόνο του εντέρου και με τα επιθηλιακά κύτταρα και πως αυτά αντιδρούν μεταξύ τους και την κατάληξη της αλληλεπίδρασης αυτής στην εισροή των νανοσωματιδίων στην κυκλοφορία του συστήματος. Η διανομή ή κατανομή πραγματοποιείται μέσα από την κυκλοφορία του συστήματος και οι οποία κατανέμει τα σωματίδια στα όργανα (ήπαρ, νεφρά, καρδιά, πνεύμονες, εγκέφαλος). Ο μεταβολισμός αφορά τη μετατροπή των νανοσωματιδίων σε ιστούς μέσα από αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούνται με πρωτεΐνες και λιπίδια. Η απέκκριση αφορά την αποβολή των νανοσωματιδίων όπως και των μεταβολιτών τους από όργανα που είναι υπεύθυνα για αυτό όπως είναι το ήπαρ, τα νεφρά και το έντερο (**Εικόνα 10**) [Borel 2014].



**Εικόνα 10:** Διάγραμμα ροής της διαδρομής που ακολουθεί ένα νανοσωματίδιο μέσα στο σώμα [Borel 2014].

### 2.3.1 Έγχυση στο στομάχι

Τα νανοσωματίδια αρχικά προσλαμβάνονται από το στόμα και μέσω του σάλιου και της μάσησης περνάνε στη γαστρεντερική οδό με pH 5-7. Από εκεί, μέσω του οισοφάγου περνάνε στο στομάχι όπου ανάλογα με το αν το στομάχι του εκάστοτε ανθρώπου είναι άδειο ή γεμάτο, παραμένουν εκεί για 30 λεπτά έως και 4 ώρες. Το pH του στομάχου όντας όξινο και με τιμές από 1 μέχρι 3,5,

~ 29 ~



μαζί με τα ένζυμα που διαθέτει, έχει τη δυνατότητα διάσπασης πρωτεϊνών και υδατανθράκων. Αν υποθεθεί ότι τα νανοσωματίδια έχουν τη δυνατότητα αντοχής στο όξινο περιβάλλον του στομάχου, τότε αυτά περνάνε στο επόμενο τμήμα που είναι το λεπτό έντερο, μέσω του δωδεκαδάχτυλου, όπου εκεί το pH κυμαίνεται μεταξύ 6 και 7,5 [Borel 2014].

Επιπλέον, το τμήμα αυτό περιέχει διάφορα χολικά άλατα που προέρχονται από τη χοληδόχο κύστη και τα οποία έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τη γαλακτωματοποίηση λιπών. Στο τμήμα αυτό του εντέρου τα νανοσωματίδια διατηρούνται για 3 με 6 ώρες και στη συνέχεια περνάνε στο παχύ έντερο. Το λεπτό έντερο, ωστόσο, είναι αυτό που κατά κύριο λόγο απορροφά το νανοσωματίδιο ή ακόμα και τη βιοδραστική ουσία που απελευθερώνεται από αυτό [Borel 2014].

### 2.3.2 Απορρόφηση

Η απορρόφηση των νανοσωματιδίων μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν αυτά καταφέρουν να διαπεράσουν από τα ένζυμα, από το όξινο περιβάλλον του στομάχου, τα έντερα με επένδυση βλέννας και τις κυτταρικές μεμβράνες που παρουσιάζουν επιλεκτική διαπερατότητα. Το λεπτό έντερο στο εσωτερικό του διαθέτει επιθηλιακά κύτταρα τα οποία είναι υπεύθυνα για την πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών ή νανοσωματιδίων που είναι απαραίτητα. Τα κύτταρα αυτά έχουν στο εξωτερικό τους επικάλυψη από μικρολάχνες και βλέννα, τα οποία τα βοηθούν στην επιλεκτική απορρόφηση θρεπτικών συστατικών και όχι επιβλαβών χημικών ουσιών. Στο λεπτό έντερο τα εντεροκύτταρα έχουν εξωτερική επικάλυψη από ένα λεπτό στρώμα βλέννας το οποίο έχει τη δυνατότητα σταθερής προσκόλλησης και ένα παχύ στρώμα βλέννας το οποίο είναι σταθερής προσκόλλησης και το οποίο βοηθάει στην απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών [Borel 2014].

Η απορρόφηση και ο τύπος μεταφοράς των νανοσωματιδίων, εξαρτώνται από τις επιφανειακές ιδιότητες καθώς και την συγκέντρωση των σωματιδίων. Για τη μεταφορά βλεννογόνου, θεωρείται ως καλύτερο μέγεθος νανοσωματιδίου τα 100 nm, αφού είναι το μέσο μέγεθος που εμφανίζουν οι πόροι της ανθρώπινης βλέννας. Ωστόσο, δεν προτιμάται αυτό, αλλά ένα νανοσωματίδιο 200 nm, αφού αυτό το μέγεθος εμφανίζει τριπλάσιο συντελεστή διάχυσης. Το μέγεθος στο οποίο διακόπτεται η μεταφορά βλεννογόνου είναι συνήθως τα 500 nm [Borel 2014].

### 2.3.3 Κατανομή και Μεταβολισμός

Μετά τη διαδικασία της απορρόφησης τα νανοσωματίδια με μεγάλη υδροφοβικότητα περνάνε στη λέμφο, όπου είτε προσλαμβάνονται από τον λεμφικό ιστό και στη συνέχεια φτάνουν στη λεμφική κυκλοφορία, αλλιώς αν δεν απορροφηθούν από τον λεμφικό ιστό στέλνονται στο ήπαρ μέσα από την ηπατική πυλαία φλέβα. Στο ήπαρ τα νανοσωματίδια υπόκεινται σε επεξεργασία και στη συνέχεια περνάνε στη συστηματική κυκλοφορία [Borel 2014].

Στην περίπτωση που τα νανοσωματίδια απορροφηθούν στη λέμφο, η διαδικασία του μεταβολισμού στο ήπαρ δεν θα πραγματοποιηθεί και τα νανοσωματίδια θα περάσουν κατευθεί-

~ 30 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 30/74

αν στη συστηματική κυκλοφορία. Με τον τρόπο αυτό, τα νανοσωματίδια προσπερνάνε τον μεταβολισμό πρώτης διέλευσης και οδηγούν σε αύξηση της συγκέντρωσης των βιοδραστικών ουσιών στην κυκλοφορία του αίματος. Στη συνέχεια, το λεμφικό σύστημα μεταφέρει τα νανοσωματίδια στη συστηματική κυκλοφορία με τη βοήθεια της ουραίας κοίλης φλέβας και από εκεί περνάνε σε διάφορα όργανα. Τα όργανα, όπως είναι η καρδιά, οι πνεύμονες, ο σπλήνας, τα νεφρά και ίσως και ο εγκέφαλος, τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροή αίματος, συνήθως έρχονται σε επαφή με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων. Ο τρόπος και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβολίζονται τα νανοσωματίδια εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τύπο των νανοσωματιδίων [Borel 2014].

#### **2.3.4 Απόκκριση**

Στα νανοσωματίδια υπάρχει πιθανότητα μη απορρόφησης τους από τα επιθηλιακά κύτταρα και τη βλέννα και έτσι περνάνε κατευθείαν στο παχύ έντερο το οποίο τα προετοιμάζει για απέκκριση. Επιπλέον, νανοσωματίδια από το σκώτι, μπορούν να περάσουν ξανά στα έντερα και από εκεί να πραγματοποιηθεί η απέκκρισή τους. Τα υδρόφιλα σωματίδια που παρουσιάζουν μέγεθος μικρότερο από 10 nm έχουν τη δυνατότητα να απεκκριθούν μέσα από τα νεφρά στο ουροποιητικό σύστημα, ενώ εκείνα με μέγεθος μεγαλύτερο από 500 nm δεν απορροφώνται στα έντερα [Borel 2014].

Τα νανοσωματίδια μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι διαδικασίες της απορρόφησης και της κατανομής να αλλάξουν στο βέλτιστο και η διαδικασία της απέκκρισης να μειωθεί. Τα υδρόφοβα σωματίδια που εμφανίζουν ουδετερότητα στο φορτίο τους και μέγεθος μικρότερο από 100 nm δείχνουν να είναι τα πιο κατάλληλα για απορρόφηση. Από την άλλη, τα υδρόφιλα σωματίδια που εμφανίζουν ουδετερότητα στο φορτίο τους και μέγεθος μικρότερο από 100 nm θεωρούνται καταλληλότερα για τη διαδικασία της κατανομής, χάρη στην παραμονή τους στην κυκλοφορία για μεγαλύτερο διάστημα [Borel 2014].

## **2.4 Κατάληξη της βιοενεργής ουσίας**

Το εγκλωβισμένο βιοδραστικό συστατικό καταλήγει απελευθερωμένο στο σώμα ή στα έντερα ή στα κύτταρα των ιστών των οργάνων, μέσω της κυκλοφορίας του συστήματος. Για τον χρόνο και τη θέση της απελευθέρωσης αυτής, είναι υπεύθυνη η επιφανειακή χημεία που παρουσιάζει το σύστημα νανοπαραγωγής. Με χρήση πολυμερών όπως είναι το αλγινικό ή η χιτοζάνη και με τοποθέτησή τους στρώση προς στρώση για αποφυγή πιθανής διάλυσης, η απελευθέρωση μπορεί να γίνει πιο σταθερή. Ο έλεγχος της θέσης στην οποία απελευθερώνεται η ουσία μπορεί να γίνει με χρήση πολυμερών που εμφανίζουν ευαισθησία σε ένα σχεδιασμένο εύρος τιμών pH [Borel



2014].

Μόλις η ουσία απελευθερωθεί στα έντερα, πραγματοποιείται ενδοκυτταρική μεταφορά σε εντεροκύτταρα ή κύτταρα M<sup>2</sup>. Ο ρυθμός, η μέθοδος και η βαρύτητα με την οποία μπορεί να προσληφθεί το βιοενεργό συστατικό εξαρτώνται από τις ιδιότητες αυτού είτε αυτές είναι χημικές, είτε φυσικές, είτε μορφολογικές. Τα υδρόφιλα και φορτισμένα βιοενεργά συστατικά προλαμβάνονται σε μικρότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα υδρόφοβα και μη φορτισμένα βιοενεργά συστατικά. Το βιοδραστικό έχει τη δυνατότητα παραμονής στα εντερικά κύτταρα ή ακόμα απελευθέρωσης στο λεμφικό σύστημα ή σε μία πυλαία φλέβα που θα το οδηγήσει στο συκώτι.

Στην περίπτωση απελευθέρωσής του στη συστηματική κυκλοφορία, τότε οι ιδιότητες που το καταρτίζουν θα προσδιορίσουν την αλληλεπίδραση που θα έχει αυτό με τα συστατικά του αίματος. Το υδρόφοβο βιοδραστικό θα μείνει στην κυκλοφορία λιγότερη διάρκεια από ένα που είναι υδρόφιλο, μη ιονικό. Αυτό συμβαίνει λόγω των υδρόφοβων αλλά και ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων που χρειάζονται για να συνδεθούν οι πρωτεΐνες του πλάσματος με τα μόρια [Borel 2014].

Στην περίπτωση απελευθέρωσης στα κύτταρα των ιστών των οργάνων, η ενδοκυτταρική μεταφορά του βιοενεργού συστατικού θα προσδιοριστεί από τις κυτταρικές αλληλεπιδράσεις. Η θέση απελευθέρωσης θα προσδιοριστεί από τη μέθοδο με την οποία θα εισαχθεί το νανοσωματίδιο που χρησιμοποιείται για την είσοδο στο κύτταρο. Σε περίπτωση που συμβεί λυσοσωμική απελευθέρωση, υπάρχει περίπτωση διαφυγής μικρών υδρόφοβων μορίων από τις μεμβράνες που διαθέτει το ενδοσώμα ή τα λυσοσώματα, ενώ τα μεγάλα υδρόφιλα μόρια έχουν την ικανότητα παραμονής μέσα στα λυσοσώματα. Ανάλογα με τις χημικές ή και φυσικές του ιδιότητες, ένα βιοδραστικό συστατικό, μπορεί να ακολουθήσει τις οδούς τοπικών υδατοδιαλυτών ή λιποδιαλυτών βιομακρομορίων [Borel 2014].

---

<sup>2</sup> Εξειδικευμένα κύτταρα του επιθηλίου που επικαλύπτουν τα λεμφοειδή οζίδια των εντέρων που δεσμεύουν αντιγόνα και τα μεταφέρουν στα υποκείμενα λεμφοκύτταρα. Μπορούν να παρέχουν συνεχή δειγματοληψία του εντερικού περιεχομένου στο ανοσοποιητικό σύστημα.





## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Γραμμικές Νανοδομές και Μικροδομές (1D Δομές) (Linear Nano and Microstructures)

#### 3.1.1 Ίνες και Νανοσωλήνες (Fibres and Nanotubes)

Οι ίνες και οι νανοσωλήνες, γνωστές ως 1D δομές έχουν εμφανίσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, κατά κύριο λόγο εκείνες που έχουν βάση τον άνθρακα. Εξαιτίας του μεγέθους τους, οι νανοϊνες και οι νανοσωλήνες παρουσιάζουν μοναδικές ιδιότητες που τους επιτρέπουν να εμφανίζουν πιθανές εφαρμογές σε διάφορους κλάδους. Στον κλάδο των τροφίμων συγκεκριμένα, υπάρχουν πολλές εφαρμογές για ίνες και σωλήνες και περιλαμβάνουν το σχηματισμό πηκτωμάτων, την ενθυλάκωση μεγαλύτερων κομματιών τροφής σε μία ενιαία μονάδα, την περαιτέρω υποστήριξη σε υλικά συσκευασίας, καθώς και τον έλεγχο της απελευθέρωσης βιοδραστικών ενώσεων, που στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι και η εφαρμογή που μας ενδιαφέρει. Και στις δύο περιπτώσεις μεθοδολογίας -από πάνω προς τα κάτω και από κάτω προς τα πάνω- οι δομές που δημιουργούνται έχουν ως βάση πολυσακχαρίτες και πρωτεΐνες με ξεχωριστές ιδιότητες που προσθέτουν βιοδραστικές ενώσεις κατά την παραγωγή η οποία ενθυλακώνεται ή συνδέεται με τη δομή [Cerqueira 2022]

Από τις πιο σημαντικές και γνωστές «προς τα κάτω» τεχνολογίες για την παραγωγή ινών είναι η ηλεκτροϊνιοποίηση. Η τεχνολογία αυτή έχει εμφανιστεί ως η καταλληλότερη επιλογή σε εφαρμογές τροφίμων, για πραγματοποίηση ενθυλάκωσης και μεταφορά βιοδραστικών ενώσεων υπό έλεγχο. Στην περίπτωση των τεχνολογιών «προς τα πάνω», τα μικρότερα μεμονωμένα μόρια μικρότερης κλίμακας εντάσσονται σε μεγάλες λειτουργικές μονάδες που βρίσκονται σε μεγαλύτερη κλίμακα. Στις τεχνολογίες αυτές σε σχέση με τις «προς τα κάτω» συνθέτονται δομές των οποίων οι ιδιότητες έχουν προδιαγραφεί σε μεγάλο βαθμό ελέγχου δομής [Cerqueira 2022].

#### 3.1.2 Υλικά και Μέθοδοι Παραγωγής Γραμμικών Κατασκευών

##### 3.1.2.1 Ηλεκτροϊνιοποίηση (Electrospinning)

Η μέθοδος αυτή αν και γνωστή για τις χρήσεις σε διάφορους κλάδους, τώρα παρουσιάζει τα πρώτα της βήματα στην ενθυλάκωση και τη μεταφορά βιοδραστικών ουσιών με την παραγωγή ινών νανοκλίμακας για χρήση στα τρόφιμα. Κατά την ηλεκτροϊνιοποίηση, ίνες μονής στρώσης ή πολλών στρώσεων παράγονται από τη χρήση σε μικροκλίμακα ή νανοκλίμακα μιας ηλεκτρικά κινούμενης δύναμης. Το διάλυμα του βιοπολυμερούς που δημιουργείται ανάμεσα στον κλωστήρα και τον συλλέκτη σχηματίζει έναν πίδακα υγρού κώνου που είναι ηλεκτρικά φορτισμένος. Όταν το ρευστό εξαπολύεται από τον κώνο, σχηματίζει μία τεντωμένη ίνα μέσω ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, η οποία σταθεροποιείται άμεσα στον συλλέκτη, με αποτέλεσμα τη διαρκή πα-

~ 33 ~

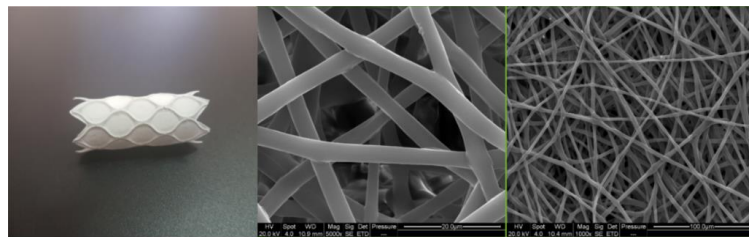
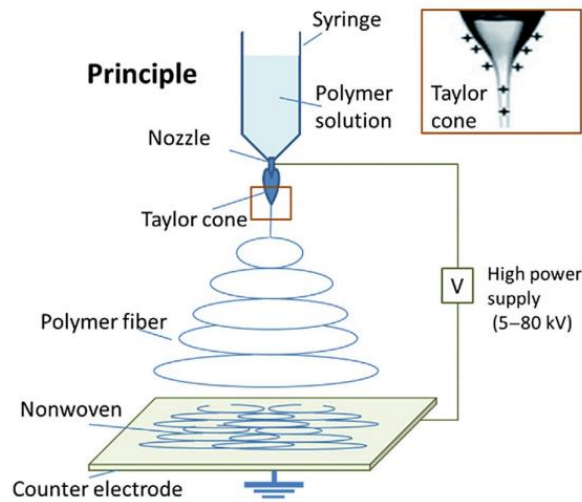


ραγωγή ινών (**Εικόνα 11**). Η παραγωγή αυτή είναι εφικτή με τη χρήση πολυμερούς το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία σε χαμηλή θερμοκρασία ή θερμοκρασία δωματίου ή με την ηλεκτροίνοποίηση τετηγμένου πολυμερούς. Στα τρόφιμα, ως καταλληλότερες θερμοκρασίες θεωρούνται οι θερμοκρασίες δωματίου ή οι χαμηλές θερμοκρασίες, διότι οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν ελάττωση της βιοδραστικής ιδιότητας των ενώσεων [Cerqueira 2022].

Η παραγωγή των δομών καθώς και η μορφολογία και τα χαρακτηριστικά τους επηρεάζονται από την ποικιλία διαφορετικών διαμέτρων ακροφύσιων, καθώς και από τις πολυαξονικές γεωμετρίες. Οι γεωμετρίες αυτές προσφέρουν τη δυνατότητα περιστροφής συγχρόνως διαφορετικών διαλυμάτων/υγρών χάρη στα πολλά και διαφορετικά στοιχεία που εμφανίζει ο κλωστήρας. Η δυνατότητα αυτή παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως η μεταφορά βιοδραστικών ουσιών υπό έλεγχο και η ενθυλάκωση ξεχωριστών ενώσεων στην ίδια δομή με ταυτόχρονη απελευθέρωση σε ξεχωριστά επίπεδα. Από την άλλη, ο συλλέκτης εμφανίζει διάφορες γεωμετρίες και μορφολογίες και προσφέρει κίνηση κατά την επεξεργασία με τη χρήση είτε επίπεδης επιφάνειας, είτε κυλίνδρου. Οι δομές όμως δεν επηρεάζονται μόνο από τον εξοπλισμό, αλλά και από τις συνθήκες επεξεργασίας, όπως η τάση και η απόσταση ανάμεσα στο ακροφύσιο και τον συλλέκτη, η ταχύτητα ροής, η θερμοκρασία καθώς και η σχετική υγρασία [Cerqueira 2022].

Επιπλέον, σημαντική σπουδαιότητα παρουσιάζουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Στα τρόφιμα, ως κύρια υλικά επιλέγονται οι πολυσακχαρίτες και οι πρωτεΐνες, σύμφωνα όμως με το που εφαρμόζονται αυτά μπορεί να γίνει χρήση και άλλων πολυμερών όπως είναι το πολυγαλακτικό οξύ. Τέλος, τα υλικά με τα οποία πραγματοποιείται η ηλεκτροίνοποίηση επηρεάζονται από τον διαλύτη, ενώ έρευνες έχουν δείξει ότι το ιξώδες, το ηλεκτρικό φορτίο και η επιφανειακή τάση του βιοπολυμερούς εμφανίζουν σημαντική επίδραση στην μορφή που παρουσιάζουν οι ίνες, καθώς επίσης και στην ολική απόδοση που εμφανίζει η όλη διαδικασία [Cerqueira 2022].





**Εικόνα 11:** Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της ηλεκτροϊννοποίησης (πάνω) [Zheng 2019] και σχηματική απεικόνιση από μικροσκόπιο των ινών που σχηματίζονται (κάτω) [Medibrane LTD].

### 3.1.2.2 Αυτοσυναρμολόγηση (Self-assembly)

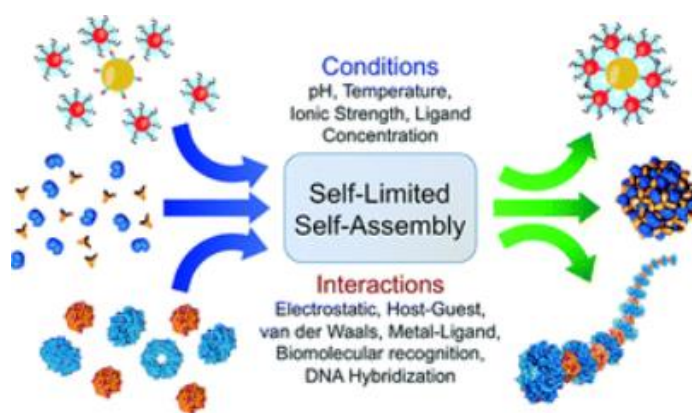
Η μέθοδος της αυτοσυναρμολόγησης δίνει τη δυνατότητα σε ένα σύστημα να αποκτήσει ιδιότητες και χαρακτηριστικά που δεν εμφάνιζε. Με τη βοήθεια αλλαγών που πραγματοποιούνται στις θερμοδυναμικές ή φυσικές ιδιότητες, όπως η αλλαγή της θερμοκρασίας ή του χημικού δυναμικού, αλλαγές σε μηχανικές ιδιότητες, ή και αλλαγές σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, πραγματοποιείται μεταφορά από μία διαταραγμένη φάση σε μία πιο τακτοποιημένη (**Εικόνα 12**) [Cerqueira 2022].

Θα πρέπει όμως να διαχωριστούν οι έννοιες αυτοσυναρμολόγηση και συσσωμάτωση και να μην συγχέονται. Η διαδικασία της συσσωμάτωσης είναι μία αυτοσύνδεση που σχηματίζει άμορφα και ετερογενή συσσωματώματα μη αναστρέψιμα και τα οποία εμφανίζουν τάση κροκιδωσης. Στη συσσωμάτωση εμπλέκονται τόσο μη ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις, όσο και ομοιοπολικές. Από την άλλη, η αυτοσυναρμολόγηση είναι ένας ξεχωριστός τρόπος συσσωμάτωσης κατά τον οποίο πραγματοποιείται οργάνωση σε μία ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση με τη βοήθεια ομοιοπολικών δεσμών (δεσμοί υδρογόνου, ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, υδρόφοβες



αλληλεπιδράσεις, δυνάμεις Van der Waals). Επιπλέον, τα συστήματα εκείνα που δημιουργούνται από αυτοσυναρμολόγηση πρωτεϊνών παρουσιάζουν ιδιαίτερες ιδιότητες, αφού είναι βιοσυμβατά, βιοδιασπώμενα και ευαίσθητα σε αλλαγές που μπορεί να προκληθούν στις συνθήκες περιβάλλοντος, όπως αλλαγές στο pH, στη θερμοκρασία ή ακόμα και στην σύνθεση των ιόντων [Cerqueira 2022].

Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία της αυτοσυναρμολόγησης πρωτεϊνών μπορεί να συμβεί με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός είναι η διαδικασία της πυρηνοποιημένης αυτοσυναρμολόγησης, κατά την οποία σχηματίζονται πυρήνες από μια πολύ μικρή συγκέντρωση πρωτεΐνης. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι το ισοδεσμικό συγκρότημα, κατά το οποίο εμφανίζεται μια ελαφριά αύξηση στους αριθμούς και στο μήκος των συγκεντρωτικών ειδών. Αντικείμενα μεγάλου νανομεγέθους εμφανίζουν δυνατότητα δημιουργίας μόνο σε μεγάλες συγκεντρώσεις ή υψηλές σταθερές συσχέτισης [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 12:** Σχηματική απεικόνιση της αυτοσυναρμολόγησης [Piccinini 2016].

### 3.1.3 Εφαρμογές γραμμικών κατασκευών

Η εφαρμογή ινών έχει εμφανιστεί να παρουσιάζει λειτουργικότητα στα υλικά συσκευασίας, κυρίως στην παραγωγή ενεργών και έξυπνων συσκευασιών. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση της ηλεκτροϊονοποίησης για τον σχηματισμό ινών στην επιφάνεια της συσκευασίας, οι οποίες θα απελευθερώσουν δραστικές ενώσεις, προσφέροντας λειτουργικότητα στα υλικά αυτά. Η απελευθέρωση αυτών των ενώσεων θα γίνεται μόνο όταν και αν χρειάζεται και υπό έλεγχο από έναν εξωτερικό παράγοντα όπως η θερμοκρασία ή το pH [Cerqueira 2022].

Μία άλλη εφαρμογή είναι η παρασκευή «χαλιών» από ίνες που τοποθετούνται κατευθείαν στο τρόφιμο ή στο υλικό συσκευασίας και η χρήση ινών που έχουν υποστεί ηλεκτροϊονοποίηση, ως στρώμα ενδιάμεσα σε ένα υλικό συσκευασίας που είναι πολυστρωματικό και του



οποίου το υλικό δημιουργείται μετά από θερμική και μηχανική επεξεργασία. Με αυτό τον τρόπο, οι νανοΐνες δεν εμφανίζουν πια ινώδη δομή δημιουργώντας έτσι ένα λεπτό φιλμ [Cerqueira 2022].

Στις δομές 1D, η δομή από ίνες των υλικών που έχουν υποστεί ηλεκτροϊνοποίηση διατηρείται και μία επίστρωση καλύπτει τα υλικά συσκευασίας. Επιπλέον, πραγματοποιείται ρύθμιση της αλλαγής που εμφανίζεται στην επιφανειακή συμπεριφορά της συσκευασίας, μπορούν δηλαδή να παραχθούν υλικά με πιο υδρόφοβη ή υδρόφιλη επιφάνεια. Η λειτουργικότητα των υλικών με βάση το χαρτί είναι μία πιθανή εφαρμογή των δομών αυτών. Στην εφαρμογή αυτή οι ίνες από ηλεκτροϊνοποίηση φορτώνονται μαζί με ένα ενεργό υλικό με αποτέλεσμα η επιφάνεια να γίνεται πιο υδροφοβική διατηρώντας ταυτόχρονα το πορώδες των υλικών [Cerqueira 2022].

Οι Martins et al. (2018) σε πείραμα που διεξήγαγαν έκαναν χρήση ινών αιθυλοκυταρίνης φορτισμένες με κινναμαλδεΐδη, η οποία παράγεται με ηλεκτροϊνοποίηση, για να καταφέρουν να κάνουν τα υλικά με βάση το χαρτί να λειτουργήσουν. Στη συνέχεια έκαναν σύγκριση με ένα υλικό από χαρτί που έχει επικαλυφθεί με χύτευση κάνοντας πάλι χρήση ινών αιθυλοκυταρίνης φορτισμένες με κινναμαλδεΐδη. Αποτέλεσμα αυτού ήταν το ενεργό στρώμα να εμφανίζει ικανότητα μείωσης της μικροβιολογικής ανάπτυξης, λειτουργώντας ως ενεργή συσκευή και αύξησης της γωνίας επαφής του νερού πιο κοντά στις 140°. Κατάλληλη επιλογή για ενσωμάτωση σε ενεργές συσκευασίες θεωρούνται τα αιθέρια έλαια και τα παράγωγά τους εξαιτίας της αντιμικροβιακής δράσης που παρουσιάζουν. Συνήθως όμως, η μεγάλη μεταβλητότητα που εμφανίζουν καθιστά απαραίτητη την ενθυλάκωσή τους [Martins 2018, Cerqueira 2022].

Οι Kara et al. (2016) εμφάνισαν την ίδια θεώρηση, αλλά στην ανάπτυξη μεμβρανών με αντιβακτηριακή δράση [Cerqueira 2022]. Χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία της ηλεκτροϊνοποίησης για την ενθυλάκωση ισοθειοκυανικού αλλυλίου (ΑΙΤC)<sup>3</sup> και τη λειτουργικότητα των PLA φιλμ. Τα φιλμ εκείνα με μεγαλύτερη ποσότητα ΑΙΤC εμφάνισαν μεγαλύτερο ρυθμό απελευθέρωσης. Τα PLA φιλμ που εμβολιάστηκαν με τις ίνες παρουσίασαν αναστολή της ανάπτυξης *Listeria innocua* και *Escherichia coli K12* όταν δοκιμάστηκαν σε πραγματικά συσκευασμένα τρόφιμα, όπως σταφύλια και κρέας έτοιμο προς κατανάλωση [Kara 2016, Cerqueira 2022].

## 3.2 Μικροεπιφάνειες και Νανοεπιφάνειες (Δισδιάστατες Δομές)

### 3.2.1 Μεμβράνες και επιστρώσεις (Films and Coatings)

Οι μεμβράνες και οι επιστρώσεις παράγονται με τη χρήση πολυμερικών διαλυμάτων, με τη διαφορά ότι και παράγονται και εφαρμόζονται με διαφορετικούς τρόπους. Στην παραγωγή των

<sup>3</sup> Το ισοθειοκυανικό αλλύλιο (ΑΙΤC) είναι μία οργανοθειο-ένωση υπεύθυνη για την πικάντικη γεύση στη μουστάρδα, το χρένο και το γουασάμπι.



μεμβρανών γίνεται εναπόθεση του διαλύματος στη μήτρα σχηματισμού του φιλμ. Αφού πραγματοποιηθεί ξήρανση, σχηματίζεται μία μεμβράνη που χρησιμοποιείται ανάλογα με τον σκοπό, όπως για παράδειγμα περιτύλιξη. Αντίθετα, η επίστρωση χρησιμοποιείται με άμεση εφαρμογή στην επιφάνεια που χρειάζεται, όπως η επιφάνεια ενός τροφίμου ή μίας συσκευασίας. Στη συνέχεια, αφήνεται να στεγνώσει με αποτέλεσμα να σχηματίζει ένα λεπτό φιλμ [Cerqueira 2022].

Στις μεμβράνες που είναι εδώδιμες, μπορεί να γίνει ενθυλάκωση βιοενεργών ουσιών, οι οποίες μπορούν είτε να μεταφερθούν στο τρόφιμο είτε να καταναλωθούν μαζί με το τρόφιμο. Παράλληλα, οι εδώδιμες μεμβράνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα είδος συσκευασίας με σκοπό την προστασία των τροφίμων. Στις επιστρώσεις, από την άλλη, μπορεί να γίνει χρήση τους για τη βελτίωση της λειτουργικότητας των υλικών συσκευασίας, με στόχο τη βελτίωση των φραγμών σε υδρατμούς και των μηχανικών ιδιοτήτων της συσκευασίας ή να γίνει εφαρμογή τους κατευθείαν στις επιφάνειες των τροφίμων, με στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής των τροφίμων. Κάποιες έρευνες όμως, παρουσίασαν τη δυνατότητα χρήσης των επιστρώσεων για μεταφορά βιοδραστικών ενώσεων [Cerqueira 2022].

Και στις δύο περιπτώσεις, των μεμβρανών και των επιστρώσεων, το πάχος τους αποτελεί σημαντικό παράγοντα στις εφαρμογές τους. Μάλιστα, το πάχος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους, οι ιδιότητες που εμφανίζει το πολυμερές διάλυμα και η αλληλεπίδραση που εμφανίζει το διάλυμα με την επιφάνεια, αν αυτή είναι επίστρωση. Η παραγωγή των μεμβρανών που έχουν ως βάση βιοπολυμερή τα οποία εντάσσουν βιοδραστικές ενώσεις γίνεται με εξάτμιση διαλύτη κάνοντας χρήση της χύτευσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα υλικά να διαλυτοποιούνται ή να διασπείρονται μέσα σε διαλύτη και να σχηματίζουν ένα ομοιογενές μείγμα που οδηγεί σε σχηματισμό φιλμ μετά από την εξάτμιση του διαλύτη. Η επίστρωση, συνήθως πραγματοποιείται με εμβάπτιση, ψεκασμός ή βούρτσισμα όπου το διάλυμα μπορεί να στάξει μόνο του ή με τη βοήθεια εξοπλισμού και με τον τρόπο αυτό να γίνεται έλεγχος του πάχους της επίστρωσης [Cerqueira 2022].

Στα υλικά που χρησιμοποιούνται για συσκευασία, η πλαστικοποίηση, η επίστρωση και η συνεξώθηση διαμορφώνουν την παραγωγή πολυστρωματικών συστημάτων. Μάλιστα, ο πιο συνήθης τρόπος παραγωγής αυτών σε ναοκλίμακα είναι η τεχνική γνωστή ως layer-by-layer (LbL) την οποία πρώτος παρουσίασε ο Decher (1991). Στην τεχνική αυτή, η προσρόφηση φορτισμένων μορίων σε ένα υπόστρωμα και η διαδοχική προσρόφηση αντίθετα φορτισμένων υλικών στο ίδιο υπόστρωμα, οδηγούν στη δημιουργία μιας πολυστρωματικής δομής. Κάθε στρώμα της δομής αυτής είναι μόνο λίγα νανόμετρα και επηρεάζεται από τη φύση του πολυηλεκτρολύτη, το pH, την ιοντική ισχύ και από το ίδιο το υπόστρωμα. Η τεχνική της LbL και η επιτυχία της οφείλεται στην ευελιξία και την προσαρμοστικότητα που εμφανίζει σε διαφορετικά υλικά και μορφές [Cerqueira 2022].

~ 38 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 38/74

Πολλές είναι οι μέθοδοι που έχουν παρουσιαστεί, όμως εκείνες που επιλέγονται είναι της εμβάπτισης και του ψεκασμού, κυρίως για την άμεση τοποθέτηση σε προϊόντα διατροφής. Η μέθοδος της εμβάπτισης είναι απλή και δίνει τη δυνατότητα για χρήση ακανόνιστων σχημάτων και διαφορετικών μεγεθών, ενώ από την άλλη η μέθοδος του ψεκασμού δίνει τη δυνατότητα εξάντλησης της εναπόθεσης κατά 10 με ταυτόχρονη διατήρηση μιας αποδεκτής ποιότητας φιλμ. Όσο αφορά τη συσκευασία, γίνεται κατά κύριο λόγο χρήση της τεχνικής layer-by-layer, η οποία παράγει ένα ενεργό διάλυμα συσκευασίας δίνοντας έμφαση στη βελτίωση των ιδιοτήτων φραγμού και την ένταξη δραστικών ενώσεων στα στρώματα που βρίσκονται ενδιάμεσα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην παραγωγή επιστρώσεων σε μικρο και νάνο κλίμακα είναι οι πρωτεΐνες, οι πολυσακχαρίτες και τα κερία και επιλέγονται κατά κύριο λόγο χάρη στη λειτουργικότητά τους και τη μέθοδο παραγωγής τους [Cerqueira 2022].

### 3.2.2 Μεμβράνες και επιστρώσεις για ενεργή συσκευασία

Στην πρόσφατη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί επιστρώσεις με βάση τις πρωτεΐνες, όπως είναι η απομονωμένη πρωτεΐνη σόγιας (SPI), η απομονωμένη πρωτεΐνη ορού γάλακτος (WPI) και η ζεΐνη καλαμποκιού (CZ), με τη χρήση ξεχωριστών πλαστικοποιητών, με στόχο τη λειτουργικότητα της συσκευασίας. Οι Lee et al. (2008) αναφέρθηκαν στη χρήση επιστρώσεων σε μεμβράνες πολυπροπυλενίου με βάση πρωτεΐνες φορτισμένες με νισίνη [Lee 2008, Cerqueira 2022].

Δραστικές επιστρώσεις πάχους από 14 έως 84 μm δημιουργήθηκαν με χρήση απομονωμένης πρωτεΐνης ορού γάλακτος και χρησιμοποιήθηκε γλυκερόλη ως πλαστικοποιητής φορτισμένα με νισίνη και εξετάστηκε η αντιβακτηριακή δράση τους έναντι στην ικανότητα ανάπτυξης του *Lactiplantibacillus plantarum*. Επιπλέον, επιστρώσεις με βάση πρωτεΐνες, επιστρώσεις ζεΐνης καλαμποκιού φορτισμένα με αιθέρια έλαια βρήκαν εφαρμογή σε γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας με τη βοήθεια χρήσης ράβδου επικάλυψης. Στη συνέχεια, η πρόσθεση μίας ακόμα μεμβράνης γραμμικού πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας οδήγησε στο σχηματισμό μιας πολυστρωματικής μεμβράνης. Οι ενεργές μεμβράνες που αναπτύχθηκαν, έπειτα, εφαρμόστηκαν σε μπιφτέκια μοσχαρίσιου κιμά με αποτέλεσμα τη βελτίωση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών όπως είναι το χρώμα και η οξειδωση λιπιδίων και την αύξηση της διάρκειας ζωής του προϊόντος [Lee 2008, Cerqueira 2022].

Οι Slavutsky και Bertuzzi (2016) έχοντας ως στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων φραγμού των μεμβρανών με βάση το άμυλο, εφάρμοσαν με εμβάπτιση μια νανοστοιβάδα με βάση το λάδι σε τέτοιου είδους μεμβράνες. Τοποθέτησαν το φιλμ με βάση το άμυλο στην ελαιώδη φάση και στη συνέχεια το ξέπλυναν με εξάνιο. Το αποτέλεσμα ήταν ο σχηματισμός μιας νανοστοιβάδας που είχε ως βάση τα λιπίδια και η οποία μείωσε την υδροφοβικότητα του φιλμ. Το πείραμα αυτό οδήγησε στη χρήση αυτής της μεθόδου με στόχο την προσθήκη λιπόφιλων βιοδραστικών ενώ-



σεων στη νανοστοιβάδα, παρά το γεγονός ότι οι ίδιοι δεν χρησιμοποίησαν βιοδραστικές ενώσεις [Slavutsky-Bertuzzi 2016, Cerqueira 2022].

Οι Costa et al. (2021) δημιούργησαν ενεργά φιλμ κάνοντας χρήση 2 μεθόδων με στόχο την ενθυλάκωση βακτηριοφάγων σε μεμβράνες που είχαν ως βάση πολυ(3-υδροξυβουτυρικό-συν-3-υδροξυβαλερικό). Στη μία μέθοδο, με τη βοήθεια ενός μεταλλικού διασκορπιστή, δημιουργήθηκε μία λεπτή επίστρωση που είχε ως βάση πολυβινυλική αλκοόλη. Η μέθοδος αυτή απέδειξε ότι μετά την ξήρανση, διατηρείται η βιωσιμότητα του βακτηριοφάγου [Costa 2021, Cerqueira 2022].

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η τεχνική layer-by-layer για την παραγωγή ενεργών μεμβρανών με πολλές έρευνες μάλιστα να παρουσιάζουν δυνατότητα συναρμολόγησης ενεργών υλικών κατά τη διαδικασία δημιουργίας πολλών στρωμάτων, οδηγώντας σε επιτάχυνση της αντιμικροβιακής δραστηριότητας [Cerqueira 2022].

Οι Fabra et al. (2016) χρησιμοποίησαν δύο ξεχωριστές πολυεπίπεδες μεθόδους με στόχο την ανάπτυξη ενεργών πολυστρωματικών συστημάτων. Η μία μέθοδος ήταν η ενθυλάκωση της καρβακρόλης (αιθέριο έλαιο) σε νανοκάψουλες ζεΐνης και η άλλη μέθοδος ήταν η δημιουργία γαλακτωμάτων που έχουν βάση τη χιτοζάνη φορτισμένα με καρβακρόλη. Και οι δύο μέθοδοι, ανέπτυξαν ένα φιλμ που αποτελείται από 5 στρώσεις σε ένα φιλμ PET και έγινε χρήση των παρακάτω στρωμάτων: αλγινικό νάτριο, νανοκάψουλες ζεΐνης, άλας αλγινικού οξέος, νανοκάψουλες ζεΐνης και άλας αλγινικού οξέος ή αλγινικό νάτριο, γαλάκτωμα με βάση χιτοζάνη, άλας αλγινικού οξέος, γαλάκτωμα χιτοζάνης και άλας αλγινικού. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές της πιθανής αντιμικροβιακής δράσης των μεμβρανών απέναντι στον μύκητα *Alternaria sp.* και έδειξαν την ικανότητα που εμφανίζουν οι ενεργές πολυστρωματικές μεμβράνες να δρουν μυκητοστατικά απέναντι στον μικροοργανισμό αυτόν. Αποδείχτηκε πως το πιο αποτελεσματικό σύστημα ήταν το αλγινικό νάτριο, νανοκάψουλες ζεΐνης, άλας αλγινικού οξέος, νανοκάψουλες ζεΐνης και άλας αλγινικού οξέος αφού εμφάνισε την μεγαλύτερη δράση κατά των μυκήτων [Fabra 2016, Cerqueira 2022].

Η τεχνική layer-by-layer δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και στη δημιουργία νάνο επίστρωσης στην επιφάνεια των τροφίμων. Πειράματα έχουν διεξαχθεί σε φρούτα και τυριά όπου εφάρμοσαν νανοεπιστρώσεις με τη βοήθεια αυτής της τεχνικής. Οι Medeiros et al. (2014) με την τεχνική αυτή εμβάπτισαν μάνγκο «Tommy Atkins» σε πηκτίνη και χιτοζάνη πέντε στρωμάτων. Μετά από 45 ημέρες αποθήκευσης, τα μάνγκο που είχαν επικαλυφθεί με τα στρώματα εμφάνιζαν καλύτερη, είχαν μειωμένη απώλεια νερού και έλλειψη ανάπτυξης μυκήτων σε σχέση με εκείνα που δεν ήταν επικαλυμμένα [Medeiros 2014, Cerqueira 2022].

Την ίδια τεχνική πολυστρωμάτωσης χρησιμοποίησαν και σε φρέσκα ολόκληρα αχλάδια με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Τα φρέσκα αχλάδια επικαλύφθηκαν με πέντε

~ 40 ~





στρώσεις από κ-καραγενάνη και λυσοζύμη, οι οποίες οδήγησαν στην αποφυγή απώλειας μάζας και στην καθυστέρηση της ωρίμανσης των αχλαδιών, δείχνοντας εμφανώς την αποτελεσματικότητα που παρουσιάζει το νάνο-ελασματοποιημένο υλικό όταν χρησιμοποιείται ως φραγμός απώλειας νερού [Medeiros 2014, Cerqueira 2022].

Επιπλέον, μία αντίστοιχη μελέτη των Medeiros et al. (2014) χρησιμοποίησε ως επίστρωση πέντε στρώσεις αλγινικού και χιτοζάνης με εναλλάξ σειρά σε φρεσκοκομμένα μάνγκο, προκαλώντας αύξηση της διάρκειας ζωής των μάνγκο τα οποία διατηρούνται στο ψυγείο στους 8°C για περισσότερες από 6 ημέρες, σε σχέση με εκείνα που ήταν φρεσκοκομμένα αλλά όχι επικαλυμμένα. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιήθηκε από τους Medeiros et al. (2014) για την επικάλυψη τυριού χρησιμοποιώντας όμως εναλλάξ στρώσεις αλγινικού και λυσοζύμης. Στη συνέχεια τα δείγματα τυριού τοποθετήθηκαν για 20 ημέρες στους 8°C μαζί με εκείνα που δεν είχαν επικαλυφθεί και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το τυρί με την επίστρωση παρουσίασε μικρότερη απώλεια σε μάζα, pH, χαμηλότερη οξείδωση λιπιδίων και μικρότερη ανάπτυξη μικροοργανισμών, αποδεικνύοντας πάλι ότι η νανοεπικάλυψη οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής του τυριού [Medeiros 2014, Cerqueira 2022].

### 3.3 Δ Δομές

#### 3.3.1 Μέθοδοι και Υλικά για την Παραγωγή Μικροσωματιδίων και Νανοσωματιδίων

##### 3.3.1.1 Μέθοδος Coacervation/Ionic Pre-gelation

Η μέθοδος συσσωμάτωσης / ιονικής προπηκτοποίησης έχει ως βάση την ηλεκτροστατική έλξη που εμφανίζουν αντίθετα φορτισμένα πολυμερή και η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μικροσωματιδίων και νανοσωματιδίων. Θεωρείται από τις μεθόδους που εφαρμόζονται με ευκολία και χωρίζεται σε απλή και σύνθετη ανάλογα με τον αριθμό των πολυμερών που χρησιμοποιούνται. Στην απλή μέθοδο περιέχεται ένα πολυμερές το οποίο είναι η ηλεκτροστατική έλξη η οποία δημιουργείται ανάμεσα σε ένα φορτισμένο πολυμερές (αντίθετα φορτισμένο) και μία φορτισμένη βιοενεργή ένωση (**Εικόνα 13**) [Cerqueira 2022].

Η σύνθετη μέθοδος από την άλλη, περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα πολυμερή, επίσης αντίθετα φορτισμένα, με την βιοενεργή ένωση που βρίσκεται εγκλωβισμένη σε ένα από τα πολυμερή, στο εσωτερικό του πυρήνα του. Μπορεί επίσης να γίνει χρήση ενός αντίθετου ιόντος το οποίο θεωρείται κατάλληλο για να ενεργοποιήσει τη διαδικασία της προ-πηκτοποίησης και να προκαλέσει αύξηση στη στιβαρότητα που εμφανίζεται στη σύνδεση μεταξύ των ιοντικών πολυμερών [Cerqueira 2022].

Το αποτέλεσμα που εμφανίζει η μέθοδος που αναφέρεται παραπάνω, είναι η δημιουργία μικρο και νάνο καψουλών οι οποίες εξωτερικά καλύπτονται από πολυμερική μεμβράνη, ενώ

~ 41 ~



εσωτερικά περιλαμβάνουν έναν πυρήνα ο οποίος περιέχει εγκλωβισμένο το βιοενεργό συστατικό και ο οποίος αποτελείται από μία υγρή ή μία πολυμερική μήτρα. Η δημιουργία των καψουλών αυτών χρειάζεται κάποιες παραμέτρους με σκοπό την μέγιστη απόδοσή τους. Οι παράμετροι αυτοί περιλαμβάνουν τη φύση των πολυμερών, την αναλογία των πολυμερών, τη συνολική περιεκτικότητα σε στερεά όπως και τις υδατικές συνθήκες (πίεση, διάτμηση, θερμοκρασία, pH, ιοντική ισχύς, ρυθμός που προστίθεται το διάλυμα πολυμερούς) [Cerqueira 2022].

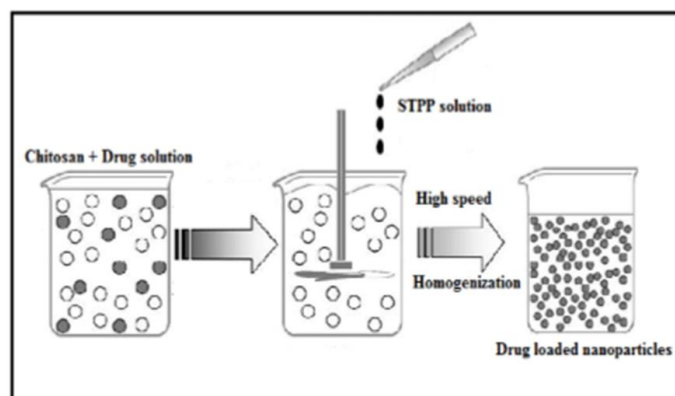
Η μέθοδος αυτή μπορεί να κάνει χρήση πολλών πολυμερών, όμως η επιλογή του καθενός θα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή ανάλογα με τη σταθερότητα, τα χαρακτηριστικά καθώς και την αποτελεσματικότητα που εμφανίζουν τα σωματίδια που σχηματίζονται. Στο επίπεδο των τροφίμων, ωστόσο, θα πρέπει να γίνεται χρήση υλικών με βιολογική βάση ή και υλικών που αποικοδομούνται βιολογικά, με χαμηλό κόστος και πιστοποιημένα από κανονισμούς και νομοθεσίες. Στα τρόφιμα γίνεται συνήθως χρήση βιοπολυμερών που προέρχονται από διαφορετικές πηγές όπως πολυσακχαρίτες (π.χ χιτοζάνη) και πρωτεΐνες (π.χ πρωτεΐνες γάλακτος) [Cerqueira 2022].

Η συσσωμάτωση / ιονική προπηκτοποίηση έχει εφαρμοσθεί πολλές φορές στην ενθυλάκωση βιοδραστικών ενώσεων όπως είναι η λουτεΐνη, το λυκοπένιο, τα αντιοξειδωτικά, τα προβιοτικά και οι γεύσεις με παράδειγμα τη μελέτη των Azevedo et al. (2014) όπου σχηματίστηκαν νανοκάψουλες με ενθυλακωμένη βιταμίνη Β, κάνοντας χρήση αλγινικού οξέος (αρνητικά φορτισμένο) και χιτοζάνης (θετικά φορτισμένη), και ως αντίθετο ιόν, CaCl. (Εικόνα) Οι κάψουλες που σχηματίστηκαν εμφάνισαν διαφορετικές τιμές διαμέτρου χωρίς τη βιταμίνη Β (119,5 nm ± 49,9) και με τη βιταμίνη Β (104,0 nm ± 67,2) [Azevedo 2014, Cerqueira 2022].

Στη μελέτη των Yuan et al. (2017) δημιουργήθηκαν μικροκάψουλες από πρωτεΐνη σόγιας/χιτοζάνη κάνοντας χρήση της σύνθετης μεθόδου, όπως αυτή αναφέρθηκε παραπάνω, με στόχο την ενθυλάκωση του ελαίου από φύκια. Με στόχο τη βέλτιστη απόδοση ενθυλάκωσης η οποία κυμαίνεται από 75,40% μέχρι 97,36%, πήραν μικροκάψουλες μεγέθους από 7,63 μm μέχρι 65 μm και παρατήρησαν ότι οι μικροκάψουλες οδήγησαν σε βελτίωση της οξειδωτικής σταθερότητας του ελαίου [Yuan 2017, Cerqueira 2022].

Από την άλλη οι Pei et al. (2021) έκαναν χρήση αιθανόλης με στόχο τη συσώρευση υδατικών διαλυμάτων ζελατίνης. Η συγκέντρωση της ζελατίνης μαζί με το υδατικό διάλυμα ζελατίνης και την αναλογία της αιθανόλης είχαν ως αποτέλεσμα να επηρεαστεί το μέγεθος των σωματιδίων που δημιουργήθηκαν (350 nm – 800 nm). Επιπλέον, η μέθοδος αυτή οδήγησε στο συμπέρασμα πως ο σχηματισμός λειτουργικού υλικού που έχει ως βάση τη ζελατίνη η οποία εμφανίζει ευαισθησία στη θερμοκρασία, είναι μία καλή επιλογή [Pei 2021, Cerqueira 2022].





**Εικόνα 13:** Σχηματισμός νανοκαψουλών με ενθυλακωμένη ουσία κάνοντας χρήση μίας αρνητικά φορτισμένης ένωσης, μίας θετικά φορτισμένης ένωσης και ενός αντίθετου ιόντος άλας [Kumar 2017]

### 3.3.1.2 Κατακρήμνιση κατά του διαλύτη (Anti-Solvent Precipitation)

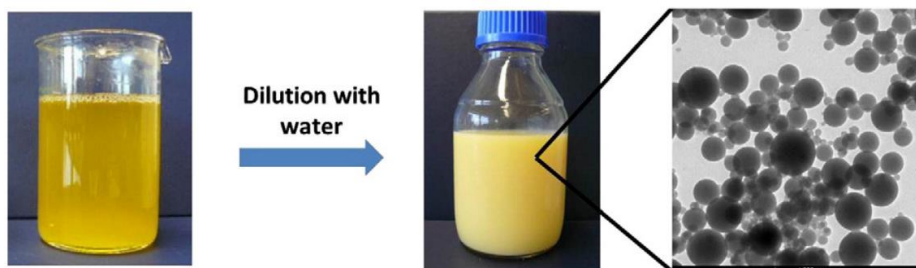
Η κατακρήμνιση κατά του διαλύτη περιλαμβάνει την αλλαγή της ποιότητας ενός διαλύτη για να σχηματιστούν αποσυναρμολογούμενες δομές ενός υλικού από μια υπερκορεσμένη ομοιογενή φάση. Ο σχηματισμός αυτός μπορεί να επιτευχθεί αναμινύοντας τη ρευστή φάση που βρίσκεται αρχικά και η οποία συνήθως είναι οργανικός διαλύτης με μία άλλη ρευστή φάση που είναι συνήθως νερό και η οποία φάση αναμειγνύεται καλά με τον οργανικό διαλύτη, αλλά όχι με το διαλυμένο υλικό. Η ανάμιξη των δύο διαλυτών οδηγεί σε αύξηση του υπερκορεσμού, του οποίου το επίπεδο είναι δυνατόν να εξακριβωθεί μέσω της συγκέντρωσης του υλικού που υπάρχει στο αποθεματικό διάλυμα και μέσω του τελικού αντιδιαλυτικού μείγματος. Ο υψηλός υπερκορεσμός ωστόσο οδηγεί σε αύξηση του των πυρήνων που δημιουργούνται, με αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου μεγέθους που έχουν τα σωματίδια που σχηματίζονται [Cerqueira 2022].

Η διαδικασία της κατακρήμνισης κατά του διαλύτη έχει 4 στάδια παραγωγής νανοσωματιδίων που ακολουθούν την εξής σειρά: υπερκορεσμός, πυρήνωση, ανάπτυξη, πήξη. Όταν δημιουργηθούν τα σωματίδια, ωστόσο, υπάρχει πιθανότητα συσσώρευσης αυτών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη μία πολύ ισχυρή ηλεκτροστατική απώθηση που θα εμποδίσει τη συσσώρευση αυτή [Cerqueira 2022].

Στα τρόφιμα η διαδικασία της κατακρήμνισης έχει χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο για τον σχηματισμό σφαιρικών νανοσωματιδίων με χρήση διαφόρων υλικών (πρωτεΐνες προλαμίνης, παράγωγα κυτταρίνης, λιπίδια, ρητίνες). Έτσι, αποδεικνύεται ότι η κατακρήμνιση κατά του διαλύτη είναι δυνατόν να εφαρμοστεί βιομηχανικά, αλλά και να παρασκευάσει νανοσωματίδια τα



οποία να είναι φορτισμένα με βιοενεργές ενώσεις, χρωστικές ουσίες, ακόμα και γεύσεις [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 14:** Αναπαράσταση της κατακρήμνισης με αντιδιαλύτη μοριακού διαλύματος ζείνης (σε υδατική αιθανόλη) με αρραίωση σε νερό προς λήψη σφαιρικών κολλοειδών σωματιδίων. Εικόνα μικροσκοπίας διέλευσης των σωματιδίων της κλίμακας 500 nm [Patel 2014].

### 3.3.1.3 Αυθόρμητη Συμπλοκοποίηση (Spontaneous Complexation)

Η διαδικασία της αυθόρμητης συμπλοκοποίησης βασίζεται σε μη ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις διαλυτών συστατικών όπως είναι οι ιοντικές αλληλεπιδράσεις, οι υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις ή οι δεσμοί υδρογόνου και κατά την οποία διαλυτά συστατικά συναρμολογούνται με στόχο τη δημιουργία μίας καινούργιας φάσης. Η αυθόρμητη συμπλοκοποίηση εστιάζει το ενδιαφέρον της στη δημιουργία νανοσωματιδίων μέσω της συσσωμάτωσης μίας ένωσης με μικρό μοριακό βάρος με μία εξίσου μικρού μοριακού βάρους ή με ένα μακρομόριο. Η τεχνική αυτή οδηγεί στη δημιουργία σωματιδίων στα οποία συγκαταλέγεται το χαμηλού μοριακού βάρους βιοδραστικό, με αποτέλεσμα η απελευθέρωση των βιοδραστικών ενώσεων να γίνεται ελεγχόμενα μέσω της διάσπασης των σωματιδίων [Cerqueira 2022].

Ως μακρομοριακά συστατικά έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά διαφορετικά βιοπολυμερή, με κύρια τις πρωτεΐνες γάλακτος και τα παράγωγα της κυτταρίνης, ενώ ως ενώσεις μικρού μοριακού βάρους έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης οι πολυφαινόλες. Πιο συγκεκριμένα, είναι γνωστό, πως οι φυσικές πολυφαινόλες εμφανίζουν ιδιαίτερη αντίδραση στη συμπλοκοποίηση με μακρομόρια εξαιτίας των πολικών ομάδων που διαθέτουν, οι οποίες εμφανίζουν πολλές λειτουργίες καθώς επίσης και εξαιτίας της φύσης τους, η οποία ούσα αμφιλεγόμενη αφού είναι και υδρόφιλη και υδρόφοβη, βοηθάει σε αλληλεπιδράσεις μη ομοιοπολικές. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές οδηγούν στη δημιουργία διαλυτών συμπλεγμάτων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα στη συνέχεια για αυτό-σύνδεση και να δημιουργηθούν κολλοειδή μεγέθη ή ακόμη και να συσσωματωθούν σε μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία καταλήγουν στο σχηματισμό ιζημάτων. Ωστόσο, για τη βέλτιστη παρασκευή σταθερών δομών νανοκλίμακας, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της στοιχειομετρίας και οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται η αντίδραση [Cerqueira 2022].

~ 44 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο docs.gov.gr/validate



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

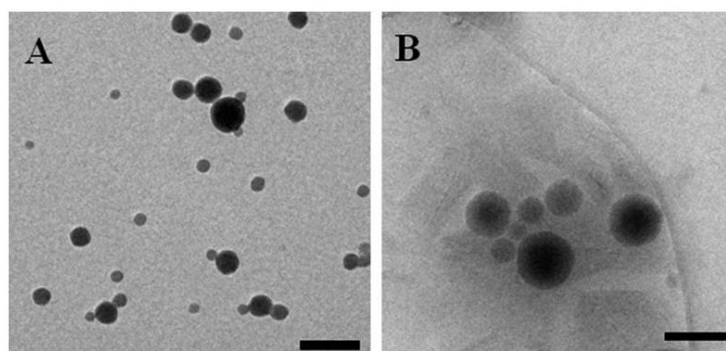
: 44/74

Οι πολυφαινόλες όμως δεν είναι μόνο γνωστές για τη συσσωμάτωσή τους με μακρομόρια, αλλά και για τη συμπλοκοποίησή τους με αλκαλοειδή τα οποία είναι μικρού μοριακού βάρους συστατικά. Η συμπλοκοποίηση αυτή οδηγεί στο σχηματισμό σφαιρικών κολλοειδών σωματιδίων, τα οποία μπορούν να καλύψουν τη γεύση ή και να ελέγξουν τη μεταφορά πικρών βιοδραστικών συστατικών σε εφαρμογές τροφίμων [Cerqueira 2022].

Η τεχνική της καθίζησης κατά του διαλύτη και η τεχνική της αυθόρμητης συμπλοκοποίησης παρουσιάζουν εμφανή πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μεθόδους από πάνω προς τα κάτω, οι οποίες αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα, και τα οποία είναι: μπορούν να πραγματοποιηθούν σε συνθήκες περιβάλλοντος, ο εξοπλισμός τους δεν κοστίζει, δεν σπαταλάται ενέργεια κατά την εφαρμογή τους και έχουν ως στόχο την κλιμάκωση [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 15:** Αναπαράσταση αυθόρμητης συμπλοκοποίησης, αριστερά αλκαλοειδής βερβερίνη, μέση διάλυμα EGCG (επιγαλοκατεχίνη), δεξιά κολλοειδές σύμπλοκο [Patel 2012].



**Εικόνα 16:** Απεικονίσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διέλευσης των σωματιδίων του κολλοειδούς συμπλόκου που παρασκευάστηκε στην **Εικόνα 15** κλίμακας 500nm (A) και 200nm (B) [Patel 2012].



### 3.3.2 Μέθοδοι και Υλικά Γαλακτωματοποίησης και Αφρού

#### 3.3.2.1 Γαλακτωματοποίηση (Emulsification)

Η διαδικασία της γαλακτωματοποίησης έχει ως βάση ένα σύστημα διασποράς αποτελούμενο από δυο μη αναμίξιμα υγρά, το ένα εκ των οποίων βρίσκεται σε διασπορά (δισπαρμένη φάση) εντός του άλλου (συνεχής φάση), με τη μορφή λεπτότατων σταγονιδίων, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός σταθερού συνδυασμού φάσεων. Στα τρόφιμα συγκεκριμένα, το λάδι και το νερό χρησιμοποιούνται συνήθως ως οργανικές και υδατικές φάσεις αντίστοιχα, αφού η ανάμειξή τους μπορεί να γίνει σταθερή με έναν ειδικό σταθεροποιητή. Ο συνδυασμός νερού-λαδιού οδηγεί σε σωματίδια τύπου «λάδι σε νερό» κατά το οποίο η λιπαρή φάση (υδρόφοβος πυρήνας) διασπείρεται στην υδατική φάση (υδρόφιλο γαλάκτωμα) ή σε σωματίδια τύπου «νερό σε λάδι» όπου το νερό (υδρόφιλος πυρήνας) διασπείρεται στη λιπαρή φάση (υδρόφοβο γαλάκτωμα) [Cerqueira 2022].

Ωστόσο, απαιτούνται κάποιοι παράγοντες οι οποίοι θα κρίνουν ποια από τις δύο καταστάσεις θα επικρατήσει και αυτοί είναι: οι συνθήκες, το είδος του γαλακτωματοποιητή, η αναλογία των δύο φάσεων και η μέθοδος ανάμειξής τους. Αποτέλεσμα των συνδυασμών αυτών είναι ο σχηματισμός σωματιδίων με πολύ μικρά μεγέθη (<100 nm). Τα σωματίδια εκείνα των οποίων η διάμετρος είναι από 10 nm έως 100 nm, εμφανίζουν καλύτερη σταθερότητα στον βαρυτικό διαχωρισμό όπως και στη συσσωμάτωση, οδηγώντας σε ένα διαφανές ή ελάχιστα θολό διάλυμα αφού τα μεγέθη αυτά βρίσκονται σε κλίμακα μικρότερη από εκείνη που βρίσκεται το υπεριώδες – ορατό φως. Οι γαλακτωματοποιητές που χρησιμοποιούνται ως σταθεροποιητές στη σταθερότητα των σωματιδίων είναι σημαντικοί κατά την παραγωγή των μικρο και νάνο-σωματιδίων καθώς προκαλούν μείωση της επιφανειακής τάσης όπως και της απαιτούμενης ενέργειας για το σχηματισμό γαλακτώματος. Με τον τρόπο αυτό, εμποδίζουν τη συνένωση των σταγονιδίων της δισπαρμένης φάσης, με τον σχηματισμό γύρω από αυτά μίας προστατευτικής μεμβράνης [Cerqueira 2022].

Ένας γαλακτωματοποιητής είναι ένα μόριο που περιέχει και υδρόφιλο και υδρόφοβο τμήμα, ένα πλεονέκτημα που του επιτρέπει να συνδέεται και με το νερό αλλά και με τη λιπαρή ύλη. Το υδρόφιλο τμήμα μπορεί να είναι φορτισμένο αρνητικά (ανιόν), θετικά (κατιόν), καθόλου φορτισμένο (μη ιονικό), ή και με τα δύο φορτία (αμφότερο). Η αναλογία που εμφανίζονται οι υδρόφοβες και οι υδρόφιλες ομάδες στον γαλακτωματοποιητή εκφράζεται με τον όρο «υδρόφιλη-λιπόφιλη ισορροπία» (H.L.B, Hydrophilic-Lipophilic Balance) και αφορά τον τρόπο που συμπεριφέρεται ο γαλακτωματοποιητής στην μεσεπιφάνεια μεταξύ νερού και λαδιού. Όσο χαμηλότερη είναι η HLB (3-6), τόσο πιο υδρόφοβος εμφανίζεται ο γαλακτωματοποιητής και ευνοείται η δημιουργία γαλακτωμάτων N/A, ενώ σε υψηλότερες HLB (8-18), ο γαλακτωματοποιητής εμφα-



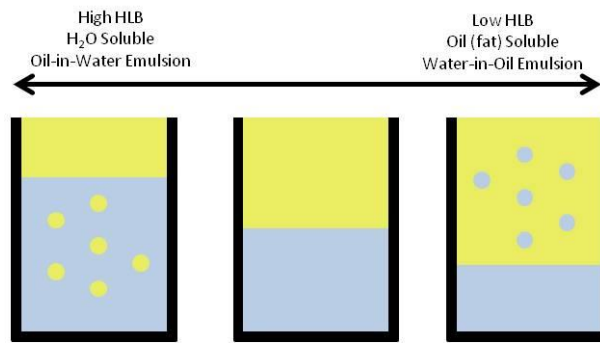
νίζεται υδρόφιλος και ευνοείται η δημιουργία γαλακτωμάτων Λ/Ν. Σε πολύ υψηλότερες HLB (>20) είναι απαραίτητη μία επιπλέον επιφανειοδραστική ουσία, η οποία θα μειώσει την αποτελεσματική τιμή της HLB (**Εικόνα 17**) [Cerqueira 2022].

Επιπλέον, είναι σημαντική η επιλογή σωστού γαλακτωματοποιητή, μιας και θα επηρεαστούν διάφοροι παράγοντες των γαλακτωμάτων (μέγεθος, σταθερότητα, τοξικότητα, φαρμακοδυναμική). Σε αντίθεση με τις κύριες φάσεις, η υδατική φάση περιέχει κατά κύριο λόγο νερό, αλλά δεν αποκλείεται κάποιες φορές να περιλαμβάνει και αλκοόλες, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, μέταλλα, οξέα, και βάσεις, ενώ η οργανική φάση περιλαμβάνεται από λιπίδια/έλαια, τα οποία ανήκουν στη κατηγορία τριγλυκερίδια μακράς αλυσίδας (LCT), μέσης αλυσίδας (MCT), ή βραχείας αλυσίδας (SCT) και μπορεί να γίνει χρήση τους είτε μεμονωμένα, είτε συνδυαστικά και η επιλογή τους γίνεται σύμφωνα με τη διαλυτότητα της βιοδραστικής ένωσης [Cerqueira 2022].

Μία ακόμα πληροφορία, είναι η παραγωγή των γαλακτωμάτων, η οποία γίνεται με μηχανισμούς οι οποίοι ταξινομούνται σύμφωνα με την ενέργειά τους σε χαμηλή και υψηλή ή σε έναν συνδυασμό αυτών. Ο μηχανισμός με την υψηλή ενέργεια, περιέχει μέσα τεχνικές όπως είναι οι υπέρηχοι, μικρορευστοποιητές και ομογενοποιητές υψηλής πίεσης, οι οποίες καταφέρνουν να μειώσουν το μέγεθος και να σχηματίσουν γαλακτώματα, μέσω διασπαστικών δυνάμεων που δημιουργούν και καταφέρνουν να διαλύσουν τις φάσεις. Οι μηχανισμοί αυτοί όμως παρουσιάζουν χρήση ακριβών οργάνων, καθώς και πιθανή βλάβη σε κάποιες βιοδραστικές ενώσεις και ιδιότητες του γαλακτώματος, εξαιτίας της παραγωγής θερμότητας. Από την άλλη, ο μηχανισμός με τη χαμηλή ενέργεια, περιλαμβάνει αυθόρμητη γαλακτωματοποίηση, αναστροφή φάσης και καταστροφική αναστροφή φάσης και δεν κάνει χρήση ομογενοποιητικού εξοπλισμού, ενώ εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υλικών, για αυτό θα πρέπει να γίνεται και σωστή επιλογή τους [Cerqueira 2022].

Η τεχνική της αυθόρμητης γαλακτωματοποίησης εμφανίζει απλότητα και χαμηλό κόστος και για αυτό παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές στο επίπεδο των τροφίμων. Από την άλλη όμως, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την τεχνική αυτή είναι συχνά περιορισμένα και οι γαλακτωματοποιητές βρίσκονται σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από εκείνες που γίνεται χρήση τους σε μηχανισμούς υψηλής ενέργειας. Επιπλέον, με τη μέθοδο αυτή επιτρέπεται η παραγωγή πολλαπλών γαλακτωμάτων νερό σε λάδι σε νερό (Ν/Λ/Ν) ή λάδι σε νερό σε λάδι (Λ/Ν/Λ). Η διασπορά του ενός υγρού στο άλλο, ως σταγονίδια, κάνει απαραίτητη τη χρήση τουλάχιστον δύο γαλακτωματοποιητών. Για σταθεροποίηση λοιπόν της επιφάνειας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού σταγονιδίου καθώς και της εξωτερικής διεπιφάνειας των σταγονιδίων, είναι απαραίτητη η χρήση γαλακτωματοποιητών που εμφανίζουν διαφορετικές HLB [Cerqueira 2022].





**Εικόνα 17:** Υδρόφιλη – λιπόφιλη ισορροπία και η επίδρασή της στον γαλακτωματοποιητή [Al-Yami AS 2018].

### 3.3.2.2 Σταθεροποίηση Κολλοειδών: Γαλακτώματα, Αφροί και Αφρώδη

Το μεγαλύτερο ποσοστό διατροφικών προϊόντων είναι πολύπλοκα κολλοειδή, όπως για παράδειγμα γαλακτώματα υψηλής εσωτερικής φάσης ή αφρισμένα γαλακτώματα. Τα προϊόντα αυτά των οποίων η κατανάλωση είναι συχνή αφορούν τα προϊόντα μαγιονέζα, σαντιγί και παγωτό. Η επιτυχημένη σταθεροποίηση όμως της διεπιφάνειας που δημιουργείται ανάμεσα στο λάδι και το νερό ή στον αέρα και το νερό των προϊόντων αυτών πραγματοποιείται συνήθως από επιφανειοδραστικές ουσίες με μικρό μοριακό βάρος (λεκιθίνη) ή από επιφανειοδραστικά μακρομόρια (πρωτεΐνες), μέσω της μοριακής προσρόφησης αυτών στις διεπιφάνειες. Η διαδικασία αυτή είναι αναστρέψιμη και έτσι η σταθερότητα των κολλοειδών υπάρχει για μικρό χρονικό διάστημα εξαιτίας της ευαισθησίας που εμφανίζουν στην αποσταθεροποίηση μέσα από τη συνένωση και την ωρίμανση Ostwald [Cerqueira 2022].

Μελέτες ασχολήθηκαν με διεπιφάνειες φορτωμένες με σωματίδια, τα οποία είχαν επιρροή στην σταθερότητα των κολλοειδών με μεγαλύτερη διάρκεια. Ωστόσο, τα σωματίδια αυτά έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στην ανάπτυξη κολλοειδών που αντιδρούν σε νέες λειτουργίες [Cerqueira 2022].

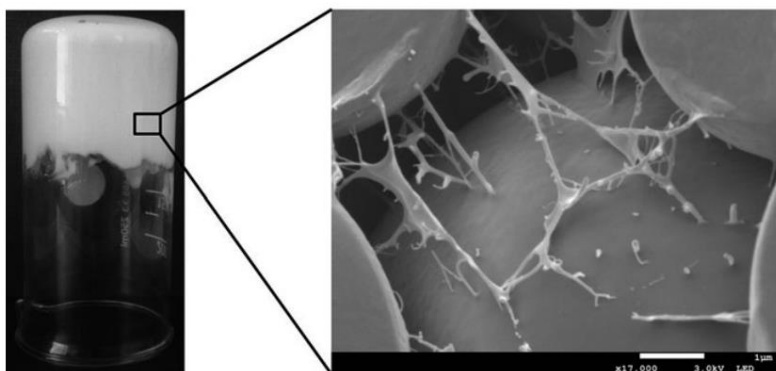
Η ανάπτυξη τυποποιημένων προϊόντων με τη βοήθεια απλών συνταγών και καθαρών ετικετών γίνεται ολοένα και αυξανόμενη σε ζήτηση στις βιομηχανίες τροφίμων σε παγκόσμια κλίμακα. Κατά τη διαδικασία αυτή, ερευνητές στον τομέα της επιστήμης τροφίμων αναζητούν λύσεις αντικατάστασης των πρόσθετων και των βοηθητικών σκευασμάτων, όπως είναι τα επιφανειοδραστικά, με φυσικά συστατικά [Cerqueira 2022].

Τα γαλακτώματα Pickering εμφανίζουν μεγάλες δυνατότητες αντιμετώπισης στη μεγάλη πρόκληση της ενίσχυσης της δυναμικής ποιότητας των τροφίμων. Μελέτες μάλιστα, εξετάζουν τις πιθανές χρήσεις αυτών στη βιομηχανία τροφίμων. Στα γαλακτώματα αυτά, τα σταγονίδια γί-





νονται σταθερά με τη βοήθεια των σωματιδίων τα οποία παρέχουν μερική διπλή διαβρεξιμότητα και από τις δύο φάσεις (νερό, λάδι), με αποτέλεσμα τη συσσώρευση των σωματιδίων στη διεπιφάνεια που δημιουργείται μεταξύ τους. Η σταθεροποίηση αυτή ωστόσο, μπορεί να επιτευχθεί και με τη βοήθεια μαλακών σωματιδίων που παραμορφώνονται εύκολα όπως είναι τα σωματίδια μικρογέλης ή κολλοειδή σύμπλοκα. Ένα παράδειγμα της χρήσης αυτών, είναι η παραγωγή γαλακτωμάτων συνεχούς νερού με κλάσμα όγκου φάσης διασποράς περίπου 0,82 κάνοντας χρήση κολλοειδών συμπλόκων απομόνωσης πρωτεΐνης ορού γάλακτος και χαμηλής μεθοξυπηκτίνης (LMP). Τα κολλοειδή σύμπλοκα του τύπου WPI-LMP χρησιμοποιούνται ως ευέλικτα συστατικά φυσικής προέλευσης, σε σχέση με άλλα συνθετικά επιφανειοδραστικά (**Εικόνα 18**) [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 18:** Εικόνα γαλακτώματος (αριστερά) και εικόνα cryo-SEM (δεξιά) με κλάσμα όγκου φάσης διασποράς 0,82, που παρουσιάζει τα κολλοειδή σύμπλοκα που σχηματίζονται στην επιφάνεια των σταγονιδίων ελαίου [Cerqueira 2022].

Επιπλέον, τα γαλακτώματα αυτά έχουν την ικανότητα να τους συμβαίνει από-γαλακτωματοποίηση και στη συνέχεια ξανά γαλακτωματοποίηση με τη βοήθεια παραγόντων που λειτουργούν σαν ενεργοποιητές όπως είναι το pH, η θερμοκρασία και οι ηλεκτρολύτες. Τα γαλακτώματα Pickering έχουν τη δυνατότητα απόκρισης σε βιολογικούς ερεθισμούς, ανάλογα με τη χρήση που γίνεται στις ιδιότητες των σωματιδίων τους. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει χρήση των γαλακτωμάτων αυτού του τύπου για να χορηγήσουν βιοδραστικές ενώσεις, ένζυμα ή γεύσεις, σε ρυθμό που έχει προδιαγραφεί, ή για να ανταποκριθούν σε συνθήκες που έχουν προκαθοριστεί, όπως είναι οι αλλαγές στο pH στη γαστρεντερική οδό. Μέσω της ιδιότητας του shellac, η οποία εξαρτάται από το pH, θα υπήρχε η δυνατότητα να γίνεται μετατροπή των γαλακτωμάτων από κροκιδώμενα σε σταθερά, αλλά αναστρέψιμα, μόνο με μία αλλαγή στο pH. Τέτοιου είδους γαλακτώματα θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στη χορήγηση βιοδραστικών ενώσεων οι

~ 49 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο docs.gov.gr/validate



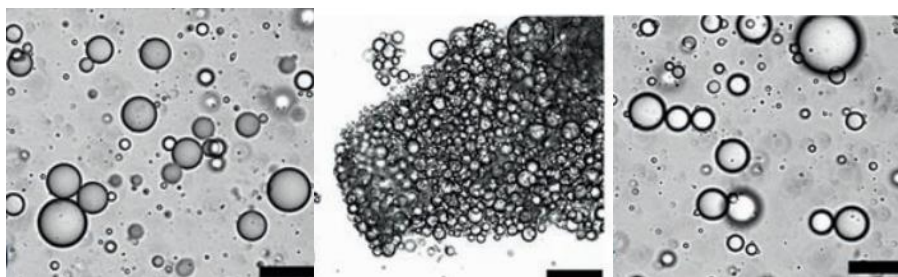
Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 49/74

οποίες εμφανίζουν ευαισθησία στην αποικοδόμηση στο όξινο pH που εμφανίζει το στομάχι (**Εικόνα 19, Εικόνα 20**) [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 19:** Αριστερά σε ουδέτερο pH, σταθερό γαλάκτωμα – Μέση σε όξινο pH, αφρώδες γαλάκτωμα – Δεξιά μετά από εξουδετέρωση, σταθερό γαλάκτωμα [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 20:** Εικόνες μικροσκοπίας με το μέγεθος των σταγονιδίων των παραπάνω γαλακτωμάτων (από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα). Κλίμακα μέτρησης: 50μm, 100μm, 50μm [Cerqueira 2022].

Τα αφρώδη γαλακτώματα θεωρούνται πολύπλοκα κολλοειδή, όπου η φάση του λαδιού και η φάση του αέρα διασπώνται στη φάση του νερού. Πολύπλοκα κολλοειδή αυτού του είδους θεωρείται ότι χρησιμοποιούνται ως βάση σε προϊόντα διατροφής όπως η σαντιγί. Στα συστήματα αυτά η σταθερότητα του αφρού πραγματοποιείται μέσω προσρόφησης γαλακτωματοποιητών όπως είναι οι πρωτεΐνες και στη συνέχεια μέσω συσσωμάτωσης σφαιριδίων λίπους πάνω στη διεπιφάνεια που δημιουργείται μεταξύ αέρα και νερού, με τη βοήθεια της μερικής συνένωσης. Γαλακτώματα αφρού νερού με κλάσματα όγκου ελαίου έως 0,5 μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας κολλοειδή σύμπλοκα που παρασκευάζονται από την αυθόρμητη αλληλεπίδραση μεθυλοκυτταρίνης και πολυφαινολικό ταννικό οξύ (**Εικόνα 21**) [Cerqueira 2022].

Τα κολλοειδή σύμπλοκα είναι εξαιρετικοί σταθεροποιητές διεπιφάνειας για γαλακτώ-

~ 50 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

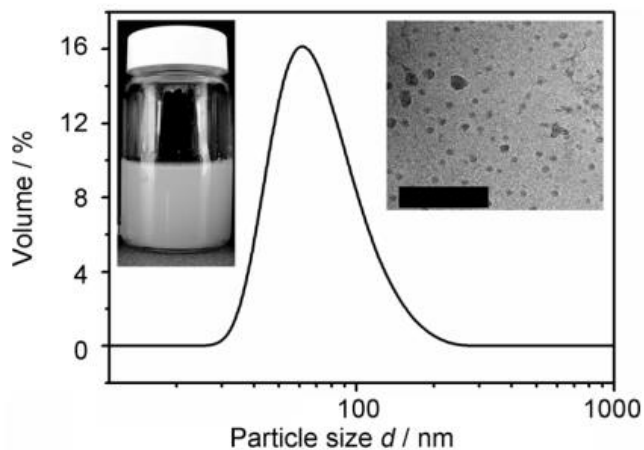
Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο docs.gov.gr/validate



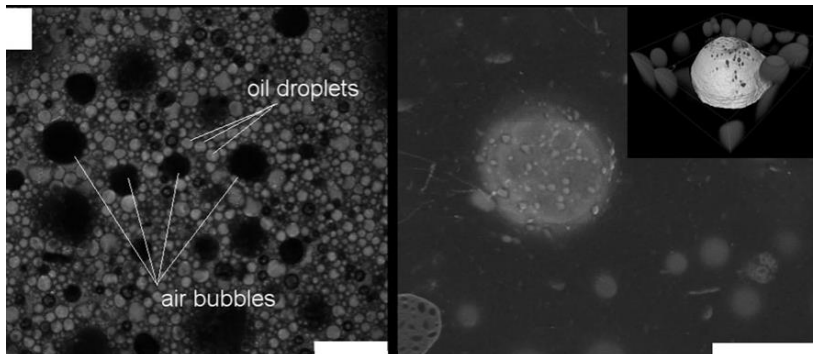
Κωδικός εγγράφου: 11Sp2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 50/74

ματα αφρού, αφού διαπιστώθηκε ότι είναι σταθερά σε πιθανή κατάρρευση για αρκετές εβδομάδες και εμφανίζουν σφιχτά συσκευασμένα σταγονίδια λαδιού γύρω από τις φυσαλίδες στη φάση αφρού (**Εικόνα 22**). Η προσέγγιση αυτή έδωσε τη δυνατότητα χρήσης τους στη φόρτωση χρωστικών διαλυτών στο λάδι, με στόχο τον σχηματισμό έντονων χρωματισμών αφρών, χάρη στον εντοπισμό της υδρόφοβης βαφής στην αφρώδη φάση [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 21:** Καμπύλη κατανομής μεγέθους των σωματιδίων των κολλοειδών συμπλόκων μεθυλοκυτταρίνης και πολυφαινολικού ταννικού οξέος. Αριστερά: κολλοειδής διασπορά ενός τέτοιου συμπλόκου. Δεξιά: TEM εικόνα της διασποράς κλίμακας 200nm [Patel 2012 (1)].



**Εικόνα 22:** Συνεστιακή μικροσκοπία, γαλακτώματα αφρού κλίμακας 250mm και 25mm. Απεικονίζονται οι φυσαλίδες αέρα ως σκούρες κηλίδες και οι σταγόνες ελαίου ως γκρι κηλίδες. Πάνω δεξιά: μία φυσαλίδα αέρα που περιβάλλεται από τα σταγονίδια ελαίου σε τρισδιάστατη μορφή [Patel 2012 (1)].



### 3.3.2.3 Ελαιοπήγματα (Oleogels)

Τα ελαιοπήγματα αποτελούνται από ένα έλαιο το οποίο είναι φαγώσιμο και το οποίο διατηρείται ή εγκλωβίζεται μέσα στο δομικό θερμοαναστρέψιμο δίκτυο ή στο θερμοαναστρέψιμο δίκτυο ζελατινοποίησης. Αν και οι μελέτες για τα ελαιοπήγματα πραγματοποιούνταν για πολλά χρόνια, το ενδιαφέρον για τη χρήση τους σε προϊόντα διατροφής αναπτύχθηκε μόλις την περασμένη δεκαετία. Εξαιτίας των πλεονεκτημάτων τους που αναδείχθηκαν από έρευνες, όπως η εύκολη επεξεργασία τους, η χαμηλή τιμή τους και η ικανότητα που έχουν να προσαρμόζονται, αποδείχθηκε ότι μπορούσαν να εφαρμοστούν σε διατροφικά προϊόντα προσφέροντας τις κατάλληλες ιδιότητες, ενώ ταυτόχρονα θα υποκαταστάσουν το λίπος σε μια πιο υγιεινή του μορφή, αφού τα κορεσμένα και τρανς λιπαρά σχετίζονται με σοβαρά θέματα υγείας. Για τον λόγο αυτό, απαιτήθηκε η χρήση ποιοτικών συστατικών τροφίμων για υποκατάσταση του λίπους [Cerqueira 2022].

Το 2018 η Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων (EFSA), έδωσε την έγκριση της σε μία έκθεση, η οποία επεσήμανε συστάσεις προς τους καταναλωτές για την πρόσληψη των τρανς λιπαρών, καθώς επίσης και για την αύξηση του κινδύνου απόκτησης σοβαρών προβλημάτων υγείας (καρδιαγγειακή νόσος). Το 2021, λοιπόν, πάρθηκε η απόφαση από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA), η οποία τερμάτισε τη χρήση τρανς λιπαρών σε προϊόντα βιομηχανίας [Cerqueira 2022].

Τα ελαιοπήγματα ευνοούνται στην εφαρμογή τους σε σκληρά υλικά των οποίων χαρακτηριστικά όπως η λειτουργικότητα, η υφή και η γευστικότητα οφείλονται κατά κύριο λόγο στη φυσική τους κατάσταση και όχι στη χημική τους. Αυτό συμβαίνει, διότι τα ελαιοπήγματα δημιουργούνται από φυσικές πηγές και προσφέρουν τη διατήρηση των χαρακτηριστικών αυτών πιο φυσικά. Επιπλέον, η παραγωγή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα μεγάλο πεδίο δομικών παραγόντων που καταλήγουν σε ξεχωριστούς μηχανισμούς ζελατινοποίησης, οι οποίοι θα επηρεάσουν διαφορετικά τα χαρακτηριστικά τους σε νανοκλίμακα και διαφορετικά σε μικροκλίμακα. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη ζελατινοποίησης που είναι κατάλληλα για αυτή την εφαρμογή, ανάμεσα στα οποία είναι η αιθυλοκυτταρίνη, τα λιπαρά οξέα, τα ελαιοπήγματα που έχουν ως βάση στερόλη, πολυσακχαρίτες και πολλά άλλα (**Εικόνα 23**) [Cerqueira 2022].





**Εικόνα 23:** Απεικόνιση σχηματισμού ελαιοπήγματος ενός γαλακτωματοποιημένου υγρού ελαίου που έχει υποστεί αποξήρανση και διάτμηση. Τα κίτρινα σταγονίδια που απεικονίζονται είναι σταγονίδια γαλακτώματος με προσροφημένο στρώμα ζελατίνης (κόκκινο χρώμα) και φύλλα κόμμεως ξανθάνης (πράσινο χρώμα). Με μπλε απεικονίζεται το νερό που απομακρύνεται με ξήρανση και οδηγούνται τα σταγονίδια ελαίου σε σφιχτό πακετάρισμα. Συσκευασμένα σταγονίδια σχηματίζονται μετά από διάτμηση του αποξηραμένου ελαίου που οδηγεί σε σχηματισμό ελαιοπήγματος [Guenard 2019].

### 3.4 Εφαρμογές Τρισδιάστατων Δομών

#### 3.4.1 Απελευθέρωση καφεΐνης από νανοσωματίδια πρωτεΐνης

Η καφεΐνη είναι ευρέως γνωστή και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ πεδίο αναψυκτικών, καθώς και ενεργειακών ποτών, τα οποία γίνονται ολόένα και πιο διαδεδομένα εξαιτίας της εξαιρετικής βιοδραστικότητας που παρουσιάζουν. Ένα από τα προβλήματα ωστόσο που παρουσιάζουν τα προϊόντα αυτά στη σύνθεσή τους, είναι η ύπαρξη της πικρής γεύσης της καφεΐνης. Με τη βοήθεια ενός μέσου, η καφεΐνη ενθυλακωμένη μπορεί με ευκολία να προστεθεί σε λειτουργικά διατροφικά προϊόντα χωρίς να αλλοιωθεί η γεύση ή να προκαλέσει αύξηση της πικράδας, ενώ επιτυγχάνεται η ελεγχόμενη απελευθέρωση της και εντείνονται οι ιδιότητες των προϊόντων αυτών [Cerqueira 2022].

Πιο συγκεκριμένα, ο Guo et al. (2017) μελέτησε την ενθυλάκωση καφεΐνης σε νανοσωματίδια πρωτεΐνης, παράγοντας μονοδιασπαρμένα νανοσωματίδια β-λακτοσφαιρίνης με σφαιρικό σχήμα μέσω απλής αυτοσυναρμολόγησης που οφείλεται στη θερμότητα που δημιουργείται σε ήπιες συνθήκες. Αποδείχτηκε, ότι τα νανοσωματίδια αυτά είχαν την ικανότητα να ενθυλακώσουν την καφεΐνη στη μέγιστη απόδοση του 13,54%, με την αναλογία να είναι 50 (καφεΐνη) προς 1 (β-λακτοσφαιρίνη). Τα νανοσωματίδια με την ενθυλακωμένη καφεΐνη, απελευθερώθηκαν ω-



στόσο μόνο σε εντερικές συνθήκες και όχι σε στομαχικές. Αντίστοιχα, οι Bourbon et al. (2018) πέτυχαν ενθυλάκωση καφεΐνης σε πρωτεϊνικές νανοϋδροπηκτές, οι οποίες αποτελούνται από λακτοφερίνη και γλυκομακροπεπτίδια και προσθέτοντας ένα στρώμα χιτοζάνης τα απελευθέρωσε σε συνθήκες στομάχου. Τα αποτελέσματα, έδειξαν βελτίωση στη σταθερότητα και τη βιοπροσβασιμότητα των δραστικών ενώσεων κατά τη διάρκεια της πέψης που πραγματοποιήθηκε in vitro, εξαιτίας της ύπαρξης της χιτοζάνης [Bourbon 2018, Cerqueira 2022].

### 3.4.2 Τα ελαιοπήγματα ως αντικαταστάτες λίπους

Τα ελαιοπήγματα προσφέρουν δομικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να προστεθούν σε τρόφιμα προσφέροντάς τους επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά, ενώ ταυτόχρονα δεν περνάνε απαρατήρητα από τους καταναλωτές. Ωστόσο, ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζει η διαδικασία αυτή είναι η δυνατότητα αλλαγής των θρεπτικών, δομικών και αισθητηριακών ιδιοτήτων, ενώ ταυτόχρονα να συνεχίζουν να είναι ελκυστικά στους καταναλωτές. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι η εύρεση πηκτωμάτων με χαμηλό κόστος, κάτι που τα καθιστά δύσκολο να εφαρμοστούν. Παρόλα τα προβλήματα όμως οι μελέτες έχουν προχωρήσει και τα ελαιοπήγματα έχουν βρει εφαρμογή σε ένα ευρύ πεδίο τροφίμων όπως είναι το κρέας, η σοκολάτα, το παγωτό και τα αρτοσκευάσματα. Τα ελαιοπήγματα αποτελούμενα από χαμηλά κορεσμένα και υψηλά ακόρεστα λιπαρά, προσφέρουν απευθείας βελτίωση στη διατροφική αξία των τροφίμων, αμέσως μόλις ενσωματωθούν σε αυτά, αντικαθιστώντας το λίπος [Cerqueira 2022].

Η αντικατάσταση του λίπους, ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει αλλαγές σε οργανοληπτικά χαρακτηριστικά που αφορούν το λίπος, όπως είναι η υφή και αυτό είναι κάτι που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη από τους ερευνητές. Επιπλέον, θα πρέπει να γίνει κατανοητό, πως η ενσωμάτωση των ελαιοπηγμάτων δεν γίνεται για πλήρη αντικατάσταση του λίπους, αλλά αντιθέτως για τη μερική αντικατάσταση του κακού λίπους με καλό. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει το δρόμο προς τη χρήση εδωδιμων ελαιοπηγμάτων με στόχο την αντικατάσταση των κορεσμένων λιπαρών σε επεξεργασμένα προϊόντα κρέατος όπως είναι τα λουκάνικα Φρανκφούρτης. Η αντικατάσταση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με στόχο τη βελτίωση της υφής, των αισθητηριακών ιδιοτήτων ή ακόμα και της οξειδωτικής συμπεριφοράς των προϊόντων που έχουν ως βάση το κρέας [Cerqueira 2022].

Στα επεξεργασμένα προϊόντα κρέατος συγκεκριμένα, το λίπος έχει σπουδαίο ρόλο καθώς δημιουργεί σταθερά γαλακτώματα, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν σε βελτίωση της ικανότητας συγκράτησης του νερού, που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απώλειάς του κατά το μαγείρεμα. Στα πατέ, ένα άλλο είδος επεξεργασμένου κρέατος, η ενσωμάτωση ελαιοπηγμάτων με βάση είτε μονοστεατική γλυκερόλη ή αιθυλοκυτταρίνη ως αντικαταστάτες του λίπους, παρουσίασε ότι τα καινούργια προϊόντα είχαν παρόμοια υφή και φυσικές ιδιότητες με τα αρχικά



πατέ. Στα λουκάνικα Φρανκφούρτης, επίσης, ελαιοπήγματα ηλιέλαιου με βάση γ-ορυζανόλη και φυτοστερόλη, οδηγούν σε αντικατάσταση του χοιρινού λίπους σε ποσοστό 50%, επιτρέποντας τη διατήρηση των φυσικοχημικών και αισθητηριακών ιδιοτήτων τους. Επιπλέον, ελαιοπήγματα με βάση το κερύ ή ελαιοπήγματα παραγόμενα από μείγματα μονοστεατικού και φυτοστερόλης, έδειξαν να προκαλούν βελτίωση στη θρεπτική αξία των Φρανκφούρτης, με ταυτόχρονη διατήρηση της υφής και των ιδιοτήτων της [Cerqueira 2022].

Η πρόσφατη εκ νέου σύνθεση γαλακτωμάτων κρέατος με στόχο την παραγωγή λουκάνικου Μπολόνιας, απέδειξε ότι με χρήση ελαιοπηγμάτων που έχουν ως βάση μονογλυκερίδια, ένας αντικαταστάτης κορεσμένου λίπους 50% δεν επιδρά τη σκληρότητα του νέου προϊόντος, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί βελτίωση της κοπής σε φέτες, κάτι που μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερες αποδόσεις για τους κατασκευαστές. Μελέτες για την ένταξη σε νερό, ελαιοπηγμάτων αιθυλοκυτταρίνης ή γαλακτωμάτων ελαιογέλης, σε σχέση με την αντικατάσταση του λίπους μόνο με λάδι κανόλα (κραμβέλαιο), πρόσφεραν την ιδιότητα της υιοθέτησης της σκληρότητας των Φρανκφούρτης από χοιρινό λίπος [Cerqueira 2022].

Στα αρτοσκευάσματα, από την άλλη, όπως είναι τα μπισκότα ή τα κέικ, χρησιμοποιούνται συνήθως υδρογονωμένα ή φυσικά έλαια που περιέχουν υψηλά ποσοστά κορεσμένων λιπαρών. Αυτό οδήγησε στη χρήση shellac, φυσικών κεριών και αιθυλοκυτταρίνης ως ελαιοπήγματα με στόχο την εφαρμογή σε τέτοια προϊόντα προς αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού. Σε αλείμματα σοκολάτας αποδείχθηκε ότι τα ελαιοπήγματα που έχουν ως βάση υδροκολλοειδή είναι κατάλληλα για να αντικαταστήσουν το στερεό λίπος καρύδας. Επιπλέον, η σοκολάτα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι ένα από τα τρόφιμα, στα οποία βρίσκουν εφαρμογή τα ελαιοπήγματα [Cerqueira 2022].

Πιο συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση ελαιοπηγμάτων στη σοκολάτα οδηγεί σε καθυστέρηση της δημιουργίας λίπους που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της γυαλάδας, της ομαλότητας καθώς και της υφής που εμφανίζει η επιφάνεια της σοκολάτας. Τα δείγματα σοκολάτας που περιείχαν την αιθυλοκυτταρίνη εμφάνισαν υψηλότερη αντίσταση στη θερμότητα σε σύγκριση με τα αρχικά δείγματα. Επιπλέον, με την ενσωμάτωση ελαιογέλης shellac σε πάστα σοκολάτας, έγινε εφικτή η πλήρης αντικατάσταση του συνδετικού λαδιού, ενώ ταυτόχρονα δεν υπήρξε εξάντληση λαδιού. Έρευνες έδειξαν ότι αυτό οφείλεται στην κρυστάλλωση που μπορεί να συμβαίνει στην αιθυλοκυτταρίνη και τη shellac ελαιογέλη [Cerqueira 2022].

Μία άλλη κατηγορία είναι το παγωτό. Στο παγωτό, γίνεται χρήση μη γαλακτοκομικού λίπους το οποίο συνήθως είναι από κορεσμένη φάση. Η χρήση ελαιοπηγμάτων φαίνεται να είναι μία διαδικασία αντικατάστασης του λίπους. Πιο συγκεκριμένα, οι Botega et al. (2013) ερεύνησαν το ενδεχόμενο ένταξης γαλακτωματοποιημένων ελαιοπηγμάτων κεριού με βάση πίτουρο ρυζιού και μονοελαϊκή γλυκερόλη και δημιούργησαν δομή λίπους στο παγωτό με 15% συνολική περι-

~ 55 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

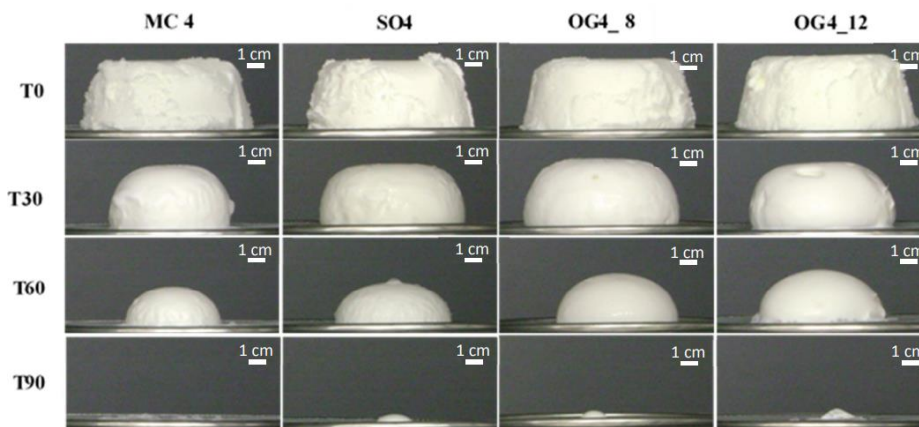
Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 55/74

κτικότητα σε λιπαρά και απέδειξαν την αποτελεσματικότητα αυτών, αφού δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τα δείγματα ελέγχου στο μέγεθος των λιπιδικών σφαιριδίων. Τα παγωτά με χαμηλή περιεκτικότητα σε λιπαρά εμφάνισαν σχεδόν ίδια πυκνότητα και ιξώδες με τα κανονικά παγωτά, με τη μόνη διαφορά ότι τα πρώτα παρουσίαζαν βελτιωμένη ροή και αύξηση στη διάρκεια έναρξης της τήξης (**Εικόνα 24**) [Botega 2013, Cerqueira 2022].



**Εικόνα 24:** Τήξη παγωτών με 4g/100g λίπους, παρασκευασμένα με κρέμα γάλακτος (MC4), με ηλιέλαιο (SO4), με ελαιογέλη με 8g/100g ζελατινοποιητές (OG4\_8) και με ελαιογέλη με 12g/100g ζελατινοποιητές (OG4\_12). Η λήψη των εικόνων πραγματοποιείται στην αρχή των δοκιμών (T0), μετά από 30 λεπτά (T30), μετά από 60 λεπτά (T60) και μετά από 90 λεπτά (T90) [Moriani 2017].

### 3.4.3 Γαλακτώματα-Bigels με βάση τα ελαιοπήγματα

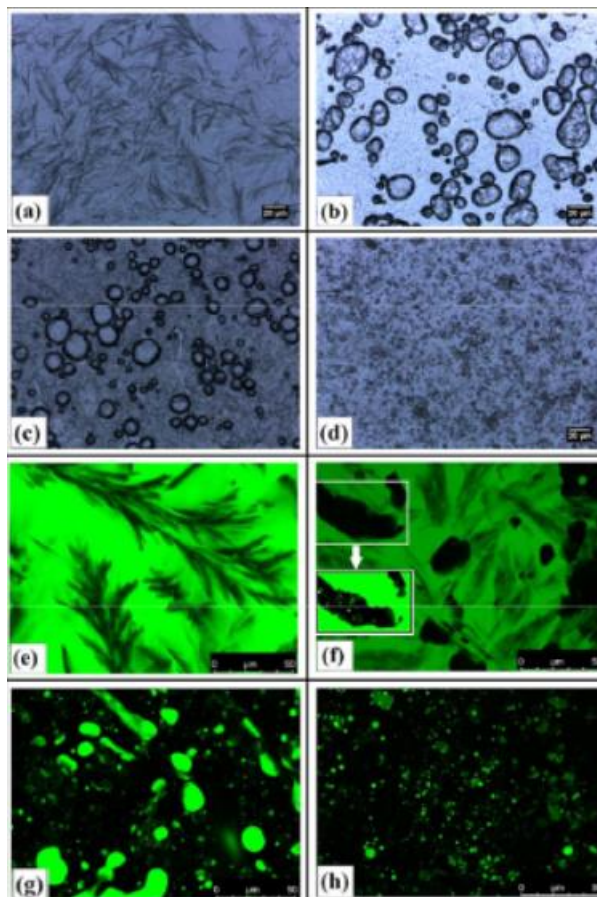
Η παραγωγή στερεών υλικών των οποίων η σύνθεση αποτελείται από ελαιοπήγματα, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση συστημάτων τα οποία είναι μορφοποιημένα με γαλακτώμα. Τα bigels τα οποία είναι μοναδικά ημιστερέα σκευάσματα με βελτιωμένες ιδιότητες για τρόφιμα, είναι ένας συνδυασμός δύο μη αναμιγνυόμενων πηκτωμάτων. Τα γαλακτώματα που έχουν ως βάση αυτά ή ελαιοπήγματα, αποτελούν εδωδιμα συστήματα δύο φάσεων που έχουν την ικανότητα παραγωγής σε μεγάλους ρυθμούς διάτμησης και εμφανίζουν τον χαρακτήρα και του λαδιού και του ύδατος. Η προσέγγιση αυτή, ωστόσο, δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα για συστήματα που έχουν ως βάση τους ελαιοπήγματα, ενώ αντίθετα τα bigels αυξάνουν τις πιθανές εφαρμογές τους χάρη στη φύση τους η οποία έχει άμεση σχέση με τα υλικά που θα διαλεχθούν, καθώς υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας δύο διαφορετικών συστημάτων oleogel σε υδρογέλη, ή υδρογέλη σε oleogel (**Εικόνα 25**) [Cerqueira 2022].

Ο διαφορετικός πιθανός συνδυασμός, θα οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τα δίκτυα ή τις δομές, με αποτέλεσμα να υπάρξει πιθανή επιρροή της σκληρότητας ή





και της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς. Επιπλέον, τα υλικά αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε καλλυντικά, φαρμακευτικά είδη και διατροφικά προϊόντα, χάρη στο πλεονέκτημα που έχουν να μπορούν να μεταφέρουν και υγρόφιλες αλλά και υδρόφοβες βιοενεργές ενώσεις, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν τη δυνατότητα να σχετίζονται με το λίπος και τη υφή [Cerqueira 2022].



**Εικόνα 25:** Απεικόνιση φωτεινού πεδίου Bigels με διαφορετικούς πιθανούς συνδυασμούς σύνθεσης των σκευασμάτων [Guenard 2019].



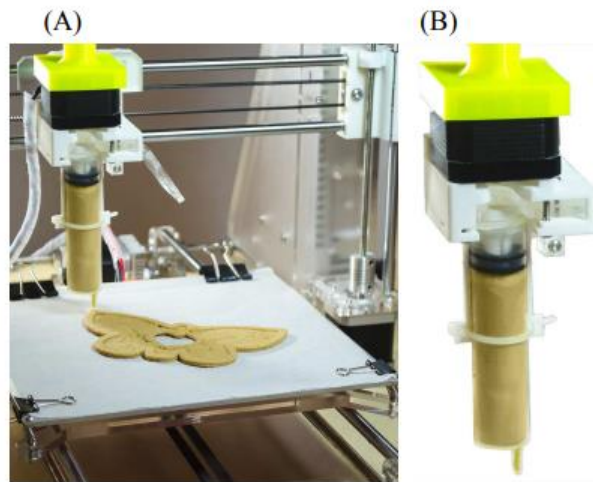
### 3.5 Τρισδιάστατη Εκτύπωση Τροφίμων

Η 3D εκτύπωση είναι η τεχνολογία εκείνη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή 3D αντικειμένων μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού, βασισμένα σε τρισδιάστατα μοντέλα, κάνοντας χρήση ενός υπολογιστή ο οποίος κατασκευάστηκε το 1980 για χρήση συγκεκριμένα στη στερεολιθογραφία. Σήμερα, η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε ένα ευρύ πεδίο υλικών, όπως είναι τα πλαστικά, τα μέταλλα, τα κεραμικά, τα βιοπολυμερή, το τσιμέντο, ακόμα και εδωδιμες τρισδιάστατες δομές. Η τρισδιάστατη εκτύπωση περιέχει πολλά στάδια και είναι ανεξάρτητη από το υλικό ή από την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Το μοντέλο που σχεδιάζεται, στη συνέχεια κόβεται σε φέτες. Οποιαδήποτε επεξεργασία πραγματοποιηθεί μετά την επεξεργασία, τροποποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνει την εκτύπωση, τη δομική σταθερότητα ή οποιαδήποτε άλλη ιδιότητα που είναι σημαντική στο τελικό μοντέλο. Τα προϊόντα που έχουν εκτυπωθεί έχουν τη δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία μετά το πέρας των προηγούμενων, με στόχο τη βελτίωση, μέσω θέρμανσης και φινιρίσματος των επιφανειών [Cerqueira 2022].

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η μοναδική τεχνολογία που προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης πολλών συστατικών τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν κατά παραγγελία στο χρώμα, την εύνοια, την υφή, τη διατροφή και το σχήμα κάνοντας χρήση ενός μόνο μηχανήματος. Στις πρώτες αναφορές για τρισδιάστατα τρόφιμα, περιλαμβάνεται η εκτύπωση τρισδιάστατων εδωδιμων σχημάτων, όπως είναι κάποιες τούρτες γενεθλίων που είναι ειδικά σχεδιασμένες. Ωστόσο, το ενδιαφέρον έχει αυξηθεί και ολοένα περισσότερες εταιρίες αλλά και εργαστήρια θα διαθέτουν τέτοια μηχανήματα με στόχο την ανάπτυξη μελλοντικών τροφίμων (**Εικόνα 26**) [Cerqueira 2022].

Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή μπορεί να προσφέρει λύσεις βιώσιμου επιπέδου για το αντιμετώπιση της αύξησης των τροφίμων και των πρωτεϊνών που απαιτείται, μιας και ο παγκόσμιος πληθυσμός ολοένα και αυξάνεται. Στόχος θα είναι η μείωση της σπατάλης τροφίμων, η βελτίωση της λειτουργικότητας των τροφίμων, η ενίσχυση της βιωσιμότητας στην τροφική αλυσίδα καθώς και η προώθηση της κυκλικής οικονομίας, μέσα από εναλλακτικά συστατικά όπως είναι οι σπόροι λούπινου, τα έντομα, τα υποπροϊόντα τροφίμων ή και τα τεύτλα. Στόχος της προσέγγισης αυτής είναι η παραγωγή υγιεινών τροφίμων, τα οποία θα είναι ελκυστικά στον καταναλωτή, ενώ ταυτόχρονα θα προσφέρουν την ίδια νοστιμιά αλλά με πρωτότυπα και ασυνήθιστα συστατικά [Cerqueira 2022].





**Εικόνα 26:** (A) Απεικόνιση εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων, (B) Κεφαλή εκτύπωσης [Sun 2015].

Τον τελευταίο καιρό, υπάρχει μεγάλη εξέλιξη στην ανάπτυξη νέων εδωδίων μελανιών μέσω έρευνας που πραγματοποιείται στη δομή των τροφίμων, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το κρέας, τη σοκολάτα, το μελάνι βασισμένο στα υδροκolloειδή, το τυρί κ.α. Οι έρευνες που πραγματοποιούνται, αναφέρονται στην εκτύπωση γενικά, στη ικανότητα αλλαγής σχήματος, στις ρεολογικές ιδιότητες, στην περιγραφή και αναπαράσταση των μηχανικών ιδιοτήτων, στην υφή τους, στις τεχνικές για έλεγχο του σχήματος και ακόμα τις τεχνικές για έλεγχο της εύνοιας με δομές 4D [Cerqueira 2022].

Μία ακόμη χρήση της τεχνολογίας αυτής, είναι η εξατομίκευση τροφίμων. Άτομα με προβλήματα κατάποσης της τροφής εμφανίζουν συχνά πρόβλημα υποσιτισμού ή αφυδάτωσης. Για τα άτομα αυτά, η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων θα αποτελούσε λύση στο πρόβλημά τους. Ή ακόμα και για άτομα με προβλήματα υγείας τα οποία βρίσκονται σε νοσοκομεία ή οίκους ευγηρίας. Έτοιμα γεύματα, εμπλουτισμένα με πρωτεΐνες και βιταμίνες, ή ακόμα και τα απαραίτητα φάρμακα για τον κάθε ασθενή, θα μπορούσαν εύκολα να χρησιμοποιηθούν μέσω αυτής της τεχνολογίας. Μία επιπλέον χρήση είναι η δημιουργία παγωτού [Cerqueira 2022].

Φοιτητές από το MIT, το 2014, ανακάλυψαν δύο συστήματα εκτύπωσης μαλακού παγωτού, κάνοντας χρήση υγρού αζώτου στο παγωτό κατά τη διαδικασία της εξώθησης, ενώ ο εκτυπωτής τοποθετήθηκε μέσα σε καταψύκτη. Μετά από το πείραμα αυτό, οι Robots in Gastronomy σχεδίασαν έναν 3D εκτυπωτή με το όνομα FoodForm και ο οποίος είχε την ικανότητα εκτύπωσης παγωτού με περισσότερη ακρίβεια κάνοντας χρήση μίας αντιπλεγματικής επιφάνειας. Έχοντας την ψύξη στους  $-34^{\circ}\text{C}$  είχαν τη δυνατότητα να παραλάβουν 10mm παγωτό, το οποίο είχε

~ 59 ~



όλα τα στρώματα παγωμένα, χωρίς να χρειαστεί να τοποθετηθεί ο εκτυπωτής στον καταψύκτη [Cerqueira 2022].

Στο σύνολό της, η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, μπορεί να προσφέρει πολλά μελλοντικά αρκεί να διεξαχθεί η απαραίτητη έρευνα, ανάπτυξη και το κατάλληλο μάρκετινγκ με στόχο την αυτοματοποίηση, τη κλιμάκωση και την εξατομίκευση για την είσοδο της τεχνολογίας στον τομέα καθώς και την αποδοχή της διαδικασίας από τους καταναλωτές [Cerqueira 2022].

### 3.5.1 Τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων και διαθέσιμα συστήματα

Οι πιο κοινές χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η μικροεξώθηση, η μικρορευστότητα, το λέιζερ, η πούδρα και η βάση μελάνης. Καθεμία λειτουργεί για συγκεκριμένα αρχικά υλικά και χρειάζεται εξειδικευμένες ιδιότητες μελανιού, όπως είναι το ιξώδες και η σταθερότητα του μελανιού, ενώ καθεμία μπορεί να πετύχει διαφορετική ανάλυση. Η **μικροεξώθηση** έχει δεχτεί τις περισσότερες μελέτες και καταφέρνει να σχηματίζει δομές με μελάνια και χαμηλού αλλά και υψηλού ιξώδους. Στα μελάνια αυτά πραγματοποιείται εξώθηση σε ακροφύσιο και έχουν την ικανότητα να δομηθούν σε όλη τη διάρκεια της εξώθησης, πριν, αλλά και μετά. Η **μικρορευστότητα** κάνει χρήση μικρορευστοποιημένων τσιπ και κατά την οποία σχηματίζονται σωματίδια ή ίνες, μέσω χρήσης μελανιών που είναι διασταυρωμένα ή με τη βοήθεια μίας φυσικοχημικής αντίδρασης [Cerqueira 2022].

Η διαδικασία του **λέιζερ**, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς, αλλά είναι γνωστό ότι κάνει εφικτή την αντίθεση σχεδιασμού, με σχηματισμό ή οδηγώντας σε πυροσυσσωμάτωση σωματιδίων, μέσω θέρμανσης που πραγματοποιείται την ίδια στιγμή. Η τεχνολογία βασισμένη στην **πούδρα** χρειάζεται να κάνει χρήση πρώτων υλών σε σκόνη ή ενός συνδετικού μελανιού που θα τοποθετηθεί σε ένα στρώμα πούδρας. Η τεχνολογία με βάση το **μελάνι**, κάνει χρήση μελανιών με χαμηλό ιξώδες και εξαιτίας της δυσκολίας που εμφανίζει στην επίτευξη σταθεροποιημένης δομής, δεν θεωρείται κατάλληλη για σχηματισμό δομών που εμφανίζουν πιο σημαντικές διαστάσεις [Cerqueira 2022].

Πρότυπα, παραδοσιακά ή ακόμα και καινοτόμα προϊόντα αναπτύσσονται καθημερινά από ολόένα και περισσότερους καταναλωτές, βιομηχανίες αλλά και επαγγελματίες μέσω προσαρμογών που έχουν πραγματοποιήσει στους 3D εκτυπωτές, ενώ κάποιοι από αυτούς τους εκτυπωτές βρίσκονται στο εμπόριο σε διαθεσιμότητα. Με την πάροδο των καιρών, πραγματοποιούνται αναβαθμίσεις σε τομείς των εκτυπωτών όπως είναι οι διεπιφάνειες ή οι κεφαλές εκτύπωσης, ωστόσο η τεχνολογία συνεχίζει να βρίσκεται σε στάδιο εξέλιξης. Ο Barry Callebaut, μέσω της εταιρίας του παραγωγής κακάο και σοκολάτας, κατάφερε να κλιμακώσει την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων ώστε να την προσαρμόσει στην τρισδιάστατη παραγωγή σοκολάτας [Cerqueira 2022].

~ 60 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 60/74

Τέτοιου είδους συστήματα έχουν την δυνατότητα χρήσης μόνο αφού γίνει προετοιμασία κάποιου πουρέ ή κάποιου κιμά με τα συστατικά που θα χρησιμοποιηθούν και έτσι στη συνέχεια μπορεί να γίνει εκτύπωση αλμυρών, γλυκών, πικάντικων τροφίμων, φρέσκων ή επεξεργασμένων. Μόνο κάποια είδη όπως είναι κάποια φρούτα, λαχανικά, όσπρια, ζύμη, το τυρί κρέμα, ή η σοκολάτα, εκτυπώνονται σχεδόν φυσικά. Ενώ κάποια άλλα, τα οποία είναι φρέσκα, μπορεί να μην διαθέτουν το μέγιστο ιξώδες ή την κατάλληλη εσωτερική δομή που οδηγεί σε εξώθηση ή ακόμα να μην καταφέρνουν να διατηρήσουν το σχήμα τους. Στις περιπτώσεις αυτών των τροφίμων, τα μελάνια έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν μορφή συνδυαζόμενα με άλλα συστατικά ή να αλλάξουν μορφή τοποθετώντας μέσα σε αυτά καινούργιες μεθόδους σταθερότητας κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης [Cerqueira 2022].

### **3.6 Τοξικολογική Εκτίμηση Μίκρο και Νάνο Μηχανικών Δομών**

Η ποιότητα και η ασφάλεια των τροφίμων είναι οι δύο μεγαλύτερες προτεραιότητες σε όλες τις βιομηχανίες τροφίμων. Για το λόγο αυτό, είναι επιτακτική ανάγκη η τοξικολογική αξιολόγηση. Ενώ η νανοτεχνολογία προσφέρει πολλά οφέλη στα τρόφιμα, από την άλλη η νανοδιάσταση, η μεγάλη επιφάνεια και η μεγάλη αντιδραστικότητα, είναι κάποιες ιδιότητες οι οποίες ανησυχούν τους ερευνητές αφού μπορεί να απειλήσουν την ανθρώπινη υγεία. Έτσι, οι ρυθμιστικοί φορείς ανά τον κόσμο, προσαρμόζονται στα νέα μηχανικά νανοϋλικά στα τρόφιμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι διαδικασίες αξιολόγησης κινδύνου δεν αφορούν συγκεκριμένα νανοϋλικά, οδηγώντας σε κάποια αβεβαιότητα σε σχέση με τη φύση και το εύρος των πιθανών κινδύνων. Το WPMN, ένα τμήμα του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης που επικεντρώνεται στα μηχανικά νανοϋλικά, εργάζεται για την οικοδόμηση διεθνούς συνεργασίας για την αξιολόγηση στην ασφάλεια των υλικών αυτών. Αυτό χρησιμεύει ώστε η ασφάλεια να είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα μπορούσε να επιτύχει οποιαδήποτε μεμονωμένη περιοχή [Cerqueira 2022].

Στην Ευρώπη, η Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων (EFSA) είναι υπεύθυνη για την αξιολόγηση αυτή, ενώ μετά από την αξιολόγηση του κινδύνου, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δίνει την έγκριση για τη χρήση των υλικών αυτών στα τρόφιμα, ακόμα και των υλικών εκείνων που τα τρόφιμα έρχονται απλά σε επαφή. Η EFSA το 2018 μετά από συζητήσεις με όλες εκείνες της επιτροπές και τα ιδρύματα που ασχολούνται με την αξιολόγηση κινδύνου των μηχανικών νανοϋλικών, δημοσίευσε μία καινούργια οδηγία ως προς την αξιολόγηση αυτή και η οποία είχε ως βάση της προηγούμενη έκδοση από το 2011. Η οδηγία αυτή, τονίζει τη σπουδαιότητα που έχει η χρήση όσο το δυνατόν ακριβών τεχνικών, που θα έχει ως αποτέλεσμα έναν ευρύ χαρακτηρισμό των νανοϋλικών που ελέγχονται, ενώ ταυτόχρονα επισημαίνει την αξία του να καθορίζονται τα να-

~ 61 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 61/74

νοϋλικά σε σύνθετους πίνακες [Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων, Cerqueira 2022].

Στη συνέχεια, μπορεί να πραγματοποιηθεί και εκτίμηση της αξίας της αντοχής του να-νοϋλικού κάτω από συνθήκες πέψης ή μεταφοράς αυτών από τη συσκευασία τροφίμων. Με τον τρόπο αυτό, θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της πιθανής έκθεσης που μπορεί να έχει ο άνθρωπος σε αυτά. Ωστόσο, σε περίπτωση επιμονής των μηχανικών νανοϋλικών κατά την πέψη ή μετανάστευσης αυτών από τη συσκευασία, τότε θα πρέπει πραγματοποιηθεί in vitro και in vivo τοξικολογική μελέτη, με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση του κινδύνου. Αυτό δείχνει, ότι εκτός των φυσικοχημικών χαρακτηρισμών είναι επιτακτική ανάγκη και ο προσδιορισμός των βιολογικών αλληλεπιδράσεων. Η in vitro διαδικασία προέχει πάντα της δοκιμής σε ζώα [Cerqueira 2022].

Οι τοξικές αποκρίσεις διαθέτουν πολυπαραγοντικούς μηχανισμούς. Ωστόσο, κάποιες τοξικές επιδράσεις, μέσα από περισσότερη παραγωγή ενεργών ειδών οξειδωτικού από το κανονικό ή και χρόνια φλεγμονή, οδηγούν στον σχηματισμό οξειδωτικού στρες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα κύτταρα να μην διαθέτουν φυσιολογικές λειτουργίες και έτσι να πραγματοποιηθεί βλάβη στο DNA, κυτταρική σηματοδότηση που δεν μπορεί να ρυθμιστεί, μεταμοιήσεις στην κινητικότητα που εμφανίζουν τα κύτταρα, τοξικότητα στα κύτταρα, απόπτωση ακόμα και καρκίνος [Cerqueira 2022].

Οι καινούργιες νάνο και μικρο μηχανικές δομές εμφανίζουν περιορισμένη εφαρμογή στα τρόφιμα, εξαιτίας της έλλειψης γνώσης σε σχέση με τις μεθόδους αξιολόγησης του κινδύνου και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει αυτός στην υγεία του ανθρώπου. Οι έρευνες, στοχεύουν στην ανάπτυξη εργαλείων που θα προσδιορίζουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες των μηχανικών νανοϋλικών, την ανίχνευσή τους και την παρακολούθησή τους σε φυσιολογικές συνθήκες σε όλη τη διάρκεια ζωής τους, στην μεγαλύτερη εκτίμηση των βιολογικών αποκρίσεων, στην εύρεση του πληθυσμιακού εύρους που θέτονται σε έκθεση σε τέτοιου τύπου νανοϋλικά, με ταυτόχρονη παρακολούθηση της υγείας τους και αναζήτηση και ανάπτυξη κατάλληλων αναλύσεων με στόχο την πρόβλεψη των απαντήσεων που πιθανόν να δώσουν οι άνθρωποι [Cerqueira 2022].



## Κεφάλαιο 4

### 4.1 Θέματα ασφαλείας στη χρήση νανοϋλικών στη βιομηχανία τροφίμων

Τελευταία η ολοένα και αυξανόμενη χρήση της νανοτεχνολογίας και ο μεγάλος αριθμός των εμπορικών εφαρμογών της έχει προκαλέσει ανησυχία σε σχέση με τους κινδύνους που μπορεί να υπάρχουν για την ανθρώπινη υγεία. Κάποιες μελέτες αναφέρονται στην αξιολόγηση της τοξικότητας των νανοφορέων ή των νανοϋλικών όταν συνιστούν ένα τμήμα μίας μήτρας τροφίμων. Τα υλικά εκείνα που αγγίζουν τη νανοκλίμακα είναι εύκολο να εισέλθουν και να συσσωρευτούν μέσα στο ανθρώπινο σώμα, ξεπερνώντας τα υποκυτταρικά όρια και παραβιάζοντας τα κυτταρικά τοιχώματα, έχοντας αρνητικό αντίκτυπο στον οργανισμό του ανθρώπου, στα φυτά, τα ζώα, ακόμα και στο περιβάλλον εξαιτίας των τοξικών επιδράσεων που μπορεί να έχουν [Rashidi 2021].

Η ασφάλεια αλλά και οι κίνδυνοι των νανοϋλικών και της χρήσης τους δεν έχουν εξερευνηθεί και χρειάζονται συνήθως μία εκτίμηση κινδύνου πριν από τη χρήση τους. Πιο συγκεκριμένα, είναι αναγκαίο να μελετηθούν οι άμεσες αλλά και έμμεσες επιδράσεις των νανοϋλικών στην υγεία του ανθρώπου, μαζί με τη τύχη που μπορεί να έχουν τα νανοϋλικά βιολογικά μετά την πέψη, καθώς και τη συμπεριφορά αυτών στο εσωτερικό του γαστρεντερικού σωλήνα, όπως επίσης και τις σχέσεις τους με τα βιολογικά συστήματα. Επιπλέον, είναι σημαντικό να γίνει ανάπτυξη ρυθμιστικών ελέγχων με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας από πιθανές δυνητικά δυσμενείς συνέπειες που μπορεί να έχουν τα νανοϋλικά [Rashidi 2021].

Διάφοροι οργανισμοί έχουν δραστηριότητα στον τομέα αυτό, όπως είναι ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO), ο Οργανισμός Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ (FDA), ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) και οι Επιστημονικές Επιτροπές και Οργανισμοί της ΕΕ. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) το 2021 δημοσίευσε επιστημονική γνώμη ως κατευθυντήρια γραμμή για την αξιολόγηση των κινδύνων που εμφανίζονται από τη νανοτεχνολογία σε ζωοτροφές/τρόφιμα. Η EFSA έχει ορίσει τα νανοσωματίδια ως τεχνητά νανοϋλικά (ENMs) που έχουν το λιγότερο μία διάσταση με μέγεθος 1-100 nm. Για το λόγο αυτό, αν τα νανοϋλικά αυτά βρεθούν σε ένα τρόφιμο, πρέπει να γίνει ακριβής αξιολόγηση του κινδύνου τους, ώστε να αποδειχθεί ότι είναι ασφαλή για την ανθρώπινη υγεία [Rashidi 2021].

Από την άλλη, ο FDA το 2014 κοινοποίησε μία κατευθυντήρια γραμμή για τη χρήση των νανοϋλικών σε ζωοτροφές. Πρόσφατη νομοθεσία της ΕΕ (No. 1169/2011) έχει δηλώσει αναγκαία τη χρήση σήμανσης για τα νανοϋλικά στις συσκευασίες των νέων τροφίμων. Η ασφάλεια της χρήσης νανοϋλικών στα τρόφιμα και στις ζωοτροφές μπορεί να διασφαλιστεί αν τηρηθούν οι



σύγχρονοι κανονισμοί για τα τρόφιμα και το κοινό μένει ενημερωμένο μέσα από την παροχή πληροφοριών [Rashidi 2021].

## 4.2 Συμπεριφορά μικρο και νανοσυστημάτων σε μοντέλα τροφίμων

Οι βιομηχανίες τροφίμων έχουν επηρεαστεί θετικά από την ενσωμάτωση συστημάτων ελεγχόμενης μεταφοράς στα τρόφιμα. Από την άλλη όμως, ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρονται αυτά τα συστήματα στα τρόφιμα είναι απαραίτητο να ελέγχεται πριν αυτά τεθούν στο εμπόριο, ώστε να αξιολογηθεί η επιρροή των συνθηκών που βρίσκονται τα τρόφιμα απέναντι στις ιδιότητες και τις λειτουργίες τους, στη σταθερότητα της δομής και στη βιοδιαθεσιμότητα που παρουσιάζουν οι βιοδραστικές ενώσεις [de Souza Simões 2017].

Η ενσωμάτωση των συστημάτων αυτών δεν θα πρέπει να επιδρά στις οργανοληπτικές ιδιότητες που εμφανίζει το τελικό προϊόν. Τόσο στη μικροκλίμακα αλλά ακόμα περισσότερο στη νανοκλίμακα (μέγεθος μικρότερο των 10 μm), τα συστήματα χορήγησης δεν επιδρούν αρνητικά στις αισθητηριακές ιδιότητες του τροφίμου και μόλις που γίνονται αισθητά στο στόμα, κάτι που ενισχύει την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Για το λόγο αυτό, αναλύονται παρακάτω κάποιες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από ερευνητές και οι οποίες αφορούν την ενσωμάτωση συστημάτων ελεγχόμενης μεταφοράς σε προσομοιωτές τροφίμων ή αλλιώς μοντέλα και σε μήτρες τροφίμων ή αλλιώς πραγματικά τρόφιμα [de Souza Simões 2017].

### 4.2.1 Προσομοιωτές – Μοντέλα τροφίμων

Ο Κανονισμός (ΕΕ) της Επιτροπής αριθ. 10/2011 αναφέρεται στα πλαστικά υλικά και αντικείμενα που ο προορισμός τους είναι να έρθουν σε επαφή με τρόφιμα. Στη λίστα αυτή υλικών αναφέρονται και ρυθμίζονται διάφορα προσομοιωτικά τρόφιμα, με στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται τα τρόφιμα στα συστήματα ελεγχόμενης μεταφοράς [de Souza Simões 2017].

Στις περισσότερες βιβλιογραφίες οι μελέτες που αναφέρονται κάνουν χρήση προσομοιωτών τροφίμων για τον έλεγχο της μεταφοράς ενώσεων από τη συσκευασία στα τρόφιμα. Οι Linsinger et al., Su et al. και Mackenica et al., έλεγξαν τη μεταφορά νανοσωματιδίων αργύρου σε τρόφιμα κάνοντας χρήση αντίστοιχα, απιονισμένου νερού και 10% (v/v) αιθανόλης, 3% (w/v) οξικού οξέος και 50% (v/v) αιθανόλης και Milli-Q<sup>4</sup> νερό, 3% (w/v) οξικού οξέος και 10% (v/v) αιθανόλης [de Souza Simões 2017].

Ελάχιστες είναι, ωστόσο, οι διαθέσιμες μελέτες σχετικά με τη χρήση συστημάτων χορήγησης υπό έλεγχο. Οι Madalena et al. μελέτησαν τη σταθερότητα της β-λακτοσφαιρίνης ενώ βρι-

<sup>4</sup> Το Milli-Q νερό είναι απλό νερό το οποίο καθαρίζεται χρησιμοποιώντας ένα εργαστηριακό σύστημα νερού Millipore Milli-Q.





σκόταν ενθυλακωμένη με ριφοβλαβίνη και αφού εντάσσεται σε προσομοιωτή τροφίμων ο οποίος αποτελείται από Milli-Q νερό και 3% οξικό οξύ, έτσι ώστε να προσομοιάζεται με γιαούρτι. Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι τα νανοσυστήματα β-λακτοσφαιρίνης διατήρησαν σταθερή τη δομή τους για 14 ημέρες αποθήκευσης σε σχέση με τον έλεγχο, φανερώνοντας την απελευθέρωση της ριφοβλαβίνης πλήρως μετά από 7 ημέρες αποθήκευσης [de Souza Simões 2017].

Σε άλλη έρευνα, οι Liu et al. χρησιμοποίησαν το συνένζυμο  $Q_{10}$  το οποίο ενθυλάκωσαν σε ένα νανοδομημένο φορέα λιπιδίου και το ενσωμάτωσαν σε έναν προσομοιωτή τροφίμου ο οποίος αποτελείται από 15% γλυκόζη, 0,1% EDTA- $Na_2$ <sup>5</sup>, 0,1% βενζοϊκό οξύ και 83,9% νερό, έτσι ώστε να προσομοιάζεται ένα ποτό. Η έρευνα αυτή απέδειξε ότι αυτό το σύστημα διατήρησε σταθερή τη δομή του κατά την αποθήκευση για 3 μήνες, κάτι που αποδεικνύει ότι η εφαρμογή του στη βιομηχανία τροφίμων μπορεί να πραγματοποιηθεί με επιτυχία [de Souza Simões 2017].

Στην πραγματικότητα, οι προσομοιωτές τροφίμων, είναι μία θεώρηση η οποία έχει τη δυνατότητα να αξιολογεί το πως επιδρούν οι συνθήκες των τροφίμων στη σταθερότητα των συστημάτων ελεγχόμενης χορήγησης. Είναι απαραίτητες όμως οι μελέτες σε πραγματικά τρόφιμα, αφού προσφέρουν ορθότερα αποτελέσματα για την επίδραση αυτή [de Souza Simões 2017].

#### 4.2.2 Μήτρες τροφίμων

Τα προϊόντα τροφίμων μπορεί να επηρεάσουν τα συστήματα ελεγχόμενης παράδοσης είτε επιβλαβώς, είτε ουδέτερα, είτε προστατευτικά. Στα πρόσθετα που ενσωματώνονται στα τρόφιμα ανήκουν διάφορες κατηγορίες, όπως τύποι σακχάρων, άλατα, αρώματα και φυσικές ή τεχνητές αρωματικές ύλες και όλες μπορούν να επιδράσει αμοιβαία με τα συστήματα χορήγησης και να οδηγήσουν σε μείωση της βιοδιαθεσιμότητάς τους [de Souza Simões 2017].

Στις περισσότερες βιβλιογραφίες οι μελέτες αναφέρονται στην πρόσθεση των συστημάτων ελεγχόμενης χορήγησης σε διάφορες μήτρες τροφίμων, όπως χυμούς φρούτων, ζύμη ζαχαροπλαστικής, τυρί Cheddar, γιαούρτι, σοκολάτα και ψωμί. Οι Nualkaekul et al. (2013) πραγματοποίησαν ενθυλάκωση στο *Lactiplantibacillus plantarum* και στο *Bifidobacterium longum* σε μικροσφαιρίδια αλγινικού και πηκτίνης και απέδειξαν ότι η ενθυλάκωση προκάλεσε διατήρηση της βιωσιμότητάς τους στο χυμό ροδιού και τον χυμό κράνμπερι κατά την αποθήκευσή τους για 6 εβδομάδες [Nualkaekul 2013, de Souza Simões 2017].

Από την άλλη, οι Ying et al. (2012) χρησιμοποίησαν *Lactocaseibacillus rhamnosus* και το ενσωμάτωσαν σε μικροκάψουλες που προηγουμένως είχαν υποστεί ξήρανση με ψεκασμό και το εφάρμοσαν σε χυμό μήλου, αποδεικνύοντας ότι με τον τρόπο αυτό η βιωσιμότητά του διατηρεί-

<sup>5</sup> (Ethylenedinitrilo)tetraacetic acid disodium salt, EDTA disodium salt = Αιθυλενοδιάμμο Τετραοξικό Δινάτριο, είναι ο γνωστότερος και πλέον τυπικός εκπρόσωπος μιας σειράς ενώσεων, οι οποίες γενικά ονομάζονται αμινοπολυκαρβοξυλικά οξέα και χαρακτηρίζονται από μια εξαιρετικά έντονη συμπλεκτική ικανότητα ως προς τα περισσότερα μεταλλοϊόντα.



ται. Και στις δύο περιπτώσεις αποδείχτηκε ότι η μικροενθυλάκωση των προβιοτικών οδήγησε σε βελτίωση ή διατήρηση της βιωσιμότητάς τους όταν εφαρμόζονταν σε χυμό φρούτων [Ying 2012, de Souza Simões 2017].

Σε άλλη μελέτη, οι Rivero et al. (2013) μελέτησαν την ελεγχόμενη απελευθέρωση προπιονικού οξέος σε ζύμη ζαχαροπλαστικής, από φιλμ χιτοζάνης, ώστε να οδηγήσει σε βελτίωση των ιδιοτήτων που το διατηρούν. Τα αποτελέσματα έδειξαν την αποτελεσματικότητα της χιτοζάνης ως φορέας για το προπιονικό οξύ, η οποία προωθεί την ελεγχόμενη απελευθέρωση της αντιμικροβιακής αυτής ένωσης και ως αποτέλεσμα και τη διατήρηση της επιθυμητής εμφάνισης της ζύμης ζαχαροπλαστικής ακόμα και με την πάροδο του χρόνου [Rivero 2013, de Souza Simões 2017].

Οι Amine et al. (2013) πραγματοποίησαν μελέτη με μικροενθυλάκωση του μικροοργανισμού *Bifidobacterium longum* σε σφαιρίδια αλγινικού άλατος με στόχο την ενίσχυση της αντοχής των βακτηρίων στην κατάψυξη, κατά τη διάρκεια των συνθηκών παραγωγής και της περιόδου αποθήκευσης του τυριού Cheddar. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, έδειξαν ότι τα σφαιρίδια αλγινικού εμφανίζουν προστατευτική δράση απέναντι στα βακτήρια μετά από 21 ημέρες αποθήκευσης [Amine 2013, de Souza Simões 2017].

Οι Gomes et al. (2012) ενσωμάτωσαν την κόκκινη πιπεριά σε νανοσωματίδια β-κυκλοδεξτρίνης και στη συνέχεια τα πρόσθεσαν σε γιαούρτι για να αξιολογήσουν την ενσωμάτωση της πιπεριάς και τη σταθερότητα των νανοσωματιδίων, όπως επίσης και την απόδοση διαφορετικών διαδικασιών παραγωγής, όπως είναι η μαγνητική ανάδευση και η ομογενοποίηση υπερήχων, καθώς και την όψη που εμφανίζει το τελικό προϊόν. Τα αποτελέσματα που έλαβαν έδειξαν, ότι το σύμπλεγμα που σχηματίζεται από ομογενοποίηση με υπερήχους εμφανίζει λιγότερες χρωματικές αλλαγές στο γιαούρτι, κάτι που βοηθάει στη διατήρηση των ιδιοτήτων του γιαουρτιού κατά την αποθήκευσή του [Gomes 2012, de Souza Simões 2017].

Οι Gültekin - Özgüven et al. (2016) σε άλλη μελέτη, ενθυλάκωσαν νανολιποσώματα που αποτελούνταν από εκχύλισμα μαύρης μουριάς το οποίο προηγουμένως είχε αποξηραθεί με ψεκασμό και επικαλυφθεί με χιτοζάνη σε μαύρη σοκολάτα. Τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση και ενίσχυση των ιδιοτήτων της σοκολάτας χάρη στην προσθήκη του συγκεκριμένου συμπλέγματος [Gültekin - Özgüven 2016, de Souza Simões 2017].

Οι Rutz et al. (2016) πραγματοποίησαν ενθυλάκωση φοινικέλαιου και β-καροτίνης σε μικροσωματίδια χιτοζάνης/τριφοσφορικού νατρίου ή μικροσωματίδια χιτοζάνης/καρβοξυμεθυλοκυτταρίνης και αξιολόγησαν την απόδοση σε τρόφιμα όπως ψωμί και γιαούρτι. Από τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι το σύμπλεγμα που περιείχε χιτοζάνη/καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη προκάλεσε βελτίωση στην απελευθέρωση καροτενοειδών κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης [Rutz 2016, de Souza Simões 2017].

~ 66 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο docs.gov.gr/validate



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 66/74

Από τις έρευνες που αναφέρθηκαν, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η μικρο και νάνο εν-  
θυλάκωση επιδρά θετικά στην παρουσίαση και τη δράση των βιοδραστικών ενώσεων, με αποτέ-  
λεσμα να βελτιώνεται η ελεγχόμενη απελευθέρωση και η απόδοσή της όταν ενσωματώνονται σε  
τρόφιμα, ενώ δεν επιδρά αρνητικά στις οργανοληπτικές ιδιότητες των τροφίμων. Ωστόσο, θα  
πρέπει να γίνουν περισσότερες μελέτες ώστε να προβλεφθεί καλύτερα η συμπεριφορά των συ-  
στημάτων χορήγησης, ώστε στο μέλλον η εμπορευματοποίησή τους σε τρόφιμα να είναι ακόμα  
πιο επιτυχής [de Souza Simões 2017].

~ 67 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 67/74

## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή την ανασκόπηση, διερευνήθηκαν διαφορετικά συστήματα νανοπαραγωγής, τα οποία χρησιμοποιούνται για την χορήγηση και προστασία βιοδραστικών ουσιών. Είναι αναγκαίο να αξιολογηθεί η συμπεριφορά κατανομής, απορρόφησης, αποβολής και μεταβολισμού των συστημάτων νανοπαραγωγής, τα οποία φέρουν τους βιοενεργούς παράγοντες, ώστε να ενισχυθούν οι εφαρμογές προστασίας τους κατ' επέκταση να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα των ουσιών στα τρόφιμα. Στο μέλλον, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί σωστά η ασφάλεια των συστημάτων αυτών για κατάλληλες εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων. Επιπλέον, θα πρέπει να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη συστημάτων νανοπαραδόσης που είναι εμπορικά βιώσιμα.

Η δυνατότητα σχεδιασμού μικρο και νάνο μηχανικών δομών, οι οποίες είναι εδωδιμες και οι οποίες βασίζονται σε ενώσεις που έχουν ως στόχο την ενίσχυση τις ποιότητας των τροφίμων, αποτελεί μία μελλοντική προσέγγιση στην εξατομίκευση των τροφίμων. Πιο συγκεκριμένα, ανοίγει ένας καινούργιος τομέας στην επιστήμη και την τεχνολογία των τροφίμων. Ο χειρισμός των συστατικών που χρησιμοποιούνται στα τρόφιμα, για να δημιουργηθούν οι δομές 1D, 2D και 3D, απαιτεί γνώσεις και συγκεκριμένα εκείνες που αφορούν τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά αυτών στις κλίμακες αυτές, όπως επίσης και πρακτική εξειδίκευση στις τεχνολογίες παραγωγής.

Οι μικρο και νάνο μηχανικές δομές βοηθούν στην ενίσχυση της σταθερότητας και την ελεγχόμενη απελευθέρωση βιοδραστικών ενώσεων στα τρόφιμα, καταφέροντας ταυτόχρονα να ξεπεράσουν προκλήσεις όπως είναι η βιωσιμότητα. Αυτή η διπλωματική εργασία παρουσίασε κατά κύριο λόγο την ύπαρξη ινών, νανοσωλήνων, επιστρώσεων, φιλμ, μικροσωματιδίων, νανοσωματιδίων, γαλακτωμάτων και ελαιοπηγμάτων.

Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί ακόμα κι αν φαίνεται αδύνατον, να προωθήσει τη χρήση κάποιων από αυτές τις δομές στη βιομηχανία τροφίμων. Αν και είναι μία ανερχόμενη τεχνολογία, απαιτεί έρευνα τόσο για την απαιτούμενη κλίμακα όσο και για τη χρήση της από εταιρίες και καταναλωτές.

Τα συστήματα νανοπαραγωγής προσφέρουν ένα εύρος πλεονεκτημάτων τόσο φυσικών όσο και χημικών για βελτιωμένη βιοδιαθεσιμότητα και ενισχυμένη σταθερότητα των βιοδραστικών ουσιών. Κάθε είδος συστήματος προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα το καθένα και οι ιδιότητες της βιοενεργού ουσίας σε συνδυασμό με το σκοπό της χορήγησης θα πρέπει να καθορίζουν το είδος του νανοσωματιδίου που είναι πιο κατάλληλος για εφαρμογή. Οι ιδιότητες του συστήματος, τόσο φυσικοχημικές όσο και μορφολογικές θα είναι αυτές που θα καθορίσουν τη νάνο – βίο αλληλεπίδραση και το προφίλ ADME.

Συνδυασμός μελετών *in silico*, *in vitro* και *in vivo* αποκαλύπτει την ασφάλεια αλλά και

~ 68 ~



το προφίλ τοξικότητας του συστήματος ναοπαγωγής και είναι απαραίτητος για να πραγματοποιηθεί ασφαλής εφαρμογή των συστημάτων στα τρόφιμα και τη γεωργία.

### **ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ**

1. Τα συστήματα ναοπαγωγής ενισχύουν τη βιοδιαθεσιμότητα και τη βιοκατανομή τους μέσω της βελτίωσης της πρόσληψης, της σταθερότητας και της διαλυτότητάς τους [Borel 2014].
2. Τα συστήματα ναοπαγωγής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, υγρά και στερεά. Τα υγρά μπορεί να είναι ναογαλακτώματα, ναολιποσώματα ή ναοπολυμεροσώματα. Τα στερεά μπορεί να είναι ναοκρύσταλλοι, σωματίδια λιπιδίων ή σωματίδια πολυμερών [Borel 2014].
3. Σημαντικές ιδιότητες για την κυτταρική και ανοσολογική αλληλεπίδραση είναι το μέγεθος, το φορτίο, η υδροφοβικότητα και τα μόρια στόχευσης [Borel 2014].
4. Παράγοντες που εμποδίζουν την πρόσληψη των συστημάτων ναοπαγωγής και τη βιοδραστική απορρόφηση είναι η αποικοδόμηση στο στομάχι, η παρουσία σταθερά προσκολλημένης επένδυσης του βλεννογόνου, οι επιλεκτικά διαπερατές επιθηλιακές μεμβράνες και οι μεμβράνες Μ-κυττάρων, όπως ακόμα και η ενζυμική αποικοδόμηση στα έντερα [Borel 2014].
5. Η εγκλωβισμένη βιοδραστική ουσία απελευθερώνεται τελικά στα έντερα, στο κυκλοφορικό σύστημα ή στα κύτταρα διαφόρων οργάνων. Η θέση στην οποία θα απελευθερωθεί και οι φυσικοχημικές της ιδιότητες καθορίζουν τη βιολογική του μοίρα [Borel 2014].
6. Η ασφαλής εφαρμογή των ναοσωματιδίων στα τρόφιμα και τη γεωργία απαιτεί γνώσεις σχετικά με το ADME και το προφίλ τοξικότητάς τους [Borel 2014].

~ 69 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 69/74

## 5.2 Μελλοντική έρευνα

Η ανάπτυξη λειτουργικών τροφίμων έχει εμφανίσει μεγάλη αύξηση τα τελευταία χρόνια και από μία απλή τάση έχει μετατραπεί σε πραγματικότητα στη βιομηχανία τροφίμων, ως απάντηση στην ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για περισσότερα θρεπτικά και υγιεινά τρόφιμα. Έτσι, κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας, εντοπίστηκαν κάποιες σημαντικές τάσεις σχετικά με την παραγωγή και στη συνέχεια εφαρμογή μικρο και νάνο συστημάτων ελεγχόμενης χορήγησης.

Η επένδυση για την ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων για την εφαρμογή μικρο και νάνο ενθυλάκωσης σε ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών και προϊόντων αναμένεται να δει άλμα αύξησης τα επόμενα χρόνια. Για να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα που απαιτείται, η κύρια τάση είναι αυτή της αντίστροφης μηχανικής. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδανική για την ανάπτυξη μικρο και νάνο συστημάτων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ώστε να εφαρμοστούν στα τρόφιμα.

Επιπλέον, διεξάγονται έρευνες σχετικά με τα υλικά και τις μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αναπτυχθούν τα επιθυμητά συστήματα παροχής με τις ιδιότητες που προαπαιτούνται. Στη βιομηχανία τροφίμων οι καινοτομίες αναφέρονται και σε νέες τεχνικές επεξεργασίας. Κάποιες τέτοιες αναδυόμενες τεχνικές είναι ο ηλεκτροψεκασμός και η ηλεκτροϊονοποίηση, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ινών ή και καψουλών σε μικροκλίμακα και νανοκλίμακα.

Η τεχνολογία layer-by-layer ή αλλιώς στρώμα-στρώμα είναι μία επίσης αναδυόμενη τεχνική που αφορά την ανάπτυξη συστημάτων ελεγχόμενης διανομής πολλών στρωμάτων τόσο σε μικροκλίμακα όσο και σε νανοκλίμακα. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει το σχεδιασμό συστημάτων διανομής με μεγαλύτερη απόδοση σχετικά με το ελεγχόμενο μέγεθος, τη σταθερότητα, τη σύνθεση και τη λειτουργικότητα της επιφάνειας.

~ 70 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 70/74

## Αναφορές

- Al-Yami AS, Wagle Vikrant\*, Al Shaikh Abrar and Al-Bahrani Hussain Saudi Aramco, Dhahran, Saudi Arabia, (2018). Emulsifiers Used in Designing Emulsion Based Drilling Fluids, RRJCHEM | Vol-ume 7 | Issue 4 | December, 2018
- Amine KM, Champagne CP, Raymond Y, St-Gelais D, Britten M, Fustier P, et al. Survival of micro-encapsulated Bifidobacterium longum in Cheddar cheese during production and storage. Food Control 2013;37:193–9. doi:10.1016/j.foodcont.2013.09.030
- Azevedo, M. A., Bourbon, A. I., Vicente, A. A., & Cerqueira, M. A. (2014). Alginate/chitosan nanoparticles for encapsulation and controlled release of vitamin B2. International Journal of Biological Macromolecules, 71, 141-146.
- Biesalski, H. K., Dragsted, L. O., Elmadfa, I., Grossklaus, R., Müller, M., Schrenk, D., ... & Weber, P. (2009). Bioactive compounds: Definition and assessment of activity. Nutrition, 25(11-12), 1202-1205.
- Borel, T., & Sabliov, C. M. (2014). Nanodelivery of bioactive components for food applications: types of delivery systems, properties, and their effect on ADME profiles and toxicity of nanoparticles. Annual review of food science and technology, 5, 197-213.
- Botega Z. DC, Marangoni AG, Smith AK, Goff HD (2013) The potential application of rice bran wax Oleogel to replace solid fat and enhance unsaturated fat content in ice cream. J Food Sci 78(9):C1334–C1339. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12175>
- Bourbon AI, Pinheiro AC, Cerqueira MA, Vicente AA (2018) In vitro digestion of LactoferrinGly-comacropptide Nanohydrogels incorporating bioactive compounds: effect of a chitosan coating. Food Hydrocoll 84(February):267–275. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.06.015>
- Cerqueira, M. A., Gonçalves, C., Fuciños, C., Patel, A. R., Oliveira, S. M., Martins, A. J., ... & Pastrana, L. M. (2022). Nano and Microengineered Structures for Enhanced Stability and Controlled Release of Bioactive Compounds. Delivering Functionality in Foods: From Structure Design to Product Engineering, 25-67.
- Costa MJ, Pastrana LM, Teixeira JA, Sillankorva SM, Cerqueira MA (2021) Characterization of PHBV flms loaded with FO1 bacteriophage using polyvinyl alcohol-based nanofibers and coatings: a comparative study. Innov Food Sci Emerg Technol 69(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102646>
- de Souza Simões, L., Madalena, D. A., Pinheiro, A. C., Teixeira, J. A., Vicente, A. A., & Ramos, Ó. L. (2017). Micro-and nano bio-based delivery systems for food applications: In vitro behavior. Advances in Colloid and Interface Science, 243, 23-45.
- Fabra MJ, Flores-López ML, Cerqueira MA, de Rodriguez DJ, Lagaron JM, Vicente AA (2016) Layer-by-layer technique to developing functional Nanolaminate flms with antifungal activity. Food Bioprocess Technol 9(3). <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1646-1>

~ 71 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 71/74

- Gomes LMM, Petito N, Costa VG, Falcão DQ, De Lima Araújo KG. Inclusion complexes of red bell pepper pigments with  $\beta$ -cyclodextrin: Preparation, characterisation and application as natural colorant in yogurt. *Food Chem* 2014;148:428–36. doi:10.1016/j.foodchem.2012.09.065.
- Gültekin-Özgüven M, Karadağ A, Duman Ş, Özkal B, Özçelik B. Fortification of dark chocolate with spray dried black mulberry (*Morus nigra*) waste extract encapsulated in chitosan-coated liposomes and bioaccessibility studies. *Food Chem* 2016;201:205–12. doi:10.1016/j.foodchem.2016
- Gupta, A., Eral, H. B., Hatton, T. A., & Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: formation, properties and applications. *Soft matter*, 12(11), 2826-2841.
- Kara HH, Xiao F, Sarker M, Jin TZ, Sousa AMM, Liu CK, Tomasula PM, Liu L (2016) Antibacterial poly(lactic acid) (PLA) films grafted with electrospun PLA/allyl Isothiocyanate fibers for food packaging. *J Appl Polym Sci* 133(2). <https://doi.org/10.1002/app.42475>
- Varsha K.P\*, K Krishnakumar, Dineshkumar B\* (2017), Nano-Encapsulation of Polyphenol Compounds: A Review, *Indo American Journal of Pharmaceutical Research*.2017:7(02).
- Lee JW, Son SM, In Hong S (2008) Characterization of protein-coated polypropylene films as a novel composite structure for active food packaging application. *J Food Eng* 86(4):484–493. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.025>
- Martínez-Ballesta, M., Gil-Izquierdo, Á., García-Viguera, C., & Domínguez-Perles, R. (2018). Nanoparticles and controlled delivery for bioactive compounds: Outlining challenges for new “smart-foods” for health. *Foods*, 7(5), 72.
- Martins VDF, Cerqueira MA, Fuciños P, Garrido-Maestu A, Curto JMR, Pastrana LM (2018b) Active bi-layer cellulose-based films: development and characterization. *Cellulose* 25(11):6361–6375. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2021-y>
- Medeiros BGS, Souza MP, Pinheiro AC, Bourbon AI, Cerqueira MA, Vicente AA, Carneiro-daCunha MG (2014) Physical characterisation of an alginate/lysozyme Nano-laminate coating and its evaluation on ‘Coalho’ cheese shelf life. *Food Bioprocess Technol* 7(4):1088–1098. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1097-5>
- Medibrane LTD, N. (n.d.). Electrospinning Technology. Medibrane LTD. <https://www.medibrane.com/electrospinning/>
- Mohammad, Z.H., Ahmad, F., Ibrahim, S.A. et al. Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. *Discov Food* 2, 12 (2022).
- Moncalvo, F., Martinez Espinoza, M. I., & Cellesi, F. (2020). Nanosized delivery systems for therapeutic proteins: clinically validated technologies and advanced development strategies. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 89.
- Moriano, M. E., & Alamprese, C. (2017). Organogels as novel ingredients for low saturated fat ice creams. *Lwt*, 86, 371-376.

~ 72 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 72/74



- Mozafari, M. R. (2010). Nanoliposomes: preparation and analysis. *Liposomes: Methods and Protocols*, Volume 1: Pharmaceutical Nanocarriers, 29-50.
- National Cancer Institute at the National Institutes of Health, U.S Department of Health and Human Services, USA.gov
- National Institute of Standards and Technology, U.S Department of Commerce, NIST
- National Nanotechnology Initiative, US, Nano.gov Home
- Newton, A. M., & Kaur, S. (2019). Solid lipid nanoparticles for skin and drug delivery: Methods of preparation and characterization techniques and applications. In *Nanoarchitectonics in biomedicine* (pp. 295-334). William Andrew Publishing.
- Nie, X., Chen, Z., Pang, L., Wang, L., Jiang, H., Chen, Y., ... & Zhang, J. (2020). Oral Nano drug delivery systems for the treatment of type 2 diabetes mellitus: An available administration strategy for antidiabetic phytocompounds. *International journal of nanomedicine*, 10215-10240.
- Nualkaekul S, Cook MT, Khutoryanskiy V V., Charalampopoulos D. (2013) Influence of encapsulation and coating materials on the survival of *Lactobacillus plantarum* and *Bifidobacterium longum* in fruit juices. *Food Res Int* 2013;53:304–11. doi:10.1016/j.foodres.2013.04.019
- Patel, A. R., Drost, E., den Adel, R., Hazekamp, J., & Velikov, K. P. (2012). Temperature responsive colloidal particles from non-covalently interacting small molecular weight natural bioactive molecules. *Soft Matter*, 8(13), 3515-3517.
- Patel, A. R., Drost, E., Blijdenstein, T. B., & Velikov, K. P. (2012). Stable and temperature-responsive surfactant-free foamulsions with high oil-volume fraction. *ChemPhysChem*, 13(17), 3777-3781.
- Patel, A. R., & Velikov, K. P. (2014). Zein as a source of functional colloidal nano-and microstructures. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19(5), 450-458.
- Patil, B. S., Jayaprakasha, G. K., Chidambara Murthy, K. N., & Vikram, A. (2009). Bioactive compounds: historical perspectives, opportunities, and challenges. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(18), 8142-8160.
- Pei Y, Zheng Y, Li Z, Liu J, Zheng X, Tang K, Kaplan DL (2021) Ethanol-induced Coacervation in aqueous gelatin solution for constructing Nanospheres and networks: morphology, dynamics and thermal sensitivity. *J Colloid Interface Sci* 582:610–618. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.08.068>
- Piccinini, E., Pallarola, D., Battaglini, F., & Azzaroni, O. (2016). Self-limited self-assembly of nanoparticles into supraparticles: towards supramolecular colloidal materials by design. *Molecular Systems Design & Engineering*, 1(2), 155-162.
- Rashidi, L. (2021). Different nano-delivery systems for delivery of nutraceuticals. *Food Bioscience*, 43, 101258.

~ 73 ~

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 73/74

- Rebecca Guenard (2019). Oleogels for drug delivery, AOCS Your Global Fats and Oils Connection.
- Rivero S, Giannuzzi L, García MA, Pinotti A. Controlled delivery of propionic acid from chitosan films for pastry dough conservation. *J Food Eng* 2013;116:524–31. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.12.025
- Rutz JK, Borges CD, Zambiasi RC, Cleonice G da R, Médelin M da S. Elaboration of microparticles of carotenoids from natural and synthetic sources for applications in food. *Food Chem* 2016;202:324–33. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.140.
- Singh, T., Shukla, S., Kumar, P., Wahla, V., Bajpai, V. K., & Rather, I. A. (2017). Application of nano-technology in food science: perception and overview. *Frontiers in microbiology*, 8, 1501.
- Slavutsky AM, Bertuzzi MA (2016) Improvement of water barrier properties of starch films by lipid Nanolamination. *Food Packag Shelf Life* 7:41–46. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2016.01.004>
- Sun, J., Peng, Z., Yan, L., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015). 3D food printing an innovative way of mass customization in food fabrication. *International Journal of Bioprinting*, 1(1).
- Ying D, Schwander S, Weerakkody R, Sanguansri L, Gantenbein-Demarchi C, Augustin MA. (2012) Microencapsulated *Lactobacillus rhamnosus* GG in whey protein and resistant starch matrices: Probiotic survival in fruit juice. *J Funct Foods* 2013;5:98–105. doi:10.1016/j.jff.2012.08.009.
- Yuan Y, Kong ZY, Sun YE, Zeng QZ, Yang XQ (2017) Complex Coacervation of soy protein with chitosan: constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery. *LWT* 75:171–179. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.045>
- Zheng, Y. (2019). Fabrication on bioinspired surfaces. *Bioinspired Design of Materials Surfaces*.
- Zielińska A., Carreiró F., Oliveira A. M., Neves A., Pires B., Venkatesh D. N., Durazzo A., Lucarini M., Eder P., Silva A. M., Santini A., and Souto E. B., (2020). Polymeric Nanoparticles: Production, Characterization, Toxicology and Ecotoxicology, *Molecules* 2020, 25, 3731.

~ 74 ~

#### Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου  
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό  
στο [docs.gov.gr/validate](https://docs.gov.gr/validate)



Κωδικός εγγράφου: 11SpP2KzR8-6ECykhRIT1Q

: 74/74

Υπογραφή:  
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ  
Πατρώνυμο: ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
ΑΦΜ: 067868655  
Ημ. Υπογραφής: 30/05/2023 12:51:55