



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υδρογέλες: Τεχνολογία και εφαρμογές στη βιομηχανία
τροφίμων**

Φοιτητής: Μπράχος Θωμάς

A.M.: 15061

Επιβλέπουσα: Τσάκαλη Ευσταθία

Αθήνα, 2023



University of West Attica

School of Food Science

Department of Food Science and Technology

Diploma Thesis

Hydrogels: Technology and applications in food industry

Student Name: Thomas Brahos

Registration Number: 15061

Supervisor: Efstathia Tsakali

ATHENS 2023

Η πτυχιακή εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔ/ΛΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	ΕΥΣΤΑΘΙΑ ΤΣΑΚΑΛΗ	ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ	
2.	ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΚΑΝΕΛΛΟΥ	ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΜΕΛΟΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	
3.	ΕΙΡΗΝΗ ΣΤΡΑΤΗ	ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΜΕΛΟΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΘΩΜΑΣ ΜΠΡΑΧΟΣ του ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ, με αριθμό μητρώου 15061 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ του Τμήματος ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Θωμάς Μπράχος

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
ΕΝΟΤΗΤΑ 1.....	7
1.1 Ορισμός υδρογέλης.....	7
1.2 Ιστορική αναδρομή	8
1.3 Ταξινόμηση υδρογελών	9
1.4 Χαρακτηριστικά υδρογελών	10
ΕΝΟΤΗΤΑ 2.....	12
2.1 Παραγωγή υδρογέλης.....	12
2.2 Μηχανισμοί της υδρογέλης.....	13
2.3 Διάφορες εφαρμογές των υδρογελών.....	13
ΕΝΟΤΗΤΑ 3.....	19
3.1 Οι υδρογέλες στην επιστήμη των τροφίμων	19
Βιβλιογραφία	26

Περίληψη

Η υδρογέλη είναι ένα διογκούμενο από νερό και διασυνδεδεμένο πολυμερές δίκτυο που παράγεται από την απλή αντίδραση ενός ή περισσοτέρων μονομερών. Αναφέρεται επίσης ότι είναι ένα πολυμερές υλικό που έχει την ικανότητα να διογκώνεται διατηρώντας μεγάλο μέρος του νερού μέσα στην δομή του, ενώ ταυτόχρονα παραμένει αδιάλυτο στο νερό. Οι υδρογέλες ερευνώνται κατά τα τελευταία 50 χρόνια. Λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων χρήσης που παρουσιάζουν σε πολλά πεδία εφαρμογών, τελευταία ερευνώνται ακόμα πιο εντατικά. Από ιστορικής άποψης οι υδρογέλες διακρίνονται σε τρεις γενιές και διαφέρουν ως προς τον σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν. Σήμερα οι υδρογέλες έχουν ένα ευρύ φάσμα χρήσεων σε πολλούς τομείς χάρη στις ειδικές δομές τους. Η μεγάλη ευελιξία των υδρογελών λόγω του υδατινού περιεχομένου τους, επιτρέπει τη χρήση τους σε διαφορετικές συνθήκες και για το λόγο αυτό υδρογέλες συναντώνται από βιολογικές χρήσεις έως και βιομηχανικές χρήσεις. Σήμερα, οι κύριες εφαρμογές είναι η πρόσληψη φαρμάκων, η αφαίρεση βαφών και ιόντων βαρέων μετάλλων, η μηχανική ιστών, οι φακοί επαφής, οι αισθητήρες pH, οι βιοαισθητήρες, η ενέσιμη υδρογέλη για την αναγέννηση του νωτιαίου μυελού, οι υδροπηκτές υπερπυκνωτών καθώς και η γεωργία και επιστήμη των τροφίμων. Συμπερασματικά οι υδρογέλες αποτελούν φυσικά ή συνθετικά πολυμερή υλικά που έχουν την ικανότητα να συγκρατούν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού λόγω της ιδιαιτερότητάς των δομών τους αλλά και λόγω της ιδιότητας διόγκωσης που έχουν. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό αλλά και εξαιτίας της δυνατότητας να τροποποιούν την πολυμερική δομή για επιθυμητές λειτουργίες, οι περιοχές εφαρμογών τους επεκτείνονται ραγδαία. Ανάμεσα στα εκπληκτικά χαρακτηριστικά τους, η βιοσυμβατότητα και η βιοαποδομησιμότητα τους τις καθιστά ως πιθανή λύση για την αποβολή τοξικών ρύπων από το περιβάλλον αλλά και ως εμφυτεύματα.

ΕΝΟΤΗΤΑ 1

1.1 Ορισμός υδρογέλης

Πολύ συχνά βλέπει κανείς ο όρος «γέλη» και ο όρος «υδρογέλη» να ταυτίζονται. Στην πραγματικότητα όμως οι γέλες και οι υδρογέλες αν και αποτελούν και οι δύο δίκτυα πολυμερών και ως εκ τούτου έχουν αρκετά κοινές χημικές ιδιότητες, διαφέρουν σημαντικά στις φυσικές τους ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα οι γέλες είναι ημιστερεά συστήματα, που αποτελούνται από μικρές ποσότητες στερεού μέσα σε μεγάλες ποσότητες υγρού. Για το λόγο αυτό οι ιδιότητες τους είναι πιο κοντά στις ιδιότητες των στερεών παρά στις ιδιότητες των υγρών (Klech, 1990). Από την άλλη πλευρά οι υδρογέλες είναι οι υδατοειδείς γέλες, δηλαδή ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο από υδρόφιλα πολυμερή, τα οποία μπορούν να διατηρούν την τρισδιάστατη δομή τους παρότι διογκώνονται απορροφώντας μεγάλες ποσότητες νερού. Αντίθετα, αν στις γέλες οι οποίες όπως προαναφέρθηκε είναι δίκτυα πολυμερών διογκωμένα σε ισορροπία, προστεθεί υγρό, τότε επέρχεται διάλυση του δικτύου τους. Γίνεται λοιπόν σαφές από όλα τα παραπάνω ότι ο πυρήνας της λειτουργίας των υδρογελών είναι η εγγενής διασύνδεσή τους (Gehrke, 1990).

Στο πέρασμα του χρόνου έρευνας των υδρογελών έχουν δοθεί αρκετοί ορισμοί στην προσπάθεια του ενοσιολογικού τους προσδιορισμού. Σύμφωνα με τους Lee, Kwon και Park (1894), η υδρογέλη είναι ένα κολλοειδές πήκτωμα, κατασκευασμένο από ανόργανα άλατα, το οποίο δεν ισχύει σύμφωνα με τις σημερινές περιγραφές. Ο συνηθέστερος κοινός ορισμός των υδρογελών είναι ως *“ένα διογκούμενο από νερό και διασυνδεδεμένο πολυμερές δίκτυο που παράγεται από την απλή αντίδραση ενός ή περισσοτέρων μονομερών”*. Αναφέρεται επίσης ότι είναι ένα πολυμερές υλικό που έχει την ικανότητα να διογκώνεται διατηρώντας μεγάλο μέρος του νερού μέσα στην δομή του, ενώ ταυτόχρονα παραμένει αδιάλυτο στο νερό. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι υδρογέλες συναντώνται και ως τρισδιάστατα βιοϋλικά που μπορούν να απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού, ενώ διατηρούν την διαστασιακή τους σταθερότητα. Έτσι λοιπόν παρά τις επιμέρους διαφορές που αναφέρονται, το κύριο χαρακτηριστικό όλων

των υδρογελών είναι η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων νερού ή άλλων υγρών (Ahmed, 2015; Chirani et al., 2015; Patel & Mequanint, 2011).

1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι υδρογέλες ερευνώνται κατά τα τελευταία 50 χρόνια. Λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων χρήσης που παρουσιάζουν σε πολλά πεδία εφαρμογών, τελευταία ερευνώνται ακόμα πιο εντατικά (Ahmed, 2015). Το πρώτο υλικό που εμφανίζεται με διασυνδεδεμένο δίκτυο και φέρει τις ιδιότητες των υδρογελών είναι η poly-hydroxyethylmethacrylate (pHEMA), η οποία και εντοπίστηκε το 1960. Ο τότε σκοπός της δημιουργίας της ήταν να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούσαν μόνιμη επαφή του υλικού με τους ιστούς (Deshpande et al., 1992).

Από ιστορικής άποψης οι υδρογέλες διακρίνονται σε τρεις χαρακτηριστικές περιόδους (Dagan, 1997):

- Η πρώτη γενιά: περιλαμβάνει την χημική τροποποίηση ενός μονομερούς ή ενός πολυμερούς με έναν εκκινητή, με κύριο στόχο τη δημιουργία υλικών με καλές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη ικανότητα διόγκωσης.
- Η δεύτερη γενιά: περιλαμβάνει την προσπάθεια δημιουργίας υλικών που μπορούν να ανταποκρίνονται σε κατάλληλα ερεθίσματα όπως το pH, ή την θερμοκρασία. Η προσπάθεια αυτή οδήγησε και στην ανάπτυξη των λεγόμενων “έξυπνων” υδρογελών (smart hydrogels), που όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα και παρακάτω, είναι κάποιες πολυμερείς μήτρες με ένα ευρύ φάσμα ρυθμιζόμενων ιδιοτήτων.
- Η τρίτη γενιά: περιλαμβάνει την προσπάθεια ανάπτυξη στερεών σύνθετων υλικών και υδρογελών διασυνδεδεμένων με άλλες φυσικές αλληλεπιδράσεις.

Οι ιδιαίτερα σημαντικές ιδιότητες των υδρογελών, όπως η φυσική τους προσομοίωση με ιστούς, η υψηλή διαπερατότητα τους σε μικρού μεγέθους μόρια και

η απελευθέρωση εγκλωβισμένων μορίων με ελεγχόμενο τρόπο, τις κατέστησαν σημαντικό πεδίο έρευνας πολλών βιοϊατρικών πεδίων (D'Emanuele & Staniforth, 1991). Έτσι λοιπόν οι υδρογέλες μπορούν να απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού λόγω των υδρόφιλων ομάδων που συνδέονται με την πολυμερική “ραχοκοκαλιά”, ενώ η δομή τους δεν διαλύεται λόγω των διασυνδέσεων μεταξύ των αλυσίδων του δικτύου (Degan, 1997).

1.3 Ταξινόμηση υδρογελών

Οι υδρογέλες χωρίζονται σε διάφορους τύπους, όπως:

- Ταξινόμηση βάσει της πηγής προέλευσης: Οι υδρογέλες χωρίζονται σε φυσικές ή συνθετικές, αν και έχει αναφερθεί και μια υβριδική που προκύπτει από την ένωση των φυσικών με συνθετικές. Αναλυτικότερα, ως φυσικές θεωρούνται οι υδρογέλες που περιλαμβάνουν υλικά όπως είναι το κολλαγόνο, το υαλουρονικό οξύ, η φιμπρίνη αλλά και κάποια παράγωγα φυσικών υλικών όπως είναι η χιτοζάνη, ή τα άλατα του αλγινικού οξέος. Από την άλλη πλευρά οι συνθετικές έχουν υλικά όπως Polyethylenegaglycol (PEG), Poly(acrylic acid) (PAA). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι PEG υδρογέλες είναι πολύ κατάλληλες για ικρίωματα λόγω του τρισδιάστατού τους περιβάλλοντος. Τέλος, οι υβριδικές υδρογέλες αποτελούν ενυδατωμένα πολυμερή δίκτυα που συνδέονται είτε φυσικά είτε ομοιοπολικά με νανοσωματίδια ή νανοδομές (Ferreira et al., 2000; Firestone & Siegel, 1991).
- Ταξινόμηση βάσει της πολυμερικής σύνθεσης: Ανάλογα με τη μέθοδο προετοιμασίας, οι υδρογέλες μπορεί να είναι ομοπολυμερείς, οι οποίες αναφέρονται σε δίκτυα που προέρχονται από ένα είδος μονομερούς. Συμπολυμερείς, οι οποίες αποτελούνται από τουλάχιστον δυο διαφορετικά είδη μονομερών, με το λιγότερο, ένα υδρόφιλο συστατικό και πολυ-πολυμερείς, οι οποίες σχηματίζονται από δυο πολυμερή με διασυνδέσεις φυσικών ή συνθετικών συστατικών τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και περιέχονται σε μορφή δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών αποτελούν οι υδρογέλες IPNs (Interpenetrating polymer network) καθώς και οι s-IPNs (semi-interpenetrating polymer networks)(Gehrke, 2000).

- Ταξινόμηση βάσει διαμόρφωσης: Οι υδρογέλες με βάση την φυσική και την χημική τους δομή μπορούν να διακριθούν σε άμορφες υδρογέλες, οι οποίες είναι οι μη κρυσταλλικές, οι ημικρυσταλλικές καθώς και κρυσταλλικές.
- Ταξινόμηση βάσει φυσικής εμφάνισης: Οι υδρογέλες μπορεί να είναι μικροσφαιρίδια, φιλμ ή μήτρες ανάλογα με τον τρόπο σύνθεσής τους (Gehrke, 2000; Kazakov, 2012).
- Ταξινόμηση βάσει της βιοδιασπασιμότητάς τους: χωρίζονται σε βιοδιασπώμενες και μη βιοδιασπώμενες.
- Ταξινόμηση βάσει του τύπου διασύνδεσης: Διακρίνονται σε φυσική ή χημική διασύνδεση. Στη φυσική διασύνδεση, που ονομάζεται και αντιστρεπτή, οι συνδέσεις δεν είναι μόνιμες και οφείλονται είτε σε φυσικές αλληλεπιδράσεις είτε σε πλεγμένες αλυσίδες πολυμερών.
- Ταξινόμηση βάσει του ηλεκτρικού φορτίου του δικτύου: Διακρίνονται ανάλογα με την παρουσία ή απουσία ηλεκτρικού φορτίου σε:
 - Μη – ιονικές
 - Ιονικές
 - Αμφοτερικούς ηλεκτρολύτες
 - Αμφιτεριονικούς ηλεκτρολύτες.
- Ταξινόμηση βάσει των φυσικών ιδιοτήτων τους: Διακρίνονται σε συμβατικές και στις λεγόμενες «έξυπνες» υδρογέλες (Gehrke & Lee, 1990).

1.4 Χαρακτηριστικά υδρογελών

Τα κύρια χαρακτηριστικά των υδρογελών είναι τα εξής (Zhang, 2017):

- μεγάλη χωρητικότητα απορρόφησης
- μεγάλη απορροφητικότητα υπό φορτίο
- επιθυμητός ρυθμός απορρόφησης

- μεγάλη βιοαποικοδομησιμότητα
- χαμηλό δυνατό διαλυτό περιεχόμενο και υπολειπόμενο μονομερές
- φωτο – σταθερότητα
- διατήρηση ουδέτερου pH μετά την διόγκωση
- άχρωμη, άοσμη και απολύτως μη τοξική
- την υψηλότερη ανθεκτικότητα και σταθερότητα στο περιβάλλον διόγκωσης αλλά και στις συνθήκες αποθήκευσης
- την ικανότητα επαναβρεξιμότητας
- και τέλος το χαμηλό κόστος

Όλες οι παραπάνω ιδιότητες είναι σχεδόν αδύνατον να υπάρχουν σε μια υδρογέλη αλλά πολλές υδρογέλες μπορεί να συναντούν το μέγιστο βαθμό κάποιων από αυτές τις ιδιότητες. Έτσι ανάλογα με τις εκάστοτε ιδιότητές τους οι υδρογέλες βρίσκουν το αντίστοιχο πεδίο εφαρμογής, που μπορεί να είναι από τη γεωργία και τις διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές μέχρι την ιατρική και την επιστήμη των τροφίμων (Ahmed, 2015).

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

2.1 Παραγωγή υδρογέλης

Οι υδρογέλες σχηματίζονται, όπως προαναφέρθηκε, από αλυσίδες πολυμερών συνδεδεμένων με σταυροειδείς δεσμούς μέσω μιας πληθώρας μηχανισμών. Οι περισσότερες μέθοδοι γελοποίησης εξαρτώνται από τις ίδιες τις ιδιότητες των πολυμερών. Όπως αναφέρθηκε και στον ορισμό των υδρογελών, οι υδρογέλες είναι υδρόφιλα πολυμερή δίκτυα διασυνδεδεμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πολύ ελαστικά. Η διασύνδεση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως (Dagan, 1997):

- σύνδεση πολυμερικών αλυσίδων μέσω χημικής αντίδρασης
- μέσω φυσικών αλληλεπιδράσεων
- με ιονίζουσα ακτινοβολία για την δημιουργία ελευθέρων ριζών

Αναλυτικότερα, η σύνθεση των φυσικών γελών γίνεται με τους εξής τρόπους (Deshpande et al., 1992):

- Θέρμανση ή ψύξη πολυμερούς διαλύματος
- Διασύνδεση πολυμερούς σε υδατικό διάλυμα προς σχηματισμό πολυμερών μικροκρυστάλλων, με τη χρήση ψυκτικών κύκλων σε θάλαμο.
- Ελάττωση pH προς σχηματισμό μίας γέλης με δεσμούς υδρογόνου,
- Μίξη πολυανιονικών και πολυκατιονικών διαλυμάτων προς σχηματισμό μίας σύνθετης διαχωρισμένης γέλης

Από την άλλη πλευρά, η σύνθεση των χημικών γελών γίνεται με τους εξής τρόπους:

- Διασύνδεση πολυμερών σε στερεή κατάσταση ή μέσα σε διάλυμα ακτινοβολίας, χημικούς διασυνδέτες ή πολυλειτουργικά σύνθετα αντιδραστήρια.
- Συμπολυμερισμός ενός μονομερούς με τον διασυνδέτη μέσα σε διάλυμα

- Συμπολυμερισμός ενός μονομερούς με ένα πολυλειτουργικό μακρομόριο.
- Πολυμερισμός ενός μονομερούς μέσα σε ένα διαφορετικό συμπαγές πολυμερές προς σχηματισμό μιας IPN γέλης
- Χημική μετατροπή ενός υδρόφοβου πολυμερούς σε μία υδρογέλη

2.2 Μηχανισμοί της υδρογέλης

Αυτό που είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικό σε κάθε υδρογέλη είναι ο χαρακτήρας του νερού, ο οποίος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το επίπεδο της διαπερατότητας των θρεπτικών συστατικών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι όταν μια ξηρή υδρογέλη απορροφήσει νερό, τότε ενυδατώνονται οι υδροφιλικές ομάδες και έπειτα οι πολικές ομάδες. Έτσι προκαλείται μια διόγκωση του δικτύου συνολικά και μια έκθεση των υδροφοβικών ομάδων. Έπειτα, λόγω των οσμωτικών δυνάμεων του δικτύου, απορροφάται κι άλλο νερό προς άπειρη αραίωση. Η άπειρη αυτή αραίωση έχει ως αποτέλεσμα μια ελαστική συσταλτική δύναμη από το δίκτυο και έτσι επέρχεται η ισορροπία διόγκωσης. Το επιπλέον νερό που απορροφάται μετά το σημείο του κορεσμού τόσο των ιονισμένων, όσο και των πολικών και υδροφοβικών ομάδων, ονομάζεται ελεύθερο νερό και εικάζεται ότι καλύπτει τον ελεύθερο χώρο μεταξύ των αλυσίδων του δικτύου ή το κέντρο των μεγαλύτερων πόρων (Hoffman, 2002).

Για να υπολογιστεί η ποσότητα του ελεύθερου νερού, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι. Αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως βασίζονται στη χρήση μικρών ανιχνευτικών μορίων, DSC και NMR. Επιπρόσθετα, σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διαπερατότητα κάθε υδρογέλης αποτελούν οι εξής (Kuo, 2000):

- το μέγεθος και το σχήμα των διαλυμένων ιχνηθετών
- η σχετική υδροφιλικότητα και υδροφοβικότητά τους
- και η διαθεσιμότητα “ελεύθερων” μορίων νερού για να ενυδατώσουν και να διαλύσουν τα μόρια των διαλυμένων ουσιών

2.3 Διάφορες εφαρμογές των υδρογελών

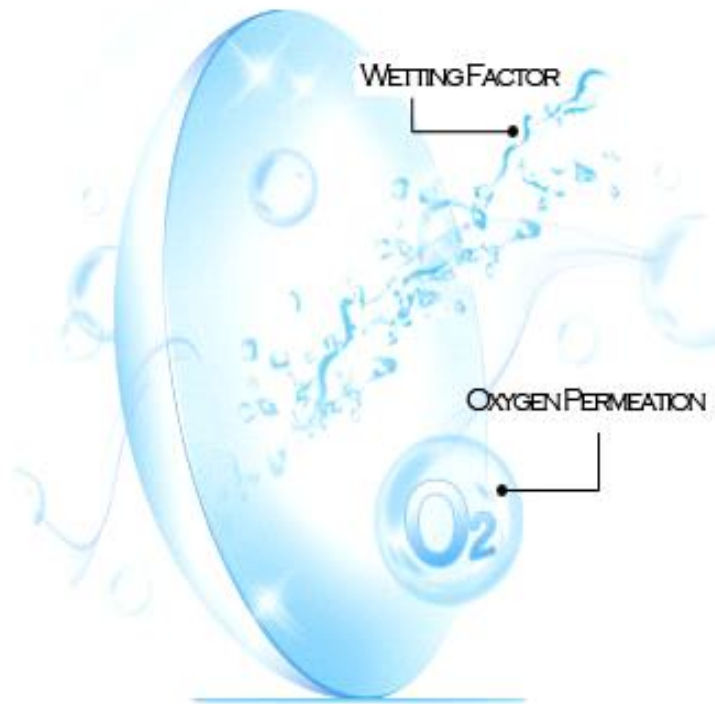
Οι υδρογέλες, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλούς τομείς. Σήμερα, οι κύριες εφαρμογές είναι οι εξής:

- Πρόσληψη φαρμάκων: Οι υδρογέλες χρησιμοποιούνται με αξιοσημείωτα αποτελέσματα στα συστήματα ελεγχόμενης χορήγησης φαρμάκων (DDS). Οι θαυμάσιες ιδιότητες των υδρογελών τα καθιστούν εξαιρετική επιλογή στις εφαρμογές αυτές, διότι η δομή από τις υδρογέλες και το υψηλό πορώδες μπορούν να επηρεάζουν τον βαθμό διασύνδεσης στη μήτρα και τη συγγένεια της υδρογέλης με το υδατικό περιβάλλον, στο οποίο εμφανίζεται το οίδημα. Λόγω των πορωδών δομών, οι υδρογέλες είναι εξαιρετικά διαπερατές σε διάφορα είδη φαρμάκων και έτσι τα φάρμακα μπορούν να φορτωθούν σε αυτές και στις κατάλληλες συνθήκες να ληφθούν από τον οργανισμό (Bahram, Nurallahzadeh & Mohensi, 2015). Το κύριο πλεονέκτημα της εφαρμογής αυτής είναι η δυνατότητα απελευθέρωσης φαρμακευτικών προϊόντων για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η επέκταση της απελευθέρωσης του φαρμάκου μπορεί να επιτευχθεί είτε με φυσικές είτε με χημικές στρατηγικές, έτσι ώστε να ενισχυθεί η δέσμευση φαρμάκου και υδρογελών.
- Υδρογέλες ευαίσθητες στο pH σε DDS: Η αλλαγή του pH λαμβάνει χώρα σε πολλά σημεία του του ανθρώπινου σώματος, και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το DDS. Πιο συγκεκριμένα στην γαστρεντερική οδό ή σε όγκους παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές στο pH. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κάποια πολυμερή, όπως το PAA, το PMAA, το πολυ(L-γλουταμινικό οξύ) και τα πολυμερή που περιέχουν σουλφοναμίδιο για την αποτελεσματικότερη χορήγηση φαρμάκων στον άνθρωπο (Bahram et al., 2011, 2013, 2014; Mohseni et al., 2014).
- Υδρογέλες ευαίσθητες στη θερμοκρασία σε DDS: Τα θερμοευαίσθητα πολυμερή, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στη βιοϊατρική. Πολυμερή όπως το PNIPAAm και το PDEAAm έχουν πολλές εφαρμογές στην βιοϊατρική. βρίσκουν πολλές εφαρμογές.
- Αφαίρεση βαφών μετάλλων: Μέχρι σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο πολλά είναι τα περιστατικά ρύπανσης του περιβάλλοντος από βαρέα

μέταλλα, τα οποία συνήθως βρίσκονται στα βιομηχανικά λύματα. Η αφαίρεση ιόντων βαρέων μετάλλων είναι μια πολύ χρήσιμη πρακτική για τη διατήρηση των περιβαλλοντικών πόρων. Συνθετικές πολυακρυλικές υδρογέλες με διασταυρούμενη σύνδεση έχουν χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση της τοξικότητας των βαρέων μετάλλων από υδατικά μέσα (Bahram, 2015). Ωστόσο, επειδή αυτή η εφαρμογή έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος δεν εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα (Ramesh et al., 2009; Kandile & Nasr, 2009).

- Στη μηχανική ιστών: Η μηχανική ιστών αποτελεί έναν συνδυασμό υλικών, μηχανικής και κυττάρων που χρησιμοποιείται για την βελτίωση ή αντικατάσταση κάποιων ανθρώπινων οργάνων. Για να συμβεί αυτό χρειάζεται να βρεθούν οι κατάλληλοι τύποι κυττάρων και να καλλιεργηθούν σε ένα κατάλληλο ικρίωμα υπό κατάλληλες συνθήκες. Οι υδρογέλες είναι ένα υλικό κατάλληλο για τη χρήση αυτή, διότι οι δομές των υδρογέλων είναι παρόμοιες με την εξωκυτταρική μήτρα πολλών ανθρώπινων ιστών (Lee & Mooney, 2001). Ειδικότερα, οι υδρογέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παράγοντες για την πλήρωση κενών χώρων, ως φορείς για την παράδοση βιοδραστικών μορίων και ως θεραπείες τρισδιάστατης δομής, που λειτουργούν ως στήριγμα για τα κύτταρα και βοηθούν στο σχηματισμό ενός ιδανικού ιστού. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG) έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόληψη μετεγχειρητικών συμφύσεων (Lee & Mooney, 2001).
- Φακοί επαφής: Ένας ακόμη τομέας που χρησιμοποιούνται οι συνθετικές υδρογέλες είναι η οφθαλμολογία, και πιο συγκεκριμένα οι φακοί επαφής. Το 1960, οι φακοί PHEMA αναπτύχθηκαν από τον καθηγητή Otto Wichterle. Ο καλός φακός επαφής πρέπει να έχει μέγιστη διαπερατότητα οξυγόνου για να μην ερεθίζει το μάτι. Οι υδρογέλες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φακών επαφής μπορούν να ικανοποιήσουν τις περισσότερες από τις απαιτήσεις. Οι κύριες προϋποθέσεις για αυτό περιλαμβάνουν ικανή ποσότητα περιεκτικότητας σε νερό, καλές μηχανικές ιδιότητες, διαπερατότητα προς το οξυγόνο, διαβρεξιμότητα της επιφάνειας, καλές οπτικές

λειτουργίες, σταθερότητα προς την υδρόλυση και την αποστείρωση και μη τοξικό χαρακτήρα με παράλληλα αρκετή βιολογική ανοχή για τα ζωντανά κύτταρα. Διάφορα μονομερή που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το διυδροξύ μεθακρυλικό, μεθακρυλικό οξύ, ακρυλαμίδια κ.α. (Michalek et al., 2010).



Εικόνα . Φακοί επαφής με υδρογέλες

- Αισθητήρες pH: Οι υδρογέλες μπορούν να μεταβάλλουν τον όγκο τους όταν αποκρίνονται σε κάποιες αλλαγές διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων (Koetting et al., 2015).
- Βιοαισθητήρες: Ο συνδυασμός φυσικών και χημικών αισθητήρων οδηγεί στη δημιουργία ενός βιοαισθητήρα. Υπάρχουν δύο ορισμοί για το τι μπορεί να κάνει ένας βιοαισθητήρας: μπορεί να θεωρηθεί ως ανιχνευτής και να αναφέρει μια βιοφυσική ιδιοκτησία του υπό μελέτη συστήματος ή μια συσκευή που μπορεί να παρέχει χρήσιμες αναλυτικές πληροφορίες από τη μετατροπή βιοχημικών δεδομένων. Όλοι οι βιοαισθητήρες έχουν δυνατότητα ανάλυσης κάποιων βιολογικών

πληροφοριών και σήμερα αποκτούν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Το βιοστοιχείο είναι το μέρος εκείνο όπου γίνεται η βιολογική αναγνώριση και αποτελείται από ένζυμα, αντισώματα, ζωντανά κύτταρα ή ιστούς. Οι υδρογέλες λόγω της υψηλής περιεκτικότητας τους σε νερό και της υδρόφιλης φύσης τους είναι εγγενώς βιοσυμβατές. Έτσι οι υδρογέλες μπορούν να λειτουργήσουν ως προστασία του αισθητήρα καθώς και ως μήτρες ακινητοποίησης για τα βιοαισθητήρια στοιχεία (Renneberg et al., 2004). Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι χρήσης υδρογέλης σε βιοαισθητήρες: αυτοί που μπορούν να επικαλυφθούν στην επιφάνεια μιας συσκευής ανίχνευσης όπως ένα ηλεκτρόδιο ή να χρησιμοποιηθούν ως τρισδιάστατη μήτρα ή στήριγμα για συντήρηση κυττάρων (Koetting et al., 2015)..

- Ενέσιμη υδρογέλη για την αναγέννηση του νωτιαίου μυελού: Η βλάβη του νωτιαίου μυελού (SCI) είναι ένα περίπλοκο αναγεννητικό πρόβλημα λόγω των πολλαπλών όψεων της αναστολή ανάπτυξης που συμβαίνει μετά από τραύμα. Σε τέτοιες συνθήκες, η εισαγωγή ενός προσχηματισμένου πλαισίου ή DDS στον κατεστραμμένο νωτιαίο μυελό με χειρουργικές επεμβάσεις μπορεί να προκαλέσει επακόλουθη βλάβη. Μια εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση του σε επιτόπιες σκαλωσιές. Αυτό που συμβαίνει μετά την ένεση στην τραυματισμένη περιοχή του λώρου είναι η μετατροπή της ιξωδοελαστικής υδρογέλης από υγρή μορφή σε γέλη και προσαρμογή στον ιστό του σημείου τραυματισμού (Makaya & Spector, 2012). Οι λειτουργίες τους περιλαμβάνουν (Zhong & Bellamkonda, 2008) τη δημιουργία ενός ικρίωματος για κυτταρική διήθηση και ανάπτυξη νευραξόνων, την ενθυσίαση φαρμάκων και την διατήρηση της βιοδραστικότητας κατά τη διάρκεια της ζελατινοποίησης και της απελευθέρωσης..
- Υδρογέλες υπερπυκνωτών: Οι τεχνολογικές εξελίξεις τρέχουν σήμερα με πολύ γρήγορους ρυθμούς (Shi et al., 2014). Χρειάζεται λοιπόν ταυτόχρονη ενσωμάτωση μηχανικής ισχύος, οπτικής μετάδοσης και ηλεκτρονικής αγωγιμότητας (Hao et al., 2014). Ωστόσο, στην πράξη αυτές το κόστος μπορεί να είναι απαγορευτικό για εμπορευματοποίηση.

Συμπερασματικά οι υδρογέλες αποτελούν φυσικά ή συνθετικά πολυμερή υλικά που έχουν την ικανότητα να συγκρατούν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού λόγω της ιδιαιτερότητάς των δομών τους αλλά και λόγω της ιδιότητας διόγκωσης που έχουν. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό αλλά και εξαιτίας της δυνατότητας να τροποποιούν την πολυμερική δομή για επιθυμητές λειτουργίες, οι περιοχές εφαρμογών τους επεκτείνονται ραγδαία. Ανάμεσα στα εκπληκτικά χαρακτηριστικά τους, η βιοσυμβατότητα και η βιοαποδομησιμότητα τους τις καθιστά ως πιθανή λύση για την αποβολή τοξικών ρύπων από το περιβάλλον αλλά και ως εμφυτεύματα. Επιπλέον, οι αγωγίμες υδρογέλες είναι συχνά μια καλή επιλογή για το σχεδιασμό και την κατασκευή υπερπυκνωτών, που υπόσχονται τις πιο γρήγορες εξελίξεις στα ηλεκτρονικά.

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

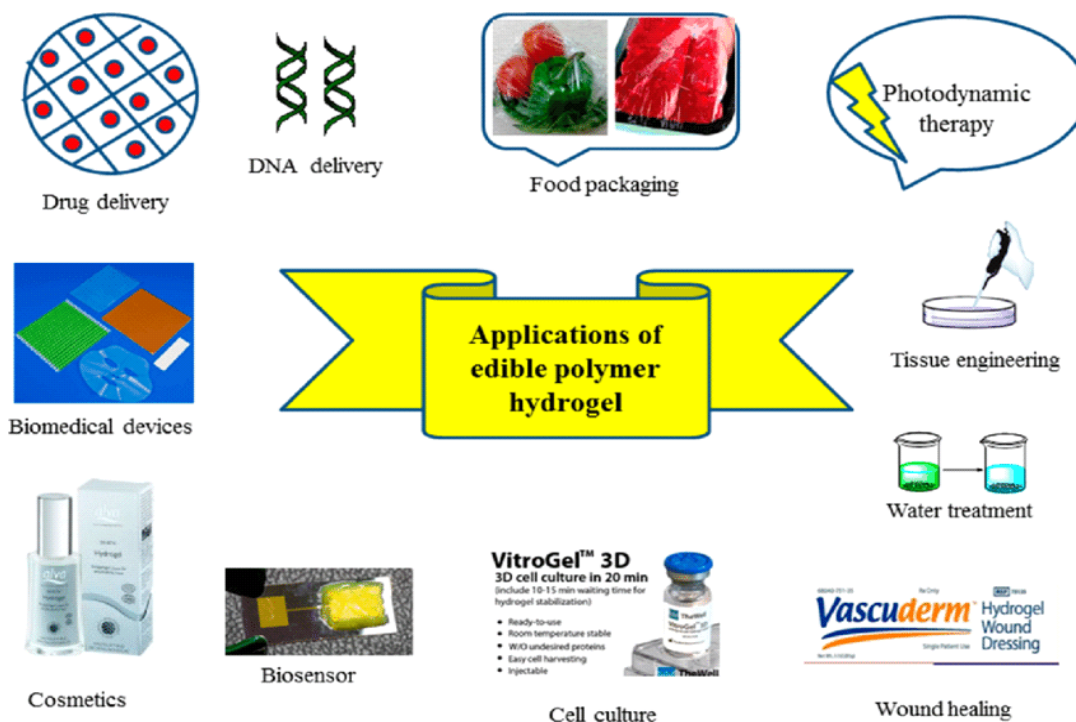
3.1 Οι υδρογέλες στην επιστήμη των τροφίμων

Πριν ξεκινήσει κανείς τη συζήτηση για τις δυνατότητες εφαρμογής της υδρογέλης στην επιστήμη των τροφίμων, είναι απαραίτητο να αναρωτηθεί τι είναι η επιστήμη των τροφίμων. Η επιστήμη των τροφίμων αποτελεί έναν κλάδο που συνδέεται στενά με τους ανθρώπους, διότι είναι ένας κλάδος που συνδέεται στενά με το «φαγητό». Τρία κύρια επίπεδα περιλαμβάνονται στην επιστήμη των τροφίμων:

1. Η παραγωγή υγιεινών τροφίμων που είναι ασφαλή για τον καταναλωτή
2. Η αποτελεσματική επεξεργασία και διατήρηση των τροφίμων (μηχανική και επεξεργασία τροφίμων / ασφάλεια τροφίμων)
3. Το να τρώει ο καταναλωτής νόστιμα, άνετα και βολικά (επεξεργασία τροφίμων/ οργανοληπτικός έλεγχος).

Πιθανές εφαρμογές των υδρογελών στο μέλλον αφορούν (Ahmad et al., 2019):

- στη δόμηση τροφίμων με επιθυμητή αισθητηριακή υφή
- στη διατήρηση μετασταθερών δομών τροφίμων και την αύξηση της διάρκειας ζωής τους,
- στον σχεδιασμό υλικών συσκευασίας τροφίμων
- στην παράδοση και βιοδιαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών
- στον έλεγχο θερμίδων
- στην παρακολούθηση κινδύνων για την ασφάλεια των τροφίμων.



Εικόνα 2. Οι υδρογέλες στην βιομηχανία των τροφίμων

Υπάρχουν πολλές βιβλιογραφίες για υδρογέλες φυσικής προέλευσης που παρασκευάζονται από βιοπολυμερή τροφίμων (Doyle et al., 2015; Kower et al., 2013), που αποτελούνται από αποκυτταρωμένη εξωκυτταρική μήτρα (ECM), κολλαγόνο Matrigel, χιτοζάνη, ελαστίνη, ινώδες, αλγινικά άλατα, υαλουρονικό οξύ, πουλλουλάνη, φιμπρίνη, , ακόμη και DNA και αυτές οι δυνητικές εφαρμογές σε υδρογέλη παρουσιάζουν εξαιρετική ποιότητα διατροφής, τόσο ως ενισχυτικά αλλά και χαρακτηριστικά βιοδιαθεσιμότητας των τροφίμων. (Benton et al., 2014; Charoen et al., 2013; Liu et al., 2012; Mredha et al., 2015; Truong et al., 2011; Qu & Luo, 2020; Yao et al., 2020) .

Τα συνθετικά πολυμερή και τα παράγωγά τους προσφέρουν στους μηχανικούς εξαιρετικά ευέλικτα υλικά με φυσικές και χημικές ιδιότητες που μπορούν εύκολα να ελεγχθούν και να τροποποιηθούν (Naahidi et al., 2017) και παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυνατότητες σχηματισμού υδρογέλης με διαφορετικές δομές και λειτουργίες.

Λόγω της ποικιλομορφίας των δομών της υδρογέλης (είτε αυτές είναι φυσικές είτε συνθετικές), υπάρχει ευρύτερος χώρος για λειτουργική ρύθμιση, καθιστώντας την

εφαρμογή υδρογέλης στον τομέα της επιστήμης των τροφίμων πιο συντονισμένη. Οι υδρογέλες μπορεί να παρέχουν στα υλικά συσκευασίας την ζητούμενη διαπερατότητα. Από την άλλη, οι μικρογέλες, οι νανογέλες, οι υδρογέλες με δομή πυρήνα και οι υδρογέλες γαλακτώματος είναι πιο κατάλληλες ως πλατφόρμες ενθυλάκωσης και παροχής θρεπτικών ουσιών (Szot et al., 2011).

Η υδρογέλη, ως ένα είδος μαλακού και υγρού υλικού που επεξεργάζεται εύκολα, μπορεί να απορροφήσει έως και πολλές χιλιάδες φορές το ξηρό βάρος του με τα τρισδιάστατα πορώδη δίκτυα, καθιστώντας το ένα σύστημα ενθυλάκωσης νερού σε διαλυτό συστατικό. Τις τελευταίες δεκαετίες, υπάρχουν πολυάριθμες αναφορές για την εφαρμογή των υδρογελών ως συστημάτων ενθυλάκωσης στον τομέα των τροφίμων, που είναι άξιες αναφοράς για τους επιστήμονες της βιομηχανίας τροφίμων. Από πλευράς δοκιμών, οι μικρογέλες, οι νανογέλες, οι υδρογέλες με δομή πυρήνα-κέλυφος, οι υδρογέλες γαλακτώματος και τα νανοσωματίδια υδρογέλης είναι πιο κατάλληλες ως πλατφόρμα για ενθυλάκωση. Υπάρχουν ομοιότητες αλλά και διαφορές μεταξύ της έρευνας χρήσης υδρογέλης για ακινητοποίηση (ένζυμο, κύτταρο, μικροοργανισμός κ.λπ.) και για ενθυλάκωση. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό των υδρογελών οι οποίες μπορούν να απορροφήσουν και να συγκρατήσουν μεγάλη ποσότητα νερού ή βιολογικών ρευστών μέσα σε μια τρισδιάστατη δομή δικτύου τις καθιστά υποψήφιες για εφαρμογές στο σύστημα διανομής (Mc Clements, 2017; Wei et al., 2019). Για παράδειγμα, νανοσωματίδια ενός είδους υδρογέλης, σφαιρίδια που κρύβουν βιοενεργά φορτωμένα νανοσωματίδια, απελευθερώνονται υπό ορισμένες συνθήκες, διότι παρουσιάζουν μεγάλη ικανότητα παροχής θρεπτικών ουσιών (Lim et al., 2020; Mc Clements, 2007).

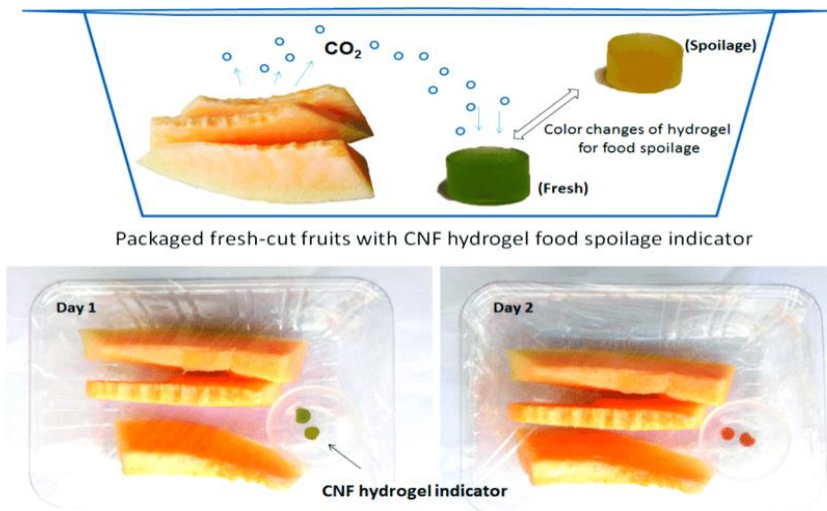
Επιπλέον, οι άλλες ιδιότητες των υδρογελών όπως η ανταπόκριση στα ερεθίσματα της θερμότητας, του pH και του φωτός είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την ελεγχόμενη απελευθέρωση στο σύστημα παροχής τροφίμων (Cooper & Yang, 2019). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στην έρευνα των Zhu et al (2019), παρασκευάστηκε μια υδρογέλη ημι-IPN που ανταποκρίνεται στο pH αποτελούμενη από πολυσακχαρίτη ροδάκινου (PGP) και β-γλυκάνες *Auricularia polytricha* (APP) μέσω της μεθόδου διασταύρωσης αντίστροφου γαλακτώματος.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μελετών που εστιάζει στην εφαρμογή υδρογέλης στην ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων για τη

χορήγηση φαρμάκων (Mahinroosta et al., 2018) όπως οι μικρογέλες (Shewan & Stokes, 2013). Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι υδρογέλες για τη χορήγηση του φαρμάκου στο σωστό μέρος και τον σωστό χρόνο (ελεγχόμενης αποδέσμευσης) σχεδιάζονται ανάλογα με τη διόγκωση ή τη συρρίκνωση από την επίδραση των σημάτων pH και θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, ενθαρρύνεται η λήψη χρήσιμων παραδειγμάτων από τις ερευνητικές περιπτώσεις εφαρμογής καλά σχεδιασμένων δομημένων υδρογελών στο σύστημα χορήγησης φαρμάκων.

Επίσης, οι υδρογέλες μπορούν να διαδραματίσουν ρόλο στη μείωση των θερμίδων, ενισχύοντας την αίσθηση του κορεσμού στο άτομο (Cao & Mezzenga, 2020). Οι Wu et al (2014) έφτιαξαν σωματίδια υδρογέλης από πρωτεΐνες και διαιτητικές ίνες, τα οποία αποτελούσαν υγιεινά υποκατάστατα των κόκκων αμύλου. Παρόμοια μελέτη έχει αναφερθεί από τους Chung et al (2013) και Thompson et al (2017) σχετικά με τη χρήση μιας αναμειγμένης υδρογέλης αγαρμεθυλοκυτταρίνης που δεν είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία, για τρόφιμα, με σκοπό τη μείωση της θερμιδικής πυκνότητας των τηγανιτών που παρασκευάζονται σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από το σημείο βρασμού του νερού. Οι Chung et al (2013) ανέφεραν ότι η εφαρμογή υδρογέλης γαλακτώματος σε τρόφιμα με μειωμένα λιπαρά, μπορεί να γίνει με την αντικατάσταση των ζωικών ελαίων με φυτικά έλαια.

Τέλος όσον αφορά τα υλικά συσκευασίας τροφίμων, οι υδρογέλες αποτελούν μια σημαντική λύση στο ιδιαίτερα έντονο ζήτημα της χρήσης ή και κατάχρησης πολυμερών υλικών μεγάλου μοριακού βάρους με βάση το πετρέλαιο. Η πρόσφατη έρευνα και η επιστημονική πρόοδος προωθούν βιοαποικοδομήσιμα υλικά για τη συσκευασία τροφίμων (Bandyopadhyay et al., 2018). Ο κύριος ρόλος αυτών των υλικών στη συσκευασία τροφίμων είναι ο έλεγχος της υγρασίας μέσα στη συσκευασία (Batista et al., 2019).



Εικόνα 3. Σχήμα χρωματισμένης CNF υδρογέλης για έξυπνα συστήματα συσκευασίας τροφίμων

Η χρήση υδρογέλης μπορεί να μειώσει τη δραστηριότητα του νερού, επιβραδύνοντας την ανάπτυξη μούχλας και βακτηρίων και συνεπώς της αλλοίωσης σε τρόφιμα όπως έτοιμα γεύματα και υγροσκοπικά προϊόντα ή να μειώσει το μαλάκωμα των ξηρών τραγανών προϊόντων (de Azeredo, 2013).

Ανεξάρτητα από το αν η υδρογέλη λειτουργεί ως παραδοσιακό, ή ως έξυπνο υλικό συσκευασίας, εκτός από τις βασικές ανησυχίες όπως το υψηλό κόστος έχει πολλά οφέλη όπως η ανανεώσιμη δυνατότητα (διάρκεια ζωής), η βιοδιασπασιμότητα, η μηχανική αντοχή, η υψηλή απορρόφηση, ακόμη και η αναπνοή και η διαφάνεια. Για παράδειγμα, στην ανασκόπηση του Batista et al (2019), συνοψίζεται η δυνατότητα των υδρογελών ως απορροφητικά υλικά που εφαρμόζονται στις συσκευασίες τροφίμων. Ως εκ τούτου, κάθε προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης που έχει καλή μηχανική αντοχή, υπεραπορροφητική ιδιότητα, ακόμη και καλή αναπνοή και διαφάνεια μέσω αποτελεσματικού δομικού σχεδιασμού αξίζει προσοχής, όπως στις υδρογέλες DN/IPN, τις προσανατολισμένες δομικές υδρογέλες, τις πορώδης υδρογέλες κ.λπ. Η ενεργή συσκευασία αλληλοεπιδρά με το τρόφιμο που περιέχει άμεσα με σκοπό να μειώσει ή ακόμη και να αναστείλει τη μικροβιακή ανάπτυξη στο προϊόν (Batista et al., 2019).

Επιπρόσθετα, με την έξυπνη συσκευασία μεταφέρονται πληροφορίες ποιότητας προς τον καταναλωτή, έτσι ώστε να ξέρει πόσο ασφαλές είναι το προϊόν που θα αγοράσει και θα καταναλώσει. Ακόμη, η ποιότητα των τροφίμων εξαρτάται σε μεγάλο

βαθμό απο την αντίληψη της υφής. Ως μαλακό υλικό, η υδρογέλη έχει σημαντικές ιδιότητες υφής (ελαστικότητα, σκληρότητα, μασητικότητα κ.λπ.). Ως εκ τούτου, οι υδρογέλες με βέλτιστες αποδόσεις να χρησιμοποιηθούν πέρα από τη συσκευασία και την αίσθηση του κορεσμού, ως βελτιωτικά της υφής του εκάστοτε τροφίμου (Batista et al., 2019).

Επίσης, οι υδρογέλες μπορούν χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία λυμάτων υγρών αποβλήτων, για το διαχωρισμό λαδιού-νερού, για την κάλυψη δυσάρεστων γεύσεων και την αποτελεσματική πρόληψη απολέπισης σε λέβητες, σωλήνες κ.α. Οι Thompson et al (2017), παρήγαγαν ένα σύστημα δυαδικής υδρογέλης κατασκευασμένο από δύο βιοπολυμερή, το άγαρ και τη μεθυλοκυτταρίνη (agar-MC), το οποίο δεν απαιτούσε προσθήκη άλατος για να συμβεί ζελατινοποίηση και έχει πολύ ασυνήθιστες ρεολογικές και θερμικές ιδιότητες. Αυτές οι εξαιρετικά θερμικά σταθερές υδρογέλες έδειξαν αντοχή στο τήγμα που μπορεί να βρει εφαρμογή στην επεξεργασία τροφίμων σε υψηλές θερμοκρασίες και στη διαμόρφωση υλικών. Ακόμη στην ανασκόπηση του Dickinson (2015), οι μικρογέλες που βασίζονται σε βιοπολυμερή ήταν ικανές στη διατήρηση μετασταθερών δομών τροφίμων και ως επακόλουθο στην αύξηση της διάρκειας ζωής των τροφίμων.

Όσον αφορά στον τομέα της ασφάλειας τροφίμων, λόγω του γεγονότος ότι η υδρογέλη έχει υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού στη δομή της και το τρισδιάστατο υδρόφιλο δίκτυο πολυμερών, μπορεί να επιτρέψει σε μεγάλες ποσότητες ελεύθερων μορίων ή ιόντων να διαχέονται σε ολόκληρη τη δομή. Επιπλέον, το υψηλό προσροφητικό υλικό με υψηλό πορώδες καθώς και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης, καθιστούν την υδρογέλη μια αποτελεσματική πλατφόρμα για λειτουργία προσρόφησης ή απομάκρυνσης (Goncalves et al., 2017, 2019; Guo et al., 2019; He et al., 2020).

Για παράδειγμα, οι Goncalves et al (2020), ανέπτυξαν ένα πολλά υποσχόμενο προσροφητικό με βάση το ικρίωμα υδρογέλης χιτοζάνης τροποποιημένο με νανοσωλήνες άνθρακα, για την αφαίρεση χρωστικών τροφίμων σε μεμονωμένα και δυαδικά υδατικά συστήματα. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές έρευνες στον τομέα της περιβαλλοντικής επιστήμης σχετικά με τη χρήση υδρογέλης για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων και άλλων ρύπων, που μπορούν επίσης να εξεταστούν για εφαρμογή στην επιστήμη των τροφίμων. Στην παρακολούθηση κινδύνων οι υδρογέλες έχουν

κερδίσει ευρεία προσοχή αφού λειτουργούν ως (βιο)αισθητήρες ή ανιχνευτές σημάτων για τον εντοπισμό παραγόντων κινδύνου ή επικινδυνότητας στα τρόφιμα. Για παράδειγμα, οι Hao et al (2020) στην έρευνά τους σχημάτισαν έναν φθορίζοντα αισθητήρα υδρογέλης DNA για την ευαίσθητη ανίχνευση της ωχρατοξίνης A (OTA). Ομοίως οι Zhao et al (2018) εφάρμοσαν υδρογέλη διασταυρούμενης σύνδεσης απταμερούς που ανταποκρίνεται στην Αφλατοξίνη B-1 σε φορητό μετρητή pH . Παρόμοια μελέτη έχει αναφερθεί από τους Ma et al. (2016) και από τους Wang et al (2019), που σχημάτισαν έναν δισδιάστατο μοριακά αποτυπωμένο αισθητήρα υδρογέλης φωτονικών κρυστάλλων για την ανίχνευση της οξυτετρακυκλίνης στο γάλα.

Στο ίδιο πλαίσιο οι Zhan et al (2019) κατασκεύασαν ένα φορητό κιτ δοκιμών υδρογέλης αгарόζης με βάση φθορισμού, το οποίο εφαρμόζεται στην επιτόπια αξιολόγηση της περιεκτικότητας σε NO₂- εντός 10 λεπτών, το οποίο μπορεί να έχει ευρείες προοπτικές εφαρμογής στην αξιολόγηση της ασφάλειας των τροφίμων. Παρόμοιες αναφορές έχουν εντοπιστεί και σε κάποιες άλλες έρευνες (Gong et al., 2016; Liu et al., 2015; Nam et al., 2018).

Τα τελευταία χρόνια, η εκχύλιση στερεάς φάσης υδρογέλης με βάση πολυμερή (SPE) χρησιμοποιήθηκε επίσης ως μέθοδος δειγματοληψίας στον άμεσο, επιτόπιο και γρήγορο έλεγχο επικίνδυνων ουσιών, όπως ο υδράργυρος (Geng et al., 2015) παράνομα πρόσθετα στη φλούδα φρούτων και λαχανικών (Gong et al., 2016) όπως η ροδαμίνη B (Huang et al., 2020) και άλλες αποτελεσματικές προκλήσεις.

Βιβλιογραφία

- Ahmad, S.; Ahmad, M.; Manzoor, K.; Purwar, R.; Ikram, S. A Review On Latest Innovations in Natural Gums Based Hydrogels: Preparations & Applications. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019, 136, 870–890. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.06.113.
- Ahmed E.M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research, Cairo University.* 2015;6:105–121.
- Bahram, M., F. Hoseinzadeha, Kh. Farhadi, M. Saadat, P. Najafi-Moghaddam, A. Afkhami, Synthesis of Gold Nanoparticles Using pH-sensitive Hydrogel and Its Application for Colorimetric Determination of Acetaminophen, Ascorbic Acid and Folic Acid, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2014; 441: 517-524, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.09.024.
- Bahram, M., F. Keshvari, N. Mohseni, A Novel Hydrogel Based Microextraction of Analytes, *J. Saudi Chem. Soc.* 2013, DOI: 10.1016/j.jscs.2013.05.002.
- Bahram, M., F. Keshvari, P. Najafi-Moghaddam, Development of Cloud Point Extraction Using pH-sensitive Hydrogel for Preconcentration and Determination of Malachite Green, *Talanta.* 2011; 85(2): 891-896, DOI: 10.1016/j.talanta.2011.04.074.
- Bahram, M., N. Nurallahzadeh, N. Mohseni, pH-sensitive Hydrogel for Coacervative Cloud Point Extraction and Spectrophotometric Determination of Cu(II): Optimization by Central Composite Design, *J. Iran. Chem. Soc.* 2015; 12(10): 1781-1787, DOI: 10.1007/s13738-015-0653-5.
- Bandyopadhyay, S.; Saha, N.; Brodnjak, U. V.; Saha, P. Bacterial Cellulose Based Greener Packaging Material: A Bioadhesive Polymeric Film. *Mater. Res. Express.* 2018, 5, 115405. doi: 10.1088/2053-1591/aadb01.
- Batista, R. A.; Espitia, P. J. P.; Quintans, J. D. S. S.; Freitas, M. M.; Cerqueira, M. Â.; Teixeira, J. A.; Cardoso, J. C. Hydrogel as an Alternative Structure for Food

- Packaging Systems. *Carbohydr. Polym.* 2019, 205, 106–116. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.10.006.
- Benton, G.; Arnaoutova, I.; George, J.; Kleinman, H. K.; Koblinski, J. Matrigel: From Discovery and Ecm Mimicry to Assays and Models for Cancer Research. *Adv. Drug Deliver. Rev.* 2014, 79–80, 3–18. doi: 10.1016/j.addr.2014.06.005.
- Boido, M.; Ghibaudi, M.; Gentile, P.; Favaro, E.; Fusaro, R.; Tonda-Turo, C. Chitosan-Based Hydrogel to Support the Paracrine Activity of Mesenchymal Stem Cells in Spinal Cord Injury Treatment. *Sci. Rep-UK.* 2019, 9, 6402. doi: 10.1038/s41598-019-42848-w.
- Cao, Y.; Mezzenga, R. Design Principles of Food Gels. *Nat. Food.* 2020, 1, 106–118. doi: 10.1038/s43016-019-0009-x.
- Charoen, K. M.; Fallica, B.; Colson, Y. L.; Zaman, M. H.; Grinstaff, M. W. Embedded Multicellular Spheroids as a Biomimetic 3D Cancer Model for Evaluating Drug and Drug-Device Combinations. *Biomaterials.* 2013, 35, 2264–2271. doi: 10.1016/j.biomaterials.2013.11.038.
- Chaudhuri, O.; Koshy, S. T.; Branco Da Cunha, C.; Shin, J.; Verbeke, C. S.; Allison, K. H.; Mooney, D. J. Extracellular Matrix Stiffness and Composition Jointly Regulate the Induction of Malignant Phenotypes in Mammary Epithelium. *Nat. Mater.* 2014, 13, 970–978. doi: 10.1038/nmat4009.
- Chirani N., Yahia L'H., Gritsch L., Motta F.L., Chirani S., Faré S. History and Applications of Hydrogels. *Journal of Biomedical Sciences.* 2015;4(2):13.
- Chung, C.; Degner, B.; Decker, E. A.; McClements, D. J. Oil-Filled Hydrogel Particles for Reduced-Fat Food Applications: Fabrication, Characterization, and Properties. *Innov. Food Sci. Emerg.* 2013, 20, 324–334. doi: 10.1016/j.ifset.2013.08.006.
- Cooper, R. C.; Yang, H. Hydrogel-Based Ocular Drug Delivery Systems: Emerging Fabrication Strategies, Applications, and Bench-to-Bedside Manufacturing Considerations. *J. Control. Release.* 2019, 306, 29–39. doi: 10.1016/j.jconrel.2019.05.034

- Dagan R.i , Intelligent gels. *Chem. Eng. News* 75 (1997), pp. 26-36.
- de Azeredo, H. M. C.;. Antimicrobial Nanostructures in Food Packaging. *Trends Food Sci. Tech.* 2013, 30, 56–69. doi: 10.1016/j.tifs.2012.11.006.
- Deshpande, S. R.; Hammink, R.; Das, R. K.; Nelissen, F. H. T.; Blank, K. G.; Rowan, A. E.; Heus, H. A. DNAResponsive Polyisocyanopeptide Hydrogels with Stress-Stiffening Capacity. *Adv. Funct. Mater.* 2016, 26, 9075–9082. doi: 10.1002/adfm.201602461.
- Dickinson, E.;. Microgels — An Alternative Colloidal Ingredient for Stabilization of Food Emulsions. *Trends Food Sci. Tech.* 2015, 43, 178–188. doi: 10.1016/j.tifs.2015.02.006
- Dong L.C., A.S. Hoffman and Q. Yan , Macromolecular penetration through hydrogels. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.* 5 (1994), pp. 473-484
- Doyle, A. D.; Carvajal, N.; Jin, A.; Matsumoto, K.; Yamada, K. M. Local 3D Matrix Microenvironment Regulates Cell Migration through Spatiotemporal Dynamics of Contractility-Dependent Adhesions. *Nat. Commun.* 2015, 6, 8720. doi: 10.1038/ncomms9720.
- Geng, Z.; Zhang, H.; Xiong, Q.; Zhang, Y.; Zhao, H.; Wang, G. A. Fluorescent Chitosan Hydrogel Detection Platform for the Sensitive and Selective Determination of Trace Mercury(II) in Water. *J. Mater. Chem. A.* 2015, 3, 19455–19460. doi: 10.1039/C5TA05610A.
- Gonçalves, J. O.; Da Silva, K. A.; Rios, E. C.; Crispim, M. M.; Dotto, G. L.; de Almeida Pinto, L. A. Single and Binary Adsorption of Food Dyes on Chitosan/Activated Carbon Hydrogels. *Chem. Eng. Technol.* 2019, 42, 454–464. doi: 10.1002/ceat.201800367.
- Gonçalves, J. O.; Da Silva, K. A.; Rios, E. C.; Crispim, M. M.; Dotto, G. L.; de Almeida Pinto, L. A. Chitosan Hydrogel Scaffold Modified with Carbon Nanotubes and Its Application for Food Dyes Removal in Single and Binary Aqueous Systems. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, 142, 85–93. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.09.074.

Gonçalves, J. O.; Santos, J. P.; Rios, E. C.; Crispim, M. M.; Dotto, G. L.; Pinto, L. A. A. Development of Chitosan Based Hybrid Hydrogels for Dyes Removal from Aqueous Binary System. *J. Mol. Liq.* 2017, 225, 265–270. doi: 10.1016/j.molliq.2016.11.067.

Gong, Z.; Wang, C.; Pu, S.; Wang, C.; Cheng, F.; Wang, Y.; Fan, M. Rapid and Direct Detection of Illicit Dyes on Tainted Fruit Peel Using a PVA Hydrogel Surface Enhanced Raman Scattering Substrate. *Anal. Methods*. UK 2016, 8, 4816–4820. doi: 10.1039/C6AY00233A.

Guo, X.; Xu, D.; Yuan, H.; Luo, Q.; Tang, S.; Liu, L.; Wu, Y. A Novel Fluorescent Nanocellulosic Hydrogel Based on Carbon Dots for Efficient Adsorption and Sensitive Sensing in Heavy Metals. *J. Mater. Chem. A*. 2019, 7, 27081–27088. doi: 10.1039/C9TA11502A.

Hao, G.P., F. Hippauf, M. Oschatz, F.M. Wisser, A. Leifert, W. Nickel, N.M. Noriega, Z. Zheng, S. Kaskel, Stretchable and Semi-transparent Conductive Hybrid Hydrogels for Flexible Supercapacitors, *ACS Nano*. 2014; 8(7): 7138-7146, DOI: 10.1021/nn502065u

Hao, L.; Wang, W.; Shen, X.; Wang, S.; Li, Q.; An, F.; Wu, S. A Fluorescent DNA Hydrogel Aptasensor Based on the Self-Assembly of Rolling Circle Amplification Products for Sensitive Detection of Ochratoxin A. *J. Agr. Food Chem.* 2020, 68, 369–375. doi: 10.1021/acs.jafc.9b06021.

He, J.; Ni, F.; Cui, A.; Chen, X.; Deng, S.; Shen, F.; Huang, C.; Yang, G.; Song, C.; Zhang, J., et al. New Insight into Adsorption and Co-Adsorption of Arsenic and Tetracycline Using a Y-Immobilized Graphene Oxide-Alginate Hydrogel: Adsorption Behaviours and Mechanisms. *Sci. Total Environ.* 2020, 701, 134363. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134363.

Hoffman A.S. , Hydrogels for biomedical applications. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 54 (2002), pp. 3-12.

- Hu, X.; Wang, Y.; Zhang, L.; Xu, M. Construction of Self-Assembled Polyelectrolyte Complex Hydrogel Based on Oppositely Charged Polysaccharides for Sustained Delivery of Green Tea Polyphenols. *Food Chem.* 2020, 306, 125632. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125632.
- Jeong, S.; Lee, J.; Shin, Y.; Chung, S.; Kuh, H. Co-Culture of Tumor Spheroids and Fibroblasts in a Collagen Matrix-Incorporated Microfluidic Chip Mimics Reciprocal Activation in Solid Tumor Microenvironment. *Plos One.* 2016, 11, e0159013–e0159013. doi: 10.1371/journal.pone.0159013.
- Kandile, N.G., A.S. Nasr, Environment Friendly Modified Chitosan Hydrogels as a Matrix for Adsorption of Metal Ions, Synthesis and Characterization, *Carbohydr. Polym.* 2009; 78: 753-759, DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.06.008.
- Kazakov S.V. Hydrogel Films on Optical Fiber Core: Properties, Challenges, and Prospects for Future Applications. *New Polymers for Special Applications.* Ailton De Souza Gomes: InTech;2012:25-70.
- Koetting, M.C., J.T. Peters, S.D. Steichen, N.A. Peppas, Stimulus-responsive Hydrogels: Theory, Modern Advances, and Applications, *Mater. Sci. Eng. R.* 2015; 93: 1-49, DOI: 10.1016/j.mser.2015.04.001.
- Kouwer, P. H. J.; Koepf, M.; Le Sage, V. A. A.; Jaspers, M.; van Buul, A. M.; Eksteen-Akeroyd, Z. H.; Woltinge, T.; Schwartz, E.; Kitto, H. J.; Hoogenboom, R.; et al. Responsive Biomimetic Networks From Polyisocyanopeptide Hydrogels. *Nature* 2013, 493, 651–655. doi: 10.1038/nature11839.
- Kuo C.K. and P.X. Ma , Diffusivity of three-dimensional ionically-crosslinked alginate hydrogels. *Polym. Prepr.* 41 (2000), p. 1661.
- Lee, K.Y., D.J. Mooney, Hydrogels for Tissue Engineering, *Chem. Rev.* 2001; 101(7): 1869-1877, DOI: 10.1021/cr000108x.
- Li, W.; Liu, L.; Tian, H.; Luo, X.; Liu, S. Encapsulation of *Lactobacillus Plantarum* in Cellulose Based Microgel with Controlled Release Behavior and Increased Long-Term Storage Stability. *Carbohydr. Polym.* 2019, 223,115065. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115065.

- Li, Y.; Ma, Y.; Jiao, X.; Li, T.; Lv, Z.; Yang, C. J.; Zhang, X.; Wen, Y. Control of Capillary Behavior through Target-Responsive Hydrogel Permeability Alteration for Sensitive Visual Quantitative Detection. *Nat. Commun.* 2019, 10, 1036. doi: 10.1038/s41467-019-08952-1.
- Lim, H.; Ho, K.; Surjit Singh, C. K.; Ooi, C.; Tey, B.; Chan, E. Pickering Emulsion Hydrogel as a Promising Food Delivery System: Synergistic Effects of Chitosan Pickering Emulsifier and Alginate Matrix on Hydrogel Stability and Emulsion Delivery. *Food Hydrocolloid.* 2020, 103, 105659. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105659.
- Liu, J.; Tan, Y.; Zhang, H.; Zhang, Y.; Xu, P.; Chen, J.; Poh, Y.; Tang, K.; Wang, N.; Huang, B. Soft Fibrin Gels Promote Selection and Growth of Tumorigenic Cells. *Nat. Mater.* 2012, 11, 734–741. doi: 10.1038/nmat3361.
- Liu, R.; Huang, Y.; Ma, Y.; Jia, S.; Gao, M.; Li, J.; Zhang, H.; Xu, D.; Wu, M.; Chen, Y., et al. Design and Synthesis of Target-Responsive Aptamer-Cross-Linked Hydrogel for Visual Quantitative Detection of Ochratoxin A. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2015, 7, 6982–6990. doi: 10.1021/acsami.5b01120.
- Ma, Y.; Mao, Y.; Huang, D.; He, Z.; Yan, J.; Tian, T.; Shi, Y.; Song, Y.; Li, X.; Zhu, Z., et al. Portable Visual Quantitative Detection of Aflatoxin B1 Using a Target-Responsive Hydrogel and a Distance-Readout Microfluidic Chip. *Lab Chip* 2016, 16, 3097–3104. doi: 10.1039/C6LC00474A.
- Macaya, D., M. Spector, *Injectable Hydrogel Materials for Spinal Cord Regeneration: A Review*, *Biomed. Mater.* 2012; 7(1): 012001, DOI: 10.1088/1748-6041/7/1/012001
- Mahinroosta, M.; Jomeh Farsangi, Z.; Allahverdi, A.; Shakoori, Z. Hydrogels as Intelligent Materials: A Brief Review of Synthesis, Properties and Applications. *Mater. Today Chem.* 2018, 8, 42–55. doi: 10.1016/j.mtchem.2018.02.004.
- McClements, D. J., *Designing Biopolymer Microgels to Encapsulate, Protect and Deliver Bioactive Components: Physicochemical Aspects*. *Adv. Colloid Interface.* 2017, 240, 31–59. doi: 10.1016/j.cis.2016.12.005.

- McClements, D. J.; Recent Progress in Hydrogel Delivery Systems for Improving Nutraceutical Bioavailability. *Food Hydrocolloid*. 2017, 68, 238–245. doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.05.037.
- McClements, D. J.; The Future of Food Colloids: Next-Generation Nanoparticle Delivery Systems. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2017, 28, 7–14. doi: 10.1016/j.cocis.2016.12.002.
- Michalek, R. Hobzova, M. Pradny, M. Duskova, Hydrogels Contact Lenses in: *Biomedical Applications of Hydrogels Handbook*, Springer (2010). 303-315.
- Mohseni, N., M. Bahram, Kh. Farhadi, P. Najafi-Moghaddam, F. Keshvari, Spectrophotometric Determination of Paracetamol Using Hydrogel Based Semi Solid-liquid Dispersive Microextraction, *Sci. Iran. C*. 2014; 21(3): 693-702.
- Mredha, M. T. I.; Zhang, X.; Nonoyama, T.; Nakajima, T.; Kurokawa, T.; Takagi, Y.; Gong, J. P. Swim Bladder Collagen Forms Hydrogel with Macroscopic Superstructure by Diffusion Induced Fast Gelation. *J. Mater. Chem. B*. 2015, 3, 7658–7666. doi: 10.1039/c5tb00877h.
- Naahidi, S.; Jafari, M.; Logan, M.; Wang, Y.; Yuan, Y.; Bae, H.; Dixon, B.; Chen, P. Biocompatibility of Hydrogel-Based Scaffolds for Tissue Engineering Applications. *Biotechnol. Adv.* 2017, 35, 530–544. doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.05.006.
- Nam, J.; Jung, I.; Kim, B.; Lee, S.; Kim, S.; Lee, K.; Shin, D. A Colorimetric Hydrogel Biosensor for Rapid Detection of Nitrite Ions. *Sens. Actuators B Chem.* 2018, 270, 112–118. doi: 10.1016/j.snb.2018.04.171.
- Patel A., Mequanint K. Hydrogel Biomaterials. *Biomedical Engineering – Frontiers and Challenges*. Reza Fazel: IntechOpen;2011.
- Qu, B.; Luo, Y. Chitosan-Based Hydrogel Beads: Preparations, Modifications and Applications in Food and Agriculture Sectors – A Review. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, 152, 437–448. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.240.

- Ramesh, A., H. Hasegawa, W. Sugimoto, T. Maki, K. Ueda, Adsorption of Gold(III), Platinum(IV) and Palladium(II) onto Glycine Modified Crosslinked Chitosan Resin, *Bioresource Technol.* 2008; 99: 3801-3809, DOI: 10.1016/j.biortech.2007.07.008.
- Renneberg, T., R.C.H. Kwan, C. Chan, G. Kunze, R. Renneberg, A Salt-tolerant Yeastbased Microbial Sensor for 24 Hour Community Wastewater Monitoring in Coastal Regions, *Microchim. Acta.* 2004; 148(3): 235-240, DOI: 10.1007/s00604-004-0266-7
- Shewan, H. M.; Stokes, J. R. Review of Techniques to Manufacture Micro-Hydrogel Particles for the Food Industry and Their Applications. *J. Food Eng.* 2013, 119, 781–792. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.06.046.
- Shi, Y., L. Pan, B. Liu, Y. Wang, Y. Cui, Z. Bao, G. Yu, Nanostructured Conductive Polypyrrole Hydrogels as High-performance Flexible Supercapacitor Electrodes, *J. Mater. Chem. A* 2014; 2(17): 6086-6091, DOI: 10.1039/C4TA00484A
- Szot, C. S.; Buchanan, C. F.; Freeman, J. W.; Rylander, M. N. 3D in Vitro Bioengineered Tumors Based on Collagen I Hydrogels. *Biomaterials.* 2011, 32, 7905–7912. doi: 10.1016/j.biomaterials.2011.07.001.
- Thompson, B. R.; Horozov, T. S.; Stoyanov, S. D.; Paunov, V. N. An Ultra Melt-Resistant Hydrogel From Food Grade Carbohydrates. *RSC Adv.* 2017, 7, 45535–45544. doi: 10.1039/c7ra08590g.
- Thompson, B. R.; Horozov, T. S.; Stoyanov, S. D.; Paunov, V. N. Structuring and Calorie Control of Bakery Products by Templating Batter with Ultra Melt-Resistant Food-Grade Hydrogel Beads. *Food Funct.* 2017, 8, 2967–2973. doi: 10.1039/C7FO00867H.
- Truong, H. H.; de Sonnevile, J.; Ghotra, V. P. S.; Xiong, J.; Price, L.; Hogendoorn, P. C. W.; Spaink, H. H.; van de Water, B.; Danen, E. H. J. Automated Microinjection of Cell-Polymer Suspensions in 3D Ecm Scaffolds for High-Throughput

- Quantitative Cancer Invasion Screens. *Biomaterials*. 2011, 33, 181–188. doi: 10.1016/j.biomaterials.2011.09.049.
- Wang, L.; Zhang, L.; Qiu, S.; Liu, C.; Zhang, P.; Yin, L.; Chen, F. Rheological Properties and Structural Characteristics of Arabinoxylan Hydrogels Prepared from Three Wheat Bran Sources. *J. Cereal Sci.* 2019, 88, 79–86. doi: 10.1016/j.jcs.2019.05.003.
- Wang, Y.; Xie, T.; Yang, J.; Lei, M.; Fan, J.; Meng, Z.; Xue, M.; Qiu, L.; Qi, F.; Wang, Z. Fast Screening of Antibiotics in Milk Using a Molecularly Imprinted Two-Dimensional Photonic Crystal Hydrogel Sensor. *Anal. Chim. Acta.* 2019, 1070, 97–103. doi: 10.1016/j.aca.2019.04.031.
- Wei, Z.; Volkova, E.; Blatchley, M. R.; Gerecht, S. Hydrogel Vehicles for Sequential Delivery of Protein Drugs to Promote Vascular Regeneration. *Adv. Drug Deliver. Rev.* 2019, 149–150, 95–106. doi: 10.1016/j.addr.2019.08.005.
- Wu, B.; Degner, B.; McClements, D. J. Soft Matter Strategies for Controlling Food Texture: Formation of Hydrogel Particles by Biopolymer Complex Coacervation. *J. Phys. Condens. Mater.* 2014, 26, 464104. doi: 10.1088/0953-8984/26/46/464104.
- Xiang, B.; He, K.; Zhu, R.; Liu, Z.; Zeng, S.; Huang, Y.; Nie, Z.; Yao, S. Self-Assembled DNA Hydrogel Based On Enzymatically Polymerized Dna for Protein Encapsulation and Enzyme/Dnazyme Hybrid Cascade Reaction. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2016, 8, 22801–22807. doi: 10.1021/acsami.6b03572.
- Yao, C.; Tang, H.; Wu, W.; Tang, J.; Guo, W.; Luo, D.; Yang, D. Double Rolling Circle Amplification Generates Physically Cross-Linked Dna Network for Stem Cell Fishing. *J. Am. Chem. Soc.* 2020, 142, 3422–3429. doi: 10.1021/jacs.9b11001.
- Zhan, Y.; Zeng, Y.; Li, L.; Luo, F.; Qiu, B.; Lin, Z.; Guo, L. Ratiometric Fluorescent Hydrogel Test Kit for On-Spot Visual Detection of Nitrite. *ACS Sens.* 2019, 4, 1252–1260. doi: 10.1021/acssensors.9b00125.
- Zhang Y.S., Khademhosseini A. *Advances in engineering hydrogels*. Science.2017; May 05; 356(6337).

Zhao, M.; Wang, P.; Guo, Y.; Wang, L.; Luo, F.; Qiu, B.; Guo, L.; Su, X.; Lin, Z.; Chen, G. Detection of Aflatoxin B1 in Food Samples Based On Target-Responsive Aptamer-Cross-Linked Hydrogel Using a Handheld pH Meter as Readout. *Talanta*. 2018, 176, 34–39. doi: 10.1016/j.talanta.2017.08.006.

Zhong, Y., R.V. Bellamkonda, *Biomaterials for the Central Nervous System*, J.R. Soc. Interface. 2008; 5: 957-975, DOI: 10.1098/rsif.2008.0071.

Zhu, K.; Yu, D.; Chen, X.; Song, G. Preparation, Characterization and Controlled-Release Property of Fe³⁺ Cross-Linked Hydrogels Based on Peach Gum Polysaccharide. *Food Hydrocolloid*. 2019, 87, 260–269. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.08.019.