



**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

«3D εκτύπωση τροφίμων και η συμβολή της στη βιώσιμη οικονομία »

DEGREE THESIS ON THE SUBJECT:

«3D printing in food and its contribution in bio-economy»



ΟΝΟΜΑΦΟΙΤΗΤΩΝ:

Δήμητρα Σιούλα (16092)

Ελένη Κονόμη (16045)

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ:

Κανέλλου Αναστασία/ Kanellou Anastasia

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΙΓΑΛΕΟ 2022

Έγινε δεκτή

Οι υπογράφοντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη πτυχιακή εργασία με τίτλο **«3D εκτύπωση τροφίμων και η συμβολή της στη βιώσιμη οικονομία»**, που παρουσιάστηκε από τις φοιτήτριες Δήμητρα Σιούλα και Ελένη Κονόμη με αριθμούς μητρώου **16092 και 16045** και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ημερομηνία & Όνομα επιβλέποντος:

Ημερομηνία & Όνομα μέλους επιτροπής:

Ημερομηνία & Όνομα μέλους επιτροπής:

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ/COPYRIGHT

Οι κάτωθεν υπογραφόμενες Δήμητρα Σιούλα και Ελένη Κονόμη, με αριθμούς μητρώου 16092 και 16045, φοιτήτριες του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, δηλώνουμε υπεύθυνα ότι:

«Είμαστε συγγραφείς αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία.

Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε 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, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμάς αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μας όσο και του Ιδρύματος.

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

Υπογραφή φοιτήτριας:



Υπογραφή φοιτήτριας:



Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας κα Κανέλλου Αναστασία, για την καθοδήγηση που μας προσέφερε και τον χρόνο που διέθεσε, δίνοντάς μας χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μας εργασίας.

Περίληψη

Η Προσθετική Παραγωγή (Additive Manufacturing, AM), η οποία περιλαμβάνει και τη τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση, είναι μια αναπτυσσόμενη τάση στον κόσμο της παραγωγής τροφίμων με πολλές καινοτόμες εφαρμογές. Ο αυξανόμενος αριθμός των προτύπων που δημιουργούνται, σε σχέση με αυτή την τεχνολογία, δίνει την ευκαιρία να αντιμετωπιστούν οι ανάγκες και οι προκλήσεις της AM τόσο στη βιομηχανία τροφίμων όσο και σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στον τομέα των τροφίμων, καθώς οι τεχνολογικές πτυχές, οι πόροι και οι βιομηχανικές πτυχές της έχουν τη δυνατότητα να «εκτυπώσουν» τρισδιάστατα τρόφιμα με πολύπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, προσαρμοσμένη υφή, δομή, γεύση και προσαρμοσμένο θρεπτικό περιεχόμενο. Ως εκ τούτου, τα προϊόντα διατροφής μπορούν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν για να καλύπτουν εξειδικευμένες ανάγκες μέσω του ελέγχου της ποσότητας του υλικού εκτύπωσης και του θρεπτικού περιεχομένου. Η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα τρόφιμα ξεκίνησε στις αρχές του 2000 και έφερε επανάσταση στην παραγωγή τροφίμων, καθώς ενσωματώνει την τρισδιάστατη εκτύπωση και την «ψηφιακή γαστρονομία». Οι κύριες τρισδιάστατες εφαρμογές τροφίμων βασίζονται στην τεχνολογία εξώθησης και αφορούν εγγενώς εκτυπώσιμα υλικά, όπως παράγωγα δημητριακών και σοκολάτα. Ένα σοβαρό ζήτημα αποτελεί η αποδοχή των τρισδιάστατων εκτυπωμένων τροφίμων από τους καταναλωτές, καθώς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ασυνήθιστη εμφάνισή τους. Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο να παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη τρισδιάστατων εκτυπωμένων τροφίμων, καθώς και να αναλύσει τη συμβολή της 3D εκτύπωσης στην βιώσιμη οικονομία. Παρέχονται λεπτομέρειες και θέματα σχετικά με τις μεθόδους που είναι διαθέσιμες, καθώς και για πτυχές όπως η διατροφική αξία, η αποδοχή από τους καταναλωτές, η συμβολή στην υγεία. Παρέχει επίσης μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την βιωσιμότητα και πώς αυτή επηρεάζεται από τις διάφορες κοινωνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Αν και διάφορες μελέτες σκοπεύουν να διερευνήσουν περαιτέρω τη βιωσιμότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα τρόφιμα, είναι ακόμα άγνωστο πώς αυτή η τεχνολογία θα εξελιχθεί αναφορικά με τα πλαίσια των τριών πυλώνων της βιωσιμότητας, ήτοι της οικονομικής, της περιβαλλοντικής και της κοινωνικής βιωσιμότητας. Η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων θα πρέπει να θεωρείται ευκαιρία για την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών στρατηγικών, καθώς και ένας τρόπος για να αυξηθεί η βιωσιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων.

Abstract

A new trend in the world of manufacturing known as additive manufacturing (AM), which also includes 3D printing, offers a wide range of uses. The opportunity to meet AM's demands and challenges in the food business and on a grander scale is demonstrated by the ever-increasing number of concepts. 3D printing can be successfully applied in the food sector as the technological, resource and industrial aspects of 3D food printing have the potential to 'print' 3D food with complex geometrical characteristics, customized texture, structure, taste and customized nutritional content. Therefore, food products can be designed and manufactured to meet individual needs by controlling the amount of printing material used and the nutritional content. The application of 3D printing in food began in the early 2000s and has revolutionized food production as it integrates 3D printing and "digital gastronomy". The main 3D food applications are based on extrusion technology and involve inherently printable materials such as cereal derivatives and chocolate. A serious issue includes the consumers acceptance of 3D printed foods, as it is greatly influenced by their unusual appearance. This thesis aims to provide a comprehensive overview of the processes used to develop 3D printed food and also to analyze the contribution of 3D printing to the sustainable bio-economy. Details and topics, as well as analysis of aspects such as nutritional values, consumer acceptance and health contribution, are provided on the methods available. Furthermore, a literature review on sustainability and how it is affected by its various social and environmental parameters is also provided. While several studies claim to address sustainability in 3D food printing, its economic, environmental and social parameters still remain unclear. Food 3D printing should be seen as an opportunity to develop new business strategies, as well as a way to increase the sustainability of the food supply chain.

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ/ COPYRIGHT	3
Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	9
Κεφάλαιο 2: Αρχές Λειτουργίας 3D εκτύπωσης	12
2.1 Η Έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης	12
2.2 Κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης	15
2.2.1 Εκτύπωση με βάση την εξώθηση (Extrusion-Based printing).....	15
2.2.2 Εκτύπωση Binder Jetting	17
2.2.3 Εκτύπωση με Έγχυση Μελάνης (Inkjet Printing).....	19
2.3 Παράγοντες εκτύπωσης	21
2.4 Ρόλοι των συστατικών των τροφίμων.....	22
2.4.1 Υδατάνθρακες	22
2.4.2 Πρωτεΐνες	23
2.4.3 Λίπος.....	24
2.4.4 Εδώδιμες Ίνες.....	25
2.4.5 Δράση άλλων προσθέτων	26
2.5 Προκλήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης	27
2.6 Οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων.....	28
2.6.1 Εξατομικευμένος σχεδιασμός τροφίμων.....	28
2.6.2 Εξατομικευμένη διατροφή	29
2.6.3 Απλούστευση διατροφικών αλυσίδων	29
2.6.4 Αναδιαμόρφωση τεχνολογιών επεξεργασίας τροφίμων.....	29
2.6.5 Σχεδιασμός και ψηφιοποίηση διαδικασιών	30
Κεφάλαιο 3: Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και αξιολόγηση από καταναλωτές	31

3.1	Μηχανικές και ρεολογικές ιδιότητες	33
3.2	Επιδράσεις των μηχανικών και ρεολογικών ιδιοτήτων στην υφή.....	35
3.3	Αντίληψη των καταναλωτών.....	37
3.4	Δεκτικότητα των καταναλωτών στις νέες τεχνολογίες-Οφέλη 3D εκτύπωσης.....	42
3.5	Μελλοντικές πληροφορίες	46
Κεφάλαιο 4: 3D εκτύπωση και Βιώσιμη Οικονομία		48
4.1.	Σύγχρονα ευρήματα για την 3Dprinting τεχνολογία και την βιωσιμότητα	49
4.2.	Σύγχρονες προσεγγίσεις και μέθοδοι για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων και την βιωσιμότητα	50
4.3.	Παράμετρος του περιβάλλοντος	52
4.4.	Κοινωνική παράμετρος	55
4.5.	Αειφόρος ανάπτυξη.....	57
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....		59
Βιβλιογραφία.....		62

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Η πρώτη γενιά πρωτοτύπων εκτυπωτών τροφίμων διατέθηκε στο κοινό πριν από δέκα και πλέον χρόνια. Μια τεχνική ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων και κατασκευής για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων τροφίμων, όπως μια ειδικά σχεδιασμένη τούρτα γενεθλίων, κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από την Nanotek Instruments, Inc., αν και δεν κατασκευάστηκε φυσικό πρωτότυπο (Yang et al., 2001).

Στο διαγωνισμό Electrolux Design Lab 2009, ο Nico Kläber (Electrolux 2009) παρουσίασε ένα πρωτότυπο Moléculaire, που χρησιμοποιούσε έναν μικροσκοπικό ρομποτικό βραχίονα για την εκτύπωση ενός εξατομικευμένου γεύματος πολλαπλών υλικών (Palouogi, 2014). Η Philips Design (2010) πρότεινε τη δημιουργία ενός προσαρμοσμένου προϊόντος διατροφής χρησιμοποιώντας κατάλληλα κατασκευασμένα «φυσίγγια τροφίμων» και μια διαδραστική γραφική διεπαφή χρήστη για την επιλογή συστατικών, ποσοτήτων, σχημάτων, υφών και άλλων ιδιοτήτων (Design, 2010).

Από τότε έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά έργα εκτύπωσης τροφίμων με τρισδιάστατους εκτυπωτές (J. I. Lipton et al., 2009). Η διαδικασία εκτύπωσης τροφίμων ξεκινά με τον σχεδιασμό ενός εικονικού τρισδιάστατου μοντέλου. Το λογισμικό κοπής μεταφράζει αυτό το μοντέλο σε μεμονωμένα επίπεδα και τελικά δημιουργεί κωδικούς μηχανής για την εκτύπωση του τελικού προϊόντος.

Τα πολύπλοκα σχέδια στα μπισκότα και στις σοκολάτες, τα σκαλισμένα γράμματα στα προϊόντα αρτοποιίας και τα ζωγραφισμένα λογότυπα σε τρόφιμα έχουν δημιουργήσει έναν ευρύ τομέα στην αγορά των προσωποποιημένων δώρων. Επειδή, σε σχέση με τα συμβατικά τρόφιμα, χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να αναπτυχθούν και να κατασκευαστούν, τέτοιες υψηλά εξατομικευμένες τροφές συνηθίζεται να σχεδιάζονται και να παράγονται από ιδιαίτερα καταρτισμένους και υψηλά εξειδικευμένους παραγωγούς. Αυτό εμποδίζει τέτοια προϊόντα να υιοθετηθούν ευρέως από το κοινό. Επίσης, τα επιμέρους συστατικά των προϊόντων και το πώς επηρεάζουν τον μεταβολισμό και την υγεία του κάθε ατόμου είναι διαφορετικά.

Για τη βελτίωση της ατομικής κατάστασης υγείας η έννοια της εξατομικευμένης διατροφής, που στοχεύει στην προσαρμογή και τη δημιουργία δίαιτας - ειδικά με βάση την ατομική κατάσταση υγείας, έχει προκαλέσει σημαντικά το ενδιαφέρον του κοινού. Ακόμη και με τις σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας, οι συμβατικές μέθοδοι παρασκευής

τροφίμων δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τέτοιες απαιτήσεις ούτε να συμβαδίσουν με το έργο των εξειδικευμένων παραγωγών (Zoran & Coelho, 2011). Μια πιθανή μέθοδος για να καλυφθεί αυτό το χάσμα είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, γνωστή και ως παραγωγή τροφίμων «σε στρώματα» (Layered Manufacture). Τα σύνθετα τρισδιάστατα προϊόντα διατροφής μπορούν να παρασκευαστούν χρησιμοποιώντας αυτήν την ψηφιακά ελεγχόμενη, αυτοματοποιημένη μέθοδο «στρώμα προς στρώμα» (Huang et al., 2013). Ξεκίνησε μια επανάσταση στη μαγειρική με την ακριβή ανάμειξη, την εναπόθεση και στρώση συστατικών, έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν εύκολα και γρήγορα να πειραματίζονται με διαφορετικούς συνδυασμούς υλικών. Ρυθμίζοντας την ποσότητα του υλικού εκτύπωσης και του θρεπτικού περιεχομένου, αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη και τη δημιουργία τροφίμων που θα ανταποκρίνονται στις ατομικές απαιτήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την κατάσταση της υγείας και τη σωματική δραστηριότητα.

Η μαγειρική είναι μια από τις πιο σημαντικές δραστηριότητες στη ζωή μας και με βάση αυτή την παραδοχή ένας ρομποτικός σεφ - ικανός να ακολουθεί συνταγές - θα είχε πολλές εφαρμογές τόσο σε οικιακό όσο και σε βιομηχανικό περιβάλλον. Για παράδειγμα, τα ρομπότ ψησίματος μπισκότων μπορούν να εντοπίσουν τα συστατικά, να τα ανακατέψουν με τη σωστή σειρά και να τοποθετήσουν τη ζύμη που προκύπτει σε ένα ταψί του φούρνου (Bollini, 2012).

Αυτά τα αυτοματοποιημένα ψηφιακά συστήματα μπορούν να εκτελούν συνήθεις χειρωνακτικές εργασίες και απλές κινήσεις, όπως να σηκώνουν, να τοποθετούν ή να πετούν ένα αντικείμενο. Είναι εξοπλισμένα με πλήρεις βάσεις δεδομένων, σχετικά με μία ή περισσότερες εξειδικευμένες λειτουργίες (Beetz et al., 2011). Αυτές οι μέθοδοι, που βασίζονται στην υψηλή αυτοματοποίηση, χρησιμοποιούνται στη συμβατική μαζική παραγωγή τροφίμων για την αυτοματοποίηση των χειρωνακτικών διαδικασιών. Μπορούν να μειώσουν το κόστος εργασίας, να μειώσουν σημαντικά τον φόρτο εργασίας και να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της παραγωγής τροφίμων. Ως έναν βαθμό η δημιουργία τέτοιων καινοτομιών έχει ικανοποιήσει τη βιομηχανία τροφίμων, ωστόσο δεν είναι απόλυτα σαφές γιατί δημιουργήθηκαν οι τεχνικές εκτύπωσης τροφίμων και τι τις κάνει ξεχωριστές έναντι συμβατικών μεθόδων παραγωγής. Κατά συνέπεια, απαιτείται σύγκριση των δύο μεθόδων.

Διαφοροποιημένη από τέτοιες τεχνολογίες, που βασίζονται στη ρομποτική, η εκτύπωση τροφίμων ενσωματώνει τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DP) και ψηφιακής γαστρονομίας για την παραγωγή τεμαχίων με μαζική προσαρμογή σε σχήμα, χρώμα, γεύση,

υφή και ακόμη και θρεπτική αξία. Το 3DP είναι μια ψηφιακά-ελεγχόμενη ρομποτική διαδικασία παραγωγής που δημιουργεί σύνθετες στερεές μορφές «στρώμα προς στρώμα» και εφαρμόζει μεταβάσεις φάσης ή χημικές αντιδράσεις στα επιμέρους στρώματα.

«Ψηφιακή γαστρονομία» είναι η εφαρμογή γνώσεων μαγειρικής διαδικασίας παρασκευής τροφίμων, έτσι ώστε οι διατροφικές μας εμπειρίες να ξεπερνούν τη γεύση και να περιλαμβάνουν όλες τις πτυχές της γαστρονομίας (Van Bommel & Spicer, 2011; Van Gunst & Roodenburg, 2019). Με τη χρήση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης και ψηφιακής γαστρονομίας, είναι δυνατή η ψηφιακή προβολή της διαδικασίας παραγωγής τροφίμων, ανοίγοντας μια νέα αγορά για την παρασκευή νέων τροφίμων σε ανταγωνιστικές τιμές. Ένας εξατομικευμένος σχεδιασμός τροφίμων με τη μορφή ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου θα μετατραπεί στη στιγμή σε ένα τελικό προϊόν με πολυστρωματική δομή. (Levy et al., 2003).

Κεφάλαιο 2 - Αρχές Λειτουργίας 3D εκτύπωσης

Μια τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση, που αλλιώς ονομάζεται πρόσθετη κατασκευή (Additive Manufacturing, AM), που ιδρύθηκε τη δεκαετία του 1980, έχει αναπτυχθεί και έχει πολυάριθμες εφαρμογές για πολλές βιομηχανίες. Η AM κατασκευάζει προϊόντα προσθέτοντας τα υλικά στρώμα-στρώμα από ένα ηλεκτρονικό τρισδιάστατο συμπαγές μοντέλο.

Ένα πλεονέκτημα της AM είναι η κατασκευή ενός πολύπλοκου μοντέλου χωρίς εξαρτήματα, κοπτικά εργαλεία και ψυκτικά. Η AM έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αρχιτεκτονική και η ιατρική. Επιπλέον, η AM εφαρμόζεται στη παραγωγή και τεχνολογία τροφίμων. Ωστόσο, η βιώσιμη ανάπτυξη και η ασφάλεια των τροφίμων είναι δυο από τα βασικότερα θέματα τα οποία εξετάζονται κατά την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων (Annoni et al., 2016).

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την παραγωγή τροφίμων μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτές είναι:

- η εκτύπωση με βάση την εξώθηση,
- το binder jetting και
- η εκτύπωση με έγχυση μελάνης (inkjet printing).

2.1 Η Έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια ψηφιακή διαδικασία που περιλαμβάνει την κατασκευή σύνθετων στερεών γεωμετριών από στρώμα προς στρώμα, συνδέοντάς τες μεταξύ τους είτε με μεταβάσεις φάσης είτε με χημικές αντιδράσεις (Severini et al., 2016). Η εκτύπωση τροφίμων διαφέρει από την αυτοματοποιημένη παραγωγή τροφίμων, εφόσον η εκτύπωση επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν και να φτιάχνουν τρόφιμα με εξατομικευμένες μορφές, χρώματα, γεύσεις και διατροφικές απαιτήσεις. Στο τελευταίο, οι ανθρώπινες ενέργειες μπορούν να μειωθούν με την αυτοματοποίηση διαφόρων χειρωνακτικών λειτουργιών. Ενσωματώνοντας όλες τις πτυχές της γαστρονομίας, η τεχνολογία μπορεί να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι βιώνουν τα τρόφιμα (Sun et al., 2015).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση των τροφίμων ακολουθεί μια καλά καθορισμένη διαδοχική διαδικασία. Αυτό ξεκινά με το **σχεδιασμό ενός τρισδιάστατου μοντέλου**, με τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μέσω ενός προγράμματος σχεδιασμού σε υπολογιστή (Computer-Assisted Design, CAD). Αρχικά, για να ληφθούν οι πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του, είτε δημιουργείται το μοντέλο είτε σαρώνεται. Ύστερα, χωρίζεται σε πολλά στρώματα, χρησιμοποιώντας το σωστό πρόγραμμα τεμαχισμού. Για κάθε στρώμα, δημιουργούνται κωδικοί μηχανής G και M, οι οποίοι με τη σειρά τους αποστέλλονται στον εκτυπωτή.

Οι κωδικοί G είναι η γλώσσα αριθμητικού ελέγχου, που ανέπτυξε το λογισμικό CAD για την επικοινωνία της περιοχής εκτύπωσης, της ταχύτητας εκτύπωσης και των πληροφοριών του άξονα εκτύπωσης στους κινητήρες. Οι κωδικοί M είναι βοηθητικές οδηγίες που υποστηρίζουν τη λειτουργία του μηχανήματος. Τα συστήματα τροφίμων απαιτούν ένα προσαρμοστικό λογισμικό τεμαχισμού για εκτύπωση, επειδή είναι περίπλοκα υποστρώματα. **Λόγω της πολυπλοκότητας που απαιτείται για την επεξεργασία τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, αυτό σχετίζεται με προβλήματα ανάπτυξης των κωδικών, καθώς δημιουργούνται υψηλές απαιτήσεις χώρου μνήμης. Αυτό έχει επιπτώσεις στην ποιότητα των παρασκευασμένων τροφίμων και στις απαιτήσεις χρόνου επεξεργασίας** (Brown et al., 2014). Διατίθεται διαφορετικό λογισμικό για εφαρμογές σάρωσης, ανάπτυξης μοντέλων και εκτύπωσης. Η επιλογή τους εξαρτάται από την τεχνογνωσία του χρήστη και τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά.

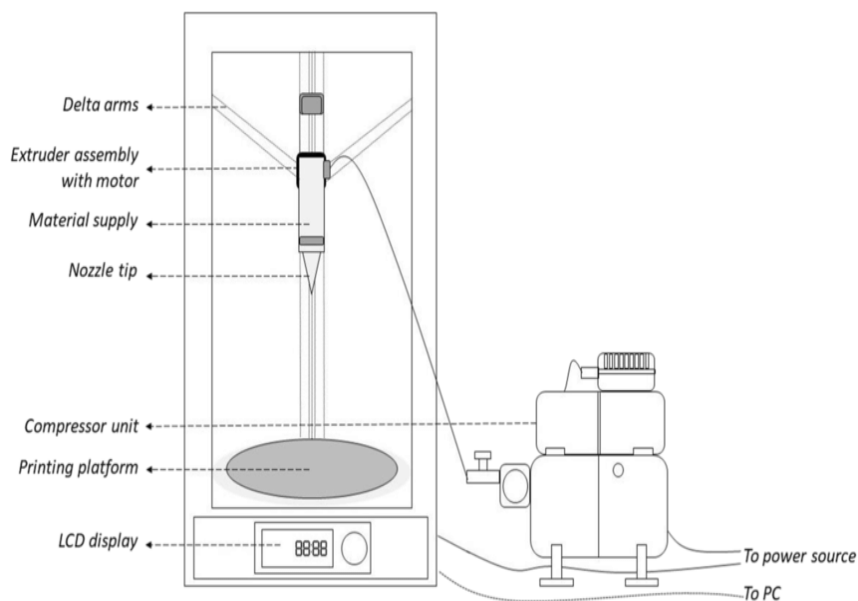
Ένας τυπικός τρισδιάστατος εκτυπωτής αποτελείται από:

- κύκλωμα ελέγχου για την ενοποίηση του υπολογιστή και του εκτυπωτή
- σύστημα κινητήρα, νήματος και μετάδοσης κίνησης για την καθοδήγηση των κινητήρων
- θάλαμο ανάμειξης για αποθήκευση, προμήθεια και ανάμιξη του υλικού
- κυλίνδρους τροφοδοσίας
- αισθητήρες κίνησης και ροής
- μανομετρικούς ρυθμιστές πίεσης
- ακροφύσια έγχυσης υλικού παραγωγής
- πλατφόρμα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η πλατφόρμα εκτύπωσης αποτελείται από μια μονάδα διανομής/συγκέντρωσης, μια διεπαφή χρήστη και ένα στάδιο τριών αξόνων (καρτεσιανή συντεταγμένη αξόνων X,Y,Z).

Είναι δυνατή η αλλαγή της διαδικασίας παραγωγής, για να ικανοποιηθούν οι προσδοκίες των πελατών, με τη βοήθεια του ψηφιακού ελέγχου του συστήματος τροφοδοσίας υλικού.

Τα τρόφιμα μπορούν να εκτυπωθούν σε εμπορικές ή εξατομικευμένες πλατφόρμες που έχουν αναπτυχθεί από τους ίδιους τους χρήστες. Οι διαθέσιμοι 3D εκτυπωτές δεν είναι σε θέση να δημιουργήσουν τρισδιάστατα τρόφιμα, μπορούν όμως να τροποποιηθούν για να ταιριάζουν σε συγκεκριμένες και εξειδικευμένες ανάγκες εκτύπωσης τροφίμων. (Sun et al., 2015). Μια εμπορική πλατφόρμα είναι μια αλλαγμένη έκδοση μιας υπάρχουσας πλατφόρμας (διαθέσιμο ανοιχτού κώδικα). Αυτό περιλαμβάνει την αντικατάσταση της κεφαλής εκτύπωσης με μια που μπορεί να ελέγχει τους ρυθμούς ροής ή μια που έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί υλικό ποιότητας τροφίμων ως συνδετικό για τη διαδικασία. Κλασικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τα Fab@home™ (Malone & Lipson, 2007) και Frostruder MK2™ (Millen, 2012) συστήματα. Σχεδιάζονται πλατφόρμες που αναπτύσσονται για την κατασκευή ενός συγκεκριμένου φαγητού. Οι βρώσμες τρισδιάστατες δομές τυριού και σοκολάτας και τα τρισδιάστατα «γλυπτά» ζάχαρης που χρησιμοποιούν εξοπλισμό λέιζερ, ελεγχόμενο από υπολογιστή, είναι χαρακτηρισικά παραδείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων (Sun et al., 2015). Η κατασκευή σε πλατφόρμες που αναπτύσσονται είναι ευέλικτη, λόγω της ικανότητας να περιλαμβάνει μεγάλες παραλλαγές στην προμήθεια υλικού (Sun et al., 2015).



Εικόνα 1 Σχηματικό διάγραμμα τυπικού τρισδιάστατου εκτυπωτή τροφίμων τύπου εξώθησης (Nachal et al, 2019)

2.2 Κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης

2.2.1 Εκτύπωση με βάση την εξώθηση (Extrusion-Based printing)

Η εκβολή ή εξώθηση (extrusion) είναι μια διεργασία που μετατρέπει μια πρώτη ύλη σε προϊόν με επιθυμητό σχήμα και επιθυμητή μορφή, εξωθώντας το υλικό μέσα από ένα μικρό άνοιγμα με χρήση πίεσης.

Κατά την εκτύπωση με εξώθηση παρασκευάζονται τρόφιμα μέσω ενός ακροφυσίου με σταθερή πίεση. Αυτή η τεχνική είναι παρόμοια με μια συμβατική Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (Fusion Deposition Modelling, FDM). Ωστόσο, η πρώτη ύλη της εκτύπωσης, με βάση την εξώθηση, μπορεί να είναι συμπαγής και μαλακή (πάστα) με χαμηλό ιξώδες, ενώ η πρώτη ύλη της FDM είναι σύρμα.

Τα υλικά χαμηλής σκληρότητας αποτελούν τη βάση της ιδέας της τεχνολογίας εξώθησης, η οποία χρησιμοποιεί ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ή ένα ημίρευσο ιξώδες σύστημα (Mantihal et al., 2020). Το υλικό συγκρατείται σε ένα φυσίγγιο, τραβιέται μέσα από ένα ακροφύσιο, όπου μπορεί να θερμανθεί και εναποτίθεται στρώμα-στρώμα στην πλατφόρμα του εκτυπωτή μέσω των οριζόντιων κινήσεων του ακροφυσίου και της κάθετης κίνησης της πλατφόρμας (Mantihal et al., 2020).

Σε αυτή τη διαδικασία εκτύπωσης που βασίζεται σε εξώθηση, το υλικό φορτώνεται σε εξωθητήρα (κύλινδρος) προτού εξωθηθεί μέσω του ακροφυσίου, με πίεση εμβόλου, για να δημιουργηθεί - στρώμα προς στρώμα – το σχήμα τροφίμου. Οι μηχανικές και οι ρεολογικές ιδιότητες του υλικού μπορούν να επηρεάσουν τη συγκόλληση του σε στρώματα, μέσω ελέγχου της θερμοκρασίας ή μέσω της χρήσης χημικών παραγόντων ή και προσθέτων.

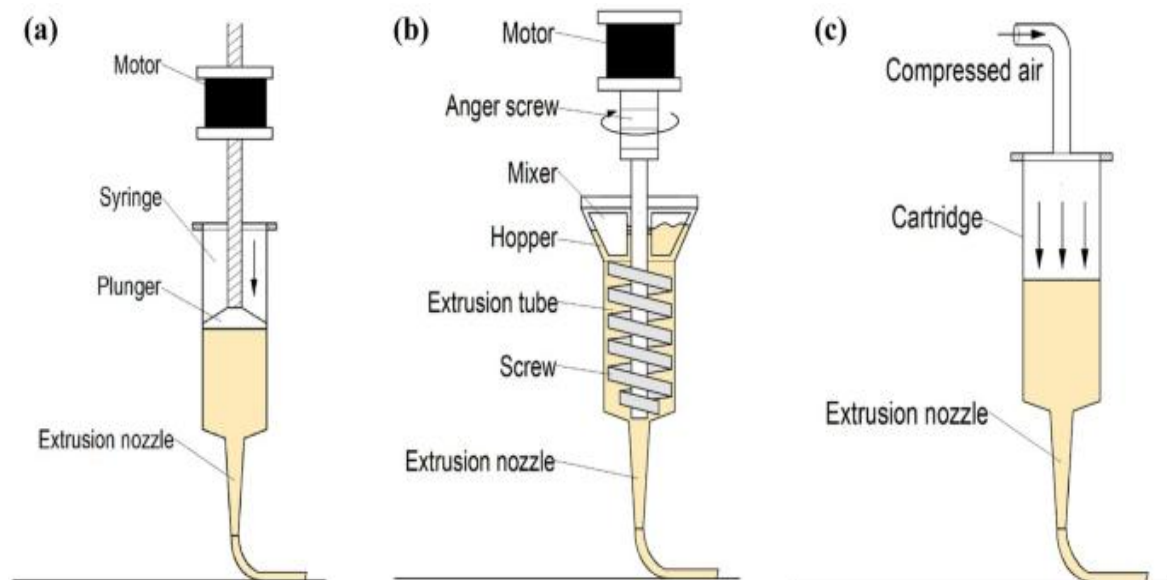
Το εξωθημένο υλικό, αφού εξέλθει από το ακροφύσιο, θα αποτεθεί με σταθερή ταχύτητα και θα στερεοποιηθεί πλήρως στο υπόστρωμα. Επιπλέον, το υλικό πρέπει να δένει με το προηγούμενο υλικό, έτσι ώστε ένα συμπαγές μέρος να μπορεί να σχηματιστεί και να παραμείνει σε αυτή τη δομή καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Παραδείγματα τροφίμων, που μπορούν να παραχθούν με αυτήν την τεχνική, είναι η ζύμη αρτοσκευασμάτων, ο πολτός κρέατος και διάφορα είδη τυριού. Η προσέγγιση είναι φιλική προς το χρήστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εκτύπωση υγρών και ημιστερεών υλικών. Με αυτήν την τεχνική, έχουν εκτυπωθεί σε διάφορες θερμοκρασίες προϊόντα κατασκευασμένα από γέλη αμύλου πατάτας, με τα δείγματα να επιδεικνύουν την καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης σε συγκέντρωση 15–25% ελαιωρήματος αμύλου στους 70 °C. (Barlow,

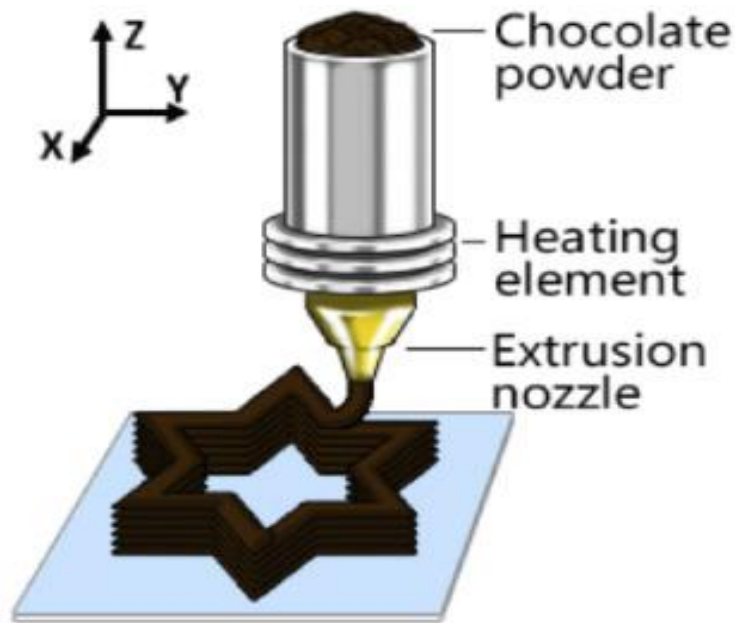
1991). Οι Lipton, et al (2010) δοκίμασαν μια ποικιλία συνταγών για την εκτύπωση μπισκότων. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι η διακύμανση της συγκέντρωσης των συστατικών επηρέασε την παρασκευή μοντέλου τροφίμου, ιδιαίτερα την αναλογία βουτύρου, κρόκου και ζάχαρης (J. Lipton et al, 2010).

Η πίεση που εφαρμόζεται στο ακροφύσιο, κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, είναι ένα σημαντικό στοιχείο που επηρεάζει το διαμέτρημα των τροφίμων που παράγονται με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Αυτή η παράμετρος πρέπει να διατηρείται σταθερή και σε σταθερό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης, για να παρουσιάζονται ακριβή αποτελέσματα με συνέπεια (Z. Liu et al., 2017).

Μια μικροσκοπική διάμετρος ακροφυσίου προσφέρει εξαιρετική ακρίβεια και υψηλή ανάλυση, αλλά αυξάνει επίσης τον χρόνο εκτύπωσης, γεγονός που θα μπορούσε να έχει αντίκτυπο στην παραγωγικότητα της εκτύπωσης. Γενικά, η διάμετρος του ακροφυσίου είναι καθοριστική για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με εξαιρετική ανάλυση.



Εικόνα 4 Τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων με βάση την εξώθηση (Kewuyemi et al,2021)



Εικόνα 5 Εκτύπωση τροφίμων με βάση την εξώθηση για ψηφιοποιημένο σχεδιασμό τροφίμων (Pitaya chaval et al, 2018)

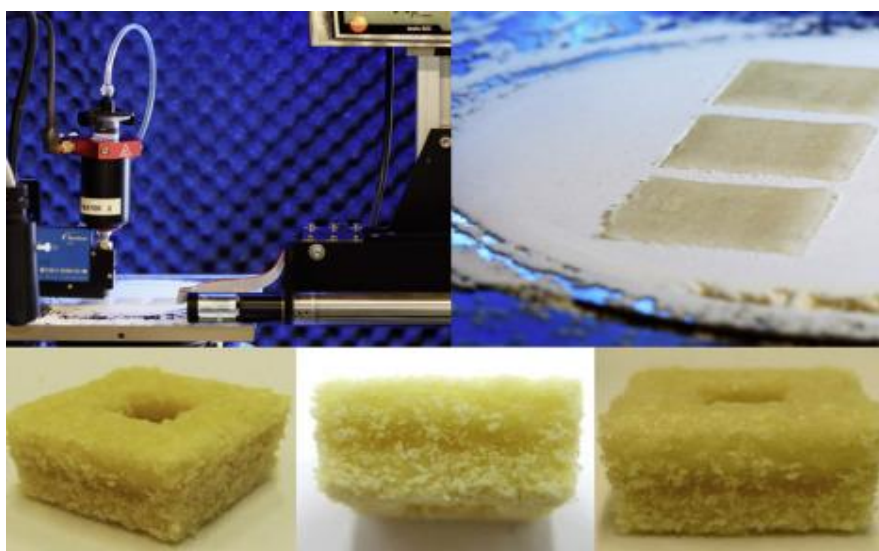
2.2.2 Εκτύπωση Binder Jetting

Η εκτύπωση Binder Jetting, η οποία είναι μια τεχνολογία προσθήκης (additive manufacturing), κατασκευάζει ένα τρισδιάστατο μοντέλο χρησιμοποιώντας ένα συνδετικό υλικό για την επιλεκτική συγκόλληση στρωμάτων υπό μορφή σκόνης. Σε αυτή τη διαδικασία, μικρά σταγονίδια συνδετικού υλικού, με διαμέτρους μικρότερες από 100μm, εναποτίθενται διαδοχικά στην επιφάνεια της κλίνης, η οποία είναι μια κεφαλή εκτύπωσης drop-on-demand, με βάση το μοτίβο σάρωσης του βαθμολογητή. Μετά την εναπόθεση του υγρού συνδετικού υλικού ολόκληρη η επιφάνεια της κλίνης σκόνης εκτίθεται σε μια σταθερή ποσότητα θερμότητας, η οποία συνήθως χρησιμοποιεί μια λυχνία θερμότητας, για τη δημιουργία κατάλληλης μηχανικής αντοχής, μέσω μερικώς σκληρυμένου συνδετικού μέσα στο παραγόμενο στρώμα, ώστε να αντέχει στη διάτμηση και τη βαρύτητα από τις συμπιεστικές δυνάμεις που εμπλέκονται στην εξάπλωση και την εκτύπωση των επόμενων στρωμάτων. Αυτά τα βήματα επαναλαμβάνονται για κάθε επίπεδο μέχρι να ολοκληρωθεί το χαρακτηριστικό (Miyanaji et al., 2018).

Η τεχνολογία του binder jetting χρησιμοποιείται μόνο για υλικά σε μορφή σκόνης και μπορεί να εφαρμοστεί από τον εκτυπωτή ChefJet 3D. Είναι δυνατή η χρήση χρωματισμένων και αρωματισμένων υγρών για τη σύνδεση ουσιών σε μορφή σκόνης, όπως

η άχνη ζάχαρη. Επιπλέον, τρόφιμα με μοναδικές οργανοληπτικές ιδιότητες, χρήσιμες για την διαμόρφωση πολύπλοκων υποστρωμάτων, όπως το αλεύρι, το γάλα σε σκόνη και σκόνη σοκολάτας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρόμοιους σκοπούς (Baiano, 2022). Τα χαρακτηριστικά υλικού (μέγεθος σωματιδίων, ιξώδες συνδετικού υλικού και δυνατότητα ροής), τα χαρακτηριστικά επεξεργασίας (διάμετρος ακροφυσίου, ρυθμός εκτύπωσης, τύποι κεφαλής και πάχος στρώσης) και τα χαρακτηριστικά μετά την επεξεργασία έχουν όλα αντίκτυπο στην ακρίβεια εκτύπωσης (ψήσιμο, θέρμανση και αφαίρεση πλεονάσματος) (Baiano, 2022). Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του binder jetting είναι η ικανότητα εκτύπωσης σύνθετων τρισδιάστατων δομών τροφίμων με πλήρες χρώμα και η δυνατότητα ποικίλων γεύσεων. Ωστόσο, λόγω των λίγων εναλλακτικών λύσεων σε κατάλληλα υλικά, που είναι κατάλληλα για αυτή τη μέθοδο, μπορεί να προσφέρει λιγότερο θρεπτικά προϊόντα (Z. Liu et al, 2017).

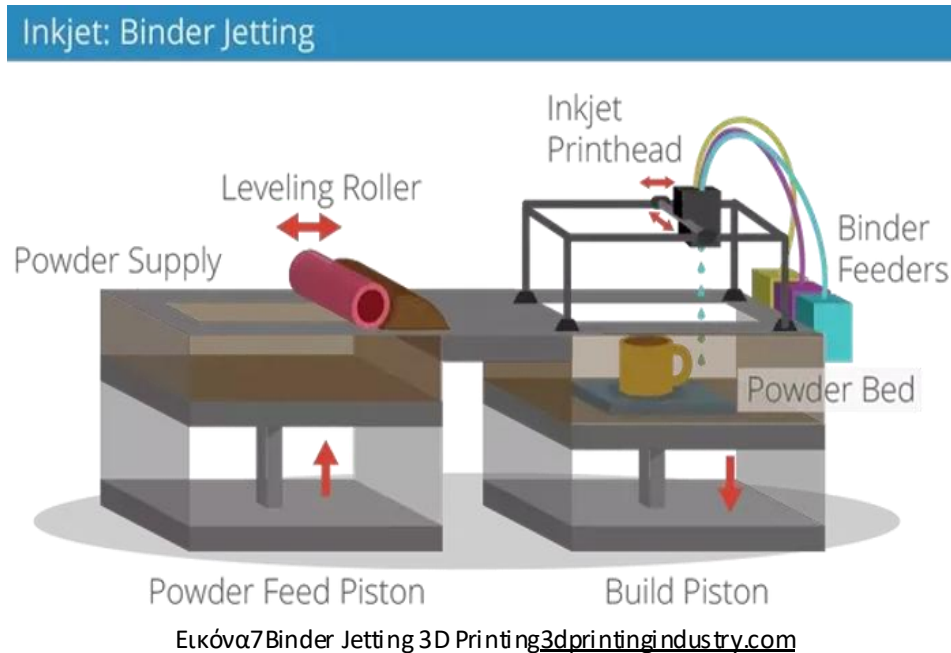
Επιλεγμένα παραδείγματα μηχανών που χρησιμοποιούν τη διαδικασία BJ περιλαμβάνουν τους εκτυπωτές παραγωγής ExOne (μηχανές Exerial, S-Max, S-Print, M-Print και M-Flex). Υπάρχει μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων των κεραμικών, το μέταλλο, το γυαλί, η άμμος και το πολυμερές που μπορούν να εκτυπωθούν χρησιμοποιώντας την τεχνική του binder jetting. Υλικά βιομηχανικής ποιότητας, όπως πυριτική άμμος, ανοξείδωτος χάλυβας, κεραμικές χάντρες, χρωμίτης, ζιργκόν, γυαλί, σόδα, ασβέστης, κολλημένο βολφράμιο, καρβίδιο βολφραμίου και άλλα είναι διαθέσιμα στο εμπόριο.



Εικόνα 6 Δημιουργία δομών τροφίμων μέσω Binder Jetting (Holland et al, 2019)

2.2.3 Εκτύπωση με Έγχυση Μελάνης (Inkjet Printing)

Η εκτύπωση inkjet διανέμει ένα ρεύμα υλικού σταγονιδίων από μια θερμική κεφαλή σε ορισμένες περιοχές για τη δημιουργία της επιφάνειας πλήρωσης ή διακόσμησης σε



επιφάνειες τροφίμων, όπως σε μπισκότα, κέικ και πίτσα.

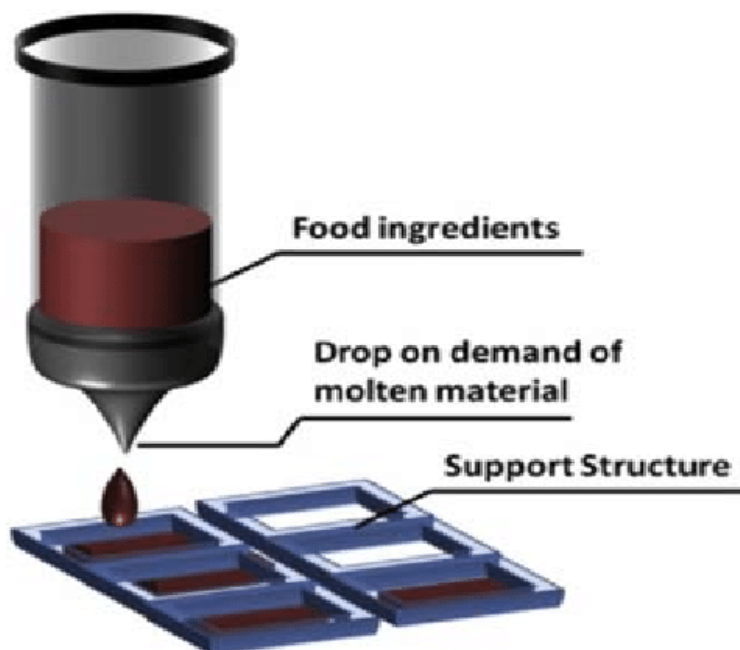
Αυτή η διαδικασία γενικά λειτουργεί με τη χρήση θερμικών ή πιεζοηλεκτρικών κεφαλών. Σε έναν θερμικό εκτυπωτή inkjet, η κεφαλή εκτύπωσης θερμαίνεται ηλεκτρικά για να δημιουργήσει παλμούς πίεσης που σπρώχνουν σταγονίδια από το ακροφύσιο (Godoi et al., 2016). Υπάρχουν δύο τύποι μεθόδων εκτύπωσης inkjet: η συνεχής εκτύπωση με ψεκασμό και η εκτύπωση «drop-on-demand». Για τον εκτυπωτή συνεχούς εκτόξευσης, η μελάνη εκτοξεύεται συνεχώς μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου με δόνηση και σταθερή συχνότητα. Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ικανότητα ροής της μελάνης, είχαν προστεθεί ορισμένοι αγωγίμοι παράγοντες. Για έναν εκτυπωτή «drop-on-demand», μια βαλβίδα λειτουργεί ως ρυθμιστής της μελάνης, η οποία εκτοξεύεται από τις κεφαλές υπό καθορισμένη πίεση. Οι ρυθμοί εκτύπωσης των συστημάτων drop-on-demand είναι γενικά πιο αργοί από τα συστήματα συνεχούς jet αλλά η ανάλυση και η ακρίβεια των παραγόμενων εικόνων είναι υψηλότερες (Huang et al., 2013). Ο εκτυπωτής inkjet χειρίζεται συνήθως υλικά χαμηλού ιξώδους. Ως εκ τούτου, δεν βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή τροφίμων σύνθετης δομής. Τυπικά προϊόντα που παράγονται είναι η σοκολάτα, η υγρή

ζύμη, η άχνη ζάχαρης, η πάστα κρέατος, το τυρί, οι μαρμελάδες, τα τζελ κ.λπ. (Godoi et al, 2016).

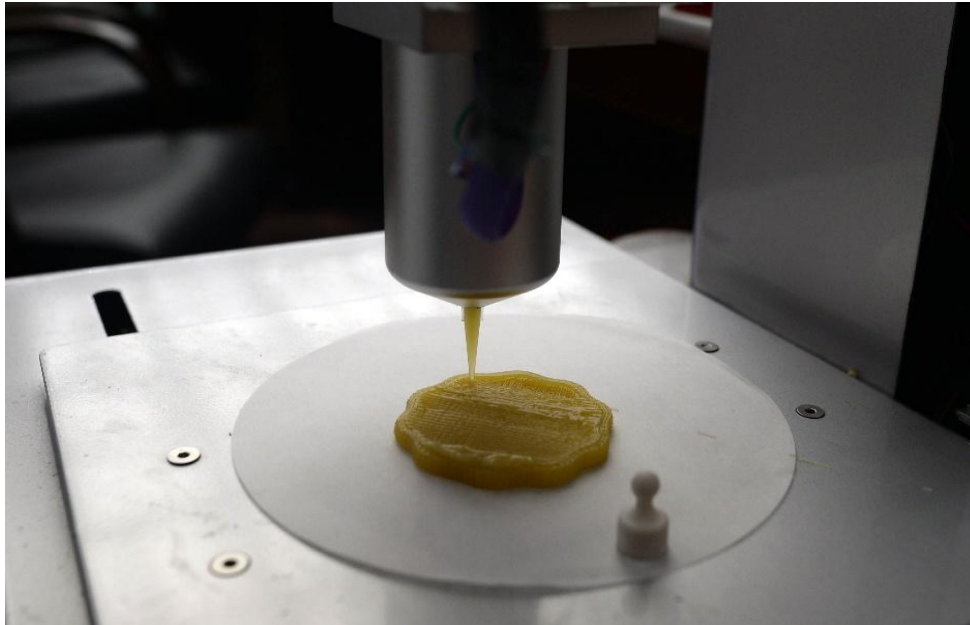
Είναι απαραίτητο να ελεγχθούν μερικές παράμετροι που είναι σημαντικές στη συγκεκριμένη διαδικασία εκτύπωσης, όπως οι ιδιότητες του υλικού, που πρέπει να επιτηρούνται πριν από την εκτύπωση, η συμβατότητα του μελανιού τροφίμων με την επιφάνεια πλήρωσης/εκτύπωσης, οι ρεολογικές ιδιότητες του βρώσιμου μελανιού και οι ιδιότητες της επιφάνειας εκτύπωσης. Επιπλέον, οι παράγοντες επεξεργασίας που επηρεάζουν την ακρίβεια εκτύπωσης είναι:

- ο ρυθμός εκτύπωσης,
- η διάμετρος του ακροφυσίου,
- το ύψος εκτύπωσης και
- η θερμοκρασία εκτύπωσης.

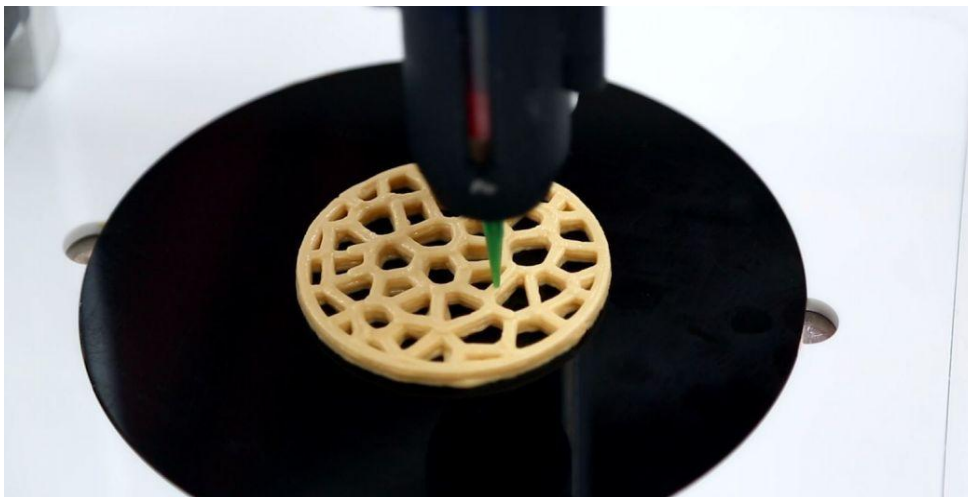
Δεν υπάρχουν στάδια μετα-επεξεργασίας σε αυτή τη διαδικασία. Η ικανότητα των σταγονιδίων της μελάνης να περιέχουν ένα ευρύ φάσμα χρωμάτων επιτρέπει τη δημιουργία διακριτικών και εξατομικευμένων εικόνων στα τρόφιμα, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη γρήγορη παραγωγή. Τέλος, αυτή η προσέγγιση είναι αποκλειστικά κατάλληλη για σχεδιασμό επιφανειών ή γέμισμα εικόνας (image fill) (Gholamipour-Shirazi et al., 2020).



Εικόνα 8 Σχηματικό διάγραμμα τεχνολογίας εκτύπωσης inkjet (Javai d & Haleem, 2019)



Εικόνα 9 Τρισδιάστατη τυπωμένη τροφή Matmatch.com



Εικόνα 10 Τρισδιάστατη τυπωμένη τροφή ibtmes.co.uk

2.3 Παράγοντες εκτύπωσης

Κάθε τεχνική εκτύπωσης έχει το δικό της πεδίο εφαρμογής καθώς και περιορισμούς. Οι προτιμήσεις των καταναλωτών σχετικά με το τελικό προϊόν, τα ζητήματα σκοπιμότητας και το κόστος της κατασκευής ήταν πάντα ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή των προσεγγίσεων εκτύπωσης. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών, η ταχύτητα εγγραφής, η ισχύς του λέιζερ, ο αριθμός των στρωμάτων, η μορφή και το πάχος του κάθε στρώματος, οι θερμοκρασίες εκτύπωσης και οι ρυθμοί ψύξης πρέπει να βελτιστοποιηθούν για τρισδιάστατη εκτύπωση με χρήση αριθμητικού ελέγχου σε υπολογιστή.

Σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού και διαδικασίας για την τεχνική εκτύπωσης τροφίμων περιλαμβάνουν τη διάμετρο του ακροφυσίου, τον ρυθμό εναπόθεσης, το ύψος του βήθους του ακροφυσίου, τον χρόνο αναρρόφησης, τον χρόνο ώθησης, την ένταση ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία ζεστού αέρα και του διάκενου αέρα μεταξύ των στρωμάτων. Οι μελέτες έδειξαν ότι η εκτύπωση τροφίμων ήταν πιο ομαλή και ακριβής με χρήση ακροφυσίων με μικρότερες διαμέτρους (Periard et al, 2007). Οι υψηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης μειώνουν την ακρίβεια εκτύπωσης και οι μεγάλες διαμέτροι άκρων μειώνουν την ανάλυση εκτύπωσης. Έχει αναφερθεί ότι τα χαμηλότερα ύψη ακροφυσίων παράγουν κακής ποιότητας εκτύπωση και ελαττωματικές μηχανικές ιδιότητες στα προϊόντα τρισδιάστατης εκτυπωμένης σοκολάτας, ενώ τα υπερβολικά υψηλά ύψη ακροφυσίων καθιστούν δύσκολη την παροχή υλικού στην πλατφόρμα εκτύπωσης (Hao et al, 2010).

2.4 Ρόλοι των συστατικών των τροφίμων

Διάφορα συστατικά τροφίμων, όπως οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και το λίπος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τρισδιάστατη εκτύπωση ως υλικά στην τροφοδοσία. Κάθε συστατικό επηρεάζει τη διαδικασία της εκτύπωσης και ο ρόλος αυτών των συστατικών έχει αναφερθεί ότι για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων εφαρμόζεται καλύτερα η εξώθηση, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εκτύπωσης.

2.4.1 Υδατάνθρακες

Οι πολύπλοκες μακρομοριακές δομές των υδατανθράκων, και ειδικότερα τα τροποποιημένα άμυλα, έχει αναφερθεί ότι βοηθούν στην ομαλότερη εξώθηση και βελτιώνουν τη διατήρηση της δομής των τροφίμων μετά την εκτύπωση, όταν εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε συγκέντρωση πάνω από το «σημείο γέλης» (gel point). Οι ερευνητές πειραματίστηκαν με αποβουτυρωμένο γάλα σε σκόνη (skim milk powder, SMP) και ημιαποβουτυρωμένη σκόνη (semi-skim milk powder, SMP) ως πηγές πρωτεΐνης. Η εξώθηση με SMP δεν ήταν ιδανική, λόγω του υψηλού ιξώδους.

Στην περίπτωση του κλάσματος υδατανθράκων, μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Glass Transition Temperature, T_g) στην τροφοδοσία υλικού.

Η φρουκτόζη από την άλλη, ένας κοινός μονοσακχαρίτης, έχει χαμηλότερο T_g (περίπου 31 °C) από υδατάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους, όπως η μαλτοδεξτρίνη. (Adhikari et al, 2000). Ο έλεγχος της T_g είναι σημαντικός για τη διατήρηση της δομής του

υλικού μετά τη διαδικασία εκτύπωσης. Η ζάχαρη επηρεάζει την T_g στα συστήματα τροφίμων και χρησιμεύει ως παράγοντας διαμόρφωσης των φυσικοχημικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τρισδιάστατων τροφίμων.

Ιδιαίτερα σε τεχνολογίες εκτύπωσης, όπως η διαδικασία δέσμευσης κλίνης σκόνης (Powder Bed Binding Process), η ζάχαρη αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά για την διαμόρφωση προϊόντων. Η ζάχαρη λειτουργεί ως «πλαστικοποιητής», παίζοντας το ρόλο της συν-διαλυμένης ουσίας (co-solute). Οι παράμετροι διεργασίας, όπως το σημείο τήξης, η πυκνότητα της σκόνης, η ικανότητα συμπίεσης και διαβροχής και το μέγεθος των κρυστάλλων της ζάχαρης έχουν άμεσες επιπτώσεις στις ιδιότητες των παρασκευασμένων τροφίμων (Schmid et al, 2013).

Μια σειρά από υδατάνθρακες δεν εκτυπώνονται εγγενώς και απαιτούν προεπεξεργασία. Η προσθήκη νερού ή κατάλληλων παραγόντων πηκτωματοποίησης (όπως τα υδροκολλοειδή) μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα εκτύπωσης των τροφίμων (Cohen et al, 2009).

Το άμυλο παρουσιάζει ρεολογική συμπεριφορά ψευδοπλαστικού (shear thinning), μια ευνοϊκή ρεολογική ιδιότητα για θερμή εξώθηση. Για να αξιολογήσουν τη συσχέτιση μεταξύ ρεολογικών χαρακτηριστικών και δυνατότητας εκτύπωσης, οι ερευνητές διεξήγαγαν μια μελέτη χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά άμυλα (πατάτα, ρύζι και καλαμπόκι). Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι και τα τρία άμυλα εμφάνισαν ψευδοπλαστική ρεολογική συμπεριφορά και ανταπόκριση στις παραμορφώσεις, καθιστώντας τα κατάλληλα για εκτύπωση με εξώθηση (H. Chen et al., 2019). Η κατανόηση τέτοιων ιδεών θα μας επιτρέψει να προσαρμόσουμε και να εξατομικεύσουμε καλύτερα τα τρισδιάστατα τυπωμένα τρόφιμα με βάση το άμυλο.

2.4.2 Πρωτεΐνες

Η μικροδομή και τα χαρακτηριστικά υφής των τυπωμένων τροφίμων επηρεάζονται από την συγκέντρωση των πρωτεϊνών. Όταν οι πρωτεΐνες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος ενός προϊόντος, το pH και το ισοηλεκτρικό σημείο γίνονται οι πιο σημαντικές μεταβλητές. Η συσσώρευση πρωτεϊνών μπορεί να συμβάλλει σε διαδικασίες εκτύπωσης, βασιζόμενες σε υγρό, που διέπονται από μηχανισμούς σχηματισμού γέλης και «υδρογέλης». Η υφή του προϊόντος κατά τη διαδικασία εκτύπωσης μπορεί να ποικίλει με την εναπόθεση στην τροφοδοσία πρωτεϊνών μαζί με πολυσακχαρίτες.

Τα αποτελέσματα της μετουσίωσης και της συσσωμάτωσης πρωτεΐνης μπορούν να αλλάξουν την υφή ως απόκριση σε εξωτερικούς στρεσογόνους παράγοντες (όπως η θερμοκρασία) ή ουσίες (όπως οξέα ή βάσεις). Σε μια μελέτη που αφορούσε το κρέας, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν τρανσγλουταμινάση για να διατηρήσουν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της σάρκας στον πουρέ κρέατος. Αυτό γίνεται εφικτό από την αυτό-υποστηριζόμενη δομή της πρωτεϊνικής διαμόρφωσης και τη συμπερίληψη ενζύμων (J. Lipton et al, 2010). Ένα άλλο συστατικό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην διαδικασία είναι η ζελατίνη, διότι εμφανίζει αποδεδειγμένη καταλληλότητα ως μελάνη για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Η ζελατίνη είναι ένα ευέλικτο μόριο πρωτεΐνης που μπορεί να αλλάξει το ιξώδες του υλικού τροφοδοσίας. Οι ενδείξεις ιξώδους εμφανίζουν μια πτωτική τάση σε υψηλότερους ρυθμούς διάτμησης (Godoi et al., 2016). Κατά την εκτύπωση, η δομή της πρωτεΐνης αλλοιώνεται και διαταράσσεται, δίνοντας την υφή "melt-in-mouth" (λιώνει στο στόμα) (Le Tohic et al, 2018).

2.4.3 Λίπος

Η σύνθεση του λίπους επηρεάζει τις οργανοληπτικές και φυσικές ιδιότητες των εκτυπωμένων τροφίμων. Η σύνθεση και η δομή των τριγλυκεριδίων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του υλικού όπως το εύρος τήξης, τον δείκτη στερεού λίπους και την κρυσταλλική δομή. Το σημείο τήξης των εναποτιθέμενων στρωμάτων και οι παράμετροι της επεξεργασίας τους, πριν και μετά αυτής, μπορούν να αλλάξουν με βάση τη σύνθεση των τριγλυκεριδίων (Godoi et al., 2016).

Στην περίπτωση των εκτυπωμένων σοκολατών, η κρυστάλλωση του λίπους σχετίζεται με τη δομική σταθερότητα (Marangoni & McGauley, 2003). Επίσης, οι ερευνητές εξήγησαν ότι η αλλαγή στο μέγεθος των σφαιριδίων του λίπους μπορεί να προκαλέσει πιο σκούρο χρώμα στο εκτυπωμένο τυρί (Le Tohic et al., 2018). Για να αποφευχθεί η ρευστοποίηση των τυπωμένων τροφίμων κατά το ψήσιμο, προσαρμόστηκε μια συμβατική συνταγή, ρυθμίζοντας μόνο την περιεκτικότητα σε λιπαρά. Είναι αξιοσημείωτο να ληφθεί υπόψη η δυνατότητα εκτύπωσης και τη σταθερότητα των λιπαρών υλών μετά την εκτύπωση, δεδομένων των μεταβαλλόμενων προσδοκιών των καταναλωτών (J. Lipton et al, 2010).

2.4.4 Εδώδιμες Ίνες

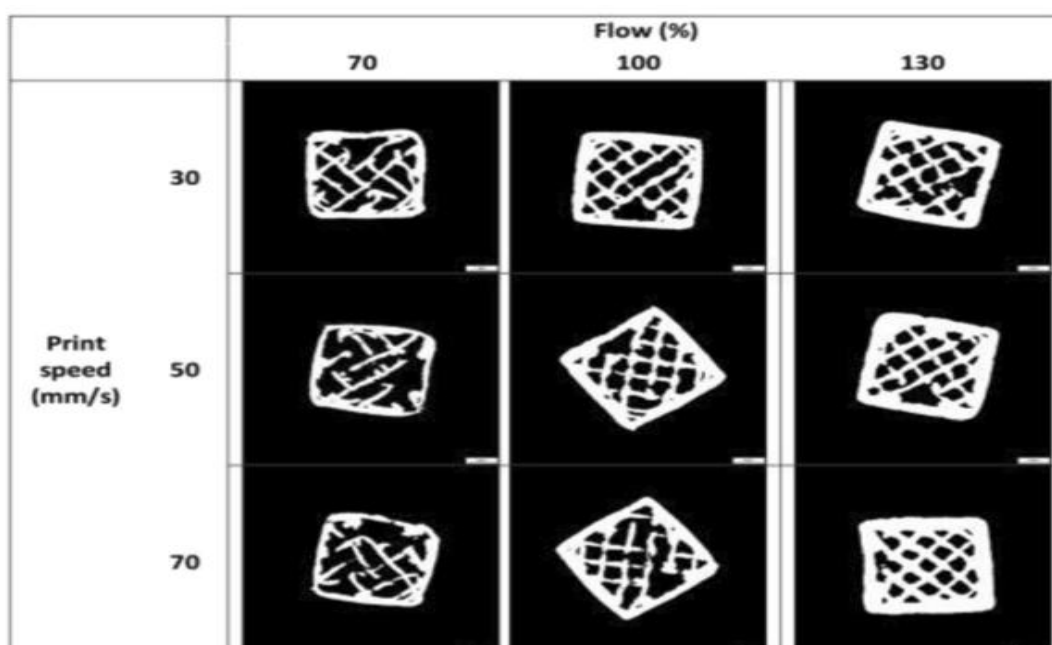
Οι Lille et al μελέτησαν τη δυνατότητα εκτύπωσης με εξώθηση διαφορετικών μιγμάτων πρωτεϊνών και ινών. Χρησιμοποίησαν, επίσης, την σπλότητα και την ομοιομορφία της διαδικασίας της εξώθησης, καθώς και την ακρίβεια και τη σταθερότητα των δημιουργηθέντων προϊόντων, για να εξηγήσουν την εκτυπωσιμότητα (printability). Η δυνατότητα εκτύπωσης επηρεάστηκε από το περιεχόμενο ινών της ροής υλικού. Αναφορικά, οι ακόλουθοι συνδυασμοί συστατικών, μεταξύ άλλων, είχαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα στη σύνθεση: 10% άμυλο ψυχρής διόγκωσης, 15% γάλα σε σκόνη (αποβουτυρωμένο ή ημιαποβουτυρωμένο), 60% γάλα σε σκόνη (αποβουτυρωμένο ή ημιαποβουτυρωμένο), 30% πίτουρο σίκαλης, 35% συμπύκνωμα πρωτεΐνης βρώμης ή 45% συμπύκνωμα πρωτεΐνης φασολιού (Lille et al, 2018).

Αυτοί οι ερευνητές παρατήρησαν επίσης ότι οι ίνες στην τροφοδοσία θα μπορούσαν να προκαλέσουν απόφραξη των ακροφυσίων, λόγω των υψηλότερων μεγεθών σωματιδίων. Οι ίδιοι οι ερευνητές, συσχέτισαν την υψηλή τάση διαρροής με τη σταθερότητα του κατασκευασμένου υλικού και εξήγησαν ότι μπορεί να προκύψουν φαινόμενα κροκίδωσης, όταν η παροχή υλικού διατμηθεί μέσω του άκρου του ακροφυσίου.

Η προσθήκη ινών θα έχει επίσης επιπτώσεις στην αποδοχή του προϊόντος από τους καταναλωτές. Η προσθήκη ινών οδηγεί σε μια σειρά αλλαγών, ξεκινώντας από τις ιδιότητες της τροφοδοσίας του υλικού έως τις αλλαγές στην υφή κατά την επεξεργασία μετά την εκτύπωση (Lille et al, 2018). Οι ερευνητές έχουν επίσης χρησιμοποιήσει νανοκυτταρίνες, λόγω της καλής συμπεριφοράς τους σε λεπτή διάτμηση, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται σε χαμηλή συγκέντρωση. Τα δίκτυα γέλης νανοκυτταρίνης παρουσιάζουν επίσης αυτοδυναμικό συναρμολόγησης σε υδατικά μέσα (Shoseyov et al, 2017). Αν και αρκετές μελέτες έχουν εξηγήσει τη δυνατότητα εκτύπωσης διαφορετικών ινών, η επίδραση της ενσωμάτωσης διαιτητικών ινών σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα τρόφιμα παραμένει ανεξερεύνητη. Καθώς επικεντρωνόμαστε στη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παροχή τροφής πλούσιας σε θρεπτικά συστατικά, αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί.

2.4.5 Δράση άλλων προσθέτων

Σε έρευνα ανάπτυξης ενός σνακ με βάση τα φρούτα, χρησιμοποιήθηκαν στερεά σωματίδια, τα οποία πολτοποιήθηκαν σε πολτοποιητή και στη συνέχεια πέρασαν μέσω ενός κόσκινου 0,6 mm για να εξασφαλισθεί η σωστή ροή της παροχής υλικού μέσω του ακροφυσίου. Η προσθήκη πηκτίνης βελτίωσε τη συνοχή, περιορίζοντας επίσης το διαχωρισμό φάσεων μεταξύ διεπιφάνειας νερού - συστατικού κατά τη διαδικασία παρασκευής (Severini et al, 2016).



Εικόνα 11 Επίδραση των διακυμάνσεων της ροής και ταχύτητα εκτύπωσης σε τρισδιάστατη εκτύπωση σνακ με βάση τα φρούτα (Nachal et al, 2019)

Σε μια διαφορετική μελέτη, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν τρανσγλουταμινάση για να επιτρέψουν τη δημιουργία περίπλοκων γεωμετριών στο κρέας. Αυτό ενίσχυσε τη ρεολογική συμπεριφορά του υλικού ζωοτροφών. Τα επεξεργασμένα προϊόντα έλαβαν ένα επιπλέον στάδιο μετα-επεξεργασίας (τηγάνισμα) και οι αισθητηριακές τους ιδιότητες κρίθηκαν αποδεκτές (J. Lipton et al, 2010). Οι Kimetal ξεπέρασαν τα προβλήματα με τη δομική παραμόρφωση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων μπισκότων (λόγω ψησίματος), προσθέτοντας υδροκολλοειδή όπως η μεθυλοκυτταρίνη και το κόμμι ξανθάνης σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μεθυλοκυτταρίνη μπορεί να προκαλέσει απώλεια αποθήκευσης, αυξάνοντας έτσι τον συντελεστή απώλειας. Παρόλο που το κόμμι ξανθάνης έχει τη δυνατότητα να διατηρήσει τη δομή, η εξαιρετική σκληρότητά του αποκλείει τη χρήση του στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Ωστόσο, τα δείγματα

που ενσωματώθηκαν στο κόμμι ξανθάνης εμφάνισαν συγκρίσιμες ιδιότητες διαστάσεων και υφής με τα δείγματα ελέγχου σε χαμηλή συγκέντρωση (5 g/100 g)(Kim et al, 2019).

2.5 Προκλήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Αν και οι τεχνολογίες AM προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής, οι περιορισμοί δεν μπορούν να παραβλεφθούν. Αναφέρεται ότι η λειτουργία, όχι η αρμοδιότητα του χειριστή, καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας της διαδικασίας εκτύπωσης. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια σειρά από κριτήρια που πρέπει να ρυθμιστούν για την τρισδιάστατη εκτύπωση των τροφίμων. Αυτά περιλαμβάνουν τη σύνθεση του υλικού, τη μηχανική αντοχή και την επιλογή των κατάλληλων συστατικών τροφίμων. Επίσης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, το μέγεθος ακροφυσίου και η διάμετρος, ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας υλικού, η εναπόθεση και ο ρυθμός ανάλυσης επηρεάζουν τη διαδικασία κατασκευής. Επιπλέον, η κακή ανάμιξη εξαρτημάτων στην παροχή υλικού, η σταθερότητα της παροχής υλικού κατά την εκτύπωση και οι παράγοντες μετά την εκτύπωση απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και έρευνα. Θα ήταν δύσκολο οι ψηφιακές πληροφορίες των συνταγών για τρισδιάστατη εκτύπωση να «διαρρεύσουν», καθώς αναπτύσσεται η τεχνολογία και οι χρήσεις της. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει τόση αναστάτωση όση το διαδίκτυο και ο προσωπικός υπολογιστής. Είναι αδύνατο να παραβλεφθεί η αναγκαιότητα νέων νόμων σχετικά με τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας και την πειρατεία (Brown et al, 2014).

Οι ερευνητές έχουν επισημάνει αφενός μεν τους κινδύνους που ενέχει το κυβερνοφυσικό περιβάλλον της AM και αφετέρου τις δυνατότητές τους να αναδειχθούν ως προκλήσεις ασφάλειας σε διάφορα επίπεδα της αλυσίδας εφοδιασμού (Zeltmann et al., 2016). Η αναγνώριση ελαττωμάτων σε αντικείμενα που εκτυπώνονται με 3D πρέπει να είναι μια συμπληρωματική τεχνολογία. Γι αυτό πρέπει να αναπτυχθούν στρατηγικές για την αξιολόγηση της ποιότητας. Για παράδειγμα, τα συστήματα μηχανικής όρασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τέτοιες εφαρμογές (Vithu & Moses, 2016).

Η διάρκεια ζωής των εκτυπωμένων τροφίμων είναι σύντομη. Λόγου χάρη, εξαιτίας αλλαγών στη ρεολογική συμπεριφορά, η ζύμη που χρησιμοποιείται σε τρισδιάστατους εκτυπωτές είναι σταθερή μόνο για 1-2 ώρες μετά την κατασκευή. (Huang et al, 2013). Ένα άλλο ζήτημα με τη μαζική παραγωγή είναι η ασφάλεια. Δεν υπάρχει τρισδιάστατος εκτυπωτής βιομηχανικής κλίμακας στην αγορά μέχρι στιγμής. Είναι ακόμα δύσκολο να δημιουργηθούν εκτυπωτές με αυτά τα χαρακτηριστικά:

- χαμηλό κόστος,
- μεγάλη αξιοπιστία και
- γρήγορη παραγωγή (Sun et al, 2015).

2.6 Οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων

Οι εκτυπωτές τροφίμων εισάγουν καλλιτεχνικές δυνατότητες στο φαγητό «υψηλής» κουζίνας (fine dining) και επεκτείνουν τις δυνατότητες μαζικής προσαρμογής στον βιομηχανικό γαστρονομικό τομέα. Αυτό ωφελεί μια διαδικασία παρασκευής υψηλής αξίας τροφίμων, με χαμηλή προσαρμογή έντασης, που θα ήταν αδύνατο να επιτευχθεί επί του παρόντος. Επιπλέον, προσφέρει ερευνητικά εργαλεία για ποικίλες κλίμακες δημιουργίας δομής στερεών προϊόντων διατροφής. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας είναι ακόμη σε εξέλιξη. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τον θεμελιώδη σκοπό και τις πιθανές εμπορικές χρήσεις του.

Ταυτόχρονα, είναι επίσης απαραίτητο να παρακολουθείται η πρόοδος της τεχνολογίας και οι σχετικές εφαρμογές, προκειμένου να διερευνηθεί πώς αυτή η νέα τεχνολογία θα καλύψει τις ανάγκες των πελατών και δυνητικά θα αλλάξει τον τρόπο ζωής των ανθρώπων.

2.6.1 Εξατομικευμένος σχεδιασμός τροφίμων

Η πλειονότητα των μεθόδων παρασκευής τροφίμων δημιουργήθηκαν για μαζική παραγωγή, συχνά εις βάρος της εφευρετικότητας των τροφίμων και του ελέγχου των σχημάτων, των υφών και των γεύσεων. Ο εκτυπωτής τροφίμων δίνει στους χρήστες μια πλατφόρμα για να πειραματιστούν με γεύσεις και σχήματα φαγητού (Paulus et al, 2014). Οπωσδήποτε, αυτή η διαδικασία προσαρμογής περιλαμβάνει παρασκευαστικές δεξιότητες με χαμηλό ρυθμό παραγωγής και υψηλό κόστος. Αυτά τα εμπόδια μπορεί να εξαλειφθούν με την τεχνολογία εκτύπωσης τροφίμων, η οποία θα παρέχει στους οικιακούς χρήστες μεγαλύτερη δημιουργική ελευθερία όταν σχεδιάζουν και προσαρμόζουν τα τρόφιμά τους, όσον αφορά τα σχήματα, τα χρώματα και τις γεύσεις. Μπορεί να δημιουργήσει περισσότερες σχεδιαστικές λύσεις όπως προσαρμοσμένο σχήμα σοκολάτας (Zoran & Coelho, 2011), και εξατομικευμένες έγχρωμες εικόνες σε στερεά τρόφιμα (Wegrzyn et al, 2012). Η Εικόνα 12 παρουσιάζει μερικά προσαρμοσμένα δείγματα τροφίμων που έχουν κατασκευαστεί σε εργαστήριο.

2.6.2 Εξατομικευμένη διατροφή

Η εξατομικευμένη διατροφή έχει δώσει έμφαση στην ιδέα της εξατομικευμένης διατροφής, όσον αφορά την κατάσταση της υγείας του ατόμου και τις απαιτήσεις σωματικού τύπου, πέρα από τις τρέχουσες διατροφικές επιλογές (Moskowitz et al, 2009). Η εκτύπωση τροφίμων επιτρέπει την ακριβή διαχείριση της διαίτας και εγγυάται φρέσκα και υγιεινά γεύματα, που προσαρμόζονται στις ανάγκες και τις προτιμήσεις του καθενός. Η ευημερία του πληθυσμού θα βελτιωθεί σημαντικά με την εφαρμογή του. Ακόμη και ουσίες με γνωστές ιδιότητες πρέπει να τροποποιηθούν σε αυτήν την περίπτωση για να ταιριάζουν σε συγκεκριμένους συνδυασμούς για κάθε συνταγή. Για την παράδοση τέτοιων προϊόντων διατροφής υψηλής προσαρμογής σε κάθε σπίτι, απαιτείται επομένως πρόσθετη έρευνα.

2.6.3 Απλούστευση διατροφικών αλυσίδων

Η χρήση εκτυπωτών τροφίμων θα διευκολύνει την υιοθέτηση μιας στρατηγικής με προϋπολογισμό κατά παραγγελία. Είναι πιο αποδοτικό να τεθούν οι εγκαταστάσεις παραγωγής κοντά στους τελικούς καταναλωτές. Κάνοντας αυτό, μπορεί να είναι δυνατή η αναδιάταξη της εξατομικευμένης αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων και η παράδοση αγαθών στους πελάτες σε λιγότερο χρόνο και με πιο λογικό κόστος, ενώ χρησιμοποιούνται και λιγότεροι πόροι.

2.6.4 Αναδιαμόρφωση τεχνολογιών επεξεργασίας τροφίμων

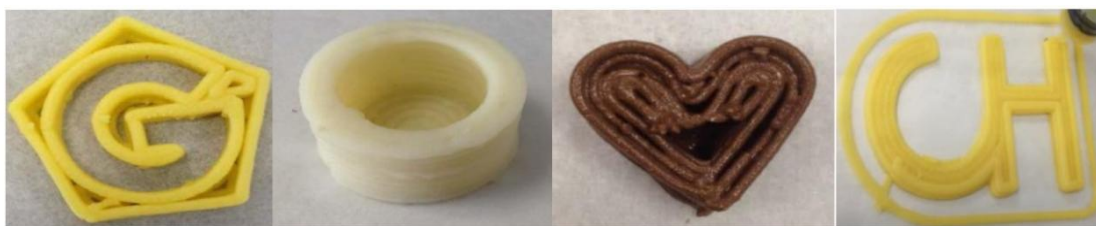
Η πλειονότητα των μεθόδων επεξεργασίας τροφίμων, που περιλαμβάνουν χημικές και φυσικές αλλοιώσεις, ενδέχεται να μην είναι σε θέση να πληρούν τα πρότυπα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό ισχύει για τη σύνθεση, τη δομή, την υφή και τη γεύση των στοιχείων. Διαφορετικές ιδιότητες υφής σε προϊόντα μπορούν να παραχθούν από συνθέσεις στοιχείων σε διαφορετικούς συνδυασμούς και κάτω από διαφορετικές καταστάσεις χειρισμού, οι οποίες μπορεί να υπερβαίνουν το όριο του διαχειρίσιμου. Επιπροσθέτως, οι ιδιότητες του υλικού εκτύπωσης πρέπει να είναι αρκετά άκαμπτες και στιβαρές ώστε να αντέχουν τόσο το βάρος των στρώσεων που εναποτίθενται στη συνέχεια όσο και τις θερμοκρασιακές επιπτώσεις της διαδικασίας μετά την θερμική επεξεργασία. Εν ολίγοις, όλες οι διαδικασίες θα πρέπει να «επανεφευρευθούν», επειδή οι τρέχουσες μέθοδοι επεξεργασίας τροφίμων είναι απίθανο να συνλειτουργήσουν κάτω από τόσο ιδιαίτερες συνθήκες.

2.6.5 Σχεδιασμός και ψηφιοποίηση διαδικασιών

Ένα μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια αυτή τη διαδικασία, όσον αφορά τις εισόδους, τις εκροές και τον τύπο της διαδικασίας, θα ήταν ουσιαστικά πολύτιμο, προκειμένου να αποκτηθεί καλύτερη γνώση της επεξεργασίας που εμπλέκεται στην τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων.

Η θεμελιώδης ώθηση για τη δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου είναι η εξατομικευμένη μέθοδος προετοιμασίας των προϊόντων και ο σχεδιασμός του εκτυπωτή. Συχνά συνδέονται σημαντικές μεταβλητές της διαδικασίας, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, καθώς και τα χαρακτηριστικά των τροφίμων, όπως η πυκνότητα, η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, το ιξώδες και η διαπερατότητα. Είναι απαραίτητο να ψηφιοποιηθούν ολοκληρωμένες διαδικασίες παρασκευής τροφίμου πριν από μαθηματικούς χειρισμούς, κάτι που διαφέρει πολύ από τα παραδοσιακά μοντέλα επεξεργασίας τροφίμων.

Μετρήσεις, βάσεις δεδομένων υπολογιστών, εγχειρίδια και θεωρητικοί υπολογισμοί μπορούν όλα να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη ποιότητα των τρισδιάστατα εκτυπωμένων τροφίμων. Στην πραγματικότητα, λόγω διαφορετικών σκευασμάτων και άλλων παραγόντων, οι ποιότητες των τροφίμων συχνά διαφέρουν από παρτίδα σε παρτίδα. Θα μπορούσαν να μετρηθούν οι ιδιότητες και να δημιουργηθεί η δυνατότητα πρόβλεψης των αποτελεσμάτων μιας δεδομένης επεξεργασίας τροφίμων για ένα συγκεκριμένο εύρος ιδιοτήτων, προσαρμόζοντας τα δεδομένα κώδικα και τη γεωμετρία γύρω από την προβλεπόμενη τιμή σε ένα υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης. Για να αναπτύξουν αυτό το μοντέλο προσομοίωσης οι ερευνητές θα πρέπει να διερευνήσουν περαιτέρω τη μοντελοποίηση της διαδικασίας της εκτύπωσης, η οποία θα είναι ειδικά σχεδιασμένη με το σύστημα ρύθμισης της τρισδιάστατης γεωμετρίας αντικειμένων. Θα πρέπει να εκτελέσουν την ποσοτικοποίηση των δεδομένων για κάθε διαδικασία (μέτρηση συστατικών και ανάμειξη, εκτύπωση, ψήσιμο και ούτω καθεξής), και θα πρέπει να καθορίσουν πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών λειτουργιών ή διεργασιών.



Εικόνα 12: Προσαρμοσμένα δείγματα σχεδίασης και κατασκευής τροφίμων

Κεφάλαιο 3 - Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και αξιολόγηση από καταναλωτές

Η additive manufacturing (AM) ή η τρισδιάστατη εκτύπωση, έχει αυξήσει το ενδιαφέρον σε πολλούς τομείς, όπως η βιομηχανία τροφίμων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση των αισθητηριακών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος στη βιομηχανία τροφίμων. Αν και δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά μια σαφής συσχέτιση μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών και της δυνατότητας εκτύπωσης, οι ρεολογικές ιδιότητες του υλικού είναι οι πρωταρχικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση της δυνατότητας εκτύπωσης των σκευασμάτων. Επιπλέον, καθώς σχετίζονται με την υφή των προϊόντων διατροφής, η κατανόηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των τρισδιάστατων εκτυπωμένων τροφίμων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ικανοποίησης των καταναλωτών. Κάθε παράμετρος παραγωγής στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης επηρεάζει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες. Πριν καταναλώσετε οποιοδήποτε τρόφιμο που έχει εκτυπωθεί 3D, απαιτείται πλήρης χαρακτηρισμός αυτών των ιδιοτήτων.

Η πλειοψηφία της έρευνας για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων επικεντρώνεται στην τροποποίηση της γεύσης και του σχεδιασμού των τελικών προϊόντων. Οι συγκεντρώσεις των χημικών ουσιών που είναι υπεύθυνες για τη γεύση και την όσφρηση, καθώς και η υφή του υποστρώματος των τροφίμων, επηρεάζουν την αισθητηριακή αντίληψη των τροφίμων (Tournier et al, 2007). Λόγω της έλλειψης γνώσης, σχετικά με τις συνδέσεις μεταξύ υφής και γεύσης, υπάρχουν λίγες ευκαιρίες για στοχευμένη μελέτη και ρύθμιση της αισθητηριακής αντίληψης των τροφίμων. Ειδικότερα, εάν οι χημικές ουσίες γεύσης είναι ετερογενώς διασκορπισμένες σε πολύπλοκα διαιτητικά υποστρώματα, είναι δύσκολο να προκαθοριστεί η αισθητηριακή αντίληψη από την ολοκληρωμένη συνολική συγκέντρωση. Έτσι, μπορεί να αποδειχθεί ότι οι δραστικές στη γεύση χημικές ουσίες έχουν μια ανομοιογενή χωρική κατανομή που προκαλεί έντονη αισθητηριακή αντίληψη (Konitzer et al., 2013).

Η επίδραση των τοπικών διαβαθμίσεων συγκέντρωσης χλωριούχου νατρίου στη σφολιάτα στην αντιληπτή ένταση αλατότητας εξετάστηκε από τους Noort et al (Noort et al, 2010). Για αυτό, τοποθετήθηκαν εναλλακτικά στρώματα αμύλου και πρωτεΐνης με διαφορετικά επίπεδα NaCl πριν από το ψήσιμο. Διαπίστωσαν ότι το ψωμί με έντονες αντιθέσεις NaCl μεταξύ των στρωμάτων είχε σημαντικά μεγαλύτερη αλμύρα από το ψωμί

με ομοιόμορφη κατανομή NaCl, επιτρέποντας μείωση του νατρίου κατά 28%, ενώ διατηρούσε την ένταση αλατότητας. Η κύρια εξήγηση για τη βελτίωση της αλμυρής γεύσης είναι η αισθητική αντίθεση, με μικρότερο ρόλο για ταχύτερη απελευθέρωση νατρίου (Konitzer et al, 2013). Ήταν αδύνατο να αξιολογηθούν με ακρίβεια οι διατροφικές δομές σε αυτές τις μελέτες. Τα πειράματα των ερευνών πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας συνήθεις μεθόδους παρασκευής τροφίμων σε αραιωμένα υποστρώματα τροφίμων.

Απαιτείται η ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών υφής, που έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλά καθορισμένη και επαναλαμβανόμενη κατασκευή υφής, προκειμένου να μελετηθεί συστηματικά ο αντίκτυπος της κατανομής γεύσης στην αισθητηριακή αντίληψη. Όλα τα συστήματα τροφίμων εξακολουθούν να στερούνται την τεχνολογική και λειτουργική ολοκλήρωση που είναι απαραίτητη για τον χειρισμό της αισθητηριακής αντίληψης μέσω του συνδυασμένου σχεδιασμού δομής και γεύσης που χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Η πλειονότητα των μελετών που είναι επί του παρόντος προσβάσιμες επικεντρώνονται στη βιωσιμότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης της υφής των τροφίμων χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα στοιχεία σχεδιασμού γεύσης (Jonkers et al, 2020 - Y. Liu et al, 2019 & Van Cauwenberghe et al, 2018). Οι Liu et al (Z. Liu et al, 2017), για παράδειγμα, χρησιμοποίησαν τρισδιάστατη εκτύπωση για να εκτυπώσουν διαφορετικές ποιότητες υφής για πηκτώματα συμπαγούς πρωτεΐνης γάλακτος με ποικίλη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη. Το ίδιο πέτυχαν οι ερευνητές Van Cauwenberghe et al (Van Cauwenberghe et al, 2018) αλλάζοντας το πορώδες με μια σειρά μετρήσεων κυττάρων και διαμέτρων πόρων.

Ορισμένα διαλύματα γέλης δεν απαιτούν θερμική σταθεροποίηση ή μετεπεξεργασία για τη λειτουργία ή τη γεωμετρική σταθερότητα κατά την εκτύπωση. Ωστόσο, οι επαγόμενες θερμικές μεταπτώσεις για τη θερμική σταθεροποίηση είναι ζωτικής σημασίας για τη γεωμετρική σταθερότητα και την κατανάλωση μετά την εκτύπωση για άλλα γεύματα, όπως συστήματα με βάση το άμυλο (He et al, 2020).

Δεδομένων των προϊόντων υψηλής κατανάλωσης που περιέχουν αμινοξέα και πρωτεΐνες, η θερμική σταθεροποίηση είναι απαραίτητη για την αποφυγή χημικών αλλαγών όπως η μετουσίωση των πρωτεϊνών, η ζελατινοποίηση του αμύλου και η απώλεια δραστηριότητας νερού για σταθερότητα αποθήκευσης. Μελέτες σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα τρόφιμα έχουν συμπεριλάβει τη θερμική σταθεροποίηση ως ένα στάδιο μετεπεξεργασίας μέσω μεθόδων όπως η ξήρανση σε μικροκύματα, το βράσιμο, το στέγνωμα στον αέρα, το τηγάνισμα και άλλα (He et al, 2020).

Από την άλλη πλευρά, οι έρευνες για την εκτύπωση τροφίμων δεν περιλαμβάνουν τεχνικές θερμικής σταθεροποίησης. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θέρμανσης θα ενσωματωθεί ηλεκτρομηχανικά στο σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης, εξαλείφοντας ενδεχομένως την ανάγκη για μετεπεξεργασία μετά την εκτύπωση τροφίμων. Επιπλέον, η θέρμανση ανά στρώμα (layer-based heating), η στοχευμένη ή η τοπική θέρμανση, και η αυτόματη βελτιστοποίηση θέρμανσης με βάση τα υλικά μπορούν να γίνουν εφικτές με τη βελτιωμένη σύνδεση μεταξύ της τρισδιάστατης εκτύπωσης και ενός ολοκληρωμένου συστήματος θερμικής σταθεροποίησης.

3.1 Μηχανικές και ρεολογικές ιδιότητες

Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον από τη βιομηχανία τροφίμων για την τρισδιάστατη εκτύπωση, ένα ενδιαφέρον που εν μέρει οφείλεται σε οφέλη, όπως ο εξορθολογισμός της αλυσίδας εφοδιασμού και η μείωση του κόστους αποθήκευσης, αλλά κυρίως σε παράγοντες, όπως η επέκταση της χρήσης των σημερινών υλικών τροφίμων, η προσαρμογή και ο σχεδιασμός, η εξατομικευμένη διατροφή, οι νέες αισθητηριακές ιδιότητες, αλλά και σε άλλους παράγοντες. Η δημιουργία γεωμετρικά πολύπλοκων προϊόντων, με χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων, θα μπορούσε να έχει θετικές επιπτώσεις στην οικονομία και στο περιβάλλον (Kim et al, 2019). Η ικανότητα τροποποίησης των διατροφικών και αισθητηριακών ποιοτήτων, σύμφωνα με τα γούστα και τις ανάγκες των καταναλωτών, είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημά της (Derossi et al., 2018). Για να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα της εκτύπωσης και να δημιουργηθούν νέες υφές, με βάση τις τυπωμένες δομές, απαιτείται βαθύτερη κατανόηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση (π.χ. μελάνη τροφίμων) και των μηχανικών ιδιοτήτων των τυπωμένων υλικών.

Η ρεολογία μπορεί να παρουσιάσει ένα τεχνολογικό πρόβλημα κατά την έρευνα περίπλοκων σκευασμάτων (που περιέχουν πολλά αλληλεπιδρώντα συστατικά τροφίμων), αλλά αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αλλάζοντας τη χημική σύνθεση των προϊόντων διατροφής ή χρησιμοποιώντας προσθήκες γέλης (Van Cauwenberghe et al, 2018). Ωστόσο, επί του παρόντος λείπει η σύνδεση των ρεολογικών παραγόντων με τη βιωσιμότητα της εκτύπωσης. Είναι σημαντικό να αποκτήσουμε μια βαθύτερη κατανόηση αυτών των παραγόντων και του τρόπου χρήσης τους στην εκτύπωση. Η σκοπιμότητα της εκτύπωσης με οποιοδήποτε ενδεχόμενο μελάνι τροφίμων έχει καθοριστεί από έναν αριθμό προσδιορισμών, αλλά μόνο ένας μικρός αριθμός ερευνών έχει προσπαθήσει να συσχετίσει αυτές τις παραμέτρους. Αφ' ετέρου, είναι σημαντικό να περιγράψουμε τα μηχανικά

χαρακτηριστικά των προϊόντων διατροφής που παρασκευάζονται με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Η διαδικασία εκτύπωσης τροφίμων έχει τέσσερα κύρια στάδια:

- διαμόρφωση (Formulation)
- σχεδιασμός μοντέλου (model design)
- τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing)
- μετα-επεξεργασία (post-processing)

Κατά την επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση, η φόρμουλα λαμβάνει υπόψη τόσο τις εγγενείς ιδιότητες των υλικών όσο και την εκτυπωσιμότητά τους όταν συνδυάζονται τα συστατικά. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι όταν σύνθετα πιάτα παρασκευάζονται με πολλά συστατικά και υλικά, οι συνθέσεις τους αλληλεπιδρούν και μάλιστα υφίστανται αντιδράσεις. Σαν αποτέλεσμα, η δημιουργία πολύπλοκων, θρεπτικών πιάτων είναι πρόκληση και σπάνια τεκμηριώνεται. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των υλικών πρέπει να ληφθούν υπόψη σε αυτό το αρχικό βήμα, καθώς πρέπει να έχουν τις απαραίτητες ιξωδοελαστικές ιδιότητες για να μπορούν να εξωθηθούν μέσω του ακροφυσίου (Ma & Zhang, 2022). Η εκτύπωση απλών τύπων τροφίμων ή μεμονωμένων συστατικών ήταν ευρέως επιτυχής, αλλά η εκτύπωση περίπλοκων μιγμάτων είναι πιο δύσκολη λόγω της αλληλεπίδρασης των συστατικών που περιγράφηκαν παραπάνω, αλλάζοντας τις ρεολογικές τους ιδιότητες (Lee et al, 2019)

Η διάταξη της δομής, λαμβάνοντας υπόψη το εξωτερικό σχήμα και το σχέδιο πλήρωσης, αναφέρεται ως σχέδιο του μοντέλου. Η ιξωδοελαστικότητα της ουσίας είναι απαραίτητη σε αυτό το σημείο για να εγγυηθεί την ακρίβεια και τη σταθερότητα της δομής της έντυπης μορφής. Επιπροσθέτως, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, ανάλογα με το εκτυπωμένο σχέδιο πλήρωσης, συνδέονται άμεσα με αυτό το στάδιο (Lee et al, 2019).

Η πλειονότητα των διαδικασιών τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτεί μόνο ένα στάδιο επεξεργασίας για τη μετατροπή των πρώτων υλών σε τελικά προϊόντα. Όσον αφορά τα τρόφιμα, την ενσωμάτωσή τους σε μια κουζίνα και την παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα, αυτό είναι περίπλοκο αυτή τη στιγμή. Ένα τελευταίο στάδιο ή η μετεπεξεργασία για τα τρόφιμα, όπως το ψήσιμο, το τηγάνισμα ή το στέγνωμα, για τη διατήρηση του σχήματος, εγγυάται τη μικροβιολογική ασφάλεια, επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής ή βελτιώνει την αισθητική για τους καταναλωτές. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου εκτυπωμένου υλικού επηρεάζονται σημαντικά και από τη μετεπεξεργασία (Ma & Zhang, 2022).

3.2 Επιδράσεις των μηχανικών και ρεολογικών ιδιοτήτων στην υφή

Όσον αφορά τα τρόφιμα, η υφή και η αίσθηση στο στόμα (mouth feel) μπορεί να είναι καθοριστικής σημασίας για τις προτιμήσεις και την αποδοχή των καταναλωτών (Stokes et al, 2013). Η υφή ενός προϊόντος περιγράφεται από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης ως «όλες οι μηχανικές, γεωμετρικές και επιφανειακές ιδιότητες που γίνονται αντιληπτές μέσω μηχανικών, οπτικών και, κατά περίπτωση, οπτικών και ακουστικών υποδοχέων» (Stokes et al, 2013). Θέτοντάς το διαφορετικά, η υφή φαίνεται να περιλαμβάνει κάθε χαρακτηριστικό της τροφής που μπορεί να γίνει αντιληπτό με τις αισθήσεις του ανθρώπινου σώματος, ιδιαίτερα τα χέρια και το στόμα. Η αντίληψη και η προτίμηση της ανθρώπινης υφής διαφέρουν ουσιαστικά από άτομο σε άτομο και επηρεάζονται έντονα από το πολιτισμικό υπόβαθρο και τις προσωπικές εμπειρίες ενός ατόμου (J. Chen & Rosenthal, 2015). Η Ιαπωνία λέγεται ότι έχει περίπου 400 φράσεις για την περιγραφή της υφής των τροφίμων, σε σύγκριση με 78 και 105 όρους, αντίστοιχα, σε δυτικά έθνη, όπως οι ΗΠΑ και η Αυστρία (Chung & Mc Clements, 2015).

Η ρεολογική, η μηχανική και η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων επηρεάζουν σημαντικά την υφή. Χρησιμοποιώντας τα εκτυπώσιμα υλικά, είτε πριν την εκτύπωση είτε μετά την εκτύπωση, αξιολογούνται οι ρεολογικές ιδιότητες και η επίδρασή τους στην υφή. Όταν πρόκειται για μηχανικές ιδιότητες, η τεχνική μπορεί να βασίζεται σε εκτυπώσιμα υλικά, καθώς και σε τυποποιημένα και μετεπεξεργασμένα (όπως τηγανητά, αποξηραμένα ή ψημένα) υλικά. Τα πιο συχνά ερευνημένα χαρακτηριστικά υφής περιλαμβάνουν την κολλητικότητα, τη μασητικότητα, τη συγκολλητικότητα, τη συνοχή, τη σκληρότητα και την ελαστικότητα (Keerthana et al, 2020). Η σκληρότητα ενός τροφίμου ορίζεται από το πόση προσπάθεια χρειάζεται για να παραμορφωθεί και πόσο καλά διατηρεί το σχήμα του. Η αντοχή που απαιτείται, για να σπάσει τα δεσμά μεταξύ της επιφάνειας ενός δείγματος και των επιφανειών που αγγίζει εξωτερικά, σχετίζεται με την πρόσφυση, όπως και η ικανότητα των συστατικών του υλικού να ενώνονται μεταξύ τους. Η ικανότητα του δείγματος να παραμορφώνεται πριν σπάσει και η κολλώδης του συμπεριφορά συνδέονται με τη συνοχή του. Η ελαστικότητα καθορίζεται από την ικανότητά των δειγμάτων να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα μετά τη συμπίεση. Τέλος, προϊόντα όπως η τσίχλα συνδέονται με την ενέργεια που απαιτείται για τον τεμαχισμό και τη μάσησή τους, ενώ η κολλώδης υφή εφαρμόζεται μόνο για ημιστερεά τρόφιμα και η μάσηση για τα στερεά (Sungsinchai et al, 2019).

Κάθε φυσικό και δομικό χαρακτηριστικό των προϊόντων διατροφής θα παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο γίνεται αντιληπτή η υφή και η αίσθηση στο στόμα. Ως αποτέλεσμα, αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό και την παραγωγή πιο υγιεινών προϊόντων, με αισθητηριακά χαρακτηριστικά που παρακινούν τους ανθρώπους να υιοθετήσουν έναν πιο υγιεινό τρόπο ζωής (Chung & Mc Clements, 2015). Λόγω του κινδύνου αναρρόφησης και πνιγμού, η υφή των τροφίμων είναι εξαιρετικά σημαντική σε ευάλωτους πληθυσμούς, συμπεριλαμβανομένων των ηλικιωμένων και εκείνων με δυσφαγία (Hemsley et al, 2019).

Η ανησυχία για την ασφάλεια των καταναλωτών καταδεικνύει την ανάγκη για προϊόντα διατροφής που συμμορφώνονται με συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές, όπως αυτές που αναπτύχθηκαν από τη Διεθνή Πρωτοβουλία Τυποποίησης Διατροφής Δυσφαγίας (IDDSI) (Cichero et al, 2020). Οι κλινικοί γιατροί και οι φροντιστές μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτό το πλαίσιο για να ταξινομήσουν τη ροή και την υφή των τροφίμων και των ποτών σε μια κλίμακα οκτώ επιπέδων κατά την προετοιμασία του φαγητού για να ενθαρρύνουν την κατάποση (Cichero et al, 2020).

Τα τρόφιμα κατηγοριοποιούνται μεταξύ 4-7 (με 8 συνηθισμένα τρόφιμα), συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων τύπου πουρέ (4), των ψιλοκομμένων και υγρών (5), των μαλακών, των τροφίμων σε μέγεθος μπουκιάς (6), και των εύκολα μασώμενων (7) τροφίμων. Τα ποτά ποικίλλουν από 0 έως 3 λεπτά (0), ήπια, μέτρια και πυκνά (1,2 και 3, αντίστοιχα) (Cichero et al., 2020). Για να εξασφαλιστεί η συμμόρφωση με τις προτεινόμενες οδηγίες, η ταξινόμηση πραγματοποιείται με την εφαρμογή πολλών μεθόδων δοκιμών που χρησιμοποιούν διάφορα καθημερινά εργαλεία, όπως σύριγγες (για την ταξινόμηση του πάχους των υγρών [δοκιμή ροής]), κουτάλια [δοκιμή κλίσης κουταλιού] και πιρούνια [Πίεση πιρουνιού/κουταλιού και δοκιμή διαχωρισμού πιρουνιού/κουταλιού] (Cichero et al, 2020).

Λόγω του επιπολασμού της δυσφαγίας στον ηλικιωμένο πληθυσμό, διάφορες μελέτες έχουν αξιολογήσει τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή προϊόντων διατροφής για όσους πάσχουν από την πάθηση (Stokes et al, 2013). Για άτομα που έχουν δυσκολία στην κατάποση, οι Kouzani et al (Kouzani et al., 2017) έχουν τυπώσει πουρέ τόνου, κολοκύθα και παντζάρι. Είχαν τυπωμένο σχέδιο σε σχήμα τόνου για να το κάνουν ελκυστικό τόσο για αυτούς όσο και για άλλους πελάτες. Είναι σημαντικό στην τρισδιάστατη εκτύπωση να χρησιμοποιούνται τρόφιμα που θα είναι και οπτικά ελκυστικά αλλά και οργανοληπτικά συνεπή. Θα πρέπει, επίσης, να τονιστεί η ανάγκη για την επίτευξη κατάλληλων διατροφικών συνθέσεων.

Η αλλαγή της υφής μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη προϊόντων με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε λιπαρά, ζάχαρη και αλάτι (Portanguen et al, 2019). Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την αποτελεσματική ανάπτυξη τέτοιων αντικειμένων είναι η δυνατότητα εκτύπωσης των υλικών, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού και της καταλληλότητάς τους για εκτύπωση.

3.3 Αντίληψη των καταναλωτών

Οι ιδιότητες της υφής των τροφίμων είναι καθοριστικές για την αποδοχή των καταναλωτών και συχνά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των προτιμήσεων του καταναλωτή και την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων (McCrickerd & Forde, 2016). Η αξιολόγηση των πρόσθετων ποιοτήτων των τροφίμων, όπως η γεύση και το άρωμα, γίνεται συχνά σε συνδυασμό με τις αξιολογήσεις αποδοχής των καταναλωτών, καθώς αυτά τα τρία χαρακτηριστικά επηρεάζουν την προτίμησή τους (J. Chen & Rosenthal, 2015). Επιπλέον, οι αλλαγές στην αντίληψη οποιουδήποτε από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να επηρεάσουν την αντίληψη των άλλων (J. Chen & Rosenthal, 2015).

Η αισθητηριακή εμπειρία των τροφίμων στο στόμα, ή αλλιώς το mouth feel, είναι μια επιπλέον κρίσιμη ιδέα που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η αίσθηση στο στόμα ορίζεται ως η αίσθηση της υφής του φαγητού κατά την κατανάλωσή του (Stokes et al., 2013). Μελέτες έχουν δείξει ότι η υφή και η αίσθηση στο στόμα παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή τροφής, στην πρόσληψη τροφής, ακόμη και στον κορεσμό (McCrickerd & Forde, 2016).

Οι αισθητηριακές αντιλήψεις των καταναλωτών επηρεάζονται από τις υφές, οπτικές και απτικές ιδιότητες των συσκευασιών και των τροφίμων, δημιουργώντας προσδοκίες για τα προϊόντα και, συνεπώς, την πιθανότητα αγοράς (Pramudya & Seo, 2019). Οι Jansson-Boyd και Kobescak (Pramudya & Seo, 2019) έδειξαν ότι η αντίληψη των καταναλωτών για την υγιεινή των τροφίμων επηρεάζεται από την οπτική άρρητη υφή της επιφάνειας. Κατέληξαν, επομένως, στο συμπέρασμα ότι τα γλυκά προϊόντα, όπως τα μπισκότα, είναι πιο πιθανό να αγοραστούν εάν θεωρούνται πιο απολαυστικά ακόμα κι εάν φαίνονται λιγότερο υγιεινά και (Pramudya & Seo, 2019). Επιπλέον, ανακαλύφθηκε ότι η αισθητηριακή εντύπωση των ποτών παγωτού, των προϊόντων πατάτας, του καφέ και της σοκολάτας επηρεάζεται από το σχεδιασμό των συσκευασιών (van Rompay & Groothedde, 2019). Οι συγγραφείς έδειξαν ότι οι επιφάνειες με λεία υφή εντείνουν την αντίληψη της γλυκύτητας στα παγωτά, ενώ οι τραχιές επιφάνειες ενισχύουν την πικράδα του καφέ και την αλμύρα στα πατατάκια (Pramudya & Seo, 2019). Πειραματιζόμενοι με τις ιδιότητες υφής της

συσκευασίας και του προϊόντος, ευρήματα όπως αυτά που παρέχονται εδώ μπορεί να είναι χρήσιμα για την προώθηση πιο υγιεινών προϊόντων διατροφής.

Η αξιολόγηση της υφής ενός δείγματος γίνεται συχνά με τη χρήση ανάλυσης ρεολογικού και προφίλ υφής (Texture Profile Analysis, TPA) ή ανάλυση διπλής συμπίεσης, η οποία προσομοιώνει τη διαδικασία μάσησης κατά τη διάρκεια δύο κύκλων της παραμόρφωσης ή των δύο πρώτων δαγκωμάτων στο ανθρώπινο στόμα (Pramudya & Seo, 2019). Αυτές οι αναλύσεις, ωστόσο, δεν αναπαράγουν επακριβώς την αισθητηριακή εμπειρία των προϊόντων, αλλά ποσοτικοποιούν απλώς τις μηχανικές ιδιότητες των τροφίμων. Επιπλέον, καθώς η υφή τροποποιείται από μεμονωμένες εμπειρίες, η πρόβλεψη του οργάνου είναι δύσκολη, λόγω της μηχανικής του ανάλυσης. (Pramudya & Seo, 2019 & Sethupathy et al, 2021). Έτσι, παρόλο που απαιτούν πολύ χρόνο και χρήμα, οι αισθητηριακές αξιολογήσεις εξακολουθούν, όπως πιστεύεται, να είναι ο καλύτερος τρόπος για τη μέτρηση της ποιότητας των τροφίμων και της αποδοχής των καταναλωτών. (O'Sullivan, 2017). Για να διασφαλιστεί ο ποιοτικός έλεγχος σε όλη την ανάπτυξη και παραγωγή τροφίμων, ο εξοπλισμός οργανοληπτικού ελέγχου έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μετατρέψει την υφή σε μετρήσιμες μονάδες που μπορούν να τυποποιηθούν (J. Chen & Rosenthal, 2015 & Lu, 2013).

Μελέτες που έχουν ήδη γίνει σχετικά με την αντίληψη των καταναλωτών και την αισθητηριακή αξιολόγηση των τυπωμένων τροφίμων έχουν δώσει ορισμένα αντιφατικά ευρήματα. Ηλεκτρονικές δημοσκοπήσεις για την αντίληψη των καταναλωτών έχουν πραγματοποιηθεί από τους Lupton και Turner. Σύμφωνα με αυτές, η εμφάνιση, η πηγή τροφής, τα οπτικά αντιληπτά αισθητήρια χαρακτηριστικά και η αντιληπτή φυσική προέλευση των τυπωμένων δομών συμβάλλουν στη γενική αποστροφή των Αυστραλών καταναλωτών για την εκτύπωση τροφίμων. Η πλειοψηφία των ατόμων ανταποκρίθηκε ευνοϊκότερα σε αναγνωρίσιμα στοιχεία (Lupton & Turner, 2018).

Σε μια άλλη έρευνα, από τους ίδιους συγγραφείς, η αντίληψη των καταναλωτών για τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα υποκατάστατα κρέατος, που παράγονται με καλλιεργούμενο κρέας (cultured meat) ή με βάση τα έντομα, επηρεάστηκε από τα προσωπικά συναισθήματα των συμμετεχόντων και την πεποίθηση ότι το κρέας που καλλιεργήθηκε στο εργαστήριο ήταν «αφύσικο» και η χρήση εντόμων ήταν «αηδιαστική», με την πλειονότητα των συμμετεχόντων να απορρίπτουν εντελώς αυτού του είδους τα προϊόντα (Lupton & Turner, 2018). Τα αποτελέσματα μπορεί να έχουν επηρεαστεί από την περιορισμένη κατανόηση αυτής της τεχνολογίας από τους καταναλωτές.

Οι Manstan και McSweeney σε μια καταναλωτική μελέτη, που συνέκρινε τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα τρόφιμα με τα συμβατικά τρόφιμα, κατάφεραν να ταξινομήσουν τους καταναλωτές σε τρεις ομάδες, με βάση τη στάση τους απέναντι στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Ο πελάτης της ομάδας 1, που ενθουσιάστηκε και ενδιαφέρθηκε, ήταν ο πιο αντιπροσωπευτικός, ακολουθούμενος από τον καταναλωτή της ομάδας 2, που ήταν μέτρια ενθουσιασμένος αλλά και μέτρια ενδιαφερόμενος, και ο καταναλωτής της ομάδας 3, που ήταν απρόθυμος και αδιάφορος (Manstan & McSweeney, 2020).

Σε μια αισθητηριακή ανάλυση εκτυπωμένης σοκολάτας, με διαφορετικά επίπεδα πλήρωσης (varied infill levels), η εμφάνιση της σοκολάτας αποδείχθηκε ότι παίζει καθοριστικό ρόλο στην προτιμώμενη επιλογή, με τα δείγματα με 100% σοκολάτα να έχουν καλύτερη οπτική αποδοχή. Τα δείγματα με πλήρωση υλικού (σοκολάτα) 25% έγιναν καλύτερα αποδεκτά ως προς την υφή. Η σύγκριση της 3D εκτυπωμένης σοκολάτας (100% πλήρωση) και της σοκολάτας του εμπορίου οδήγησε σε παρόμοιες προτιμήσεις, με την προτίμηση της τυπωμένης σοκολάτας να δικαιολογείται από την υφή της (λιγότερο σκληρή) (Mantihal et al., 2019).

Μια μικρής κλίμακας έρευνα αποδοχής τρισδιάστατων τυπωμένων σνακς σε στρατιωτικό περιβάλλον, που εξέτασε την αισθητηριακή αντίληψη των εκτυπωμένων προϊόντων, έδειξε ότι τα εμπορικά σνακς προτιμώνται έναντι των έντυπων, αλλά και ότι η αποδοχή των τυπωμένων σνακς αυξήθηκε με την επαναλαμβανόμενη κατανάλωση. Ο βαθμός προσαρμογής της γεύσης και της υφής συνέβαλε επίσης στην επιτυχία των τυπωμένων σνακς. Ωστόσο, όπως σημειώνουν οι συγγραφείς, τα συμπεράσματα μπορεί να είναι πιο αδύναμα, λόγω της χρήσης μικρού μεγέθους δείγματος (12 ανειδίκευτοι στρατιωτικοί διατροφολόγοι) (Manstan & McSweeney, 2020).

Επιπλέον, οι συγγραφείς δήλωσαν ότι οι έρευνες των καταναλωτών αποκάλυψαν ότι ακόμη και η επίδειξη της διαδικασίας εκτύπωσης και η προσφορά εκτυπωμένων δειγμάτων μπορεί να αλλάξει την αντίληψη των ανθρώπων για την τεχνολογία. Οι συμμετέχοντες δεν θεώρησαν τα τυπωμένα αντικείμενα ως τεχνητά ή αφύσικα, σε αντίθεση με άλλες έρευνες (Lupton & Turner, 2018). Η ποικιλία των προσφερόμενων τροφίμων και η ευαισθητοποίηση των πελατών σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να ευθύνονται για αυτό το κενό. Οι συμμετέχοντες στη παραπάνω μελέτη δεν ήταν εξοικειωμένοι με την τεχνολογία και τα χαρακτηριστικά των προϊόντων που έχουν ως βάση τα έντομα και το εκτυπωμένο κρέας και, λόγω αυτού, εκδήλωσαν τη υψηλότερη απέχθεια (Lupton & Turner, 2018). Από την άλλη, οι Mantihal et al αναφέρθηκαν σε συμμετέχοντες

που γνώριζαν κυρίως την τεχνολογία και τους παρουσιάστηκαν δείγματα σοκολάτας (Mantihal et al, 2019).

Οι Brunner et al διεξήγαγαν περισσότερη έρευνα σχετικά με αυτό το θέμα, εξετάζοντας τον αντίκτυπο της αλλαγής της στάσης των καταναλωτών και της ευαισθητοποίησή τους ως προς την τρισδιάστατη εκτύπωση και την αποδοχή των 3D εκτυπωμένων προϊόντων. Οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι τα συναισθήματα βελτιώθηκαν, καθώς οι συμμετέχοντες λάμβαναν περισσότερες πληροφορίες, αποδεικνύοντας ότι η επικοινωνία μπορεί να επηρεάσει τη δεκτικότητα των πελατών για την εκτύπωση τροφίμων. Η επικοινωνία, ωστόσο, ήταν αναποτελεσματική και ενίσχυε ακόμη και τις προκαταλήψεις των ανθρώπων εκείνων που ήταν ήδη αντίθετοι με την εκτύπωση και την τροφική νεοφοβία. (Brunner et al, 2018).

Τα αποτελέσματα αυτών των αξιολογήσεων μπορεί να περιορίστηκαν από τη χρήση έντυπων ερωτηματολογίων και ηλεκτρονικών ερευνών, τα οποία μπορεί επίσης να επηρέασαν και να συνεχίσουν να επηρεάζουν την εξέλιξη των ερευνών τέτοιας φύσης. Ωστόσο, ορισμένα συμπεράσματα μπορεί να προκύψουν από αυτές τις έρευνες καταναλωτών, όπως το γεγονός ότι, παρόλο που ο απλός πελάτης επί του παρόντος δεν γνωρίζει κάπως την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η αυξημένη επικοινωνία και η εκπαίδευση μπορεί να επηρεάσουν τις αντιλήψεις τους για τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα. (Brunner et al, 2018 & Mantihal et al, 2019). Μπορεί επίσης να ειπωθεί ότι μια φυσική εισαγωγή, με την εμφάνιση της διαδικασίας εκτύπωσης και τη δοκιμή των έντυπων προϊόντων, θα μπορούσε να είναι ευεργετική για την προσέλκυση των καταναλωτών (Brunner et al, 2018 & Mantihal et al, 2019).

Οι αισθητηριακές αξιολογήσεις μπορούν επίσης να επηρεαστούν από τις ιδιότητες του υλικού, τις ρυθμίσεις εκτύπωσης και τη μετεπεξεργασία. Οι βαθμολογίες οπτικής αντίληψης των προϊόντων αμύλου ρυζιού, για παράδειγμα, επηρεάστηκαν από την ταχύτητα εκτύπωσης και τη διάμετρο του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε ως μέσο εκτύπωσης. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι μια διαφορά 0,2 mm στη διάμετρο του ακροφυσίου είχε ως αποτέλεσμα πολύ διαφορετικές αισθητικές βαθμολογίες, με διάμετρο 1,5 mm (σε χαμηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης (<1500 mm/min) και υψηλότερες ταχύτητες (180–240 rpm)) που δείχνει καλύτερη συνολική αποδοχή, ενώ το ακροφύσιο 1,7 mm παρουσίασε τα χειρότερα αποτελέσματα (Theagarajan et al, 2020). Οι ανομοιότητες προέκυψαν από την κακή απόδοση εκτύπωσης σε μεγαλύτερες διαμέτρους ακροφυσίων, με την παραγωγή δομών με υπερβολική εξώθηση και χαμηλή ευκρίνεια στρώσης (Theagarajan et al, 2020).

Λίγες μελέτες έχουν προσπαθήσει να συνδέσουν τα χαρακτηριστικά του υλικού με την αισθητηριακή αντίδραση του τυπωμένου προϊόντος. Η αρχική προσπάθεια των Liu & al ήταν η συσχέτιση του ιξώδους και της αισθητικής αξιολόγησης των πρωτεϊνικών συνθέσεων του λευκού αυγού. Μέχρι ένα ιξώδες 1.375 Pa/s, οι αισθητηριακές βαθμολογίες και το ιξώδες φαινόταν να έχουν θετική συσχέτιση. Σε μεγαλύτερες τιμές ιξώδους, ο συσχετισμός έγινε αρνητικός. Τριάντα εκπαιδευμένοι συμμετέχοντες ολοκλήρωσαν την οργανοληπτική αξιολόγηση, τονίζοντας τη σημασία του ιξώδους στο τελικό προϊόν. (Y. Liu et al, 2019). Η υφή και η γεύση των κοινών τρισδιάστατων συνθέσεων προϊόντος πουρέ καρότου επηρεάστηκαν με παρόμοιο τρόπο από την προσθήκη γαλακτωματοποιητών και σταθεροποιητών όπως το κόμμι γκουάρ, το κόμμι ξανθάνης και η ζελατίνη. Η προσθήκη ζελατίνης δημιούργησε πιο πυκνές, συνεκτικές και λιγότερο γλυκές δομές, ενώ το κόμμι ξανθάνης παράγει πουρέ πιο λείο, πιο γλυκό και με λιπαρή επικάλυψη στο στόμα. Τα τυπωμένα και συμβατικά δείγματα πουρέ παρουσίασαν παρόμοια αισθητικά αποτελέσματα (Strother et al., 2020).

Η χρήση διαφόρων τεχνικών μετεπεξεργασίας, όπως η ξήρανση σε κενό μικροκυμάτων, έδειξε επίσης αύξηση της δημοτικότητας των τρισδιάστατων εκτυπωμένων προϊόντων, όπως έδειξαν έρευνες που έγιναν σε γέλη μάνγκο. Οι εκτυπωμένες δομές που υποβλήθηκαν σε μεγαλύτερους χρόνους ξήρανσης (4 λεπτά) παρουσίασαν μεγαλύτερη ακρίβεια εκτύπωσης και δομική ακεραιότητα με αυξημένες ιδιότητες υφής (σκληρότητα και κόμμι) (Yang et al, 2001). Προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ανάπτυξης τροφίμων, η μελλοντική έρευνα σε αυτό το θέμα θα μπορούσε να αποσαφηνίσει τον αντίκτυπο των παραμέτρων - εκτύπωσης και μετεπεξεργασίας - στις οργανοληπτικές αντιδράσεις και στα τρισδιάστατα τυπωμένα προϊόντα διατροφής (Strother et al, 2020).

Συνολικά, η οργανοληπτική ανάλυση των τυπωμένων προϊόντων έδειξε ότι ορισμένα από αυτά ήταν υψηλής αποδοχής, όσον αφορά την καινοτομία και τη δυνατότητα προσαρμογής τους, αποδεικνύοντας ότι τα τυπωμένα τρόφιμα έχουν τη δυνατότητα να διατεθούν στο εμπόριο (Theagarajan et al, 2020). Ωστόσο, από τις αναφερόμενες μελέτες, στις οποίες διερευνήθηκε η αποδοχή των καταναλωτών, προέκυψε ότι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των περισσότερων προϊόντων ήταν ο μειωμένος αριθμός συμμετεχόντων, γενικά με ≤ 30 συμμετέχοντες, οι οποίοι στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν ανεκπαίδευτοι ή ημιεκπαιδευμένοι. Μια εκπαιδευμένη μικρού αλλά στατιστικά σημαντικού αριθμού ατόμων μπορεί να αναλύσει λεπτομερώς το αισθητηριακό προφίλ των τροφίμων, αλλά απαιτείται μια ομάδα περισσότερων από 100 μη εκπαιδευμένων συμμετεχόντων για να

εξαχθούν σαφή συμπεράσματα σχετικά με τις προτιμήσεις των καταναλωτών (Mantihal et al, 2019). Λίγες έρευνες, ανά έτος, μέχρι και σήμερα έχουν διερευνήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την αποδοχή των καταναλωτών σε τέτοια κλίμακα (Y. Liu et al, 2019 - Strother et al, 2020 & Yang et al, 2001).

3.4 Δεκτικότητα των καταναλωτών στις νέες τεχνολογίες - Οφέλη 3D εκτύπωσης

Η αποδοχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης από τον γενικό καταναλωτή φαίνεται να σχετίζεται με την ευαισθητοποίηση του κοινού απέναντι στην τεχνολογία και στα οφέλη της. Η αύξηση της εμπιστοσύνης ως προς τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα μπορούσε να αυξήσει τη δεκτικότητα των πελατών σε αυτήν την καινοτόμο τεχνολογία. Έως σήμερα έχουν ήδη αναπτυχθεί πολλά προϊόντα διατροφής, που χρησιμοποιούν τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως, μεταξύ άλλων, δομές σοκολάτας, πουρέ με λαχανικά, μπισκότα, φαγητά για άτομα με δυσφαγία, μπάρες δημητριακών και πίτσα, (Severini et al, 2016).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση των τροφίμων μπορεί να προκαλέσει μερικά οφέλη για το μέλλον των τροφίμων, καθώς μέσω αυτής θα μπορέσει να υπάρξει αύξηση της βιωσιμότητας του κρέατος με τη χρήση βλαστοκυττάρων και εναλλακτικών βιολογικών συστατικών αλλά και μείωση της σπατάλης τροφίμων, εκτυπώνοντας μόνο την ποσότητα του φαγητού που χρειάζεται και χρησιμοποιώντας τρόφιμα που κανονικά θα απορρίπτονταν, όπως τα μελανιασμένα μήλα (Berman, 2012). Για να μπορέσουν όμως να συμβάλλουν θετικά τα οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην βιομηχανία τροφίμων αλλά και στο περιβάλλον, οι καταναλωτές πρέπει να την αποδεχθούν σαν μέθοδο επεξεργασίας τροφίμων. Έτσι, η νεοφοβία, ο φόβος δηλαδή των καταναλωτών να δοκιμάσουν νέα τρόφιμα, (Pliner & Hobden, 1992), καθώς και ο φόβος για τη νέα τεχνολογία (Brunner et al, 2018) και η ανησυχία για την ασφάλεια των προϊόντων διατροφής πρέπει να αντιμετωπιστεί. Επί του παρόντος, η κύρια στάση των καταναλωτών, ως προς την τρισδιάστατη εκτύπωση των τροφίμων, είναι η αποστροφή και η βασική ανησυχία τους αφορά την υγιεινή, λόγω της χρήσης εκτυπωτή για την παραγωγή φαγητού (Lupton & Turner, 2018).

Η υφή είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την αποδοχή ενός τροφίμου από τους καταναλωτές, το οποίο επηρεάζεται από τη συμβατική τους αντίληψη για τα τρόφιμα και την άποψή τους για την παραγωγή του τροφίμου. Έτσι, η αντίληψη για αυτή τη νέα τεχνολογία θα μπορούσε να αποτελέσει εμπόδιο για τους καταναλωτές να αποδεχθούν

τρισεδιάστατα εκτυπωμένα τρόφιμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί πιο πάνω. Οι McCluskey, Kalaitzandonakes και Swinnen (2016) διενήργησαν μια εκτενή ανασκόπηση σχετικά με την εφαρμογή μιας νέας τεχνολογίας για την παραγωγή τροφίμων και την επιρροή της στη συμπεριφορά των καταναλωτών και στις αντιλήψεις του κοινού με βάση την κάλυψη των μέσων ενημέρωσης. Ζητήματα όπως λανθασμένες αντιλήψεις, έλλειψη γνώσης και αρνητική στάση βρέθηκαν να είναι μειονεκτήματα στην αποδοχή των νέων τεχνολογιών παραγωγής τροφίμων από τους καταναλωτές. Ωστόσο, οι McCluskey et al (2016) τόνισαν ότι η προληπτική διάδοση της γνώσης και η καθιέρωση αξιόπιστων εκθέσεων από αξιόπιστες πηγές (επιστήμονες, εταιρείες) θα μπορούσαν να οδηγήσουν στο ξεπέρασμα της αντίληψης των καταναλωτών για τον κίνδυνο, όσον αφορά τις νέες τεχνολογίες τροφίμων (McCluskey et al, 2016).

Η μελέτη των Tiffany et al διερεύνησε τη στάση των καταναλωτών απέναντι στην τρισεδιάστατη εκτύπωση τροφίμων μετά την κατανάλωση ενός μπισκότου που χαρακτηρίστηκε ως μπισκότο με ετικέτα «τρισεδιάστατα εκτυπωμένο». Οι συμμετέχοντες (n = 133) αξιολόγησαν πρώτα δύο μπισκότα (το συμβατικό και το "3D printed") με χρήση "υποκειμενικής" (hedonistic) κλίμακας και με ερωτηματολόγιο. Στη συνέχεια ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να απαντήσουν σε ερωτήσεις της έρευνας και να σχολιάσουν ανοιχτά την διαδικασία της τρισεδιάστατης εκτύπωσης μετά την κατανάλωση του «3D printed» μπισκότου. Οι συμμετέχοντες ήταν πρόθυμοι να φάνε τρισεδιάστατα εκτυπωμένα τρόφιμα και ένιωθαν ότι ήταν βιώσιμα. Τα σχόλια των καταναλωτών, ως προς την αποδοχή των 3D τροφίμων, εστίαζαν σε ορισμένα εμπόδια, μεταξύ των οποίων ήταν η απέχθεια και η ασφάλεια. Τα ευρήματα έδειξαν ότι οι συμμετέχοντες φοβούνται λιγότερο τις νέες τεχνολογίες, εάν έχουν θετική εμπειρία με ένα τρόφιμο που παράγεται από αυτή την τεχνολογία. Επίσης, έδειξαν ότι εάν οι καταναλωτές έχουν θετική εμπειρία από ένα προϊόν με τρισεδιάστατη εκτύπωση (αξιολογείται με χρήση υποκειμενικής κλίμακας), έχουν στη συνέχεια θετική στάση γενικά απέναντι στην τρισεδιάστατη εκτύπωση.

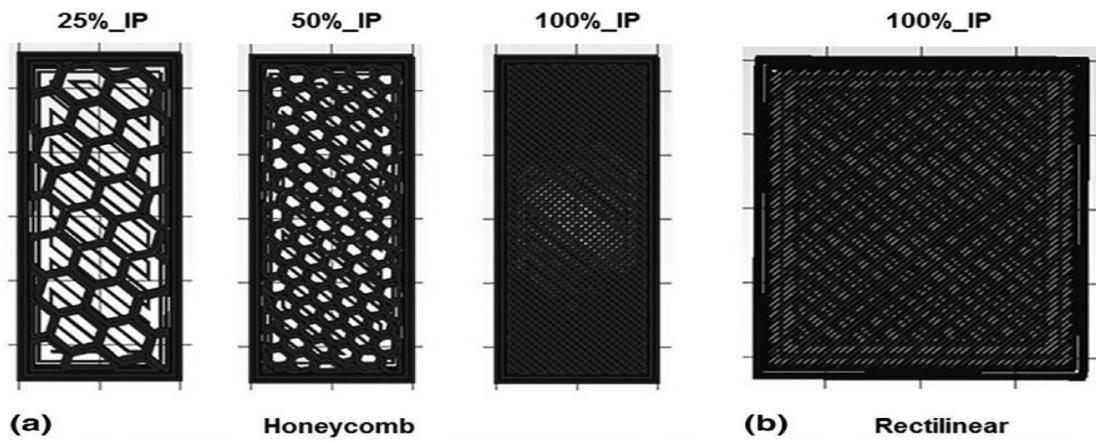


Εικόνα 13 Το συμβατικό μπισκότο (α) και το «3D printed» μπισκότο (β) (Manti hal et al, 2019)

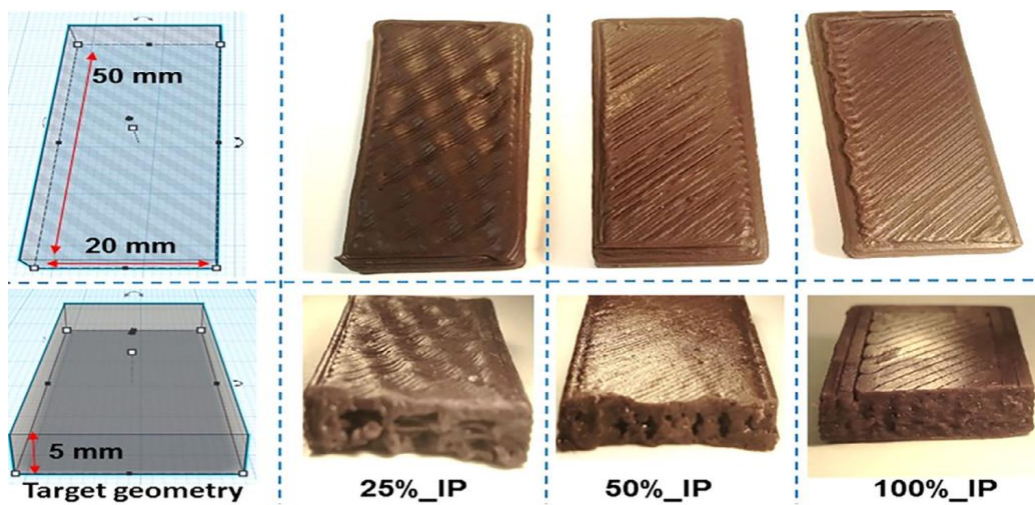
Η μελέτη των Sylvester et al είχε ως στόχο να αξιολογήσει τις προτιμήσεις των καταναλωτών και τις αντιλήψεις τους για την τροποποιημένη υφή της τρισδιάστατης (3D) εκτυπωμένης σοκολάτας μέσω τριών μέτρων: δύο δοκιμές γεύσης και μία έρευνα. Στην πρώτη δοκιμή, 30 ημεκπαιδευμένοι συμμετέχοντες κατέταξαν τη συνολική προτίμησή τους μεταξύ των τριών δειγμάτων σοκολάτας που τυπώθηκαν σε σχήμα κυψέλης σε διάφορα ποσοστά πλήρωσης 25, 50 και 100% και σε διαστάσεις (20 mm × 50 mm και πάχος 5 mm). Οι συμμετέχοντες στο πάνελ ταξινόμησαν τα δείγματα με βάση την εμφάνιση και τη σκληρότητα.

Στη δεύτερη δοκιμή, οι ίδιοι συμμετέχοντες όρισαν μια προτίμηση μεταξύ ενός δείγματος τρισδιάστατης εκτύπωσης 100% πλήρωσης και διαστάσεων (43,5 mm × 35,5 mm και 5 mm πάχος) και ενός εμπορικού δείγματος σοκολάτας. Η δοκιμή έδειξε ότι δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στις συνολικές προτιμήσεις για τη σκληρότητα, αν και οι συμμετέχοντες προτίμησαν σημαντικά την εμφάνιση δειγμάτων με 25 και 50% έναντι της πλήρωσης 100%. Επιπλέον, δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στην προτίμηση μεταξύ των δειγμάτων του εμπορίου και του εκτυπωμένου με 100% πλήρωση. Τα δεδομένα υφής των δειγμάτων σοκολάτας έδειξαν ότι απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για να σπάσουν τα δείγματα σοκολάτας, καθώς η πλήρωση αυξήθηκε από 25% ($20,4 \pm 1,1$ N) σε 100% ($54,4 \pm 1,5$ N). Επίσης, η τρισδιάστατη εκτυπωμένη σοκολάτα (εκτυπωμένη σε 100% πλήρωση) βρέθηκε να είναι λιγότερο σκληρή από αυτή της σοκολάτας του εμπορίου.

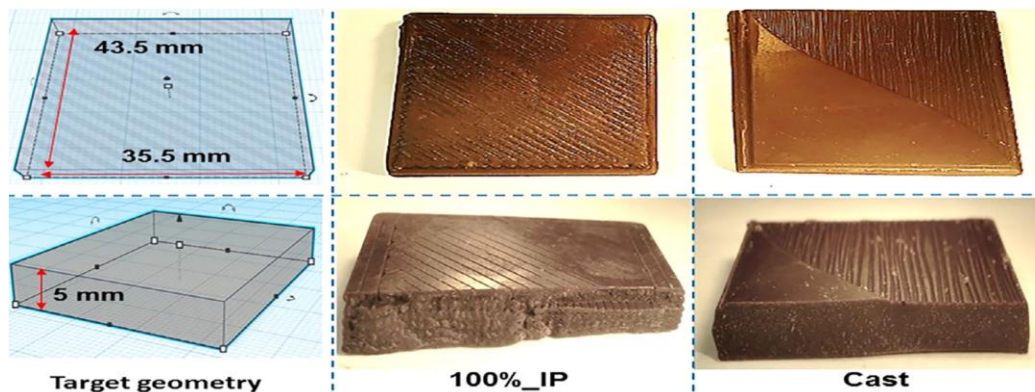
Στην έρευνα για τις αντιλήψεις των καταναλωτών συμμετείχαν συνολικά 244 άτομα, τα οποία, μέσω ενός ερωτηματολογίου, αξιολόγησαν τα δείγματα για τον περίπλοκο σχεδιασμό και την πρωτότυπη ιδέα της τεχνολογίας. Ενώ μεταξύ αυτών των συμμετεχόντων υπήρχε μια γενική επίγνωση της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης, πολλοί εντυπωσιάστηκαν με την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη σοκολάτα, καθώς αυτή ήταν η πρώτη φορά που την έβλεπαν. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αισθητηριακές δοκιμές και την έρευνα καταναλωτών παρείχαν μια χρήσιμη εικόνα για την αντίληψη των καταναλωτών για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων και τον σχεδιασμό των 3D προϊόντων. Αυτή η ευαισθητοποίηση θα είναι επωφελής για την προώθηση αυτής της τεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων (Mantihal et al., 2019).



Εικόνα 16 Τρισδιάστατα σχέδια μοντέλων για εκτυπωμένη σοκολάτα σε ορθογώνιο σχήμα (Mantihal et al 2019):
 (α) Μοντέλο 1 με σχήμα κυψέλης και βαθμό πλήρωσης 25, 50 και 100% και διαστάσεις (20 mm × 50 mm & πάχος 5 mm)
 (β) Μοντέλο 2 σε ευθύγραμμο σχέδιο με 100% ποσοστό πλήρωσης και διαστάσεις (43,5 mm × 35,5 mm & 5mm πάχος)



Εικόνα 17: Αντιπροσωπευτικές εικόνες εκτυπωμένης τρισδιάστατης σοκολάτας σε διαστάσεις 20x50x5 και με βαθμό πλήρωσης 25, 50 και 100% πλήρωση (Mantihal et al, 2019)



Εικόνα 18 Αντιπροσωπευτικές εικόνες εκτυπωμένης τρισδιάστατης σοκολάτας (διαστάσεις 43,5 mm × 35,5 mm και 5mm πάχος και βαθμό πλήρωσης 100%) και σοκολάτας του εμπορίου.

3.5 Μελλοντικές πληροφορίες

Αφού ελέγχονται η ρεολογία και οι μηχανικές ιδιότητες, η μετεπεξεργασία των τυπωμένων τροφίμων πρέπει να μελετηθεί σε βάθος για να ολοκληρωθεί η διαδικασία, παρόλο που δεν απαιτείται για όλους τους τύπους τυπωμένων τροφίμων. Η ρεολογία έχει άμεσο αντίκτυπο στη μετεπεξεργασία, επειδή η τυπωμένη δομή πρέπει να διατηρεί το σχήμα της σε όλη τη διαδικασία, αλλά έχει επίσης αντίκτυπο στην τελική υφή του δείγματος τροφής. Από αυτή την άποψη, μια νέα έρευνα περιγράφει μια τεχνική εκτύπωσης πολλαπλών υλικών με ταυτόχρονη υπέρυθρη «μαγειρική».

Για να διαχειριστούν οι επιστήμονες με ακρίβεια τη διανομή της θερμότητας στο υλικό των τροφίμων κατασκεύασαν ένα σύστημα θέρμανσης με υπέρυθρη λάμπα στον εκτυπωτή. Αφού δημιούργησαν τον εκτυπωτή, δοκίμασαν πολλά συστατικά τροφίμων σε διάφορες θερμοκρασίες θερμικής επεξεργασίας, με επιτυχή αποτελέσματα για τη διαδικασία εκτύπωσης-μαγειρέματος (Hertafeld et al, 2019). Παρόλο που αυτή είναι μια προσέγγιση αιχμής για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων και μαγειρικής, διάφοροι συγγραφείς έχουν ερευνήσει εναλλακτικές, μη ταυτόχρονες μεθόδους μετεπεξεργασίας, όπως το ψήσιμο (Pulatsu et al., 2020), το τηγάνισμα στον αέρα και άλλα (Feng et al, 2020). Έχει γίνει σε βάθος έρευνα, σχετικά με την αξία της μετεπεξεργασίας στην τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων (Ma & Zhang, 2022).

Η ιδέα της 4D εκτύπωσης έχει επίσης κερδίσει δημοτικότητα. Ερεθίσματα όπως το νερό, η θερμότητα, το φως ή το pH μπορούν να τροποποιήσουν χαρακτηριστικά, όπως το σχήμα, την υφή, τη γεύση και το θρεπτικό μακιγιάζ (Teng et al., 2021). Μερικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση 4D, με σκοπό να επιφέρουν αλλαγές, περιλαμβάνουν πηκτώματα αμύλου, συστήματα υδρογέλης και απομονωμένη πρωτεΐνη σόγιας. Η μετεπεξεργασία είναι απαραίτητη σε ορισμένες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, σε έρευνα των He et al (2020), μετά από αφυδάτωση με μικροκύματα, ο πουρές με βάση το άμυλο γλυκοπατάτας άλλαξε αυθόρμητα το σχήμα του (He et al, 2020).

Τέλος, οι μελλοντικές γνώσεις πρέπει να ευθυγραμμιστούν με την αποδοχή των προϊόντων διατροφής με τρισδιάστατη εκτύπωση από τους καταναλωτές, μαζί με τα διατροφικά οφέλη που μπορούν να αποκτήσουν. Υπάρχει ακόμη ένα κενό που πρέπει να καλυφθεί από αυτή την άποψη, επειδή μόνο λίγα έργα έχουν επικεντρωθεί σε αυτό (Manstan & McSweeney, 2020). Η συντριπτική πλειονότητα άρχισε να χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων ως νέα τεχνική κατασκευής με υψηλό βαθμό καινοτομίας, ενώ παραμελεί κρίσιμες πτυχές που είναι σημαντικές για τον καταναλωτή.

Έχει αναφερθεί ότι οι καταναλωτές τείνουν να απορρίπτουν τις νέες τεχνολογίες εάν τις συσχετίζουν με κινδύνους για την υγεία ή εάν πιστεύουν ότι ενδέχεται να παραχθούν επιβλαβή υποπροϊόντα. Από την άλλη πλευρά, τα πλεονεκτήματα για την υγεία και οι καλύτερες αισθητηριακές ιδιότητες αυξάνουν την αποδοχή των καταναλωτών (Manstan & McSweeney, 2020). Υπό αυτή την έννοια, μία από τις πιο σημαντικές χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο μέλλον είναι η προσαρμοσμένη διατροφή. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, μπορούν να παραχθούν μοναδικές γεύσεις, θρεπτικό περιεχόμενο, σχήματα, υφές κ.λπ.

Κεφάλαιο 4 - 3D εκτύπωση και Βιώσιμη Οικονομία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση εκτιμάται ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην προσφορά απτών και εμπορικών οφελών στις αλυσίδες εφοδιασμού. Το 3DP των τροφίμων αναμένεται να βοηθήσει στον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων διατροφής, στη μείωση της σπατάλης και στην αύξηση της ποικιλίας των τροφίμων. Παρά τις τεράστιες δυνατότητες του 3DP τροφίμων, η υιοθέτηση βρίσκεται ακόμα στο αρχικό στάδιο.

Οι συζητήσεις για τη βιωσιμότητα της ιδέας της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων κινούνται γύρω από την αρχή της υιοθέτησής της στην αγορά. Όταν η τεχνολογία τεθεί σε βιώσιμα θεμέλια, οι δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων μπορεί να αξιοποιηθούν πλήρως, συνδέοντας την προθυμία για χρήση και τα οφέλη που προκύπτουν από αυτήν.

Το πρωταρχικό μέλημα για τους ερευνητές και τους επαγγελματίες είναι πώς η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων μπορεί να είναι βιώσιμη, προκειμένου να δημιουργηθεί μια επιχείρηση που μπορεί να αναπαραχθεί στον κλάδο επειδή είναι πρωτοφανής στον τομέα των τροφίμων. Για να κατανοήσουμε καλύτερα πώς μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία αυτή υπάρχει ανάγκη να κατανοήσουμε τι είδους εργαλεία ορίζονται για την αξιολόγηση και τη διασφάλιση της βιωσιμότητας του συστήματος των επιχειρήσεων των εταιρειών που υιοθετούν τρισδιάστατους εκτυπωτές τροφίμων, συνολικά σε μικρής κλίμακας παραγωγή. Προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως όχι μόνο το τρέχον επίπεδο των μελετών αιεφορίας για τη τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά και να τεθούν οι βάσεις για ένα πλαίσιο και μοντέλο βιωσιμότητας, καθώς και για περαιτέρω μελέτη σχετικά με το θέμα, τα ευρήματα προορίζονται να εξετάσουν σε μεγάλο βαθμό τις προοπτικές βιωσιμότητας του 3DFP.

Η Έκθεση Brundtland για το WCED, που δημοσιεύτηκε το 1987, καθιέρωσε έναν ευρέως αποδεκτό ορισμό της βιωσιμότητας ως «ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες» (Terfansky & Thangavelu, 2013).

Οι Dabbene, Ramundo και Terzi παρουσίασαν το 2017 ένα οικονομικό μοντέλο για την αξιολόγηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων (Dabbene et al., 2018), όπου προσδιόρισαν τρεις κύριες πτυχές που πρέπει να εξεταστούν από οικονομική άποψη :

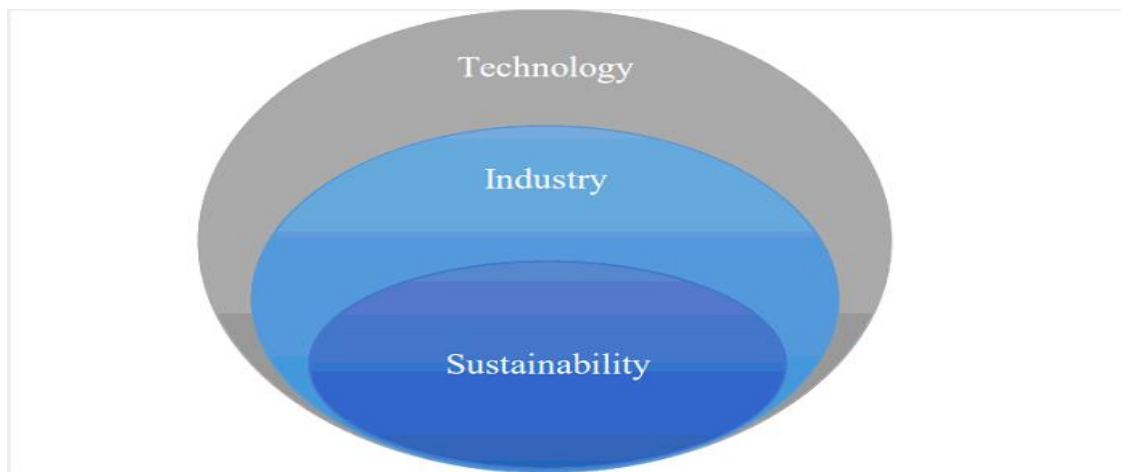
- Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων βρίσκεται ακόμη σε βρεφικό στάδιο και απαιτεί συνεχή αξιολόγηση της εμπορικής βιωσιμότητάς της.

- Τα συστατικά των τροφίμων και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να υποστούν προεπεξεργασία, από την άποψη των πρώτων υλών, αλλά και επεξεργασία για την παρουσίαση και την κατανάλωση του γεύματος, μπορεί να έχουν σημαντική κοινωνική επιρροή και να επηρεάσουν τη διάδοση της τεχνολογίας.
- Οι νέες δεξιότητες που χρειάζεται ο τομέας των τροφίμων για να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες του 3DFP.

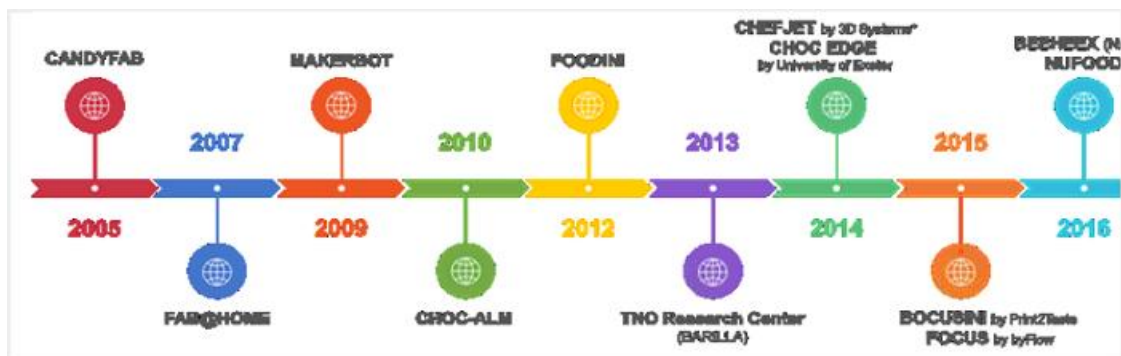
Τέλος, θεώρησαν την ανάγκη μιας μελλοντικής έρευνας σχετικά με τη βιωσιμότητα του 3DFP ως κύριο κενό στη βιβλιογραφία.

4.1 Σύγχρονα ευρήματα για την 3Dprinting τεχνολογία και την βιωσιμότητα

Πρόσφατα, το 3DFP, το οποίο έχει εκθετικά αυξανόμενη δημοτικότητα και πειράματα προσαρμογής, άρχισε να γίνεται ελκυστικό για ανάπτυξη στην αγορά.



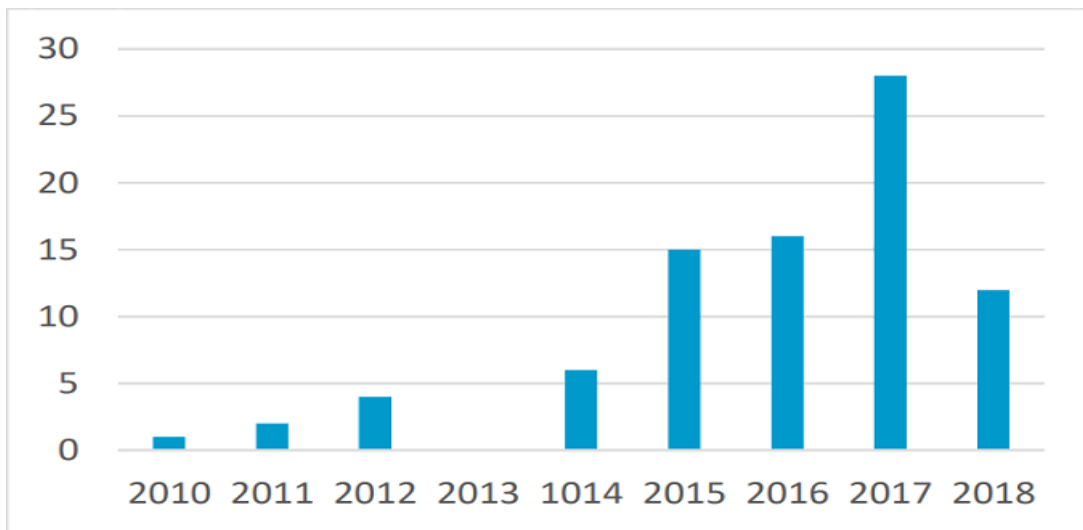
Εικόνα 20 Σχέση της βιωσιμότητας με άλλες πτυχές (Otcu et al, 2019)



Εικόνα 21 Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης 3D εκτυπωτών (Otcu et al, 2019)

Από αυτή την άποψη, η συνδυασμένη αξία των οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών πτυχών αναμένεται να δημιουργήσει μια εκθετική ώθηση σε έναν ταχέως εξελισσόμενο κόσμο στο πλαίσιο μιας βιώσιμης κατανόησης. Το εύρος των πρακτικών που προκλήθηκαν σε εργαστηριακό επίπεδο, εξαπλώθηκε από δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης σε εστιατόρια και καταστήματα ζαχαροπλαστικής, ακόμη και για διαστημικές αποστολές και στρατιωτικές αποστολές (Kohtala & others, 2016), που βασίζονται στο ευρύ φάσμα της δυνατότητας εκτύπωσης τροφίμων, που εδραιώνει τη σειρά βιωσιμότητας.

Κατά την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας από τους Gulsen Bedia Otcu et al, μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν, σε σχέση με την τεχνολογία 3DFP και την τρισδιάστατη εκτύπωση και τη βιωσιμότητα, 278 πηγές. Μετά από τη διαδικασία ανάλυσης αυτών, εξετάστηκαν 214 πηγές, οι οποίες περιλαμβάνουν 152 επιστημονικές εργασίες, συνολικά για τις τεχνολογικές εξελίξεις. Από αυτές μελέτησαν τις 147 πιο λεπτομερώς, λόγω χρονολογίας (μεταξύ 2010 έως και σήμερα). Το χρονικό διάστημα που έχει ληφθεί υπόψη είναι από το 2010 έως το 2018, ένα διάστημα που υποδηλώνει την τάση για αύξηση των επιστημονικών ερευνών.



Εικόνα 22 Ακαδημαϊκές έρευνες για την 3D τεχνολογία ανά έτος

4.2 Σύγχρονες προσεγγίσεις και μέθοδοι για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων και την βιωσιμότητα

Καθώς δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες βιωσιμότητας για το 3DFP, ο περιορισμένος αριθμός μελετών, σχετικά με τη βιωσιμότητα στην τρισδιάστατη εκτύπωση ή την κατασκευή πρόσθετων, έχει αξιολογηθεί για εφαρμογές εκτός τροφίμων (Jia et al, 2016),

(Despeisse & Ford, 2015) σε μια ευρύτερη αναζήτηση. Οι υπάρχουσες μεθοδολογίες και προσεγγίσεις των ερευνητών έχουν συνοψιστεί με τις αξιολογήσεις στην έκταση του 3DFP.

Η χαρτογράφηση ροής της αξίας που περιλαμβάνει σύνολο μετρήσεων για την αξιολόγηση όχι μόνο της οικονομικής απόδοσης αλλά και της περιβαλλοντικής και κοινωνικής βιωσιμότητας μιας γραμμής παραγωγής (Jiang et al, 2017) με τις μετρήσεις για την αξιολόγηση της κατανάλωσης νερού διεργασίας, της χρήσης πρώτων υλών, της κατανάλωσης ενέργειας, των πιθανών κινδύνων που αφορούν το εργασιακό περιβάλλον και τη σωματική εργασία που κάνουν οι εργαζόμενοι.

Η μελέτη των Guisen et al περιλαμβάνει τρεις διαστάσεις της βιωσιμότητας και την οπτικοποίηση των διαδικασιών παραγωγής. Ωστόσο, η γνώση σχετικά με την λιτή κατασκευή των εκτυπωτών τροφίμων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν η ωριμότητα της αγοράς βρίσκεται σε πρώιμα στάδια για την εφαρμογή πρακτικών συνεχούς βελτίωσης στον τομέα 3DFP.

Η αξιολόγηση, με βάση την προσομοίωση, αντικατοπτρίζει ξεκάθαρα την εφαρμογή του 3DFP στην αγορά, ωστόσο στη μέθοδο αυτή πρέπει να συμπεριληφθούν οι περιβαλλοντικές, κοινωνικές ή άλλες παράμετροι για να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη ιδέα, εκτός από την ανάγκη για δεξιότητες εικονικής προσομοίωσης.

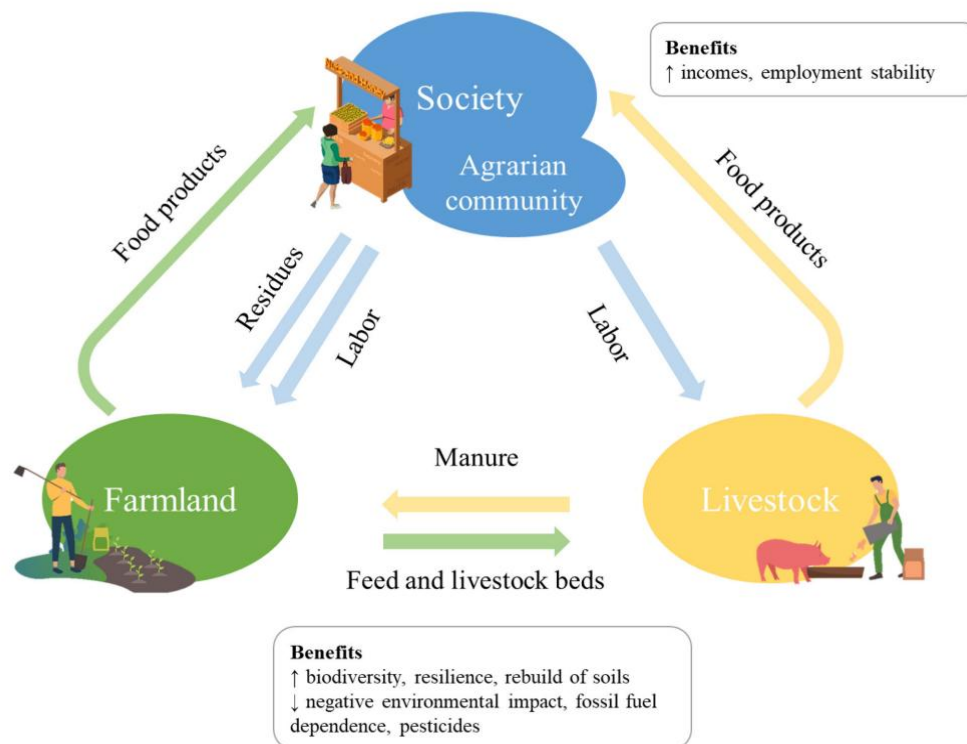
Η μέθοδος Delphi είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία (LeBourhis et al, 2014). Οι ερευνητές προέβλεψαν τις οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης για το 2030, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Delphi, μια διαδραστική τεχνική πρόβλεψης πολλαπλών σταδίων που περιλαμβάνει πολύπλοκους παράγοντες. Για την έννοια της βιωσιμότητας, ωστόσο, μπορεί να απαιτηθεί μια μεγάλη ομάδα ειδικών. Η διαδικασία αξιολόγησης του κύκλου ζωής συχνά στερείται μιας προοπτικής βιωσιμότητας και περιλαμβάνει προκλητικές αντισταθμίσεις μεταξύ ειδικότητας και βάθους και κατανόησης και εφαρμογής (Brundtland, 1987). Τα ευρήματα δείχνουν πόσο απλή είναι η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής διάστασης, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση αξιολόγησης του κύκλου ζωής, αλλά όπως σημείωσαν οι ερευνητές απαιτείται μια πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία για μια ενδεδειγμένη αξιολόγηση ως προς τις οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις.

Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής χωρίζεται στις ακόλουθες φάσεις:

- Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της αξιολόγησης. Στόχος της αξιολόγησης είναι για να γίνει σύγκριση με άλλες υποθετικές περιπτώσεις.

- Απογραφή των ροών (εισροών και εξόδων) για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα.
- Εκτίμηση επιπτώσεων, η οποία χωρίζεται σε ταξινόμηση, χαρακτηρισμό, αποτίμηση και ανάλυση βελτίωσης.
- Ερμηνεία του προφίλ επιπτώσεων, σύμφωνα με τον καθορισμένο στόχο και το πεδίο εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης μιας ανάλυσης ευαισθησίας.

Επίσης, εξίσου σημαντικό να τονιστεί είναι ότι η βάση της μεθοδολογίας προσφέρει τη δυνατότητα βιώσιμης παραγωγής προσθέτων (Elkington & Rowlands, 1999). Η ανάγκη για νέες δεξιότητες και εις βάθος γνώση για την εφαρμογή της ιδέας θέτει πιθανά εμπόδια για τους χρήστες εκτυπωτών τροφίμων παρά την ισχυρή βάση και την οπτικοποίηση της.



Εικόνα 23 Σχηματική αναπαράσταση της αγροοικονομίας και της σχέσης μεταξύ της πρωτογενούς παραγωγής και του ευρέως κοινού (Otcu et al, 2019)

4.3 Παράμετρος του περιβάλλοντος

Η περιβαλλοντική και βιώσιμη διαχείριση περιλαμβάνει την υιοθέτηση βιώσιμων διαδικασιών. Ο κύριος στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι οι οικονομικές δραστηριότητες, που περιλαμβάνουν βιομηχανικές διεργασίες, δεν θα υποβαθμίσουν το περιβάλλον, ενώ

ταυτόχρονα δεν θα ζημωθεί και η παραγωγή. Στη βάση αυτή, η αύξηση της παραγωγικότητας, η μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών και ενέργειας, η εμφύτευση εφικτών επενδύσεων στην τεχνολογία, η αύξηση της ανταγωνιστικότητας ή η βελτίωση της απόδοσης, είναι παράμετροι που συμμετέχουν στην ανάλυση. Παράλληλα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η εστίαση στο περιβαλλοντικό κόστος είναι δυνατό να αποκομίσει οφέλη. Είναι, επομένως, χρήσιμο να εκπονηθούν αναλύσεις και μελέτες με δείκτες που θα δείχνουν τα κέρδη στους επενδυτές και στα ενδιαφερόμενα μέρη της εταιρείας. Η δράση στο οικονομικό περιβάλλον της εταιρείας συνήθως δίνει βελτιώσεις στον οικονομικό τομέα. Για παράδειγμα, η σύνδεση της περιβαλλοντικής διαχείρισης με το εμπορικό τμήμα είναι ένας τρόπος δράσης από κοινωνική άποψη. Πρώτα απ' όλα, η εικόνα της εταιρείας βελτιώνεται όταν οι διαδικασίες της σέβονται το περιβάλλον. Οι πολίτες συνήθως εκτιμούν το γεγονός ότι κάποια εταιρεία σέβεται τον αέρα και φροντίζει για τη μείωση της ρύπανσης, Έτσι, οι πελάτες και οι επενδυτές θα ενδιαφέρονται περισσότερο να ξοδέψουν τα χρήματά τους στη συγκεκριμένη εταιρεία.

Μελετώντας το κόστος του περιβαλλοντικού συστήματος, ο αντίκτυπος που προκύπτει από μια εταιρεία θα μπορούσε να έχει δύο εκδοχές:

- μείωση ή αποφυγή ρύπων
- συνέχιση χωρίς λήψη αποφάσεων

Το δεύτερο προκαλεί συχνά ζημιά στο περιβάλλον και κατά συνέπεια έχει αρνητικό κοινωνικό αντίκτυπο. Στη συνέχεια, το κόστος θα αυξηθεί, λόγω της νομοθεσίας που συνήθως τιμωρεί τη ρύπανση που υπερβαίνει το καθορισμένο όριο. Είναι εφικτό μια εταιρεία να επιλέξει την πρώτη περίπτωση και τον εξοπλισμό που θα συμβάλει στο να βελτιωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, με αποτέλεσμα να βελτιωθεί έτσι και το οικονομικό της εσωτερικό όφελος.

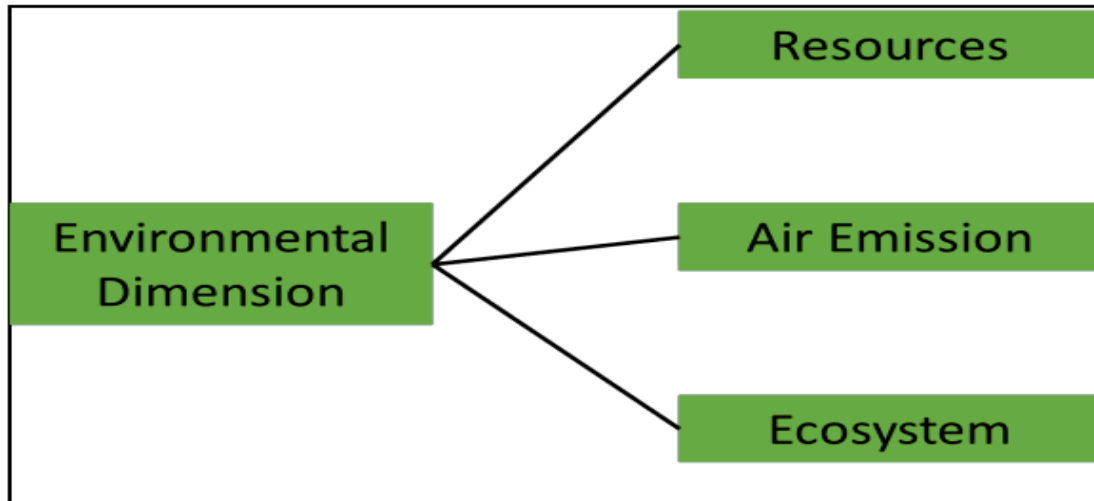
Λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές προκλήσεις, η ταχύτητα εκτύπωσης είναι και παράμετρος που επηρεάζει και επηρεάζεται από τους άξονες κίνησης της εκτύπωσης και την ποσότητα φαγητού που εναποτίθεται (Severini et al, 2018). Επομένως, επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Στην τεχνολογία 3DP, όταν πρόκειται να παραχθούν εξατομικευμένα και πολύπλοκα προϊόντα, η απαίτηση πόρων παρουσιάζει λιγότερο αποτύπωμα άνθρακα και λιγότερα παραγόμενα απόβλητα, σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, γεγονός το οποίο την καθιστά περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον (Kellens et al, 2017). Η μειωμένη σπατάλη τροφίμων μπορεί, επίσης, να

οδηγήσει σε αποδοτικότητα των πόρων, όπως στη μείωση της ανάγκης για διαθέσιμο έδαφος και στη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Ειδικότερα, η παραγωγή σε μικρές παρτίδες αυξάνει την εστίαση στη διαδικασία, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη χρήση υλικών, η οποία σταθεροποιεί την παροχή τροφίμων και την ποιότητα του περιβάλλοντος (Dabbene et al, 2018).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων έχει την δυνατότητα να ενθαρρύνει την τοπική παραγωγή και τη χρήση των τοπικών πόρων μαζί με ένα νέο απλό αλλά προσαρμόσιμο επιχειρηματικό μοντέλο, αναζωογονώντας την περιφερειακή οικονομία και τη παραγωγικότητα. Υπό το πρίσμα των αναδιαρθρώσεων της αλυσίδας της αξίας, η μετατόπιση των αλυσίδων εφοδιασμού, για να γίνουν πιο σύντομες και ανταποκρινόμενες, έχει το μεγαλύτερο όφελος για το περιβάλλον (Faludi et al, 2015).

Η επιλογή πρώτης ύλης επηρεάζει τη βιωσιμότητα του AM. Στην πραγματικότητα οι διαδικασίες παραγωγής τρισδιάστατων εκτυπωτών (παραγωγή ανταλλακτικών, πλαστικών αντικειμένων κ.λπ.), και η εξώθηση πλαστικών νημάτων, η τήξη και οι διαδικασίες εκτύπωσης προκαλούν Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOC) και σωματίδια (PM) που είναι δυνητικά επιβλαβή για την υγεία και το περιβάλλον (Faludi et al, 2015). Το 3DFP δεν προκαλεί εκπομπές ρύπων κατά το στάδιο της εκτύπωσης και, επομένως, η εκτύπωση τροφίμων εξαλείφει την πιθανότητα αρνητικών επιπτώσεων. Οι υγιείς ζωές και το 3DFP σχετίζονται. Ξεκινώντας από το αγρόκτημα, οι βιολογικές και κυρίως φυτικές πρώτες ύλες τροφίμων έχουν προωθηθεί, καθώς έχουν χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα. Η Jet-at, για παράδειγμα, παράγει μπριζόλες κρέατος φυτικής προέλευσης, με πολύ χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα και νερού, σε σύγκριση με τις μπριζόλες που παράγονται από το ζωικό κρέας (Otcu et al, 2019). Τα εναλλακτικά τρόφιμα είναι επίσης κρίσιμα και συμβάλλουν στο να ξεπεραστούν οι προκλήσεις της εξάρτησης από τους πόρους, καθώς το 3DFP επιτρέπει την παραγωγή βρώσιμων γευμάτων από έντομα, ως νέα πηγή πρωτεϊνών, προσθέτοντας νέα βρώσιμα τρόφιμα στα μενού, με χαμηλές εκπομπές άνθρακα.

Ενώ η ποιότητα των προϊόντων διατροφής εξαρτάται περισσότερο από τη διαδικασία παραγωγής παρά από τις δεξιότητες του χειριστή (Dabbene et al, 2018), η



Εικόνα 24 Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες απαρτίζονται από τις διαθέσιμες πηγές, την εκπομπή αερίων και το οικοσύστημα (Ramundo et al 2020)

αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εκτύπωσης επηρεάζεται έντονα από το επίπεδο επαγγελματισμού του χειριστή. Οι δεξιότητες του χειριστή είναι, επομένως, απαραίτητες για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αποφεύγοντας επαναλαμβανόμενες, άσκοπες ή αναποτελεσματικές ενέργειες για τη ροή υλικών και ενέργειας, τόσο στις διαδικασίες επέκτασης αρχείων όσο και στις διαδικασίες εκτύπωσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων μπορεί να εξαλείψει ορισμένες δραστηριότητες και επιμέρους δραστηριότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η σκέψη του κύκλου ζωής μετατρέπεται, από μεθοδολογική σκοπιά, σε στρατηγική διευκόλυνσης για την αποφυγή του αντίκτυπου ως μεταβαλλόμενου δείκτη κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, ενώ μετράται ο αντίκτυπος που προκαλείται από τη μειωμένη αλυσίδα εφοδιασμού.

4.4 Κοινωνική παράμετρος

Η ανάπτυξη κοινωνικού μοντέλου βασίστηκε στην ανάλυση των ενδιαφερομένων και στις μεθοδολογίες SIA (Social Impact Assessment - Εκτίμηση Κοινωνικού Αντίκτυπου). Η διαδικασία ανάλυσης των κοινωνικών προκλήσεων εντός του συστήματος τροφίμων έχει ξεκινήσει. Ο κοινωνικός αντίκτυπος της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων έχει εξεταστεί προσεκτικά, με έμφαση στην υιοθέτηση της τεχνολογίας και τις κοινωνικές επιπτώσεις της. Οι μελλοντικές τάσεις έχουν επίσης συνδεθεί με τη χρήση της τεχνολογίας. Η επιστήμη, τα κίνητρα καταναλωτών, οι τάσεις των επιχειρήσεων τροφίμων και οι παγκόσμιες ανησυχίες

έχουν ενσωματώσει και την κοινωνική διάσταση, προσφέροντας ένα ευρύ φάσμα στοιχείων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ανάλυση των ενδιαφερομένων έδωσε μια σαφή και δομημένη βάση για τον προσδιορισμό κοινωνικών δεικτών που αντιπροσωπεύουν όχι μόνο τους καταναλωτές αλλά όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς και τις συμπεριφορές τους.

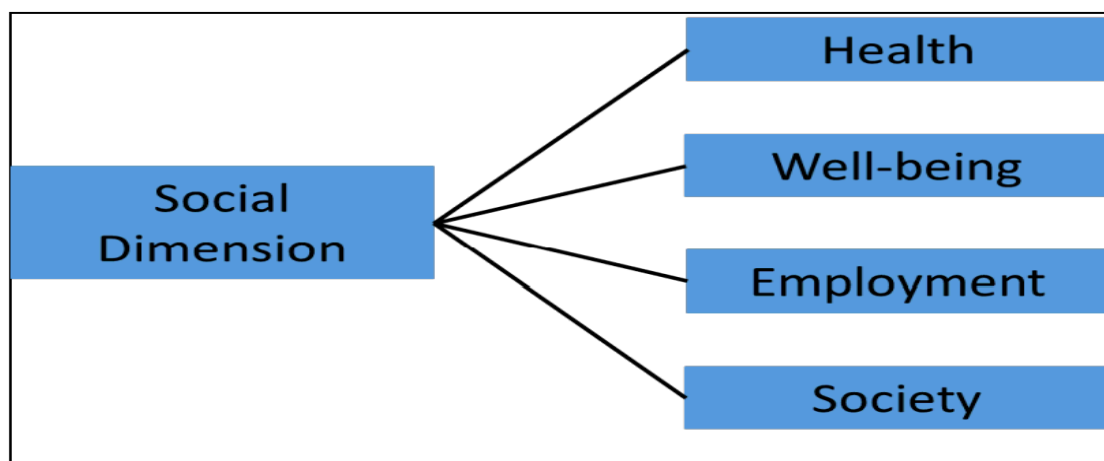
Αυτή η νέα προοπτική ενίσχυσε τη διασύνδεση των δεικτών. Το SIA επιτρέπει την εξέταση των κοινωνικών αποτελεσμάτων σε βραχυχρόνιο και μακροχρόνιο επίπεδο, όπως και στο τελικό αντίκτυπο. **Πιο συγκεκριμένα, κοινωνικές επιπτώσεις μπορεί να προκύψουν στις δεξιότητες, τις γνώσεις, τις συνθήκες διαβίωσης, τις αξίες, την κατάσταση των ανθρώπων.**

Οι κατηγορίες άμεσου αντίκτυπου του κοινωνικού υπομοντέλου έχουν προσδιοριστεί από τη γνώση που συγκεντρώθηκε από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, το εύρος των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης, τις γνώσεις από την ανάλυση των ενδιαφερομένων μελών και τις εκθέσεις των διεθνών οργανισμών για τη δημιουργία ενός τυποποιημένου πλαισίου για την ποιοτική αξιολόγηση του κοινωνικού πυλώνα.

Σύμφωνα με αναφορές, μετά τη δημιουργία του περιεχομένου των δεικτών, αναπτύσσεται ένα διάγραμμα σχέσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις κοινωνικές επιπτώσεις του πλέγματος του συστήματος.

Οι ακόλουθες κατηγορίες και δείκτες έχουν αντίκτυπο στο κοινωνικό υπομοντέλο:

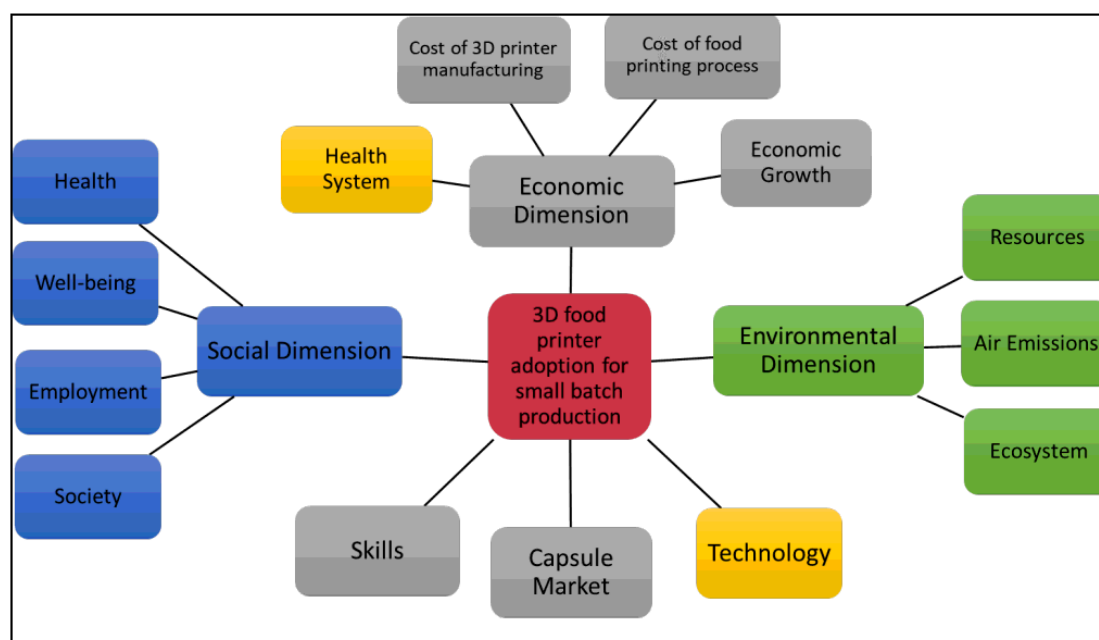
- **Υγεία:** διατροφικές προσαρμογές, διατροφική υγεία, ψυχική και σωματική υγεία.
- **Ευημερία:** βιοτικό επίπεδο, ευεξία, καλό περιβάλλον διαβίωσης, δημιουργικότητα, εγρήγορση και επαγγελματική και προσωπική ανάπτυξη.
- **Απασχόληση:** νέοι τύποι εργασίας, νέες επιλογές σταδιοδρομίας και δυνατότητες εισοδήματος.
- **Κοινωνία:** ηθικά πρότυπα, υγεία και ασφάλεια στο χώρο εργασίας, ασφάλεια και διαθεσιμότητα τροφίμων, και την ποιότητα των τροφίμων.



Εικόνα 25 Η Κοινωνική παράμετρος, επεκτείνεται στην υγεία, την ευημερία, την απασχόληση και την κοινωνία (Ramundo et al 2020).

4.5. Αειφόρος ανάπτυξη

Ολόκληρο το μοντέλο της αειφόρου ανάπτυξης δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογική προσέγγιση της συστημικής σκέψης, στην οποία οι πολλές διαστάσεις είναι περίπλοκα συνυφασμένες και στενά συνδεδεμένες η μία με την άλλη. Έγινε εξέταση των παραγόντων που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, προκειμένου να ενσωματωθεί το οικονομικό μοντέλο του Dabbene στην προσέγγιση των συγγραφέων για τις παγκόσμιες ανησυχίες, τις οικονομικές τάσεις και τη σύνδεση με τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά υπομοντέλα. Αυτοί οι παράγοντες φέρνουν το σύστημα σε πλήρη κύκλο, προβάλλουν τις ενδείξεις ισχύος, και δίνουν προοπτική για νέες απόψεις, προσθέτοντας νέες κοινωνικές και τεχνολογικές κατηγορίες στο αρχικό αποκλειστικά οικονομικό μοντέλο. Οι δείκτες των συμπληρωματικών πτυχών βρίσκονται σε συνάρτηση με την πλήρη διαδρομή πρόσκρουσης. Το μοντέλο βιωσιμότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε επίπεδο κατηγορίας εφέ απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 26 Μοντέλο βιωσιμότητας 3DFP σε επίπεδο κατηγοριών επιπτώσεων (Ramundo et al 2020)

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις τόσο της παραγωγής εκτυπωτών 3DF όσο και της διαδικασίας 3DFP για την εκτύπωση τροφίμων και την τοποθέτησή τους σε σχέση με τους ακόλουθους δείκτες κατηγοριών επιπτώσεων:

- Δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων σε πόρους: χρήση ενέργειας, αποτύπωμα νερού, χρήση γης/εδάφους, απόβλητα τροφίμων, πρώτη ύλη τροφίμων/συστατικών,

αποδοτικότητα πόρων, **διάρκεια ζωής (τρόφιμα σε κάψουλες)**, δυνατότητα ανακύκλωσης/αναπλήρωσης φυσιγγίων.

- **Δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων εκπομπών αέρα:** αποτύπωμα άνθρακα, ποιότητα αέρα, κλιματική αλλαγή.
- **Δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων στο οικοσύστημα:** συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, τοξικότητα, γονιμότητα της γης, πλαστικά απόβλητα.

Δημιουργείται, κατ' αυτόν τον τρόπο, μια διαδικασία επικύρωσης, χρησιμοποιώντας μια μεθοδολογία με δύο σκέλη για τη βελτίωση της δομής του μοντέλου και την εγγύηση της ευρωστίας του πλαισίου. Η διαδραστική φύση διατηρήθηκε σε διακριτικότητα ενώ κατασκευαζόταν το μοντέλο, προχωρώντας με γραμμικό τρόπο. Σαν αποτέλεσμα, έχει υιοθετηθεί μια συστημική αυτοαξιολόγηση βασισμένη σε μια κοινή κατευθυντήρια γραμμή για την αξιολόγηση των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται κατά τη θεωρητική βάση (Drizo & Pegna, 2006). Αν και ακολουθήθηκε η εποικοδομητική προσέγγιση, η ρεαλιστική άποψη σχετικά με την τεχνολογική κατάσταση και τη διάσταση της εξειδικευμένης αγοράς της τρισδιάστατης εκτύπωσης ήταν σημαντική για την εδραίωση της πρακτικής εφαρμογής. Δεδομένου ότι η αγορά εκτυπωμένων τροφίμων δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη, έχει εφαρμοστεί μια επικύρωση από ειδικούς για την κατανόηση των προοπτικών, των απόψεων και των εμπειριών τους.

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα

Το μοντέλο βιωσιμότητας έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα εργαλείο για τους χρήστες του 3DFP, για να αξιολογήσουν την παραγωγική τους διαδικασία με οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς ολοκληρωμένους όρους. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο, είναι σε θέση να κατανοήσουν όχι μόνο πώς η αλυσίδα αξίας και οι επιχειρήσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη νέες ικανότητες και δεξιότητες, αλλά και πώς πρέπει να εξελιχθεί η αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων μικρής κλίμακας. Επιπλέον, το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα κατανόησης των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει μακροπρόθεσμα τη τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, έτσι ώστε μια εταιρεία να μπορεί να καθορίσει μια στρατηγική κοινωνικής ευθύνης, μέσω της υιοθέτησης της τεχνολογίας, που μεταξύ άλλων λαμβάνει υπόψη τις ιδιαίτερες διατροφικές πτυχές των τροφίμων.

Οι κοινωνικο-περιβαλλοντικές συνιστώσες της παραγωγής εκτυπωμένων τροφίμων, όπως η μείωση της σπατάλης και οι συνέπειες για την επισιτιστική ασφάλεια στην υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας, μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν από τις επιχειρήσεις στη στρατηγική τους. Τα μοντέλα επιτρέπουν, επίσης, στις εταιρείες τροφίμων να κάνουν εμπορικές επιλογές, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές εξελίξεις. Για παράδειγμα, σχετικά με την ταχύτητα και τη διαχείριση συντήρησης των τρισδιάστατων εκτυπωτών, θα πρέπει οι επιχειρήσεις να κατανοούν πού και πώς θα μπορέσουν να επηρεάσουν την τεχνολογική ανάπτυξη, προκειμένου να ανοίξουν νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες και να ενισχύσουν τις υπάρχουσες. Αυτή είναι μια ιδιαίτερα σημαντική πτυχή και για τους παραγωγούς εκτυπωτών 3DF, καθώς θα μπορούν να κατανοήσουν την κατεύθυνση που πρέπει να ακολουθήσουν για να επιταχύνουν και να βελτιώσουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας.

Η ενσωμάτωση των στόχων των Ηνωμένων Εθνών από το μοντέλο επιτρέπει στις μικρές μεταποιητικές επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν τη τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, ώστε να υποστηρίξουν τη βιωσιμότητά της σε διεθνές επίπεδο. Δεδομένου του πόσο περίπλοκα συνδέονται οι διαφορετικές κατηγορίες της βιωσιμότητας, το παραπάνω μοντέλο δημιουργήθηκε ως οπτικό εργαλείο με σκοπό την απλούστευση των υπομοντέλων που το αποτελούν.

Ωστόσο, για μια αποτελεσματική βραχυπρόθεσμη χρήση απαιτείται ερευνητική κατεύθυνση, καθώς η τρέχουσα έκδοση είναι ακόμα πολύ εξελιγμένη για να τη χρησιμοποιήσουν οι εταιρείες με την πρώτη ματιά. Αυτό λήφθηκε επίσης υπόψη κατά τη

διαδικασία επικύρωσης, όπου, αντί να υποβληθεί το γραφικό μοντέλο στους ειδικούς, έχει προετοιμαστεί ένα ερωτηματολόγιο που εξετάζει τις διάφορες αλληλεπιδράσεις, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.

Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα του μοντέλου που παρουσιάζεται είναι ότι έχει αναπτυχθεί μόνο σε επίπεδο ποιότητας, επομένως απαιτείται μια πιο ποσοτική προσέγγιση για να γίνει ένα πιο ενδιαφέρον εργαλείο για τις εταιρείες, ώστε να μετρούν τις στρατηγικές βιωσιμότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω του ορισμού μετρήσεων για κάθε δείκτη και μέσω ενός απλοποιημένου μοντέλου για τις περιβαλλοντικές πτυχές, ξεκινώντας από τον προσδιορισμό μιας κατάλληλης «λειτουργικής μονάδας» για ολόκληρο το πλαίσιο του συστήματος και όχι μόνο για τον απλό τρισδιάστατο εκτυπωτή. Μέσω των δεικτών που προκύπτουν από τα διάφορα μοντέλα, οι χρήστες της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων μπορούν να μετρήσουν διάφορες παραμέτρους. Για παράδειγμα, ο αριθμός των θερμίδων ανά τυπωμένο γεύμα μπορεί να είναι ένα μέτρο του αντίκτυπου που μπορεί να έχει στις διατροφικές πτυχές και την ευεξία η υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων. Ένα μοντέλο διάρκειας ζωής μπορεί επίσης να στοχεύει ορισμένες από τις περιβαλλοντικές πτυχές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε αυτές τις προσεγγίσεις.

Η ανάλυση από την πλευρά των ενδιαφερόμενων για τη μέθοδο αυτή είναι μια κρίσιμη πτυχή για την κατανόηση όλων των στοιχείων που σχετίζονται με τη λειτουργία μιας βιώσιμης τεχνολογίας, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, αλλά το μοντέλο δημιουργήθηκε κυρίως με γνώμονα τη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων σε μικρές παρτίδες (και όχι για μαζική παραγωγή). Μπορούν στο εγγύς μέλλον με την εξέλιξη των εκτυπωτών τροφίμων για οικιακούς και εμπορικούς σκοπούς να αναμένονται νέες αναλύσεις.

Είναι προφανές ότι παρόλο που η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων έχει δυνατότητες, τόσο όσον αφορά τις εφαρμογές όσο και το ενδιαφέρον των καταναλωτών, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές τεχνολογικές, κοινωνικές και οργανωτικές προκλήσεις. Με βάση τα δεδομένα των ερευνών, οι ειδικοί της τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων θεωρούν τη νεοφοβία των καταναλωτών (αποδοχή), την έλλειψη κανονιστικών κατευθυντήριων γραμμών, την ανάγκη κλιμάκωσης, το υψηλό κόστος κατασκευής, και τους μεγάλους χρόνους εκτύπωσης ως τις πιο σημαντικές προκλήσεις. Η περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς εξαρτάται από την υπέρβαση αυτών των προκλήσεων, μέσω ενός συνδυασμού

αυξημένης οικονομικής υποστήριξης, ελέγχου διαδικασιών, συνεχιζόμενης καινοτομίας στα υλικά εκτύπωσης και συνεργασίας μεταξύ των βιομηχανιών.

Για την εξασφάλιση ενός τελικού αποτελέσματος συνεχούς εκτύπωσης υψηλής ποιότητας, οι σημαντικές και συνεχείς οικονομικές επενδύσεις και καινοτομίες διαδικασιών (συμπεριλαμβανομένης της μετεπεξεργασίας) είναι ζωτικής σημασίας.

Καθώς αυτή η καινοτόμος τεχνολογία αποκτά έλξη, ο τρόπος και ο βαθμός συνεργασίας των συμμετεχόντων στην αλυσίδα εφοδιασμού θα αλλάξει. Εξατομικευμένα τρόφιμα (συμπεριλαμβανομένων εκείνων για άτομα με ειδικές διατροφικές ανάγκες), που προσφέρουν χαρακτηριστικές ειδικές εμπειρίες φαγητού σε εστιατόρια αιχμής και — πιθανότατα το πιο σημαντικό — μείωση της σπατάλης τροφίμων μέσω της επαναχρησιμοποίησης βρώσιμων αλλά απορριφθέντων τροφίμων ήταν από τις πιο πολλά υποσχόμενες χρήσεις.

Εξαιτίας αυτών των παραγόντων, η αγορά για την τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων προβλέπεται να αναπτυχθεί ακόμη πιο γρήγορα, δημιουργώντας περισσότερες δυνατότητες για την ενοποίηση επαγγελματικών τρισδιάστατων εκτυπωτών με υλικά τροφίμων αιχμής, σχεδιασμό και διαδικασίες εκτύπωσης 3D. Συνεπώς, η μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα έχει πολλές πιθανές κατευθύνσεις.

Συμπερασματικά, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τη βιωσιμότητα των δικτύων προμήθειας τροφίμων. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνολογία προσφέρει επίσης επιλογές για την αντιμετώπιση ορισμένων από τα πιο σημαντικά ζητήματα που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν τα μελλοντικά δίκτυα προμήθειας τροφίμων. Προτού αυτή η τεχνολογία περάσει από τη θεωρία στην πράξη, απαιτούνται πρόσθετες εξελίξεις τόσο στην παροχή προϊόντων όσο και στην παροχή υπηρεσιών, όπως εξηγεί αυτή η εργασία.

Βιβλιογραφία

- Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B. R., & Truong, V. (2000). Experimental studies and kinetics of single drop drying and their relevance in drying of sugar-rich foods: A review. *International Journal of Food Properties*, 3(3), 323–351.
- Annoni, M., Giberti, H., & Strano, M. (2016). Feasibility study of an extrusion-based direct metal additive manufacturing technique. *Procedia Manufacturing*, 5, 916–927.
- Baiano, A. (2022). 3D printed foods: A comprehensive review on technologies, nutritional value, safety, consumer attitude, regulatory framework, and economic and sustainability issues. *Food Reviews International*, 38(5), 986–1016.
- Barlow, J. W. (1991). Analysis of selective laser sintering. *Conference Proceedings, Second International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton: Dayton, Ohio, 1991*.
- Beetz, M., Klank, U., Kresse, I., Maldonado, A., Mösenlechner, L., Pangercic, D., Rühr, T., & Tenorth, M. (2011). Robotic roommates making pancakes. *2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 529–536.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
- Bollini, M. A. (2012). *Following recipes with a cooking robot*. Massachusetts Institute of Technology.
- Brown, A. C., Conradie, P., & De Beer, D. (2014). Development of a stereolithography (STL) input and computer numerical control (CNC) output algorithm for an entry-level 3-D printer. *South African Journal of Industrial Engineering*, 25(2), 39–47.
- Brundtland, G. H. (1987). *Report of the World Commission on environment and development: "our common future."*. UN.
- Brunner, T. A., Delley, M., & Denkel, C. (2018). Consumers attitudes and change of attitude toward 3D-printed food. *Food Quality and Preference*, 68, 389–396.
- Chen, H., Xie, F., Chen, L., & Zheng, B. (2019). Effect of rheological properties of potato, rice and corn starches on their hot-extrusion 3D printing behaviors. *Journal of Food Engineering*, 244, 150–158.
- Chen, J., & Rosenthal, A. (2015). Food texture and structure. In *Modifying food texture* (pp. 3–24). Elsevier.
- Chung, C., & McClements, D. J. (2015). Structure and texture development of food-emulsion products. In *Modifying food texture* (pp. 133–155). Elsevier.

- Cichero, J. A. Y., Lam, P. T. L., Chen, J., Dantas, R. O., Duivesteyn, J., Hanson, B., Kayashita, J., Pillay, M., Riquelme, L. F., Steele, C. M., & others. (2020). Release of updated international dysphagia diet standardisation initiative framework (IDDSI 2.0). *Journal of Texture Studies*, 51(1), 195–196.
- Cohen, D. L., Lipton, J. I., Cutler, M., Coulter, D., Vesco, A., & Lipson, H. (2009). Hydrocolloid printing: a novel platform for customized food production. *2009 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Dabbene, L., Ramundo, L., & Terzi, S. (2018). Economic model for the evaluation of 3D food printing. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1–7.
- Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D., & Severini, C. (2018). Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220, 65–75.
- Design, P. (2010). New design probe explores the future of food. *Eri{c{s}}im Adresi: <https://www.90yearsofdesign.philips.com/article/67> [Eri{c{s}}im: 31/10/2016]*.
- Despeisse, M., & Ford, S. (2015). The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 129–136.
- Drizo, A., & Pegna, J. (2006). Environmental impacts of rapid prototyping: an overview of research to date. *Rapid Prototyping Journal*.
- Elkington, J., & Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., & Iribarne, M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*.
- Feng, C., Zhang, M., Bhandari, B., & Ye, Y. (2020). Use of potato processing by-product: Effects on the 3D printing characteristics of the yam and the texture of air-fried yam snacks. *LWT*, 125, 109265.
- Gholamipour-Shirazi, A., Kamlow, M.-A., T. Norton, I., & Mills, T. (2020). How to Formulate for Structure and Texture via Medium of Additive Manufacturing-A Review. *Foods*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/foods9040497>
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54.
- Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010).

Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57–64.

- He, C., Zhang, M., & Fang, Z. (2020). 3D printing of food: pretreatment and post-treatment of materials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2379–2392.
- Hemsley, B., Palmer, S., Kouzani, A., Adams, S., & Balandin, S. (2019). Review informing the design of 3D food printing for people with swallowing disorders: Constructive, conceptual, and empirical problems. *HICSS 52: Proceedings of the 52nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 5735–5744.
- Hertafeld, E., Zhang, C., Jin, Z., Jakub, A., Russell, K., Lakehal, Y., Andreyeva, K., Bangalore, S. N., Mezquita, J., Blutinger, J., & others. (2019). Multi-material three-dimensional food printing with simultaneous infrared cooking. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(1), 13–19.
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5), 1191–1203.
- Jia, F., Wang, X., Mustafee, N., & Hao, L. (2016). Investigating the feasibility of supply chain-centric business models in 3D chocolate printing: A simulation study. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 202–213.
- Jiang, R., Kleer, R., & Piller, F. T. (2017). Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change*, 117, 84–97.
- Jonkers, N., Van Dommelen, J. A. W., & Geers, M. G. D. (2020). Experimental characterization and modeling of the mechanical behavior of brittle 3D printed food. *Journal of Food Engineering*, 278, 109941.
- Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom. *Journal of Food Engineering*, 287, 110116.
- Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Dufloy, J. R. (2017). Environmental dimensions of additive manufacturing: mapping application domains and their environmental implications. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S49–S68.
- Kim, H. W., Lee, I. J., Park, S. M., Lee, J. H., Nguyen, M. -H., & Park, H. J. (2019). Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable

cookie dough. *Lwt*, 101, 69–75.

- Kohtala, C., & others. (2016). *Making sustainability: how Fab Labs address environmental issues*. Aalto University.
- Konitzer, K., Pflaum, T., Oliveira, P., Arendt, E., Koehler, P., & Hofmann, T. (2013). Kinetics of sodium release from wheat bread crumb as affected by sodium distribution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(45), 10659–10669.
- Kouzani, A. Z., Adams, S., Whyte, D. J., Oliver, R., Hemsley, B., Palmer, S., & Balandin, S. (2017). 3D printing of food for people with swallowing difficulties. *DesTech 2016: Proceedings of the International Conference on Design and Technology*, 23–29.
- Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Dembinski, L., Hascoët, J.-Y., & Mognol, P. (2014). Predictive model for environmental assessment in additive manufacturing process. *Procedia CIRP*, 15, 26–31.
- Le Tohic, C., O'Sullivan, J. J., Drapala, K. P., Chartrin, V., Chan, T., Morrison, A. P., Kerry, J. P., & Kelly, A. L. (2018). Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese. *Journal of Food Engineering*, 220, 56–64.
- Lee, J. H., Won, D. J., Kim, H. W., & Park, H. J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *Journal of Food Engineering*, 256, 1–8.
- Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J.-P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals*, 52(2), 589–609.
- Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 20–27.
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N., & Lipson, H. (2010). Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *2010 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Lipton, J. I., Cohen, D., Heinz, M., Lobovsky, M., Parad, W., Bernstein, G., Li, T., Quartiere, J., Washington, K., Umaru, A.-A., & others. (2009). Fab@ home model 2: Towards ubiquitous personal fabrication devices. *2009 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.

- Liu, Y., Yu, Y., Liu, C., Regenstein, J. M., Liu, X., & Zhou, P. (2019). Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing. *Lwt*, *102*, 338–346.
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, *69*, 83–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>
- Lu, R. (2013). Principles of solid food texture analysis. In *Instrumental assessment of food sensory quality* (pp. 103–128). Elsevier.
- Lupton, D., & Turner, B. (2018). I cant get past the fact that it is printed: consumer attitudes to 3D printed food. *Food, Culture & Society*, *21*(3), 402–418.
- Ma, Y., & Zhang, L. (2022). Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: A mini review. *Current Opinion in Food Science*, *44*, 100803.
- Malone, E., & Lipson, H. (2007). Fab@ Home: the personal desktop fabricator kit. *Rapid Prototyping Journal*.
- Manstan, T., & McSweeney, M. B. (2020). Consumers attitudes towards and acceptance of 3D printed foods in comparison with conventional food products. *International Journal of Food Science & Technology*, *55*(1), 323–331.
- Mantihal, S., Kobun, R., & Lee, B.-B. (2020). 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *22*, 100260.
- Mantihal, S., Prakash, S., & Bhandari, B. (2019). Texture-modified 3D printed dark chocolate: Sensory evaluation and consumer perception study. *Journal of Texture Studies*, *50*(5), 386–399.
- Marangoni, A. G., & McGauley, S. E. (2003). Relationship between crystallization behavior and structure in cocoa butter. *Crystal Growth & Design*, *3*(1), 95–108.
- McCluskey, J. J., Kalaitzandonakes, N., & Swinnen, J. (2016). Media coverage, public perceptions, and consumer behavior. *Annual Review of Resource Economics*, *8*, 467–486.
- McCrickerd, K., & Forde, C. G. (2016). Sensory influences on food intake control: moving beyond palatability. *Obesity Reviews*, *17*(1), 18–29.
- Millen, C. I. (2012). *The development of colour 3D food printing system: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering in Mechatronics at Massey University, Palmerston North, New Zealand*. Massey University.

- Miyanaji, H., Momenzadeh, N., & Yang, L. (2018). Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process. *Additive Manufacturing*, 20, 1–10.
- Moskowitz, H. R., Saguy, I. S., & Straus, T. (2009). *An integrated approach to new food product development*. CRC Press.
- Otcu, G. B., Ramundo, L., & Terzi, S. (2019). State of the art of sustainability in 3D food printing. *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1–8.
- O Sullivan, M. G. (2017). Instrumental assessment of the sensory quality of food and beverage products. *A Handbook for Sensory and Consumer-Driven New Product Development; O Sullivan, MG, Ed*, 151–175.
- Palovuori, J. (2014). *Nutrimea-concept development process in the Electrolux Design Lab 2013 competition*.
- Paulus, S., Behmann, J., Mahlein, A.-K., Plümer, L., & Kuhlmann, H. (2014). Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping. *Sensors*, 14(2), 3001–3018.
- Periard, D., Schaal, N., Schaal, M., Malone, E., & Lipson, H. (2007). Printing food. *2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Pliner, P., & Hobden, K. (1992). Development of a scale to measure the trait of food neophobia in humans. *Appetite*, 19(2), 105–120.
- Portanguen, S., Tournayre, P., Sicard, J., Astruc, T., & Mirade, P.-S. (2019). Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 188–198.
- Pramudya, R. C., & Seo, H.-S. (2019). Hand-feel touch cues and their influences on consumer perception and behavior with respect to food products: A review. *Foods*, 8(7), 259.
- Pulatsu, E., Su, J.-W., Lin, J., & Lin, M. (2020). Factors affecting 3D printing and post-processing capacity of cookie dough. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 61, 102316.
- Schmid, M., Amado, F., Levy, G., & Wegener, K. (2013). Flowability of powders for selective laser sintering (SLS) investigated by round robin test. *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 95.
- Sethupathy, P., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Food oral processing and tribology: instrumental approaches and emerging applications. *Food*

Reviews International, 37(5), 538–571.

- Severini, C., Azzollini, D., Albenzio, M., & Derossi, A. (2018). On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects. *Food Research International*, 106, 666–676.
- Severini, C., Derossi, A., & Azzollini, D. (2016). Variables affecting the printability of foods: Preliminary tests on cereal-based products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 281–291.
- Shoseyov, O., Braslavsky, I., YASHUNSKY, V., & SHARON, S. B. (2017). *3-dimensional printing of food*. Google Patents.
- Stokes, J. R., Boehm, M. W., & Baier, S. K. (2013). Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 18(4), 349–359.
- Strother, H., Moss, R., & McSweeney, M. B. (2020). Comparison of 3D printed and molded carrots produced with gelatin, guar gum and xanthan gum. *Journal of Texture Studies*, 51(6), 852–860.
- Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y. H., Hong, G. S., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308–319.
- Sungsinchai, S., Niamnuy, C., Wattanapan, P., Charoenchaitrakool, M., & Devahastin, S. (2019). Texture modification technologies and their opportunities for the production of dysphagia foods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 1898–1912.
- Teng, X., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2021). 4D printing: Recent advances and proposals in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 349–363.
- Terfansky, M. L., & Thangavelu, M. (2013). 3D printing of food for space missions. *AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition*, 5346.
- Theagarajan, R., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D extrusion printability of rice starch and optimization of process variables. *Food and Bioprocess Technology*, 13(6), 1048–1062.
- Tournier, C., Sulmont-Rossé, C., & Guichard, E. (2007). *Flavour perception: aroma, taste and texture interactions*. Global Science Books.
- Van Bommel, K., & Spicer, A. (2011). Hail the snail: Hegemonic struggles in the slow food movement. *Organization Studies*, 32(12), 1717–1744.
- Van Gunst, A., & Roodenburg, A. J. C. (2019). Consumer distrust about E-numbers: a qualitative study among food experts. *Foods*, 8(5), 178.

- van Rompay, T. J. L., & Groothedde, S. (2019). The taste of touch: Enhancing saltiness impressions through surface texture design. *Food Quality and Preference*, 73, 248–254.
- Van Cauwenberghe, V., Delele, M. A., Vanbiervliet, J., Aregawi, W., Verboven, P., Lammertyn, J., & Nicolaï, B. (2018). Model-based design and validation of food texture of 3D printed pectin-based food simulants. *Journal of Food Engineering*, 231, 72–82.
- Vithu, P., & Moses, J. A. (2016). Machine vision system for food grain quality evaluation: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 13–20.
- Wegrzyn, T. F., Golding, M., & Archer, R. H. (2012). Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), 66–72.
- Yang, J., Wu, L. W., & Liu, J. (2001). *Rapid prototyping and fabrication method for 3-D food objects*. Google Patents.
- Zeltmann, S. E., Gupta, N., Tsoutsos, N. G., Maniatakos, M., Rajendran, J., & Karri, R. (2016). Manufacturing and security challenges in 3D printing. *Jom*, 68(7), 1872–1881.
- Zoran, A., & Coelho, M. (2011). Cornucopia: the concept of digital gastronomy. *Leonardo*, 44(5), 425–431.