



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μοντελοποίηση Ροής Εδώδιμων Υλικών σε
Τρισδιάστατους Εκτυπωτές Τροφίμων»**

**“Simulation of edible materials flow in food 3d
printers”**

Φοιτήτρια: Ηλία Κωνσταντίνα [ΑΜ: 51204351]

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαρρής Ιωάννης

Αθήνα 2021

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

1. Ι. Σαρρής

2. Γ. Νίνος

3. Αικ. Σκουρολιάκου

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ηλία Κωνσταντίνα του Αναστασίου, με αριθμό μητρώου 51204351 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολή Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολογίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Η Δηλούσα



Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Σαρρή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα και φυσικά τον ευχαριστώ πολύ για την συνεχή υποστήριξή του και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος των σπουδών μου. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Νικόλα Πολυχρονόπουλο, για την αμέριστη συμπαράστασή του, την εκτενή καθοδήγησή του, τις υποδείξεις του και την πολύτιμη συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια σύνταξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Το αντικείμενο της προπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση της ροής διαφόρων τύπων εδώδιμων υλικών στο ακροφύσιο (τύπου σύριγγας) τρισδιάστατων εκτυπωτών που χρησιμοποιούνται στις προσθετικές κατασκευαστικές τεχνολογίες τροφίμων. Στο θεωρητικό υπόβαθρο μελετώνται οι ρεολογικές μεταβλητές και τα ρεολογικά μοντέλα από τα οποία επηρεάζεται η ποιότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης των εδώδιμων υλικών. Αναγράφονται διάφοροι τύποι τρισδιάστατων εκτυπωτών και ακροφυσίων. Η πιο σημαντική λειτουργία της προσθετικής κατασκευής (ή αλλιώς της τρισδιάστατης εκτύπωσης) είναι η μέθοδος εξώθησης του υλικού από ένα ακροφύσιο. Αναφέρονται τα οφέλη και τα εμπόδια της τρισδιάστατης εκτύπωσης εδώδιμων υλικών καθώς και η χρήση των εκτυπωμένων τροφίμων σε συγκεκριμένους τομείς της καθημερινής ζωής του ανθρώπου, τόσο για διατροφικούς όσο και για αισθητικούς λόγους. Για την μοντελοποίηση ορισμένων εδώδιμων υλικών, όπως πουρές πατάτας (σε συγκεκριμένα ποσοστά αμύλου), σιρόπι και πάστα σοκολάτας (σε συγκεκριμένα ποσοστά κακάο) και είδη χονδρόκοκκων (είδος σιταριού και μαύρου ρυζιού), αξιοποιήθηκαν τα ρεολογικά μοντέλα Herschel–Bulkley (για τα πρώτα δύο) και Power Law (για το τρίτο). Αξιοποιώντας αποτελέσματα παλαιότερων ερευνών για τα συγκεκριμένα υλικά, κατασκευάσαμε τα διαγράμματα που απεικονίζουν το προφίλ ταχύτητας σε συνάρτηση με την απόσταση του κέντρου από τα τοιχώματα του ακροφυσίου και της πτώσης τάσης σε συνάρτηση με την ογκομετρική ροή. Από τα διαγράμματα καταλήξαμε σε συμπεράσματα για τον τρόπο που επηρεάζουν οι αναλογίες υλικών την ροή μέσα από το ακροφύσιο του εκτυπωτή. Οι ρεολογικές μεταβλητές (κυρίως το ιξώδες) καθορίζουν τη ροή στο ακροφύσιο, αλλά και την ποιότητα εκτύπωσης. Έτσι υπάρχουν υλικά που ρέουν εύκολα αλλά δεν μπορούν να εκτυπωθούν διότι δεν δημιουργούνται στρώματα και άλλα τα οποία δεν μπορούν να ρέουν στο ακροφύσιο λόγω πολύ μικρού ιξώδους.

Από ανασκόπηση πειραματικών ερευνών σε διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων εντοπίζουμε ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί θεωρητική μελέτη στο εσωτερικό των ακροφυσίων, κάτι που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Επίσης, από βιβλιογραφία είδαμε ότι έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες δισδιάστατες ή τρισδιάστατες ρεολογικές υπολογιστικές προσομοιώσεις για το μοντέλο Power Law, αλλά για υλικά που υπάγονται ρεολογικά στο μοντέλο Herschel–Bulkley δεν έχει γίνει εκτενής έρευνα για την τρισδιάστατη εκτύπωση των υλικών

αυτών και επειδή η ρεολογία των συγκεκριμένων τροφίμων είναι περίπλοκη, γιατί οι μακρομοριακές ουσίες που έχουν αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους δύσκολα. Αυτό όπως είναι αντιληπτό δυσκολεύει και τη μοντελοποίηση της ροής τους. Επειδή η μοντελοποίηση για ακροφύσιο τρισδιάστατου εκτυπωτή τροφίμων που αφορά Herschel–Bulkley υλικά δεν έχει μελετηθεί, γι’ αυτό στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με μία πιο απλή ροή και συγκεκριμένα ροή μέσα σε αγωγό, την οποία στην συνέχεια την εφαρμόσαμε στο τελικό τμήμα του ακροφυσίου που φέρει γεωμετρία κυλινδρική, προκειμένου να δούμε αν υπάρχουν ή όχι αποκλίσεις. Αρχικά, πραγματοποιήσαμε παραμετρική ανάλυση για να δούμε τι συμβαίνει με τα διάφορα εκτυπώσιμα φαγητά που χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια επιλέξαμε ένα από αυτά προκειμένου να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τις τιμές πραγματικών πειραμάτων.

Abstract

The object of the undergraduate thesis is the study and analysis of the flow of various types of edible materials in the nozzle (syringe type) of 3D printers used in food additive manufacturing technologies. In the theoretical background, the rheological variables and the rheological models are studied, which affect the quality of the 3D printing of the edible materials. Various types of 3D printers and nozzles are listed. The most important function of prosthetic construction (or 3D printing) is the method of extruding the material from a nozzle. The benefits and obstacles of 3D printing of food materials are mentioned, as well as the use of printed food in specific areas of human daily life, both for nutritional and aesthetic reasons. The Herschel-Bulkley rheological models (for the first two) and Power Law (for the third). Utilizing the results of previous research on these materials, we constructed diagrams showing the velocity profile as a function of the center distance from the nozzle walls and the voltage drop as a function of the volumetric flow. From the diagrams we came to conclusions about how material ratios affect the flow through the printer nozzle. Rheological variables (mainly viscosity) determine the flow to the nozzle, but also the print quality. So there are materials that flow easily but cannot be printed because layers are not created and others that cannot flow into the nozzle due to very low viscosity.

From a review of experimental research on food 3D printing processes, we find that no theoretical study has been carried out inside the nozzles, something that this dissertation deals with. Also, we have seen from the literature that some two-dimensional or three-dimensional rheological computational simulations have been performed for the Power Law model, but for materials that are rheological under the Herschel-Bulkley model, no extensive research has been done on the three-dimensional printing of these materials and because the rheology of these food is complex, because the macromolecular substances they have interact with each other difficult. Because the modeling for a Herschel-Bulkley 3D printer food nozzle has not been studied, in this paper we have dealt with a simpler flow and a specific flow in a duct, which we then applied to the final part of the nozzle that bears cylindrical geometry to see if there are deviations or not. First, we performed a parametric analysis to see what happens to the various printable foods used, and then we selected one of them to compare the results with the values of real experiments.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
Εισαγωγή	10
1.1 Ανάπτυξη της τεχνολογίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών τροφίμων.....	10
1.2 Πλεονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων	14
1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την 3D εκτύπωση τροφίμων.....	14
1.4. Τεχνολογίες εκτύπωσης τροφίμων.....	17
1.4.1 Τροποποιήσεις εκτυπωτών	17
1.4.2 Τεχνικές εκτύπωσης.....	18
1.4.3 Μέθοδοι εξώθησης.....	20
1.4.3 Τύποι ακροφυσίων.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	24
Ρεολογία.....	24
2.1 Ορισμός	24
2.2 Η σημασία της ρεολογίας στη βιομηχανία τροφίμων.....	24
2.3 Ρεολογικές Παράμετροι	27
2.3.1 Ιξώδες	27
2.3.2 Διατμητική τάση.....	28
2.3.3 Ρυθμός διάτμησης.....	30
2.3.4 Το ιξώδες στα τρόφιμα.....	31
2.3.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στο ιξώδες.....	31
2.3.6 Επίδραση του βαθμού πλήρωσης στο ιξώδες.....	32
2.4 Μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την ρεολογική συμπεριφορά των ρευστών	33
2.4.1 Μοντέλο Power Law	34
2.4.2 Μοντέλο Carreau.....	35
2.4.3 Μοντέλο Bingham Plastic	36
2.4.4 Μοντέλο Herschel –Bulkley	36
2.5 Εδώδιμα υλικά που αξιοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	49
Παραγωγή εξισώσεων ρεολογικών μοντέλων	49
3.1 Ροή υπό πίεση ρευστού Power Law σε σωλήνα	50
3.2 Ροή υπό πίεση ρευστού Bingham σε σωλήνα	53
3.3 Ροή υπό πίεση ρευστού Herschel-Bulkley σε σωλήνα.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	58
Ανάλυση της ροής εδώδιμων υλικών στο ακροφύσιο 3d εκτυπωτή	58
4.1 Παραμετρική ανάλυση ροής - Διαγράμματα προφίλ ταχυτήτων και ογκομετρικής παροχής – πτώσης πίεσης	58
4.1.1 Χονδροειδείς κόκκοι.....	59
4.1.2 Σιρόπι σοκολάτας	61
4.1.3 Πάστα σοκολάτας.....	64
4.1.4 Πολτοποιημένη πατάτα.....	67
4.2 Σχόλια διαγραμμάτων	69
4.3 Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής παροχής – πτώσης πίεσης βασισμένο σε πειραματικά δεδομένα.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	75
Συμπεράσματα	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), που είναι γνωστή και ως κατασκευή πρόσθετων, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά κατά τη δεκαετία του 1980 και αυτό αποτέλεσε το εφαλτήριο ανάπτυξης νέων δεδομένων σε διάφορους ερευνητικούς τομείς όπως στην ιατρική, στην εκπαίδευση και στην αεροδιαστημική. Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί σημαντικά και η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων. Μετά από πολλές σχετικές μελέτες αναδείχθηκε η αξία αυτής της τεχνολογίας στη βιομηχανία τροφίμων και σε πολλούς τομείς της παρασκευής συγκεκριμένων ειδών, όπως ζυμαρικών, διακοσμητικών σοκολάτας και διατροφικών προϊόντων ειδικού τύπου.

Οι πρώτοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές τροφίμων ανήκουν στην τεχνολογία της NASA, που τους αξιοποίησε για την παρασκευή φαγητού ειδικά για τους αστροναύτες. Οι συγκεκριμένοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές, είναι τροποποιημένοι 3D εκτυπωτές που μέχρι πριν την ανακατασκευή τους είχαν άλλη χρήση. Αυτοί διαθέτουν ειδική υπό πίεση δεξαμενή ή δεξαμενές για την εξώθηση της πρώτης ύλης του τρόφιμου που είναι υπό τη μορφή υγρού ή πάστας (Stroud, Morris, Carey, Williams, Randolph, & Williams, 2013).

1.1 Ανάπτυξη της τεχνολογίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών τροφίμων

Η τρισδιάστατη εκτύπωση με παραδοσιακά υλικά, όπως μέταλλο, πλαστικό και άλλα τεχνητά πολυμερή, αξιοποιείται εδώ και πολλά χρόνια στη βιομηχανία και σε άλλους τομείς (αυτοκινητοβιομηχανία, ιατρική και αεροναυτική). Μέχρι πριν λίγα χρόνια, ο τομέας των τροφίμων ήταν σχετικά ανεξερεύνητος ως προς την τρισδιάστατη εκτύπωση σε σύγκριση με την εξελικτική πορεία που ακολουθούσαν οι υπόλοιποι τομείς. Μια πολύ πρωτότυπη χρήση των 3D εκτυπωτών είναι η εκτύπωση τροφίμων σε διάφορα σχήματα και γεωμετρικές δομές, που είναι δύσκολο να γίνουν με το χέρι. Ο βασικός λόγος που συμφέρει οικονομικά τις εταιρείες τροφίμων να αξιοποιήσουν την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ότι επιτυγχάνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα η μαζική παραγωγή τροφίμων.

Οι κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών έχουν πλέον επικεντρώσει την προσοχή τους, εκτός των άλλων και στην κατασκευή εκτυπωτών κατάλληλων για τρόφιμα. Αντίστοιχα οι εταιρείες που θα χρησιμοποιήσουν τους εκτυπωτές αυτούς δείχνουν μεγάλο ενδιαφέρον, πράγμα που σημαίνει ότι αποτελεί ένα νέο τεχνολογικό βήμα στην παρασκευή συγκεκριμένων τροφίμων. Με τους ειδικούς αυτούς εκτυπωτές πλέον είναι δυνατή η δημιουργία ιδιαίτερων μενού φαγητού και γλυκών, όπως και γαρνιτούρες για κοκτέιλ και διακοσμητικά για ξεχωριστές τούρτες, μιας και πλέον υπάρχει δυνατότητα να εκτυπωθούν σχέδια που είναι αδύνατον να τα πετύχουν οι αρχιμάγειρες και οι ειδικοί ζαχαροπλάστες .

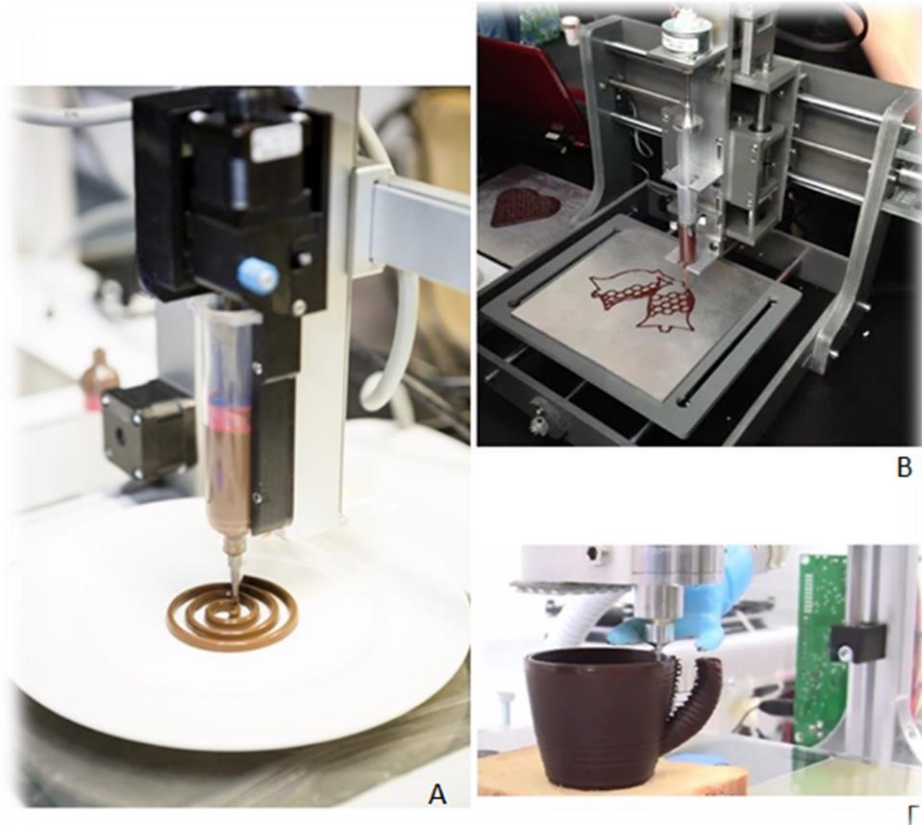
Στην αγορά έχουν κάνει την εμφάνισή τους αρκετοί 3D εκτυπωτές τροφίμων όπως ο TNO, ο οποίος μπορεί να εκτυπώσει 15-20 τεμάχια τροποποιημένα ζυμαρικά - πολύ γνωστής εταιρείας ζυμαρικών- κάθε δύο λεπτά, ο «Foodini», ο xyz και ο «Beehex», με δυνατότητα να παρασκευάσουν μπισκότα, σοκολάτες, ζυμαρικά και πίτσα τουλάχιστον, με υλικά που επιλέγει και τοποθετεί στη συσκευή ο χρήστης. Άλλοι εκτυπωτές όπως ο «ChefJet» και ο «ChefJet Pro» (για έγχρωμες εκτυπώσεις) έχουν δυνατότητα εκτύπωσης ζάχαρης με προσθήκη σοκολάτας ή σιροπιών σε διάφορες γεύσεις ενώ ο «Choc Creator» θεωρείται ο πρώτος εκτυπωτής σοκολάτας (Molitch-Hou, Watkin, Koslow).

Στις επόμενες φωτογραφίες παρατίθενται ορισμένοι από τους παραπάνω τύπους εκτυπωτών:



Εικ. 1.1: Εκτύπωση μείγματος λαχανικών

(Πηγή: *TechRepublic* , 2017)



Εικ. 1.2: Εκτύπωση σοκολάτας

Εικ. 1.2Α (Πηγή: *DPAS, 2017*)

Εικ. 1.2Β (Πηγή: *Fabbaloo, 2013*)

Εικ. 1.2Γ (Πηγή: *YourNewzz, 2018*)



Εικ. 1.3: Εκτύπωση ειδών διατροφής

(Πηγή: *Alfa Editors Technicos, 2009*)

Η 3D εκτύπωση τροφίμων μπορεί να εφαρμοστεί στα γεύματα μεγάλης ζήτησης ή και στην παραγωγή τροφίμων σε μεγάλη κλίμακα και μπορεί να συμβάλει στην καλή

διατροφή. Οι εκτυπωτές μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των χημικών προσθέτων στα τρόφιμα οπότε να συντελέσει έμμεσα στην υπερκατανάλωση. Οι εκτυπωτές φαγητού μπορούν να επιτρέψουν ακόμη και παραμετροποίηση των συστατικών, εξατομικεύοντας τις ποσότητες ασβεστίου, πρωτεΐνης, ωμέγα-3, και των υδατανθράκων στα γεύματα (McNulty, Arnas, & Thomas, Campbell, 2012).

Ωστόσο, επειδή τα υλικά τροφίμων αποτελούνται συχνά από πολλά διαφορετικά συστατικά με ξεχωριστές φυσικοχημικές ιδιότητες απαιτείται να προσαρμοστεί η τεχνολογία της 3D-εκτύπωσης σε κάθε κατηγορία τροφίμων. Όπως αναλύεται σε συγκεκριμένη ενότητα της εργασίας υπάρχουν διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, όπως εκτύπωση με βάση την εξώθηση, επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ, εκτόξευση συνδετικού υλικού και εκτύπωση με ψεκασμό (inkjet).

Πρόσφατα, έχουν γίνει πολλές έρευνες και μελέτες με σκοπό να βελτιωθούν οι ιδιότητες του υλικού που εκτυπώνεται, ο σχεδιασμός του εκτυπωτή και οι παράμετροι εκτύπωσης. Από την πρώτη παρασκευή πρόσθετων υλών το 1983 (Hugo & Rodrigue, 2013), η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό και εφαρμόζεται ευρέως στην κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων (Chua & Leong, 2014), στη λειτουργική αξιολόγηση των σχεδίων προϊόντων (Pei, 2014), των προϊόντων υγειονομικής περίθαλψης και των ζωντανών βιολογικών δομών (Murphy & Atala, 2014).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων θεωρείται ως μία από τις πρόσφατες αναδυόμενες τεχνολογίες σε αυτά τα λίγα χρόνια, δεδομένου ότι έδειξε μια δυνατότητα ακρίβειας, προσαρμογής και καινοτομίας στη δομή και την υφή διαφόρων τροφίμων (Feng, Zhang, & Bhandari, 2018· Le Tohic et al., 2018). Η πρώτη τρισδιάστατη εκτύπωση που εφαρμόστηκε στην παρασκευή τροφίμων ήταν μια εξώθηση πάστας μείγματος που αποτελούταν από ζάχαρη, άμυλο, μαγιά, σιρόπι καλαμποκιού με το οποίο παρασκεύασαν κέικ (Lile, Nurmela, Nordlund, Metsa-Kortelainen, & Sozer, 2018; Yang, Wu, & Liu, 2001). Αργότερα, ανακαλύφθηκε μια ακτίνα λέιζερ για τήξη κόκκων ζάχαρης με επιλεκτική τεχνολογία παρεμβολής/τήξης ζεστού αέρα. Καθώς προχωρούσε η έρευνα, το τρισδιάστατο σύστημα εκτύπωσης με κεφαλές εξώθησης, το οποίο επέτρεψε την εκτύπωση ποικίλων υλικών, εφαρμόστηκε για την εκτύπωση σοκολάτας και τυριού (Zoran & Coelho, 2011). Μεταξύ όλων των αναφερόμενων, η πιο υιοθετημένη τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων είναι η μέθοδος που βασίζεται στην

εξώθηση. Στη συνέχεια εντοπίζουμε τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της 3D εκτύπωσης τροφίμων.

1.2 Πλεονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων

Εκτός των οικονομικών πλεονεκτημάτων που έχει, αυτή η αναπτυσσόμενη τεχνολογία δίνει νέες δυνατότητες για παραγωγή γευμάτων με σκοπό τις διαφορετικές προτιμήσεις και διατροφικές ανάγκες ως προς την πρόσληψη ποσού θερμίδων από κάθε άτομο. Η νέα ευκαιρία που προσφέρει η εκτύπωση τρισδιάστατου φαγητού ήδη διευκολύνει άτομα με ειδικές διατροφικές απαιτήσεις, όπως ηλικιωμένοι ή ασθενείς που έχουν δυσκολίες να φάνε ή να καταπιούν (Pérez, Nykvista, Brøggera, Barmar Larsena, Falkeborga, 2019). Για παράδειγμα, τα άτομα με δυσφαγία θα μπορούν πιθανώς να επωφεληθούν από την ανάπτυξη εκτυπωτών τροφίμων 3D, μιας και η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή τροφών προσαρμοσμένων στις διατροφικές απαιτήσεις ομάδων ατόμων.

Οι εκτυπωτές 3D μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία διαφορετικών γεωμετριών και υφών και οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολο ή αδύνατο να δημιουργηθούν με το χέρι ή με συμβατικά μέσα, όπως εργαλεία ζαχαροπλαστικής και μαγειρικής (Sun, Zhou, Huang, Fuh, Hong, & Chiu, 2015).

Μια δευτερεύουσα εφαρμογή, αλλά με ενδιαφέρον στον εκπαιδευτικό τομέα είναι η χρήση τυπωμένων τροφίμων με συγκεκριμένο σχήμα, με σκοπό την αναγνώριση του σχήματος, της γεύσης και του χρώματος από παιδιά προσχολικής ηλικίας (Sun, Zhou, Yan, Huang, & Lin, 2018).

1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την 3D εκτύπωση τροφίμων

Όπως στην τρισδιάστατη εκτύπωση παραδοσιακών υλικών (π.χ. πλαστικό, μέταλλα κ.λπ.), υπάρχουν πολλές προκλήσεις, έτσι συμβαίνει και με την εκτύπωση τροφίμων, μία από τις οποίες είναι η απόκτηση της ιδανικής συνοχής του υλικού εκτύπωσης. Σύμφωνα με τους Lille et al. (2018), το ιξώδες ενός κατάλληλου υλικού τροφίμων για τρισδιάστατη εκτύπωση θα πρέπει να είναι αρκετά χαμηλό ώστε να επιτρέπει την εξώθηση μέσω ακροφυσίου, αλλά αρκετά υψηλό ώστε να δίνει μια συνεκτική και σταθερή δομή όταν στρώνεται σε μια επιφάνεια εκτύπωσης.

Ο αριθμός δημοσιευμένων εργασιών που προσπαθεί να κατανοήσει τη σχέση μεταξύ των δυνάμεων διάτμησης κατά τη διάρκεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης και των αλλαγών υφής στα τρόφιμα αυξάνεται συνεχώς (Ross, Crowley, Crotty, Oliveira, Morrison, & Kelly, 2021). Οι παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, επίσης για τον προσδιορισμό της δυνατότητας εκτύπωσης ορισμένων τροφίμων. Οι Derossi κ.α. (2017) διαπίστωσαν ότι οι διαστάσεις και οι ιδιότητες της μικροδομής ενός τρισδιάστατου τυπωμένου σνακ με βάση τα φρούτα επηρεάστηκαν από τον ρυθμό ροής του υλικού, ο οποίος είναι μια προσαρμόσιμη ρύθμιση στο λογισμικό αποκοπής (λογισμικό υπολογιστή που χρησιμοποιείται στις περισσότερες διαδικασίες εκτύπωσης που διαδραματίζει ενεργό ρόλο στη μετατροπή ενός μοντέλου 3D σε g-code ή εκπαιδευτικό κώδικα για τον εκτυπωτή) του εκτυπωτή, υπαγορεύοντας τον όγκο του υλικού που εξωθείται για μια χρονική περίοδο. Παρατηρήθηκε ότι οι χαμηλοί ρυθμοί ροής κατέληξαν σε ασταθή και διαταρασσομένη εσωτερική δομή, ενώ η αυξημένη ροή παρήγαγε παχύτερες δομές με συγχωνευμένα στρώματα και μειωμένο πορώδες (Ross, Crowley, Crotty, Oliveira, Morrison, & Kelly, 2021).

Οι μεγαλύτερες προκλήσεις στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η ακρίβεια της δομής και η σταθερότητα του σχήματος, οι οποίες μπορούν να επηρεαστούν από το σχήμα του τρισδιάστατου μοντέλου, τις παραμέτρους του κοψίματος, την απόδοση ροής των συστατικών και τη μετεπεξεργασία. Στην εκτύπωση τροφίμων, οι ιδιότητες των συστατικών τροφίμων, όπως οι ρεολογικές ιδιότητες, οι θερμικές ιδιότητες και οι χημικές ιδιότητες, είναι κρίσιμες για την ακρίβεια της δομής των τυπωμένων αντικειμένων τροφίμων (Liu, Zhang, Bhandari, & Wang, 2017).

Άλλοι κρίσιμοι παράγοντες επεξεργασίας για την ποιότητα των εκτυπωμένων είναι το ύψος εκτύπωσης, η διάμετρος ακροφυσίων, ο ρυθμός εκτύπωσης, ο ρυθμός κίνησης του ακροφυσίου, το πάχος στρώματος και η θερμοκρασία και οι οποίοι απασχολούν τους κατασκευαστές (Hao et al., 2010). Επιπλέον, η παραμόρφωση που προκαλείται από τη μετεπεξεργασία, όπως η ξήρανση και το ψήσιμο, είναι ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη ακρίβεια εκτύπωσης τρισδιάστατου εκτυπωμένων αντικειμένων (Liu et al., 2017). Μεταξύ όλων των παραγόντων, ο σχεδιασμός του τρισδιάστατου μοντέλου είναι το πρώτο και κρίσιμο βήμα που μπορεί να καθορίσει ή να επηρεάσει τη σταθερότητα και την ακρίβεια των τελικών τυπωμένων αντικειμένων. Ένα καλό μοντέλο πρέπει να είναι κατάλληλο για τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες εκτύπωσης, όπως

παραμέτρους τρισδιάστατων εκτυπωτών, παραμέτρους μελανιών τροφίμων και παραμέτρων επεξεργασίας μετά την εκτύπωση. Επιπλέον, είναι καλό το μοντέλο να ανταποκρίνεται στις ανάγκες των καταναλωτών.

Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι ένας συγκεκριμένος συνδυασμός ρεολογικών ιδιοτήτων του υλικού σε σχέση με τον τύπο του ακροφυσίου επιτρέπει τόσο την εξώθηση του υλικού από το ακροφύσιο, όσο και τη στρωματοποίηση του τρόφιμου. Υπάρχουν τρόφιμα που εξωθούνται εύκολα αλλά δεν εκτυπώνονται λόγω μικρού ιξώδους (για παράδειγμα η κέτσαπ και η μουστάρδα). Από την άλλη υπάρχουν εδώδιμα υλικά που δεν εξωθούνται εύκολα λόγω μεγάλου ιξώδους (ζυμάρι) αλλά η στρωματοποίησή τους είναι εύκολη.

Στις περισσότερες καταστάσεις τρισδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων που βασίζονται σε εξώθηση, τα υλικά εκτύπωσης εμφανίζουν τυπική συμπεριφορά αραίωσης. Μια τέτοια συμπεριφορά επιτρέπει στα υλικά με υψηλούς ρυθμούς διάτμησης να εξωθούνται εύκολα (Liu et al., 2018). Οι προβλεπόμενες υψηλές τιμές ρυθμού διάτμησης θα πρέπει συνεπώς να επιτρέπουν στα πηκτώματα κόκκων να συμπιέζονται ομαλά κατά τη διαδικασία εκτύπωσης.

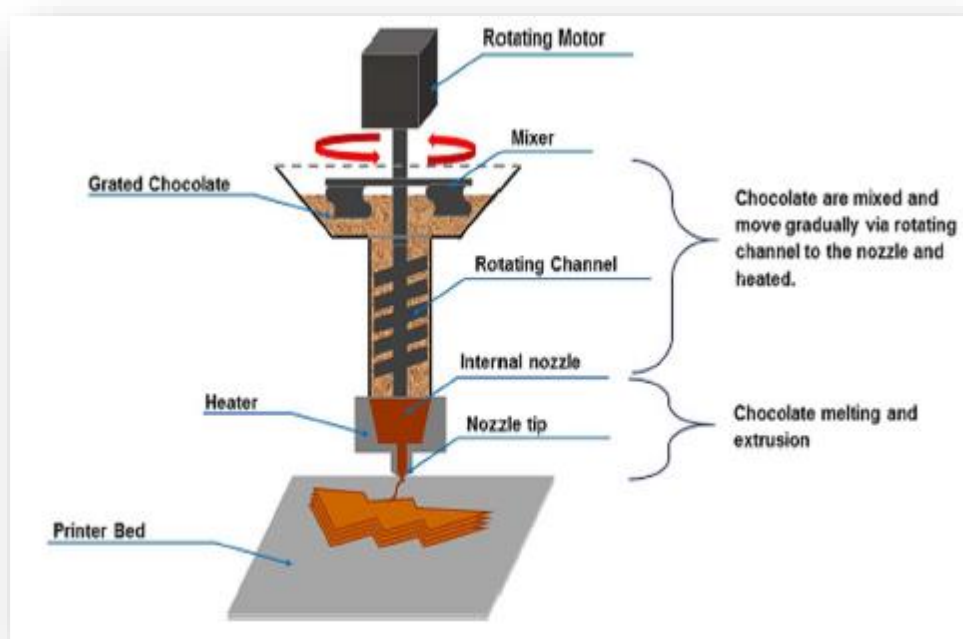
Οι Guo, Zhang και Devahastin (2020) στην έρευνά τους παρατήρησαν ότι η σειρά ευκολίας με την οποία εξωθούνται από την κεφαλή της σύριγγας τα τρόφιμα που χρησιμοποίησαν είναι μαύρο ρύζι, μαύρο σιτάρι, καστανό ρύζι, φασόλια τύπου κουκιών.

Στην έρευνα των Martínez-Monzó, Cárdenas και García-Segovia (2019) χρησιμοποιήθηκαν δοκιμές εξώθησης τυποποιημένου πουρέ πατάτας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σύνθεση με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε αφυδατωμένο πουρέ πατάτας (38 g αφυδατωμένου πουρέ πατάτας σε 250 mL πλήρους γάλακτος) σε θερμοκρασία 30°C ήταν η πιο σταθερή από όλες. Η μέση δύναμη από τη δοκιμή εξώθησης συσχετίστηκε με την ικανότητα εκτύπωσης, αλλά η επίδραση της θερμοκρασίας οδήγησε στη δυσκολία καθορισμού αυτής της παραμέτρου.

1.4. Τεχνολογίες εκτύπωσης τροφίμων

1.4.1 Τροποποιήσεις εκτυπωτών

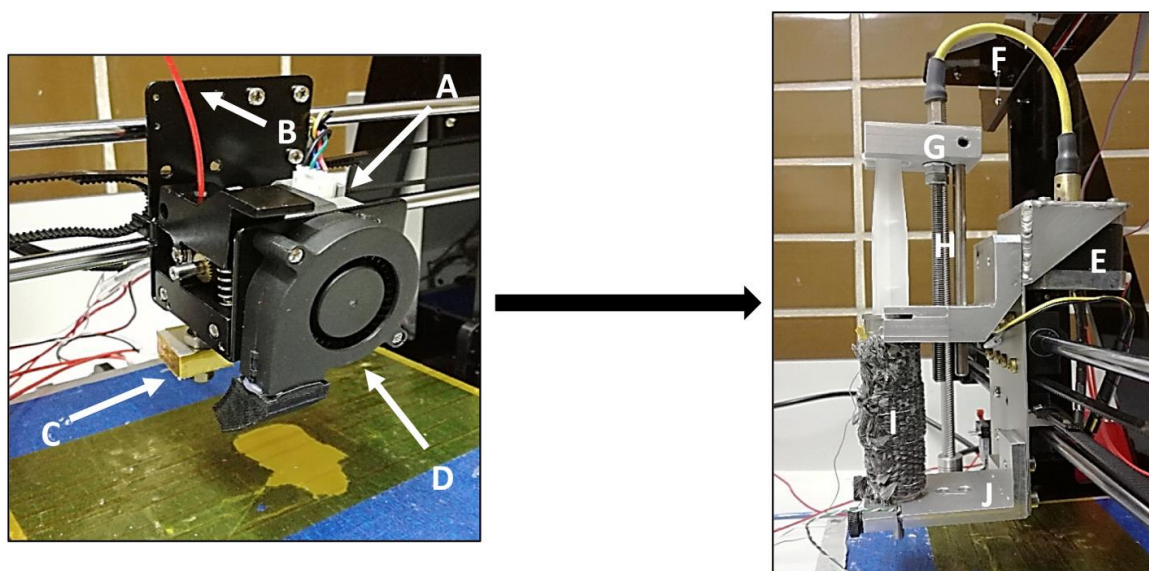
Υπάρχουν διάφοροι εκτυπωτές που υπέστησαν τροποποίηση ώστε να αποκτήσουν λειτουργία προσαρμοσμένη στα τρόφιμα. Για παράδειγμα ο Tronxy X8 (Shenzhen Tronxy Technology Co., Ltd., China) είναι ένας 3D εκτυπωτής που τροποποιήθηκε σε σχέση με τον αρχικό εκτυπωτή (εκτύπωση με νήμα) για να εκτυπώσει τρόφιμα σαν πάστα (Ross, Crowley, Crotty, Oliveira, Morrison, & Kelly, 2021). Αυτό επιτεύχθηκε μέσω τροποποιήσεων στο αρχικό σύστημα εξώθησης. Η αρχική κεφαλή εκτύπωσης λειτουργούσε με τροφοδοσία πλαστικού νήματος στο θερμό άκρο μέσω της περιστροφής του κινητήρα. Ωστόσο, για την εκτύπωση επεξεργασμένου τυριού, ολόκληρη έπρεπε να αναδιαμορφωθεί η κεφαλή εκτύπωσης για να προσαρμόσει έναν μηχανισμό με βάση τη σύριγγα.



Εικ. 1.4: Σχηματική απεικόνιση ενός 3d εκτυπωτή τροφίμων

(Πηγή: *Mantihal, Prakash, Godoi, & Bhandari, 2017*)

Μια σύριγγα αλουμινίου κατασκευάστηκε για να τη συγκρατεί και ο αρχικός κινητήρας της κεφαλής εκτύπωσης επανασυνδέθηκε στο πίσω μέρος της βάσης της σύριγγας. Προκειμένου να κινηθεί η ελικοειδής βίδα που είναι συνδεδεμένη στο περίβλημα του εμβόλου ο κινητήρας περιστρέφει έναν εύκαμπτο άξονα κίνησης (Εικ. 1.5F) που συνδέεται με τον ελικοειδή κοχλία που οδηγεί τον μηχανισμό εμβόλου, ωθώντας έτσι το περίβλημα του εμβόλου προς τα κάτω (ή προς τα πάνω) ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης (δηλαδή, αντίθετη / δεξιόστροφα). Ο κύλινδρος της σύριγγας εφοδιάστηκε επίσης με σύρματα θερμοαντήρα για να επιτρέψει στη θερμομονωμένη σύριγγα να θερμανθεί με ελεγχόμενο τρόπο. Τα σύρματα του θερμοαντήρα κατασκευάστηκαν από σύρμα νικελίου (διαμέτρου 0,5 mm) και τυλίχθηκαν 34 στροφές γύρω από τη σύριγγα από ανοξείδωτο χάλυβα (εξωτερική διάμετρος 22 mm). Η αντίσταση του πηνίου βρέθηκε να είναι 14,4 Ω (Ohms) όταν εφαρμόστηκαν 14,5 V από το τροφοδοτικό (όριο ρεύματος 1 Amp).



Εικ.1.5: Μηχανισμός 3d εκτυπωτή

(Πηγή: *Ross, Crowley, Crotty, Oliveira, Morrison, & Kelly, 2021*)

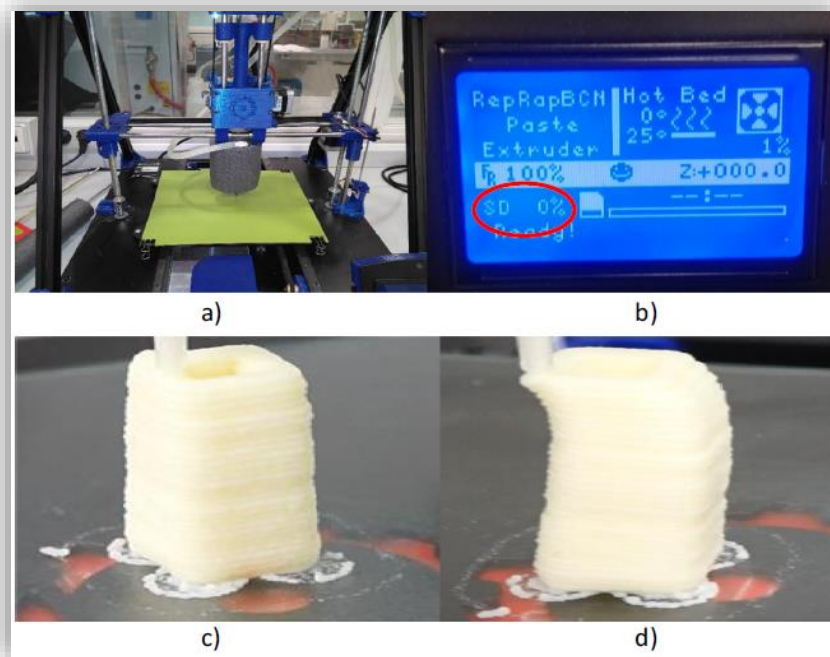
1.4.2 Τεχνικές εκτύπωσης

Η εκτύπωση με βάση την εξώθηση, γνωστή και ως τήξη εναπόθεσης (FDM), είναι από τις πιο διαδεδομένες και άρχισε να χρησιμοποιείται για εκτύπωση πλαστικού (Ahn, Montero, Odell, Roundy, & Wright, 2002). Με κάποια ανακατασκευή του εκτυπωτή επιτυγχάνεται η συνεχής εξώθηση του λιωμένου υλικού ή του πολτού που μοιάζει με πάστα από ένα κινούμενο ακροφύσιο και κάθε στρώση κολλάει με την προηγούμενη μετά από ψύξη.

Η εκτύπωση με βάση την εξώθηση βρίσκει εφαρμογή στην εκτύπωση σοκολάτας και άλλων μαλακών υλικών, όπως ζύμες, πουρέ πατάτας, τυρί και παστά κρέατα (Lipton, Cutler, Nigl, Cohen, & Lipson, 2015; Yang, Zhang, & Bhandari, 2015). Πολύ σημαντικό για το εμφανισιακό αποτέλεσμα της εκτύπωσης είναι να έχει καλή ευκρίνεια και ακρίβεια. Η ακρίβεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης επηρεάζεται από το μηχανισμό εξώθησης που θα χρησιμοποιηθεί, από τις ιδιότητες των αξιοποιήσιμων υλικών, όπως ρεολογικές ιδιότητες, ζελατινοποίηση, σημείο τήξης και θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως (T_g). Επίσης από παράγοντες που σχετίζονται με το σχεδιασμό του εκτυπωτή, όπως το ύψος και η διάμετρος του ακροφυσίου, η ταχύτητα της εξώθησης αλλά και από τις διεργασίες που εφαρμόζονται μετά την επεξεργασία.

Έχουν εφαρμοστεί τρεις μηχανισμοί εξώθησης στην τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων: εξώθηση μέσω κοχλία, εξώθηση με βάση την πίεση αέρα και εξώθηση μέσω σύριγγας. Στη διαδικασία εξώθησης με κοχλία, τα υλικά των τροφίμων τοποθετούνται στον τροφοδότη και μετακινούνται στην άκρη του ακροφυσίου με τη συμβολή ενός κινούμενου κοχλία. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας εξώθησης, τα υλικά μπορούν να τροφοδοτούνται συνεχώς στη χοάνη, πραγματοποιώντας έτσι τη συνεχή εκτύπωση. Εντούτοις, η εξώθηση με κοχλία δεν είναι κατάλληλη για τον πολτό τροφής με υψηλό ιξώδες και υψηλή μηχανική αντοχή, διότι τα τυπωμένα δείγματα δεν επιτυγχάνουν την κατάλληλη μηχανική αντοχή για να στηρίξουν τα επόμενα εναποτιθέμενα στρώματα και συνεπώς οδηγούν σε μια φαινομενικά συμπίεσμένη παραμόρφωση και κακή ανάλυση (Liu, Zhang, Bhandari, & Wang, 2017). Η εξώθηση των τροφίμων που προκαλείται με την πίεση αέρα είναι κατάλληλη για την εκτύπωση υγρών ή χαμηλού ιξώδους υλικών (Sun, Zhou, Yan, Huang, & Lin, 2018). Αντίθετα η εξώθηση μέσω σύριγγας είναι κατάλληλη για την εκτύπωση τροφίμων με υψηλό ιξώδες και υψηλή μηχανική αντοχή, συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πολύπλοκων δομών 3D με υψηλή ανάλυση. Στα μειονεκτήματα των μεθόδων εξώθησης με βάση την πίεση του αέρα και με τη σύριγγα ανήκει το γεγονός ότι δεν επιτρέπεται η συνεχής τροφοδοσία υλικών τροφίμων κατά την εκτύπωση. Στην εκτύπωση με βάση την εξώθηση, οι ιδιότητες του υλικού των τροφίμων που θα εκτυπωθούν, όπως η περιεκτικότητα σε υγρασία, οι ρεολογικές ιδιότητες και οι θερμικές ιδιότητες, είναι κρίσιμες για την επιτυχή εκτύπωση. Σημαντικό μέγεθος αποτελεί το ιξώδες του υλικού που θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να εξωθείται εύκολα μέσω ενός λεπτού ακροφυσίου αλλά συγχρόνως και σχετικά υψηλό ώστε να

συγκρατεί τα εναποτιθέμενα στρώματα σε επόμενη χρονική στιγμή (Godoi, Prakash, & Bhandari, 2016).



Εικ.1.6

Εικ. 1.6a: 3D εκτυπωτής BCN με σύστημα ψύξης

Εικ. 1.6b: Οθόνη που αναγράφει το ποσοστό εκτέλεσης της εκτύπωσης

Εικ. 1.6c: Εκτέλεση εκτύπωση

Εικ. 1.6d: Τέλος εκτύπωσης

(Πηγή: *Martínez-Monzó, Cárdenas, & García-Segovia, 2019*)

1.4.3 Μέθοδοι εξώθησης

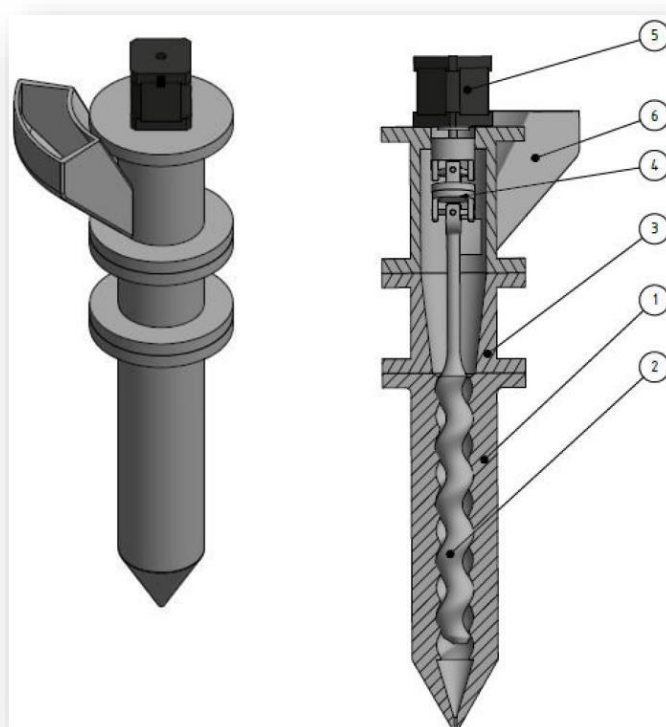
Η προσομοίωση στα ακροφύσια για εκτυπώσιμα υλικά τροφίμων έχει μελετηθεί πολύ λίγο. Διεξάγονται έρευνες σε διάφορα υλικά τροφίμων χρησιμοποιώντας ανάλογα με τις ρεολογικές ιδιότητες το κατάλληλο ακροφύσιο.

A. Εξώθηση με περιστροφική βίδα ή κοχλία

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στην εκτύπωση σοκολάτας και η διαδικασία μοιάζει με την αντίστοιχη της εξώθησης πλαστικών υλικών. Τα προς εκτύπωση υλικά αφού τοποθετηθούν στη χαάνη πάνω από την περιστρεφόμενη βίδα ή κοχλία παρασύρονται καθώς αρχίζει η περιστροφή. Ειδικά για την εκτύπωση σοκολάτας, ο

θάλαμος εξωτερικά θερμαίνεται προκαλώντας λιώσιμο της σοκολάτας, όπως και στην εκτύπωση πλαστικού.

Αυτή η μέθοδος εξώθησης είναι παρόμοια με την εξώθηση πλαστικών υλικών. Αρχικά, οι κόκκοι σοκολάτας τοποθετούνται σε χοάνη πάνω από τη περιστρεφόμενη βίδα. Ο κοχλίας περιστρέφεται και μεταφέρει τους κόκκους σε έναν θάλαμο ο οποίος θερμαίνεται από την εξωτερική πλευρά, που συνεπώς λιώνει τη σοκολάτα και της προσδίδει δομή που θυμίζει πλαστικό. Στο άκρο αυτού του θαλάμου τοποθετείται ακροφύσιο (εξωθητήρας) από το οποίο εξωθείται η σοκολάτα και καταλήγει στην επιφάνεια εργασίας (Zeleny, & Ruzicka, 2017).



Εικ. 1.7: Μηχανισμός εξώθησης με κοχλία

(Πηγή: Zeleny, & Ruzicka, 2017)

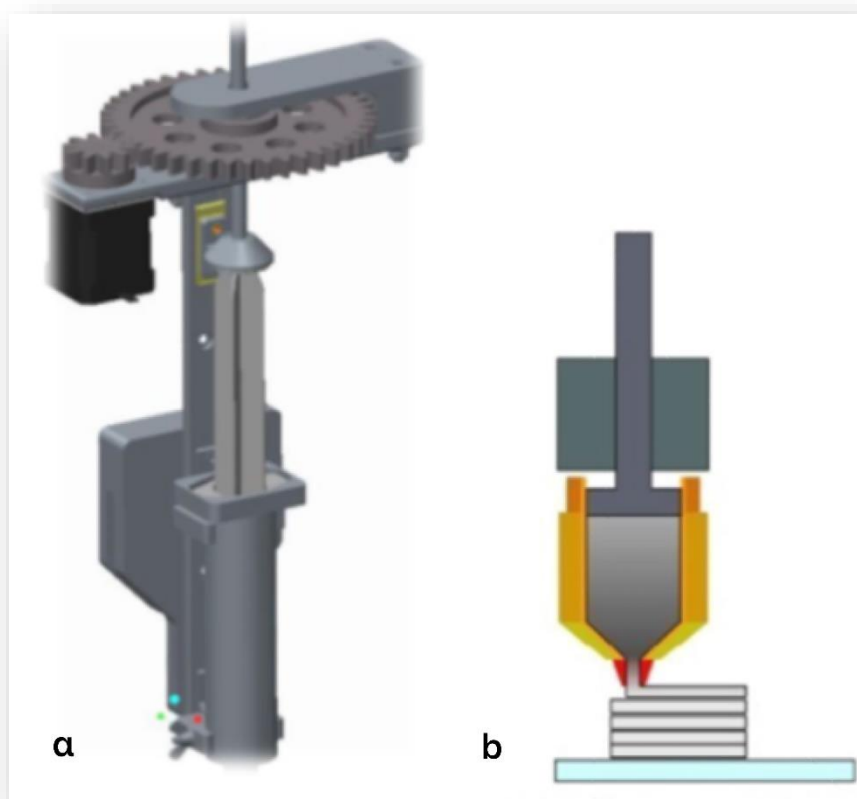
Στον επόμενο πίνακα δίνεται η επεξήγηση των αριθμημένων τμημάτων του αγωγού εξώθησης της Εικ. 1.7.

	Τμήμα αγωγού εξώθησης
1	στάτορας
2	δρομέας
3	θερμαινόμενος θάλαμος
4	μηχανισμός «άρθρωσης»
5	κινητήρας
6	χοάνη

Τα μικρά κενά που δημιουργούνται καθώς περιστρέφεται ο κοχλίας συντελεί στην άντληση της σοκολάτας. Οι κόκκοι σοκολάτας από τη χοάνη στην οποία τοποθετούνται οδηγούνται στον θερμαινόμενο θάλαμο. Ο κοχλίας περιστρέφεται μέσω ενός κινητήρα.

B. Εξώθηση με έμβολο

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτύπωση σοκολάτας.



Εικ. 1.8: Μηχανισμός εξώθησης με έμβολο

(Πηγή 1.8a: *Zeleny, & Ruzicka, 2017*)

(Πηγή 1.8b: *Gonzalez-Gutierrez, Cano, Schuschnigg, Kukla, Sapkota, & Holzer, 2018*)

1.4.3 Τύποι ακροφυσίων

Στην παρούσα εργασία έχουν παρουσιαστεί εικόνες που απεικονίζουν τρισδιάστατους εκτυπωτές τροφίμων. Οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές διαθέτουν διαφορετικούς τύπους ακροφυσίων που θα μπορούσαν να παρομοιαστούν με το ευθύ μεταλλικό τμήμα που βρίσκεται στο τελείωμα μιας σύριγγας. Ωστόσο, το ακροφύσιο θα μπορούσε να είναι ένα συγκλίνων πλαστικό ή μεταλλικό τμήμα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στους παράγοντες που επηρεάζουν την εκτύπωση τροφίμων, εκτός

των ρεολογικών ιδιοτήτων του υλικού και ο τύπος του ακροφυσίου παίζει σημαντικό ρόλο.

Τα πιο συνηθισμένα ακροφύσια που χρησιμοποιούνται στους τρισδιάστατους εκτυπωτές τροφίμων (Karyappa, & Hashimoto, 2019) είναι αυτοί, του τύπου σύριγγας και ο συγκλίνων. Στην (Εικ. 1.9) φαίνονται δύο αντιπροσωπευτικά ακροφύσια που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση σοκολάτας.



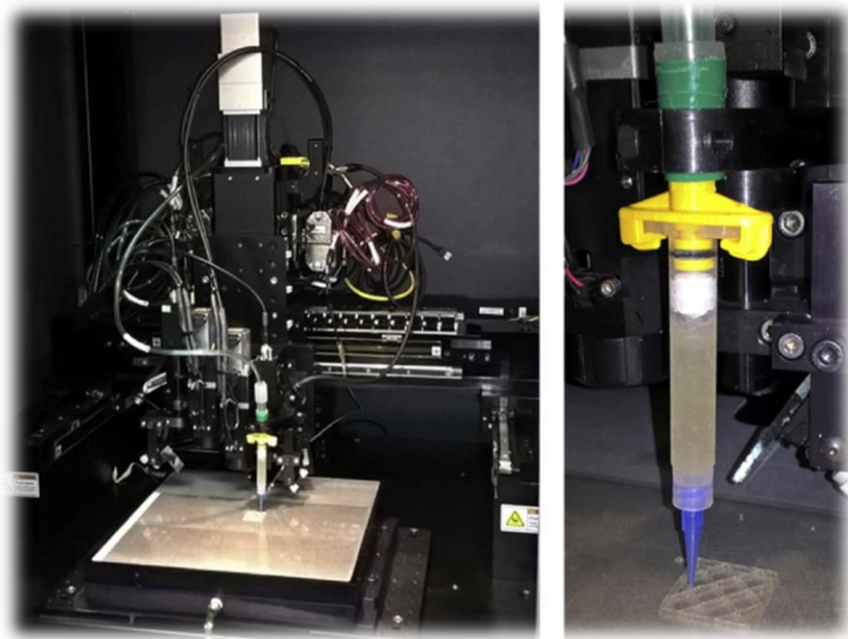
Ακροφύσιο τύπου Σύριγγας



Συγκλίνων ακροφύσιο

Εικ. 1.9: Οι δύο συχνότεροι τύποι ακροφυσίων

(Πηγή: Karyappa, & Hashimoto, 2019)



Εικ. 1.10: Εξώθηση υλικού σε τρισδιάστατο εκτυπωτή τροφίμων με συγκλίνοντα ακροφύσια

(Πηγή: Lille, Nurmela, Nordlund, Metsa-Kortelainen, & Sozer, 2018)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ρεολογία

2.1 Ορισμός

Η ρεολογία (*rheology*) είναι η επιστήμη που μελετά την απόκριση των ρευστών υπό την άσκηση τάσεων, την αλλαγή του σχήματος (παραμόρφωση), τον τρόπο ροής των ρευστών, όπως και την παραμόρφωση των υλικών υπό την άσκηση τάσεων. Αποτελεί κλάδο της Μηχανικής, και περιλαμβάνει τη μελέτη υγρών, μαλακών στερεών και στερεών, σε κατάλληλες συνθήκες όταν το στερεό υποβάλλεται σε κίνηση. Πρόκειται για έναν κλάδο διαρκώς αναπτυσσόμενο, καθώς απασχολεί τόσο τη χημική βιομηχανία, όσο και τη βιοϊατρική, ενώ βρίσκει εφαρμογή και σε πολλούς άλλους τομείς, τόσο στη βιομηχανία όσο και στα εργαστήρια (Barnes, 1985).

Οι ρεολογικές συμπεριφορές είναι η απόκριση παραμόρφωσης σε μια εφαρμοζόμενη ροπή ή αντίστροφα. Στις θεμελιώδεις ρεολογικές δοκιμές η παραμόρφωση μπορεί να μετατραπεί σε τάση και η ροπή μπορεί να μετατραπεί σε πίεση ώστε να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή (Joyner, 2019).

Η εργασία αυτή ασχολείται με την εκτύπωση τροφίμων και όλες τις παραμέτρους που την επηρεάζουν. Για την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη, κρίνεται σκόπιμη η επισκόπηση κάποιων βασικών αρχών και όρων, ενώ παρατίθενται και οι ορισμοί των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή.

2.2 Η σημασία της ρεολογίας στη βιομηχανία τροφίμων

Η ροή στα ρευστά καλύπτει ένα σημαντικό μέρος της ρεολογίας για όσους ειδικούς ασχολούνται με τα τρόφιμα (μηχανικοί ρευστών τροφίμων) αφού μέσα από τη μελέτη της ροής είναι δυνατόν να γίνει ο σχεδιασμός των περισσότερων διεργασιών επεξεργασίας τροφίμων. Εκτός αυτού για την περιγραφή της ροής αιωρημάτων, προϊόντων σε κοκκώδη μορφή και σκονών, όπως και της υφής στερεών τροφίμων αξιοποιούνται τα δεδομένα από τις βασικές αρχές της ρεολογίας (Joyner, 2019).

Αξίζει να τονίσουμε ότι όσες θεωρίες ισχύουν γενικά για τα υλικά δεν βρίσκουν εφαρμογή ως έχουν στα τρόφιμα μιας και αυτά αποτελούν κατηγορία πολύπλοκων συστημάτων. Είναι πλέον γνωστό ότι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη διεργασιών στα τρόφιμα παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η επίδραση συγκεκριμένων χημικών ουσιών και μικροβιολογικών δράσεων. Έτσι προκύπτει η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν εμπειρικά μεγέθη και πειραματικές μετρήσεις που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για τα τρόφιμα (Joyner, 2019).

Οι ρεολογικές ιδιότητες των τροφίμων αποτελούν θέμα έρευνας για τους παρακάτω λόγους:

1. Αρχικά επειδή τα πρότυπα που θέτονται για την ποιότητα των τροφίμων σχετίζονται με τις ιδιότητες αυτές.
2. Σημαντικό λόγο αποτελεί και η μέτρηση των ρεολογικών μεγεθών με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων για την τελική επιλογή τους ως προς τους καταναλωτές. Με οργανοληπτικές δοκιμές οι ειδικοί καταλήγουν στα τρόφιμα που αρέσουν στους καταναλωτές.
3. Επίσης γίνεται μελέτη των φυσικών και ρεολογικών ιδιοτήτων, όπως επίδραση του νερού ή του προστιθέμενου λίπους ώστε να μελετηθεί η αλληλεπίδρασή τους με τα συστατικά των τροφίμων
4. Τέλος καταλήγουμε σε αριθμητικές τιμές για τις ρεολογικές παραμέτρους που σχετίζονται με υπολογισμούς ροής των ρευστών όταν υφίστανται διάφορες διεργασίες.

Η επιστήμη της ρεολογίας δίνει έμφαση στη μελέτη της δομής και των ιδιοτήτων των ρευστών οι οποίες αξιοποιούνται και στα τρόφιμα. Για να περιγράψουμε τη ροή των ρευστών στα τρόφιμα (όπως και σε άλλα ρευστά) απαιτείται η γνώση και χρήση των ρεολογικών ιδιοτήτων (Rao, 1995).

Ορισμένες ρεολογικές ιδιότητες των πρώτων υλών τροφίμων και των μεταποιημένων τροφίμων σταθμίζονται στη βιομηχανία τροφίμων ως παράμετροι του συνηθισμένου ποιοτικού ελέγχου. Αρκετές ρεολογικές συμπεριφορές αναλύονται ή μοντελοποιούνται σε ερευνητικά και αναπτυξιακά προγράμματα αξιοποιώντας διάφορες ρεολογικές τεχνικές. Αν και η βασική θεμελιώδης γνώση των ρεολογικών εννοιών είναι ευρέως γνωστή, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση για τους επιστήμονες που θέλουν να ασχοληθούν με τον συγκεκριμένο τομέα και δεν έχουν τις απαραίτητες γνώσεις για την ορθή ερμηνεία της σημασίας των επιμέρους ρεολογικών

ιδιοτήτων και των ρεολογικών μετρήσεων σε μια δεδομένη εφαρμογή ή ερευνητική δημοσίευση (Joyner, 2019).

Τα ημιστερεά τρόφιμα έχουν πολύπλοκες μικροδομές και ρεολογία, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει τους ερευνητές να σχεδιάσουν συγκεκριμένες ιδιότητες ως προς την υφή και την επεξεργασία. Για τη στοχευμένη σύνθεση προϊόντων διατροφής με συγκεκριμένη υφή, πρέπει να προσδιοριστούν τα επιθυμητά δομικά χαρακτηριστικά των τροφίμων και να ταξινομηθεί η λειτουργική συμπεριφορά των συστατικών τους. Κατά την ανάπτυξη ρευστών τροφίμων, η δομή τους (σε κάποιο βαθμό) και οι λειτουργικές συμπεριφορές μπορούν να εξεταστούν με ρεολογικές δοκιμές. Ωστόσο, υπάρχουν συχνά προκλήσεις μέτρησης που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ροής είναι κρίσιμη για την καλή απόδοση των συστημάτων ροής. Πρόκειται για μία από τις μηχανολογικές προσεγγίσεις που βοηθούν στην επίλυση προβλημάτων που ανακύπτουν λόγω των παραπάνω περιπτώσεων. Η διαδικασία μοντελοποίησης φαίνεται να έχει θετική επίδραση στην προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος στη μηχανική επεξεργασία τροφίμων, καθώς αξιόπιστα μοντέλα μπορούν να εξαλείψουν τις περιττές δοκιμές και να προβλέψουν συμπεριφορές ροής προϊόντων σε αγωγούς, μειώνοντας έτσι το κόστος έρευνας και ανάπτυξης και τους κινδύνους επεξεργασίας (π.χ. αντλίες ακατάλληλου μεγέθους).

Αν και οι συμπεριφορές ροής που εξαρτώνται από τη διάτμηση και το χρόνο του ρευστού υλικού τροφίμων σε αγωγούς μπορεί να είναι περίπλοκες, οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει πολλαπλές προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη ροή αυτού του υλικού. Εμπειρικά μοντέλα που είναι βασισμένα σε ισχύοντες νόμους και τα οποία αναπτύσσονται μέσω πειραματικής τοποθέτησης δεδομένων χρησιμοποιούνται συχνά για την πρόβλεψη συμπεριφορών ροής τροφίμων (Butler, & O'Donnell 1999; Doublier, & Durand 2008).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα μοντέλα συμπεριφοράς ροής εφαρμόζονται πολύ πιο συχνά στο σχεδιασμό διαδικασιών τροφίμων σε σχέση με τα δομημένα μοντέλα, μιας και τα μοντέλα συμπεριφοράς ροής τείνουν να είναι απλούστερα στην εργασία και οι συμπεριφορές ροής τροφίμων είναι σχετικά εύκολο να μετρηθούν.

Γίνεται αντιληπτό πως η ρεολογία είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τον χαρακτηρισμό των συμπεριφορών ροής και παραμόρφωσης των τροφίμων. Κατά τη διάρκεια της μακράς ιστορίας της, οι επιστήμονες που μελετούν την ρεολογία έχουν αναπτύξει πολλαπλές μεθόδους χαρακτηρισμού των ρεολογικών συμπεριφορών των υλικών. Οι περιστροφικές δοκιμές χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό

της συμπεριφοράς ροής, ενώ οι ταλαντωτικές και άλλες παροδικές δοκιμές χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του ιξώδους.

Οι ρεολογικές συμπεριφορές μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω μιας ποικιλίας εξισώσεων και να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στην κατανόηση της επεξεργασίας υλικών και των αισθητηριακών συμπεριφορών. Ενώ οι επιστήμονες που μελετούν την ρεολογία έχουν κάνει μεγάλα βήματα στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα υλικά αντιδρούν στη μεταδιδόμενη ροπή και παραμόρφωση, μένει να ολοκληρωθεί ένα μεγάλο μέρος ερευνών πριν από την πλήρη κατανόηση της ροής του υλικού, με την οποία επιτυγχάνονται συμπεριφορές παραμόρφωσης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα τρόφιμα, των οποίων οι σύνθετες δομές και η ανομοιογένεια καθιστούν δύσκολο τον ρεολογικό χαρακτηρισμό. Παρ' όλα αυτά, η ρεολογία παραμένει πολύτιμο εργαλείο για την ανάπτυξη προϊόντων και διεργασιών στη βιομηχανία τροφίμων (Joyner, 2019).

2.3 Ρεολογικές Παράμετροι

Διαφορετικές ρεολογικές μεταβλητές σχετίζονται με κάθε τύπο παραμόρφωσης που εφαρμόζεται στα ρευστά και με κάθε τύπο ρύθμισης δοκιμής. Στη συνέχεια παραθέτουμε μια σύντομη λίστα όρων που σχετίζονται με παραμορφώσεις διάτμησης.

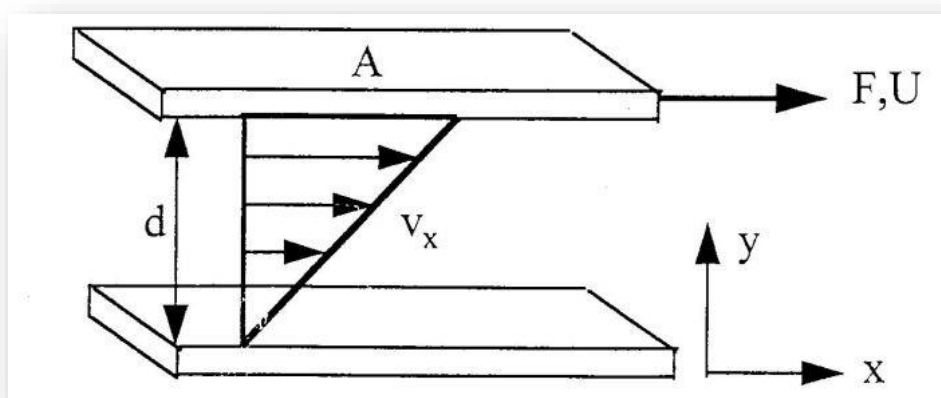
2.3.1 Ιξώδες

Το ιξώδες (viscosity) είναι το μέγεθος που μετρά την ικανότητα ενός ρευστού να αντιστέκεται στη ροή και τη σταδιακή παραμόρφωση του μέσω εφαρμογής τάσης διάτμησης (Vocaldo, 2007). Εκφράζει την εφαρμοζόμενη πίεση ή τη δύναμη που πρέπει να ασκηθεί για τη μετακίνηση ή για την εμφάνιση ρυθμού διάτμησης. Το ιξώδες είναι ίσως η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα ρεολογικής συμπεριφοράς ενός ρευστού ή ημίρρευστου προϊόντος. Η φυσική του έννοια είναι η αντίσταση των ρευστών στη ροή, αποτελεί, δηλαδή, το μέγεθος της εσωτερικής τριβής των μορίων των ρευστών. Το ιξώδες (μ) είναι αντιστρόφως ανάλογο της ρευστότητας ($\mu=1/\rho$). Με έναν όμως πιο τεχνικό ορισμό σαν ιξώδες ορίζεται η αντίσταση στη ροή διάτμησης και τότε ονομάζεται δυναμικό ιξώδες.

Το ιξώδες οριζόμενο ως προς την τάση διάτμησης (που αναλύεται παρακάτω) ισούται με το πηλίκο της τάσης προς τον ρυθμό διάτμησης $\mu = \tau/\dot{\gamma}$ και έχει βασική

μονάδα μέτρησης στο S.I. το Pa·s. Το συγκεκριμένο ιξώδες (μ) ονομάζεται δυναμικό (ή απόλυτο), υπάρχει όμως και το κινηματικό ιξώδες (ν) που χρησιμεύει σε κάποιους υπολογισμούς και ισούται με το πηλίκο του δυναμικού ιξώδους προς την πυκνότητα του ρευστού: $\nu = \mu/\rho$ και έχει μονάδα μέτρησης το 1 St (1 Stoke = $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Για να οριστεί το ιξώδες υποθέτουμε μία διάταξη που περιλαμβάνει δύο παράλληλες πλάκες, που η καθεμία έχει εμβαδόν A και απέχουν μεταξύ τους d . Θεωρούμε ότι η μία είναι ακίνητη και η άλλη κινείται με σταθερή ταχύτητα u . Αν ανάμεσα στις δύο πλάκες τοποθετηθεί ρευστό, τότε εμφανίζεται τριβή μεταξύ ρευστού και πλακών, οπότε η μετακίνηση της μίας πλάκας απαιτεί άσκηση σταθερής δύναμης F . Έτσι θα μετακινηθεί και το ρευστό. Έχει παρατηρηθεί ότι τα ενδιάμεσα τμήματά του κινούνται με ταχύτητες που παίρνουν τιμές από μηδενική μέχρι μία μέγιστη (u) (Σχήμα 2.1). Το τμήμα του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με την ακίνητη πλάκα δεν κινείται ούτε αυτό, ενώ αντίθετα το τμήμα που βρίσκεται σε επαφή με την κινούμενη πλάκα έχει τη μέγιστη ταχύτητα (u).



Σχήμα 2.1 Γράφημα για τον ορισμό του ιξώδους.

2.3.2 Διατμητική τάση

Διατμητική τάση (τ , shear stress) ονομάζεται το πηλίκο της δύναμης F που ασκείται στη μία πλάκα για επίτευξη σταθερής ταχύτητας προς το εμβαδόν της επιφάνειας A που έρχεται σε επαφή (αφού είναι παράλληλη προς την επιφάνεια, προκαλεί, διάτμηση του υλικού). Η τάση διάτμησης υπολογίζεται συνήθως με την τοποθέτηση δείγματος μεταξύ δύο επιφανειών και ακολουθεί άσκηση μιας δύναμης που μετακινεί τη μια επιφάνεια σε σχέση με τη δεύτερη, ενώ η δεύτερη επιφάνεια παραμένει σταθερή. Χρησιμοποιείται μετατροπέας για τη μέτρηση της δύναμης που

ασκείται στη σταθερή επιφάνεια λόγω της κίνησης της άλλης επιφάνειας (Joyner, 2019). Η μαθηματική σχέση που αποδίδει τη διατμητική τάση είναι:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

με μονάδες πίεσης, δηλαδή N/m^2 (Pa).

Ένα μέγεθος άμεσα σχετιζόμενο με τον ρυθμό διάτμησης $\dot{\gamma}_w$ είναι η διατμητική τάση, τ (σε Pa). Ως τάση διάτμησης τ χαρακτηρίζεται το πηλίκο της εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός ρευστού προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής και σχετίζεται με το ρυθμό διάτμησης μέσω της εξίσωσης:

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} \quad (2.2)$$

Το μέγεθος που λειτουργεί ως σταθερά αναλογίας μ μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης είναι το ιξώδες. Όταν εξετάζεται η ροή ενός ρευστού σε έναν αγωγό, οι διατμητικές τάσεις προκαλούνται στο ρευστό από τα τοιχώματα του αγωγού και η τάση διάτμησης αναφέρεται ως διατμητική τάση του τοιχώματος (*Wall Shear Stress, WSS, τ_w*) (McCabe, Smith, & Harriot, 2008).

Η απαιτούμενη δύναμη για να κινηθεί η επάνω πλάκα με ταχύτητα U είναι:

$$F \propto \frac{AU}{H} \quad (2.3)$$

Το πηλίκο F/A ονομάζεται διατμητική τάση τ και το πηλίκο U/H αντιπροσωπεύει την κλίση (βαθμίδα) ταχύτητας du/dy , και ονομάζεται ρυθμός διάτμησης $\dot{\gamma}$. Επομένως, μπορούμε να γράψουμε:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

όπου η είναι ο συντελεστής του (διατμητικού) ιξώδους. Στο σύστημα μονάδων SI η μονάδα ιξώδους είναι το $\text{Pa}\cdot\text{s}$. Ισχύει ότι $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ poise}$.

Το ιξώδες του αέρα είναι περίπου $10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, το ιξώδες του νερού $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, διαφόρων αλοιφών $1 \sim 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, σιροπιών $10 \sim 10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, τηγμάτων πλαστικών $10^2 \sim 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, ζύμης $10^3 \sim 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, τυριών $10^7 \sim 10^8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Για τα υγρά το ιξώδες μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

Για τήγματα πολυμερών το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης (du/dy) λόγω μοριακών ευθυγραμμίσεων και αποπεριελίξεων

(*disentanglements*) των αλυσίδων. Χαρακτηριστική τιμή του ιξώδους αποτελεί το οριακό ιξώδες για μηδενικό ρυθμό διάτμησης ($\dot{\gamma} \rightarrow 0$), που συχνά συμβολίζεται με η_0

2.3.3 Ρυθμός διάτμησης

Ο ρυθμός διάτμησης (*shear rate*) $\dot{\gamma}$ ή ταχύτητα διάτμησης (*velocity gradient*), v , ισούται με το πηλίκο της ταχύτητας u που κινείται η μία πλάκα προς την απόσταση d μεταξύ των πλακών:

$$\dot{\gamma} = u/d \quad \text{ή πιο σωστά αποδίδοντας τη σχέση ως ρυθμό: } \dot{\gamma} = dv_x/dy \quad (2.5)$$

με μονάδες συχνότητας ή γωνιακής ταχύτητας, Hz (ή s^{-1}). Η ταχύτητα διάτμησης είναι το διαφορικό της μερικής ταχύτητας του ρευστού που κινείται προς την κατεύθυνση x ως προς το διαφορικό της (κατακόρυφης) αποστάσεως z .

Παράλληλα, για ροή σε κυλινδρικό αγωγό, ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα $\dot{\gamma}_w$ ορίζεται ως:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{du}{dr} \quad (2.6)$$

όπου u η ταχύτητα του ρευστού στον αγωγό και r η διάμετρος του αγωγού.

Με βάση το σχήμα 2.1.1 μπορούμε να διακρίνουμε δύο οριακές περιπτώσεις: Όταν $d=0$, τότε θεωρητικά το ρευστό είναι σε επαφή με την ακίνητη πλάκα, άρα έχει όπως αναφέραμε παραπάνω μηδενική ταχύτητα.

$$v_x=0 \quad (2.7)$$

Όταν το ρευστό είναι σε επαφή με την κινούμενη πλάκα, τότε αυτό έχει τη μέγιστη ταχύτητα, δηλαδή ισχύει:

$$v_x=u \quad (2.8)$$

Η ταχύτητα του ρευστού λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της (μηδενική) στο τοίχωμα του αγωγού, όπου η τάση διάτμησης μεγιστοποιείται και εξισώνεται με την διατμητική τάση στο τοίχωμα τ_w . Πλησιάζοντας στο κέντρο του αγωγού η τάση διάτμησης που ασκείται στο ρευστό μειώνεται, ενώ η ταχύτητα αυξάνεται, μέχρι το κέντρο του αγωγού, όπου η τάση διάτμησης λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της (μηδενική), ενώ η ταχύτητα του ρευστού μεγιστοποιείται (u_{max}). Έτσι διαμορφώνεται το προφίλ της ταχύτητας πάνω στη διάμετρο του αγωγού.

2.3.4 Το ιξώδες στα τρόφιμα

Η εργασία αυτή ασχολείται με τα τρόφιμα, στα οποία εκτός από το ιξώδες (για τη σημαντικότητα του οποίου γίνεται λόγος παρακάτω), αντίστοιχα βαρύνουσα σημασία στο τελικό αποτέλεσμα έχει η υφή (texture) αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες (mechanical properties) των τροφίμων. Εξάλλου η συμπεριφορά των τροφίμων ως προς τις ρεολογικές ιδιότητες τα κατηγοριοποιεί ως προς την σκληρότητα, την ευκολία στην κίνηση, την ευπλαστότητα, την υφή και άλλους παράγοντες που συνεργούν στην ποιότητα του τροφίμου.

Καθημερινά χρησιμοποιούμε ρευστά τρόφιμα, δηλαδή τέτοια που έχουν την ικανότητα της ροής λόγω βαρύτητας και συγχρόνως της αλλαγής σχήματος. Υπάρχουν περιπτώσεις που ανάλογα με τη θερμοκρασία μπορούν να χαρακτηριστούν στερεά (σε χαμηλή θερμοκρασία) ή ρευστά (σε υψηλή θερμοκρασία). Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το παγωτό. Από την άλλη υπάρχουν τρόφιμα που δείχνουν στην τελική τους μορφή ρευστά, αλλά ουσιαστικά αυτό οφείλεται στην διασπορά κάποιου στερεού σε υγρό μέσο οπότε δημιουργείται αιώρημα. Αντίστοιχα παραδείγματα αποτελούν οι σάλτσες, οι σούπες και οι παιδικές τροφές.

2.3.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στο ιξώδες

Όπως όλα τα τρόφιμα, έτσι και τα ρευστά μπορούν να αποθηκεύονται, να επεξεργάζονται και να καταναλώνονται σε διάφορες τιμές θερμοκρασίας. Με βάση αυτό το γεγονός είναι αντιληπτό ότι οι ρεολογικές ιδιότητες μελετώνται και με βάση τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο τρόφιμο. Γενικά η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του φαινομενικού ιξώδους σε όλους σχεδόν τους τύπους των ρευστών, σύμφωνα με την εξίσωση (Rao, 2010):

$$\eta_{\text{φαιν}} = \eta_{\infty} \cdot e^{-E_a/RT} \quad (2.9)$$

όπου, E_a η ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy) σε kcal/g-mol, T η απόλυτη θερμοκρασία (K) και R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων (σε kcal/mol·K). Η ενέργεια ενεργοποίησης E_a ποικίλλει από 1,2 έως 14,2 kcal/mol με συνήθεις τιμές γύρω στα 5 kcal/mol. Μπορούμε μέσω της Εξίσωσης (2.9) να υπολογίσουμε το ιξώδες για τις διάφορες θερμοκρασίες του ρευστού. Η Εξίσωση (2.9) συνήθως γίνεται γραμμική, οπότε προκύπτει ότι ο λογάριθμος του $\eta_{\text{φαιν}}$ είναι ανάλογος του αντιστρόφου της απόλυτης θερμοκρασίας ($1/T$). Έτσι από την γραφική απεικόνιση του $\eta_{\text{φαιν}}$ σε συνάρτηση με το $1/T$, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια ενεργοποίησης μέσω

του υπολογισμού της κλίσης της ευθείας. Ειδικά για τα ψευδοπλαστικά ισχύει ότι γενικά όσο ο δείκτης συμπεριφοράς στη ροή (K) είναι μικρότερος, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της θερμοκρασίας στο ιξώδες.

2.3.6 Επίδραση του βαθμού πλήρωσης στο ιξώδες

Τα εδώδιμα υλικά και γενικότερα τα ρευστά όπως για παράδειγμα τα πολυμερικά μείγματα αναμιγνύονται με διάφορους πληρωτές με σκοπό το τελικό προϊόν να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες. Ως συνέπεια της πλήρωσης είναι η μεταβολή των ρεολογικών παραμέτρων, συνήθως όσο αυξάνεται ο βαθμός πλήρωσης αυξάνεται και το ιξώδες. Υπάρχουν μαθηματικά μοντέλα που εκφράζουν τη συγκεκριμένη μεταβολή και περιγράφονται ακολούθως.

Μερικές από τις πρώτες εργασίες για το ιξώδες των συστημάτων πλήρωσης πραγματοποιήθηκε από τον Αϊνστάιν. Έδειξε ότι σε αραιό εναιώρημα, το μοντέλο σκληρών σφαιρών (rigid spheres) διαταράσσει ένα πεδίο διάτμησης προκαλώντας περισσότερη ενέργεια που πρέπει να διαχυθεί. Αυτό εκδηλώνεται ως αύξηση του ιξώδους του συστήματος ανάλογο προς το κλάσμα του όγκου πλήρωσης. Αυτό μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση του Αϊνστάιν, το ιξώδες του σύνθετου, (η_c), το ιξώδες του ρευστού, (η_m), και το κλάσμα βαθμού πλήρωσης, ϕ (Polychronopoulos, Charlton, Suwanda, & Vlachopoulos, 2018):

$$n_c = n_m(1 + 2.5\phi) \quad (2.10)$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει για πολύ αραιωμένα διαλύματα. Ο Batchelor προχωρώντας περαιτέρω τη θεωρία του Αϊνστάιν σε κλάσμα όγκου περίπου 0,1 στην ακόλουθη μορφή.

Για την ισχυρή κίνηση κατά Brown των σφαιρών:

$$n_c = n_m(1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2) \quad (2.11)$$

Και για την ασθενή κίνηση Brown:

$$n_c = n_m(1 + 2.5\phi + 7.6\phi^2) \quad (2.12)$$

Μια κάπως λιγότερο αυστηρή εξίσωση είναι των Guth-Simha η οποία προφανώς εξηγεί τις γειτονικές αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με ικανοποιητικό τρόπο:

$$n_c = n_m(1 + 2.5\varphi + 14.1\varphi^2) \quad (2.13)$$

Καθώς αυξάνεται ο βαθμός πλήρωσης, το ιξώδες αυξάνεται με επιταχυνόμενο ρυθμό (Mooney, Krieger και Dougherty Maron, & Pierce) και άλλοι κάνουν χρήση του λόγου πλήρωσης (packing fraction), (φ_m), σε εμπειρικές εξισώσεις για την πρόβλεψη της αναστολής ιξώδους.

Η εξίσωση Krieger-Dougherty είναι η πιο γενική και χρησιμοποιείται με τη μορφή:

$$\frac{\eta_c}{\eta_m} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m} \quad (2.14)$$

όπου (φ_m) είναι ο λόγος πλήρωσης και (η) είναι συνήθως αναφέρεται ως συντελεστής Αϊνστάιν (ενδογενές ιξώδες), ίσο με 2,5 για το μοντέλο σκληρών σφαιρών.

2.4 Μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την ρεολογική συμπεριφορά των ρευστών

Η ροή ενός ρευστού μπορεί να οφείλεται είτε στην εφαρμογή διατμητικής τάσης, είτε στη δημιουργία διαφορά πίεσης. Υπάρχουν δύο είδη ρευστών, τα Νευτώνεια και τα μη Νευτώνεια ανάλογα με την σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ρυθμού.

- Νευτώνεια Ρευστά

Πρόκειται για τα ρευστά που ικανοποιούν τον πειραματικό νόμο του Isaac Newton (Ισαάκ Νεύτωνα). Στα συγκεκριμένα ρευστά η διατμητική τάση τ είναι ανάλογη του ρυθμού διάτμησης ($\dot{\gamma}$).

Ο Newton ονόμασε αυτή τη σταθερά (μ) δυναμικό ιξώδες ή ιξώδες του ρευστού και συνδέεται με τη διατμητική τάση και το ρυθμό διάτμησης με την επόμενη σχέση που περιγράφει ένα Νευτώνειο ρευστό:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.15)$$

Η ισότητα αυτή ισχύει για σχετικά χαμηλές ταχύτητες διάτμησης όπου η ροή είναι στρωτή. Σε περίπτωση μεγαλύτερων ταχυτήτων η ροή γίνεται τυρβώδης και ο υπολογισμός του ιξώδους γίνεται με εμπειρικές σχέσεις.

Για ένα ασυμπίεστο νευτώνικό ρευστό, η σχέση της διατμητικής τάσης (τ) με τον ρυθμό διάτμησης ($\dot{\gamma}$) είναι γραμμική και διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της ευθείας ισούται με το ιξώδες μ του εκάστοτε ρευστού.

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες (μ), τόσο μεγαλύτερη διατμητική τάση (τ) απαιτείται ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη τιμή ρυθμού διάτμησης ($\dot{\gamma}$). Στα Νευτώνεια ρευστά ανήκουν εκτός από όλα τα αέρια, αρκετά υγρά όπως το νερό, το μελάνι, το μέλι και τα γαλακτώματα.

- Μη Νευτώνεια Ρευστά

Αντίθετα από τα νευτώνεια ρευστά, στα μη νευτώνεια η διατμητική τάση δεν συνδέεται γραμμικά με το ρυθμό διάτμησης. Έχει διαπιστωθεί πως, η ύπαρξη μη νευτωνικών ρευστών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τριβή και αξίζει να σημειωθεί ότι το ιξώδες των μη νευτωνικών, για υψηλούς ρυθμούς διάτμησης, σταθεροποιείται σε μία συγκεκριμένη τιμή και δεν μεταβάλλεται με περαιτέρω αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Αυτό σημαίνει ότι πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή ρυθμού διάτμησης, παρουσιάζουν νευτωνική συμπεριφορά. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες μη νευτωνικών ρευστών με διαφορετική συμπεριφορά μία από αυτές που μελετάμε είναι τα ρευστά με ιξώδες ανεξάρτητο του χρόνου και μεταβάλλεται με το ρυθμό διάτμησης ή με την διατμητική τάση. Η εξίσωση που περιγράφει τη συγκεκριμένη συμπεριφορά είναι:

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (2.17)$$

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα-εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση του ρυθμού διάτμησης με το ιξώδες για μη νευτώνεια. Τα πιο σημαντικά μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή αυτής της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι δύο παραμέτρων (**Power Law** και **Bingham Plastic**) και τριών παραμέτρων (**Herschel-Buckley**), ωστόσο θα αναφερθεί και το παραπλήσιο μοντέλο του power law που είναι το ρεολογικό μοντέλο **Carreau**.

2.4.1 Μοντέλο Power Law

Το ρεολογικό μοντέλο power law, ονομάζεται επίσης μοντέλο Ostwald-de Waele και είναι πολύ χρήσιμο για πολλά μηχανικά προβλήματα που αφορούν μη νευτώνεια ρευστά. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να περιγράψει την οριακή τάση (*yield*

stress). Η οριακή τάση είναι η ελάχιστη διατμητική τάση που απαιτείται να ασκηθεί ώστε τα ρευστά να αρχίσουν να ρέουν. Η σχέση που συνδέει το ιξώδες με τη τάση διάτμησης και το ρυθμό διάτμησης είναι η εξής και περιγράφεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.18)$$

Όπου τ είναι η διατμητική τάση (Pa), K ο δείκτης συνέπειας (consistency index) (Pa·s), $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (s^{-1}) και n ο δείκτης συμπεριφοράς ροής (flow – behavior index) ή αλλιώς εκθέτης power law.

Όσον αφορά στο δείκτη συμπεριφοράς ροής (n) διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

- i. Όταν το n ισούται με ένα τότε το ρευστό είναι Νευτώνειο
- ii. Όταν το n είναι μικρότερο της μονάδας το ρευστό ονομάζεται ψευδοπλαστικό ή αλλιώς ρευστό διατμητικής λέπτυνσης (pseudoplastic or shear-thinning fluid) και είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος μη-Νευτωνικού υγρού. Στα συγκεκριμένα το ιξώδες μειώνεται με αύξηση της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης.
- iii. Όταν το n είναι μεγαλύτερο της μονάδας το ρευστό ονομάζεται διασταλτικό ή αλλιώς ρευστό διατμητικής πάχυνσης (dilatant or shear-thickening fluid). Όταν τα υγρά είναι διαστελλόμενα, το ιξώδες τους αυξάνει με τον ρυθμό διάτμησης και τον χρόνο αντίστοιχα. Παραδείγματα ρευστών που παρουσιάζουν τέτοια συμπεριφορά, αποτελούν τα αμυλώδη μείγματα νερού - αραβοσίτου, η κινούμενη άμμος κ.α.

Ο δείκτης συνέπειας K συνδέεται με το ιξώδες του ρευστού αφού σε μεγάλες τιμές του, το ρευστό είναι παχύρευστο.

2.4.2 Μοντέλο Carreau

Το μοντέλο Carreau έχει αποδειχθεί πολύ λειτουργικό για την περιγραφή του ιξώδους ψευδοπλαστικών ($n < 1$) ρευστών υψηλού ιξώδους και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για τη συμπεριφορά ρευστών με χαμηλό ιξώδες, όσο και με υψηλό ρυθμό διάτμησης. Τα μοντέλα Carreau και power law είναι παραπλήσια μεταξύ τους αφού και τα δύο περιγράφουν ψευδοπλαστικά. Η μαθηματική εξίσωση του μοντέλου είναι:

$$\frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (2.19)$$

Όπου $\dot{\gamma}$ είναι ο ρυθμός διάτμησης, η_0 το ιξώδες σε μηδενική διάτμηση, η_∞ το ιξώδες σε «άπειρη» διάτμηση, n είναι ο δείκτης ροής και λ είναι ένας χαρακτηριστικός χρόνος για το μη νευτώνειο ρευστό, που ορίζεται ως:

$$\lambda = \left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (2.20)$$

Συνήθως το η_∞ θεωρείται αμελητέο, οπότε η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (2.21)$$

2.4.3 Μοντέλο Bingham Plastic

Τα πλαστικά ρευστά αναγνωρίστηκαν πρώτα από τον Bingham το 1922 και αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία ρευστών, η συμπεριφορά των οποίων απαιτεί ελάχιστη διατμητική τάση προτού να λάβει χώρα οποιαδήποτε ροή του υλικού. Παραδείγματα ρευστών που παρουσιάζουν αυτή τη συμπεριφορά αποτελούν η μαγιονέζα, κέτσαπ, οδοντόπαστα κλπ. Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει τη ρεολογία τους είναι ο παρακάτω (Rao, 2010):

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (2.22)$$

Όπου τ είναι η διατμητική τάση (Pa), τ_0 η οριακή διατμητική τάση (Pa), μ_p το πλαστικό ιξώδες (Pa·s) και $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (s^{-1}).

Τα συγκεκριμένα πλαστικά ρευστά, έχουν πολλές ομοιότητες με τα νευτώνεια, αφού εκφράζονται και αυτά από γραμμική σχέση, η οποία αναπαρίσταται από ευθεία γραμμή. Η κύρια διαφορά είναι ότι η διατμητική τάση πρέπει να υπερβεί ένα όριο διατμητικής τάσης (*yield stress*), ώστε το ρευστό να αρχίσει να ρέει (Rehm, & Haghshenas, 2012). Η κλίση της ευθείας δίνει το πλαστικό ιξώδες (μ_p). Ένα ρευστό τύπου Bingham Plastic δεν θα εμφανίσει ροή έως ότου να εφαρμοστεί σε αυτό διατμητική τάση ικανή να «σπάσει» τις συνεκτικές δυνάμεις του πηκτώματος. Μετά από αυτό το σημείο γραφικά η διατμητική τάση είναι καθαρά ανάλογη με την ταχύτητα και η σταθερά αναλογίας ισούται με το ιξώδες. (Κελεσίδης 2002). Το ιξώδες, ελαττώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης.

2.4.4 Μοντέλο Herschel –Bulkley

Το μοντέλο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ενδιάμεσο των δύο προηγούμενων Power Law και Bingham, όμως ουσιαστικά είναι το μοντέλο Power Law με τη διαφορά ότι ισχύει και όταν εμφανίζεται οριακή διατμητική τάση (Cheremisinoff, 1986) και

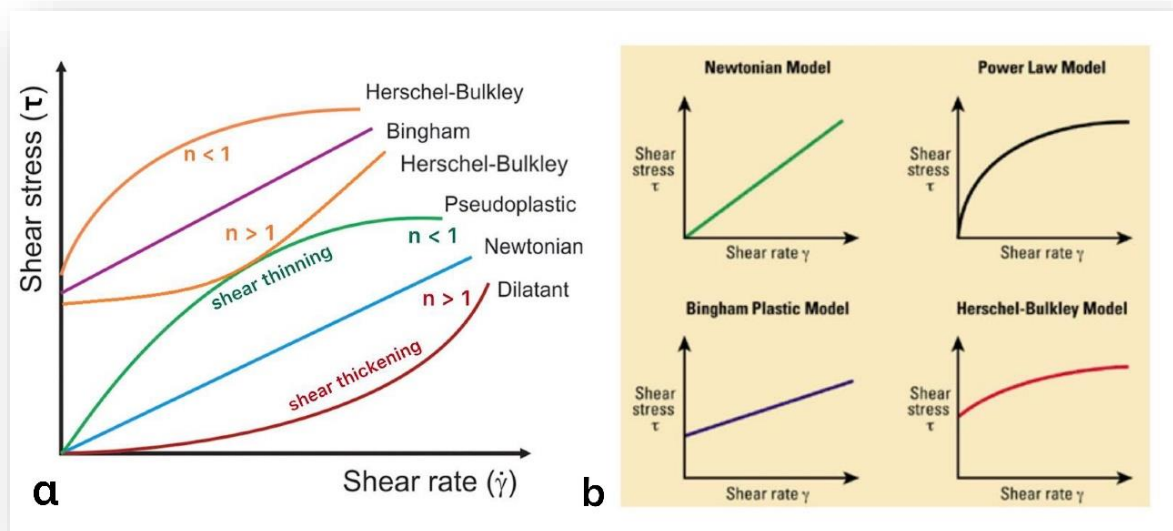
προτιμάται επειδή οδηγεί σε πιο ακριβή μοντέλα ρεολογικής συμπεριφοράς όταν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα. Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει το μοντέλο είναι η εξίσωση (Joyner, 2019):

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.23)$$

Όπου τ_0 είναι η οριακή διατμητική τάση (Pa) για ρευστό Herchel Bulkley, K ο δείκτης συνάφειας ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$), n ο δείκτης συμπεριφοράς ροής και $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (s^{-1}).

Όταν το τ_0 είναι μηδέν η συμπεριφορά του ρευστού γίνεται όπως στο μοντέλο Power Law. Όταν ο εκθέτης n ισούται με την μονάδα συμπίπτει με το μοντέλο Bingham Plastic. Στη περίπτωση που ισχύουν ταυτόχρονα τα δύο προηγούμενα, τότε το μοντέλο περιγράφει Νευτώνειο ρευστό. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.2) εμφανίζονται οι χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις των πιο βασικών ρεολογικών μοντέλων.

Όλα τα τρόφιμα έχουν μοναδική ιξώδη συμπεριφορά, η οποία επηρεάζει την απόδοσή τους σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Τα ιξώδη υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το πώς συμπεριφέρονται στην πίεση σε σχέση με το ρυθμό διάτμησης όταν υφίστανται διάτμηση. Μια απεικόνιση διαφορετικών τύπων ιξώδους συμπεριφοράς φαίνεται στο (Σχήμα 2.2). Στο συγκεκριμένο σχήμα μπορεί να παρατηρηθεί η εξάρτηση των ρευστών από το ρυθμό διάτμησης.



Σχήμα 2.2 Γραφική αναπαράσταση ρεολογικών μοντέλων

(Πηγή 2.2α: Kubo, Rojas, Miano, & Augusto, P. E. 2019)

(Πηγή 2.2β: Hemphill, Campos, & Pilehvari, 1993)

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι αντιληπτό ότι τα ρεολογικά μοντέλα συνοψίζουν τις φυσικές αντιδράσεις (ρεολογικές παραμέτρους) κάτω από μια συγκεκριμένη τάση παραμόρφωσης ή μια κινητήρια δύναμη ροής. Αυτές οι παράμετροι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά (Joyner, 2019):

- αντικατοπτρίζουν τη δυνατότητα επεξεργασίας ακατέργαστων ή ημιεπεξεργασμένων ή επεξεργασμένων υλικών τροφίμων,
- καθορίζουν τη φυσική σταθερότητα (ρυθμός διαχωρισμού φάσης) των παρασκευασμένων τροφίμων και
- περιγράφουν τις υφές των υλικών των τροφίμων και αποκαλύπτουν τα αισθητήρια χαρακτηριστικά τους .

Επομένως, οι ρεολογικές παράμετροι και μοντέλα είναι βασικά στοιχεία στη βιομηχανία τροφίμων για το σχεδιασμό γραμμών επεξεργασίας, επιλογή λειτουργικού εξοπλισμού όπως συστήματα ροής και μεμβράνες διήθησης, πρόβλεψη της φυσικής διάρκειας ζωής των τροφίμων, σχεδιασμό σκευασμάτων για την επίτευξη στοχευμένης δομής και πρόβλεψη των αισθητήριων χαρακτηριστικών.

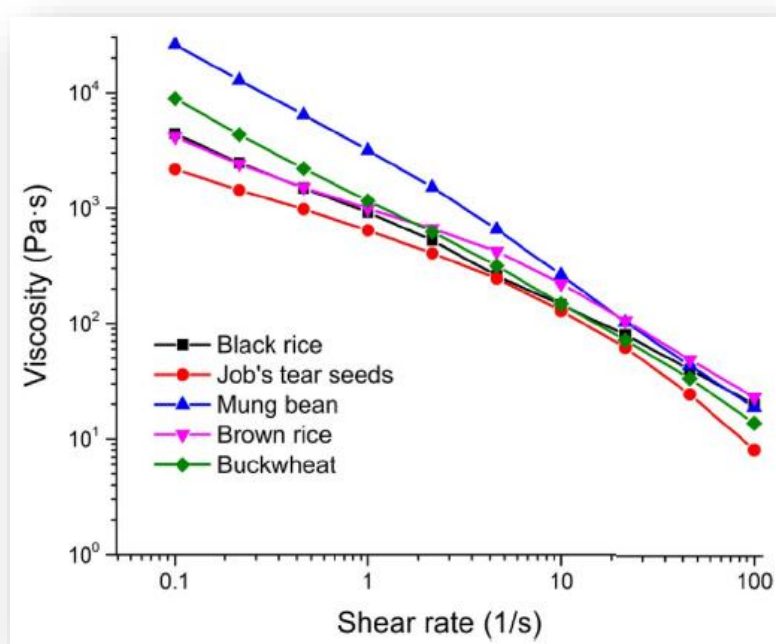
2.5 Εδώδιμα υλικά που αξιοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν τρία εδώδιμα υλικά από έρευνες των Guo et al. (2020), Liu et al. (2018) και Karyappa et al. (2019). Στις μελέτες αυτές κατά την πειραματική διαδικασία μετέβαλλαν ρεολογικές παραμέτρους και ποσοστά πληρωτών σε συγκεκριμένα υλικά με σκοπό να ελέγξουν την τελική απόδοση της εκτύπωσης και τον τρόπο που επηρεάζεται από τις ρεολογικές ιδιότητές τους. Σαν απώτερο συμπέρασμα της διαδικασίας ήταν η επιλογή του κατάλληλου ακροφυσίου για το εκάστοτε ρευστό.

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Guo et al. (2020), η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιήθηκε ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη της τρισδιάστατης εκτύπωσης και δίνει σχετικές πληροφορίες όσο αναφορά την ευκολία ή δυσκολία στην επιτυχή εκτύπωση του υλικού που μας ενδιαφέρει. Πηκτώματα επιλεγμένων κόκκων (μαύρο ρύζι, job's tear seeds, φασόλια mung, καστανό ρύζι και μαύρο σιτάρι) μελετήθηκαν για πρώτη φορά ως προς τις ρεολογικές τους ιδιότητες και δοκιμάστηκαν ως δυνητικά υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ωστόσο, στην εργασία μας επικεντρωθήκαμε σε δύο είδη χονδρόκοκκων από αυτά που προαναφέρθηκαν, στο job's tear seeds και στο μαύρο ρύζι. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το ρεολογικό μοντέλο Bird-Carreau, το οποίο ερμήνευε με μεγάλη ακρίβεια τα πηκτώματα με χαρακτηριστικά ψευδοπλαστικής ροής. Ωστόσο, επειδή για το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπάρχουν αναλυτικές λύσεις και θα πρέπει να γίνουν δισδιάστατες και τρισδιάστατες χρονοβόρες υπολογιστικές προσομοιώσεις με λογισμικά που προβλέπουν τη ροή των ρευστών και αυτό δεν είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, επιλέξαμε να το αντικαταστήσουμε με το παραπλήσιό του μοντέλο, Power Law, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Carreau. Επομένως, τα συγκεκριμένα υλικά θα μελετηθούν με το ρεολογικό μοντέλο Power Law. Αλλάζοντας τις τιμές των ρεολογικών παραμέτρων (ρεολογικός δείκτης n , ιξώδες η_0) κάθε υλικού, παρατηρούνται αλλαγές στην εξώθησή τους μέσα από το ακροφύσιο. Για παράδειγμα, αλλάζοντας τη σύσταση επιτυγχάνεται διαφορετική τιμή ρυθμού διάτμησης και παρατηρήθηκε ότι επηρεάζεται το ιξώδες, αφού όταν αυξάνεται ο ρυθμός διάτμησης το ιξώδες αρχίζει να μειώνεται (Σχήμα 2.3). Επομένως, υπάρχει περίπτωση στην εξώθηση ορισμένες φορές να απαιτείται άσκηση μεγαλύτερης πίεσης του εμβόλου στο ρευστό και άλλες μικρότερη. Η απαιτούμενη πίεση του εμβόλου για την εκτύπωση μέσω εξώθησης των διαφορετικών πηκτωμάτων καθορίστηκε με

φθίνουσα τιμή κατά σειρά για τη γέλη των φασολιών mung, τις γέλες του καστανού ρυζιού, μαύρου σιταριού, μαύρου ρυζιού και job's tear seeds. Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι συμβατά με εκείνα της προσομοιωμένης τάσης ελάχιστης ροής και από πειράματα εκτύπωσης, επιβεβαιώνεται ότι η προσομοιωμένη πίεση του εμβόλου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή αξιολόγηση ενός υλικού ως προς την ευκολία στην τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, μέσω εξώθησης.

Στη συνέχεια παρατίθεται διάγραμμα που προέκυψαν στην έρευνα Guo et al. (2020) και αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία:



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα ιξώδους – ρυθμού διάτμησης χονδρόκοκκων

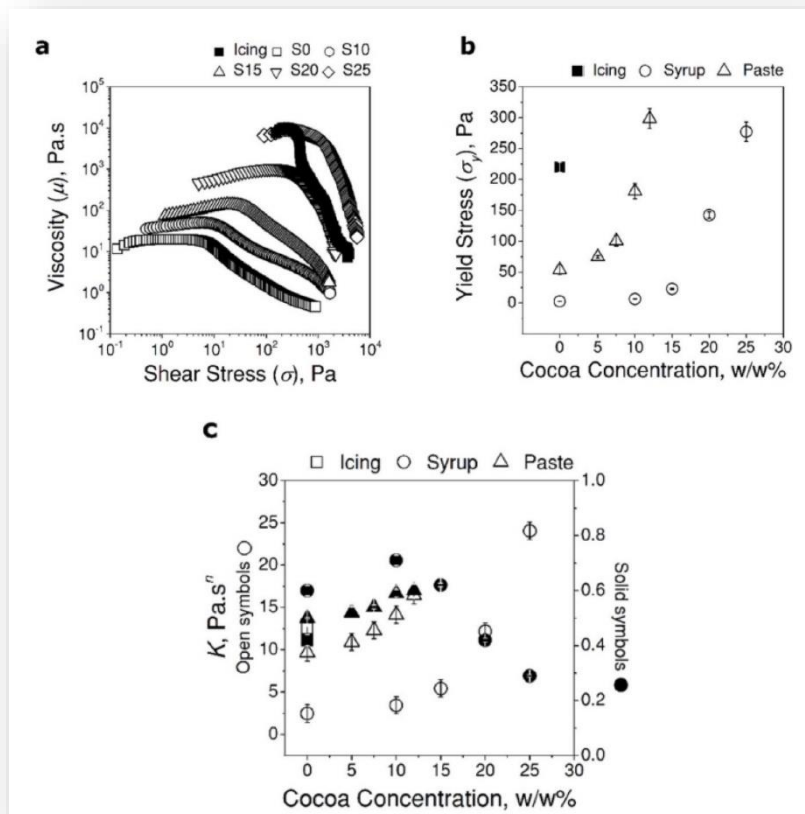
Στην μελέτη Karyappa et al. (2019), περιγράφεται μια μοναδική μέθοδος προσέγγισης για την εκτέλεση τρισδιάστατης εκτύπωσης υλικών με βάση τη σοκολάτα στην υγρή της φάση σε θερμοκρασία δωματίου (χωρίς τη χρήση θερμαντικών στοιχείων). Έγινε εκτύπωση υλικών, μεταξύ άλλων σιροπιού και πάστας σοκολάτας αναμειγμένων με διαφορετικές συγκεντρώσεις σκόνης κακάου και λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στην τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπώσεων, η εκτύπωση τους οδήγησε σε μοναδικά και σύνθετα τρισδιάστατα σχήματα. Τα συγκεκριμένα υλικά (που τροποποιήθηκαν ως προς τις ρεολογικές τους ιδιότητες) παρουσίασαν ιξώδη συμπεριφορά και ιδιότητες ρευστών που υπακούν στο ρεολογικό μοντέλο Herschel-

Bulkley. Η τρισδιάστατη εκτύπωση βασίστηκε στην εξώθηση θερμής τήξης. Αν και η εξώθηση σοκολάτας θερμής τήξης είναι απλή, η εκτύπωση απαιτεί ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας λειτουργίας σε στενό εύρος. Σε αυτήν τη μελέτη, για πρώτη φορά, εκτυπώθηκαν απευθείας μελάνια με βάση τη σοκολάτα στην υγρή φάση της χρησιμοποιώντας 3D εκτυπωτή άμεσης γραφής μελανιού (DIW), με σκοπό τη μοντελοποίηση σύνθετων τρισδιάστατων σχημάτων χωρίς έλεγχο θερμοκρασίας. Ο συγκεκριμένος τρόπος, ονομάστηκε μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης μελάνης με βάση σοκολάτας (Ci3DP). Οι Karyappa, Hashimoto χρησιμοποίησαν δύο τύπους ακροφυσίων στο Ci3DP εκτυπωτή, ένα γενικής χρήσης ακροφύσιο και ένα κωνικό (συγκλίνων) ακροφύσιο. Η αντίσταση του κωνικού ακροφυσίου ήταν χαμηλότερη από εκείνη του ακροφυσίου γενικής χρήσης με την ίδια διάμετρο της εξόδου. Το ακροφύσιο γενικής χρήσης έχει ένα δύσκολο σημείο συμφόρησης που αποτρέπει ή μειώνει τη ροή των ιξωδών μελανιών. Σύγκριναν ακροφύσια με $d = 600 \mu\text{m}$ (στην περιοχή εξόδου) για $\Delta P = 100$ έως 550 kPa και μέτρησαν την ογκομετρική ροή Q . Για δεδομένο ΔP , το Q του μελανιού σε κωνικό ακροφύσιο ήταν μεγαλύτερο κατά 2 έως 3 φορές από τις τιμές του Q σε ακροφύσιο γενικής χρήσης με την ίδια εσωτερική διάμετρο εξόδου. Για ένα ακροφύσιο γενικής χρήσης, περισσότερο από το 90% της συνολικής πτώσης πίεσης συμβαίνει στο τελευταίο 40% του μήκους του ακροφυσίου. Αντίθετα, για ένα κωνικό ακροφύσιο, περισσότερο από το 90% της συνολικής πτώσης πίεσης εμφανίζεται σε λιγότερο από το τελευταίο 20% του μήκους του ακροφυσίου. Η χρήση κωνικού ακροφυσίου εξασφάλισε ομαλή ροή του μελανιού και μείωσε την απαιτούμενη πίεση που ασκεί ο διανομέας για τα μελάνια με υψηλά ιξώδη όπως το S25 και το P12. Ενώ το ΔP είναι η παράμετρος εκτύπωσης που είναι πιο βολικό να αλλάζει για να προσαρμόζεται το Q , η αλλαγή στον τύπο του ακροφυσίου (για παράδειγμα το γενικής χρήσης ή κωνικό ακροφύσιο) επιτρέπεται επίσης να διαφοροποιεί το Q για τη σταθερή τιμή του ΔP . Στην πράξη, η χρήση των κωνικών ακροφυσίων προτιμήθηκε επειδή η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε σε χαμηλή πίεση.

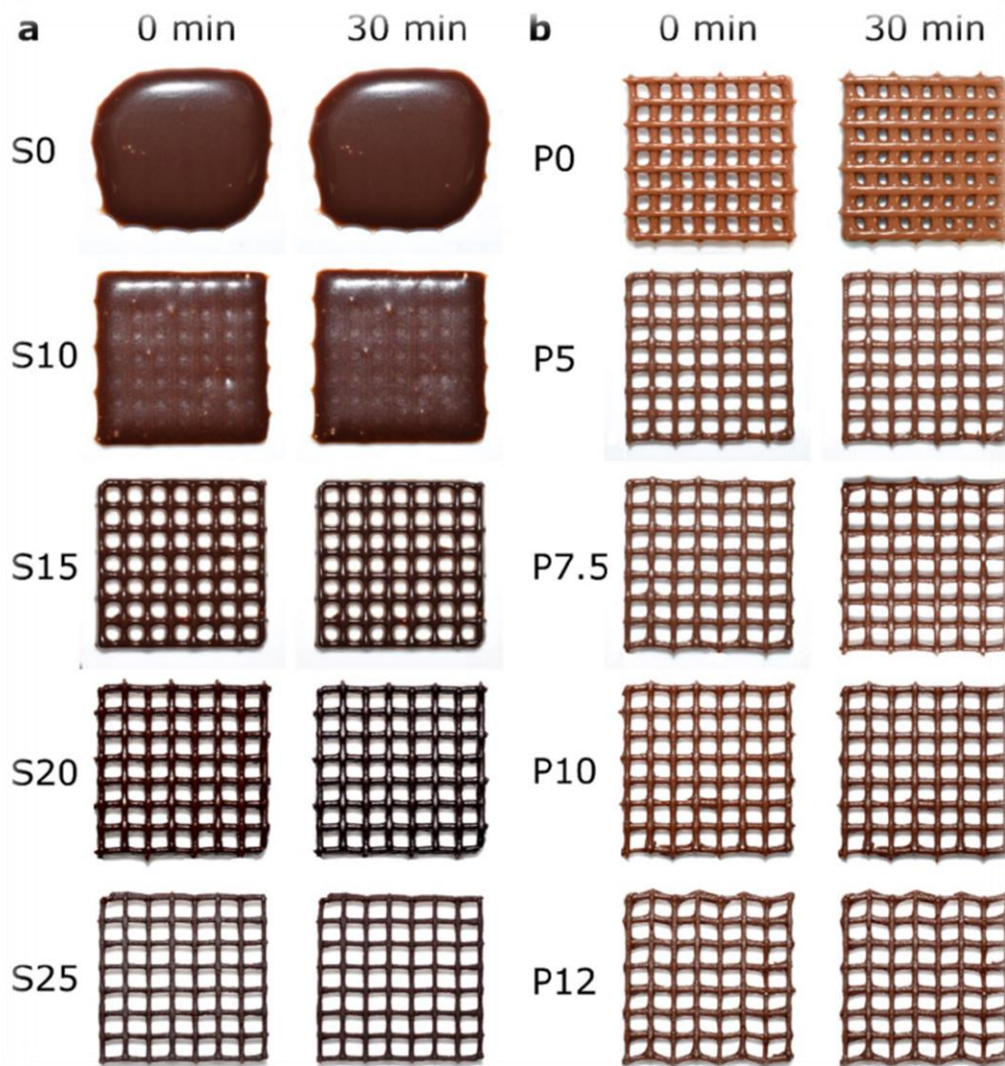
Τα μελάνια εκτύπωσης παρασκευάστηκαν με κατάλληλη ανάμειξη υλικών με διαφορετικά ποσοστά σκόνης κακάο (5% έως 25% w/w) οπότε προέκυψε ξεχωριστά το σιρόπι και η πάστα σοκολάτας. Δοκιμάστηκαν διαφορετικές αναλογίες σε κακάο, που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ρεολογικές ιδιότητες. Από τα συγκεκριμένα εκτυπωμένα προϊόντα αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα της προσθήκης σκόνης κακάου στα μείγματα εκτύπωσης όσο αναφορά αρχικά το ιξώδες του υλικού εκτύπωσης (που κυμαίνεται από 10^2 έως $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) και

κατόπιν την αλλαγή της συμπεριφοράς του υλικού από περίπου υγρό σε περίπου στερεό ανάλογα με τη διατμητική τάση. Τα μελάνια που είχαν μεγαλύτερο βαθμό πλήρωσης κακάου ήταν ικανά να σχηματίσουν αυτο-υποστηριζόμενα στρώματα (Εικ. 2.1). Η προσθήκη του πληρωτή δημιουργεί καλύτερη λεπτομέρεια στην εκτύπωση του υλικού, με προσαρμοσμένη υφή. Ωστόσο όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του κακάου προκαλείται αύξηση του ιξώδους με αποτέλεσμα να απαιτείται ολοένα και περισσότερη πίεση ώστε το ρευστό να εξωθηθεί από το ακροφύσιο. Στην περίπτωση μικρού ποσοστού σκόνης κακάο γίνεται εύκολη η εξώθηση αλλά η εκτύπωση δεν είναι η επιθυμητή, λόγω προβλήματος στη στρωματοποίηση.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα και φωτογραφίες του εκτυπώσιμου υλικού που προέκυψαν στην έρευνα Karyarra και αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία:



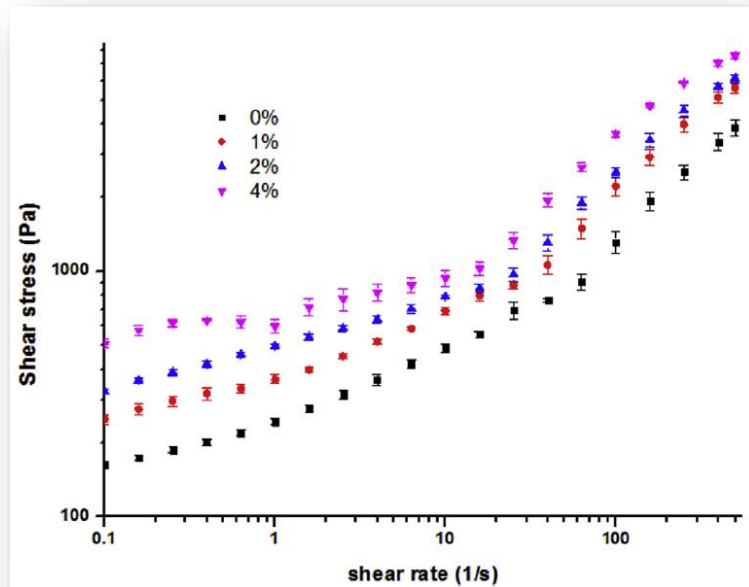
Σχήμα 2.4 Επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων πληρωτή κακάου στις ρεολογικές παραμέτρους **a)** Ιξώδες (μ) ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης διάτμησης (σ). **b)** Διατμητική τάση (σ_y) που μετρήθηκε από το (a) ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του κακάου στα μελάνια. **c)** Παράμετροι του μοντέλου Herschel-Bulkley ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του κακάο στα μελάνια (K -ανοιχτά σύμβολα και n -συμπαγή σύμβολα).



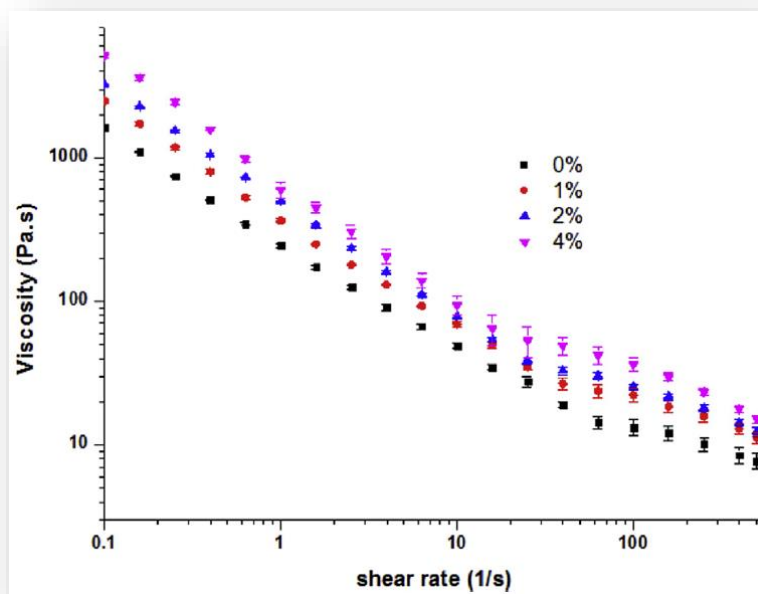
Εικ. 2.1: Τρισδιάστατα εκτυπωμένα πλέγματα από **a**) μελάνια με βάση το σιρόπι (S0 έως S25) και **b**) μελάνια με πάστα (P0 έως P12) εμφανίζονται σε δύο χρονικά σημεία: 0 λεπτά (αμέσως μετά την εκτύπωση) και 30 λεπτά μετά την εκτύπωση

Αρκετά υλικά μπορεί να έχουν καλή εξώθηση από το ακροφύσιο αλλά η εκτυπώσιμη δομή τους να μην είναι επιθυμητή, όπως αναφέρθηκε στην περίπτωση της σοκολάτας. Ακόμη ένα εδώδιμο υλικό που φέρει παρόμοιου είδους χαρακτηριστικά όπως της σοκολάτας και υπακούει στο ρεολογικό μοντέλο Herschel-Bulkley είναι εκείνο του πουρέ πατάτας και η μελέτη του πραγματοποιήθηκε από τον τους Liu et al. (2018). Ερευνήθηκε η επίδραση των ρεολογικών ιδιοτήτων της πολτοποιημένης πατάτας στην 3D εκτύπωση με την προσθήκη διαφορετικών συγκεντρώσεων αμύλου πατάτας και προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα επιθυμητά υλικά για την εκτύπωση τρισδιάστατων εδωδιμων ειδών δεν έπρεπε να έχουν μόνο κατάλληλη διατμητική τάση (τ_0) και μέτρο ελαστικότητας (G_0) ώστε να είναι ικανά να διατηρούν τυπωμένα σχήματα, αλλά επίσης σχετικά χαμηλό δείκτη συσχέτισης (K) και δείκτη συμπεριφοράς της ροής (n) για εύκολη έξοδο από το ακροφύσιο σε εκτυπωτή τύπου εξώθησης. Ο πουρές πατάτας με προσθήκη 2% αμύλου έδειξε εξαιρετική δυνατότητα εξαγωγής και εκτύπωσης, δηλαδή παρουσίασε διατμητική συμπεριφορά, δείκτη συσχέτισης που ισούται με 118,44 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) και αρκετά ισχυρή μηχανική αντοχή με διατμητική τάση ίση 312,16 Pa και κατάλληλο μέτρο ελαστικότητας. Ως εκ τούτου, τα εκτυπώσιμα εδωδιμα υλικά θα μπορούσαν να αντέξουν το σχήμα με την πάροδο του χρόνου και να έχουν ομαλή μορφή και ανάλυση. Με προσθήκη του αμύλου προκλήθηκε πτώση τόσο στην διατμητική τάση (195,90 Pa), έχοντας ως αποτέλεσμα, τα τυπωμένα αντικείμενα να παραμορφώνονται κατά την πάροδο του χρόνου εξαιτίας της χαλάρωσης. Αν και η πολτοποιημένη πατάτα με την προσθήκη 4% άμυλο έχει καλή σταθεροποίηση του σχήματος λόγω των κατάλληλων διατμητικών τάσεων (370,33 Pa) και του μέτρου ελαστικότητας, η κακή εξώθηση καθιστά δύσκολη την εκτύπωση λόγω του υψηλού δείκτη συσχέτισης (214,27 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) και του ιξώδους. Τα τυπωμένα δείγματα απεικονίζονται στην Εικ. 2.2 (Liu et al, 2018). Ουσιαστικά, γι' ακόμη μία φορά εντοπίζεται πως με την αύξηση της περιεκτικότητας του αμύλου στον πουρέ, η λεπτομέρεια στην εκτύπωση του υλικού βελτιώνεται, όμως όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του πληρωτή προκαλείται αύξηση του ιξώδους αφού ο ρυθμός διάτμησης μειώνεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η εξώθηση από το ακροφύσιο να γίνεται ολοένα και πιο δύσκολη.

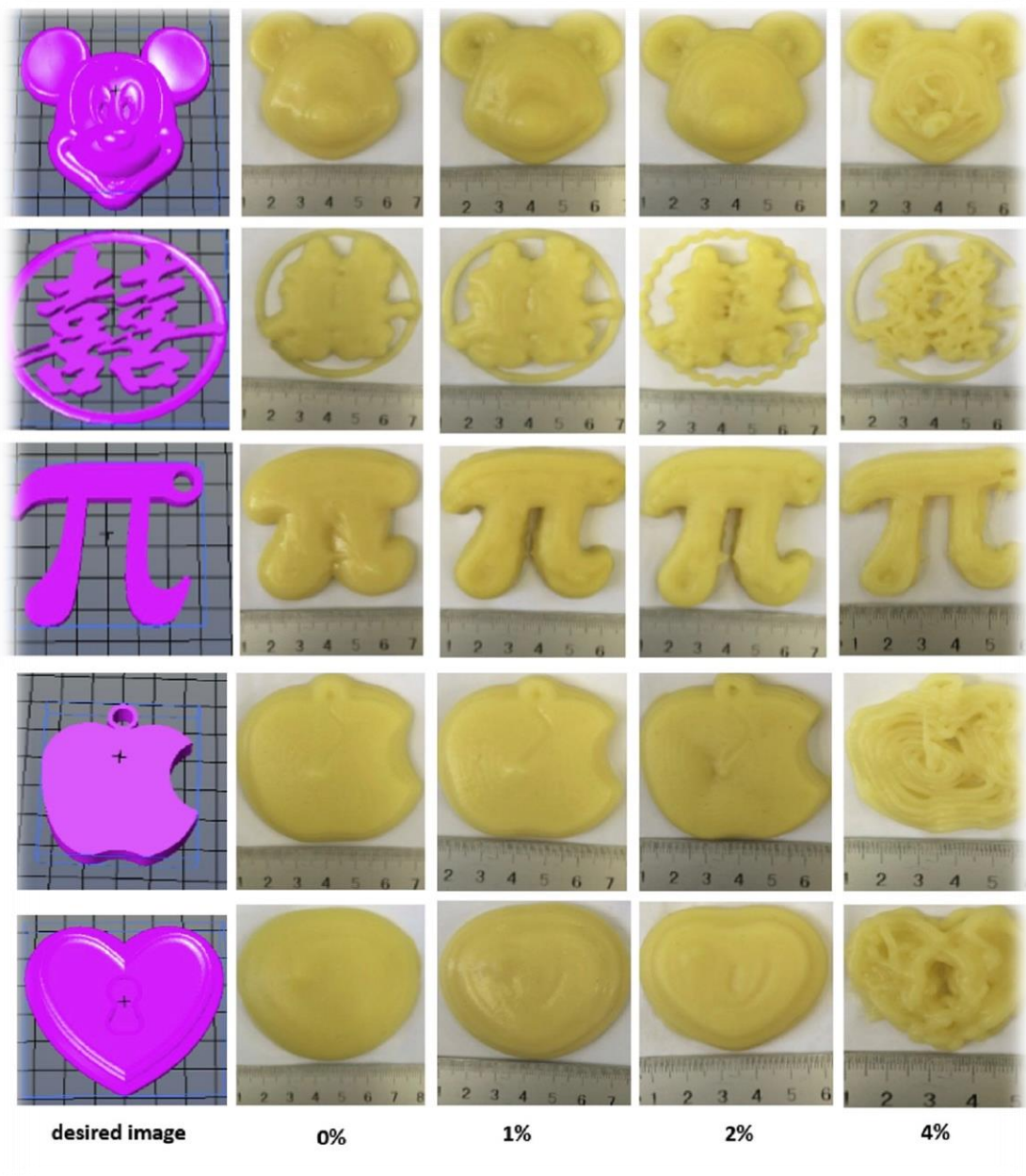
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα και φωτογραφίες του εκτυπώσιμου υλικού που προέκυψαν στην έρευνα Liu et al. και αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία:



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα διατμητικής τάσης – ρυθμού διάτμησης πολτοποιημένης πατάτας με προσθήκη διαφορετικών αναλογιών αμύλου



Σχήμα 2.6 Διάγραμμα διατμητικής τάσης – ρυθμού διάτμησης πολτοποιημένης πατάτας με προσθήκη διαφορετικών αναλογιών αμύλου



Εικ. 2.2: Εκτύπωση πολτοποιημένης πατάτας σε σχέδια, με την προσθήκη διαφορετικών βαθμών πλήρωσης αμύλου

Οι τιμές των πινάκων (Πίνακες 2.1, 2.2, 2.3) που έχουν προκύψει, είναι από τις ρεολογικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από μηχανήματα που άσκησαν διατμητική τάση στο ρευστό, προκειμένου να καταγράψουν την απόκρισή του σε αυτή τη διατμητική τάση. Παρακάτω αναφέρονται τα μεγέθη μέτρησης, ανάλογα με τα υλικά που μελετήθηκαν. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική μελέτη της ροής των παρακάτω εδωδιμων υλικών, στο ακροφύσιο τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Πίνακας 2.1

Χονδροειδείς κόκκοι συμπεριλαμβανομένου κάποιου είδους σιταριού και μαύρου ρυζιού

<i>Πηγή</i>	Είδος εδώδιμου υλικού	η_0 (Pa · s)	n
Guo, et al., 2020	Job's tear seeds (είδος σιταριού)	$7.18 \cdot 10^3$	0.382
	Μαύρο ρύζι	$6.43 \cdot 10^4$	0.288

Ρεολογικό μοντέλο: *Bird-Carreau* όμως στην παρούσα εργασία μελετάτε ως *Power Law*, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

Πίνακας 2.2

Σιρόπι και πάστα σοκολάτα σε διαφορετικά ποσοστά κακάου

<i>Πηγή</i>	Περιεκτικότητα σκόνης κακάου (%w/w)	τ_0 (Pa)	K (Pa · sⁿ)	n
<i>Karyappa et. al., 2019</i>		Σιρόπι σοκολάτας		
	0	3	2,5	0,62
	10	10	3,5	0,72
	15	25	6	0,63
	20	150	12,5	0,42
	25	250	25	0,3
		Πάστα σοκολάτας		
	0	65	11	0,5
	5	70	12	0,55
	7,5	85	13	0,58
	10	190	15	0,62
	12,5	310	17,5	0,64

Ρεολογικό μοντέλο: *Herschel-Bulkley*

Πίνακας 2.3

Πουρές πατάτας με προσθήκη διαφορετικής περιεκτικότητας αμύλου

<i>Πηγή</i>	Περιεκτικότητα αμύλου πατάτας (%)	τ_0 (Pa)	K (Pa · sⁿ)	n
<i>Liu, et al., 2018</i>	1	195.90±2.35	45.96±1.26	0.71±0.02
	2	249.57±3.18	87.78±1.28	0.67±0.02
	3	312.16±2.26	118.44±2.37	0.63±0.01
	4	370.33±1.27	214.27±3.49	0.57±0.01

Ρεολογικό μοντέλο: *Herschel-Bulkley*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Παραγωγή εξισώσεων ρεολογικών μοντέλων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην παραγωγή των εξισώσεων ρεολογικών των πιο σημαντικών μοντέλων που έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 (Power Law, Bingham ,Herschel-Bulkley,). Από τα τρία μοντέλα κυρίαρχο ρόλο στη μελέτη των τροφίμων κατέχει αυτό του Herschel-Bulkley, δεδομένου ότι η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην μελέτη εκτύπωσης τροφίμων και οι ρεολογικές παράμετροι του συγκεκριμένου μοντέλου ερμηνεύουν πληρέστερα τα ρευστά τρόφιμα.

Για να επιλύσουμε γενικά προβλήματα ροής πρέπει να φτιάξουμε μια εξίσωση ως προς την ορμή (Vlachopoulos & Polychronopoulos, 2019). Αποδεικνύεται ότι η εξίσωση της ορμής οδηγεί σε μια εξίσωση που με λεκτικούς όρους μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$\{\text{δυνάμεις αδράνειας}\} = \{\text{δυνάμεις πίεσης}\} + \{\text{δυνάμεις τάσης}\} + \{\text{βαρυτικές δυνάμεις}\} \quad (3.1)$$

Γράφοντας την παραπάνω σχέση με μαθηματικούς όρους καταλήγουμε στην σχέση:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} \right) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \bar{g} \quad (3.2)$$

Το αριστερό μέλος αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις αδράνειας, ενώ οι όροι στο δεξιά μέλος είναι οι δυνάμεις πίεσης, οι δυνάμεις τάσης και οι βαρυτικές δυνάμεις αντίστοιχα.

Ο αριθμός Reynolds $Re = \rho/\mu$ είναι πολύ μικρός υπό τις συνήθεις συνθήκες επεξεργασίας ($Re=10^{-1} \sim 10^{-4}$). Οι ακόλουθες προσεγγίσεις ισχύουν πάντα:

- Οι συγκλίνοντες (αδράνεια) δυνάμεις είναι ασήμαντες και μπορεί να παραμεληθούν.
- Οι δυνάμεις βαρύτητας είναι συνήθως αμελητέες.
- Η ροή κυριαρχείται από την ισορροπία των δυνάμεων πίεσης και τάσης. Συχνά αναφέρεται ως έρπουσα (*creeping*) ή ροή Stokes.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζουμε τις ιξώδεις πιέσεις, αλλά σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται μόνο οι ιξώδεις δυνάμεις και παραμελείται η ελαστικότητα των πολυμερών.

Λόγω των παραπάνω η εξίσωση (3.2) παίρνει τη μορφή (Vlachopoulos & Polychronopoulos, 2019):

$$0 = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} \quad (3.3)$$

Για μονοδιάστατες ροές σε καρτεσιανό σύστημα, η (3.3) παίρνει τη μορφή:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad (3.4)$$

η οποία πρόκειται για εξίσωση Navier Stokes σε υπεραπλουστευμένη μορφή (δεν λαμβάνονται υπόψη οι βαρυτικές δυνάμεις).

Ωστόσο για κυλινδρικές συντεταγμένες που μελετάμε η (3.4) παίρνει τη μορφή:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r \tau_{rz}) \quad (3.5)$$

3.1 Ροή υπό πίεση ρευστού Power Law σε σωλήνα

Στη συνέχεια εξετάζεται η ροή υπό πίεση ενός ρευστού power law σε ένα σωλήνα (Vlachopoulos & Polychronopoulos, 2019). Η εξίσωση συνέχειας απλοποιείται από τη σχέση:

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

Η τάση μέσω της εξίσωσης διατήρησης της ορμής απλοποιείται ως εξής:

Συνιστώσα r $0 = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r$

Συνιστώσα θ $0 = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta$

Συνιστώσα z $0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r \tau_{rz})$

Οι συνιστώσες r - και θ - είναι πανομοιότυπες με εκείνες του Νευτώνειου προβλήματος και παραλείπονται (χωρίς ροή σε r - ή θ -). Η συνιστώσα z - είναι η κυρίαρχη εξίσωση που περιέχει την διατμητική τάση που θα αντικατασταθεί από την εξίσωση power law:

$$\tau_{rz} = m \left| \frac{\partial V_z}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial V_z}{\partial r} \quad (3.7)$$

Στη συνέχεια έχουμε:

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r \tau_{rz}) \quad (3.8)$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης αυτής προκύπτει:

$$r \tau_{rz} = -\frac{\Delta p}{2L} r^2 + C_1 \quad (3.9)$$

Διαιρώντας με το r παίρνουμε τη σχέση:

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta p}{2L} r + \frac{C_1}{r} \quad (3.10)$$

Το C_1 πρέπει να είναι μηδέν για να παραμείνει πεπερασμένο το τ_{rz} της διατμητικής τάσης στο $r=0$. Επομένως:

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta p}{2L} r \quad (3.11)$$

Με εισαγωγή της εξίσωσης power law (3.7) έχουμε:

$$m \left| \frac{\partial V_z}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial V_z}{\partial r} = -\frac{\Delta p}{2L} r \quad (3.12)$$

Το δεύτερο μέλος είναι αρνητικό και η απόλυτη τιμή της κλίσης της ταχύτητας αυξάνεται στη δύναμη $n-1$, επομένως $\frac{\partial V_z}{\partial r}$ πρέπει να είναι αρνητική και μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{dV_z}{dr} = -\left(\frac{\Delta p}{2mL}\right)^{1/n} r^{1/n} \quad (3.13)$$

Με ολοκλήρωση καταλήγουμε:

$$V_z(r) = -\frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta p}{2mL}\right)^{1/n} r^{(n+1)/n} + C_2 \quad (3.14)$$

Με τη βοήθεια της οριακής κατάστασης χωρίς ολίσθηση $V_z=0$ σε $r=R$ καθορίζουμε τη σταθερά ενσωμάτωσης:

$$C_2 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta p}{2mL}\right)^{1/n} R^{(n+1)/n} \quad (3.15)$$

Και το προφίλ ταχύτητας είναι:

$$V_z(r) = \frac{n}{n+1} \left[\frac{R^{n+1}}{2m} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)\right]^{1/n} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{(n+1)/n}\right] \quad (3.16)$$

Η ταχύτητα γίνεται μέγιστο για $r=0$:

$$V_{max} = \frac{n}{n+1} \left[\frac{R^{n+1}}{2m} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)\right]^{1/n} \quad (3.17)$$

Και το προφίλ ταχύτητας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$V_z(r) = V_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{(n+1)/n}\right] \quad (3.18)$$

Η μέση ταχύτητα επιτυγχάνεται με την ολοκλήρωση του εμβαδού διατομής και στη συνέχεια διαιρώντας με το εμβαδό διατομής:

$$V_{avg} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R V_z r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta} \Rightarrow V_{avg} = \frac{n}{(3n+1)} \left[\frac{R^{n+1}}{2m} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)\right]^{1/n} \quad (3.19)$$

Ο ρυθμός ογκομετρικής παροχής είναι:

$$Q = V_{avg} \pi R^2 = \pi \frac{n}{3n+1} \left[\frac{1}{2m} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)\right]^{1/n} R^{\frac{1}{n}+3} \quad (3.20)$$

Και η πτώση πίεσης:

$$\Delta p = 2mLR^{-(3n+1)} \left[\frac{Q}{\pi} \left(\frac{1}{n} + 3\right)\right] \quad (3.21)$$

3.2 Ροή υπό πίεση ρευστού Bingham σε σωλήνα

Παρακάτω εξετάζεται η ροή υπό πίεση ενός ρευστού Bingham σε ένα σωλήνα. Αν και τα πολυμερή λιώνουν δεν παρουσιάζουν τάση διαρροής, όταν αναμειγνύονται με σωματίδια ή άλλα πολυμερή, μπορεί να παρουσιάζουν τόσο τάση διαρροής όσο και ψευδοπλαστική ροή. Το μοντέλο Herschel-Bulkley είναι κατάλληλο για τα Bingham (Vlachopoulos & Polychronopoulos, 2019):

$$\tau_{rz} = \tau_o + K \left(\frac{dV_z}{dr} \right)^n \quad \text{εάν } \tau > \tau_o \quad (3.22-1)$$

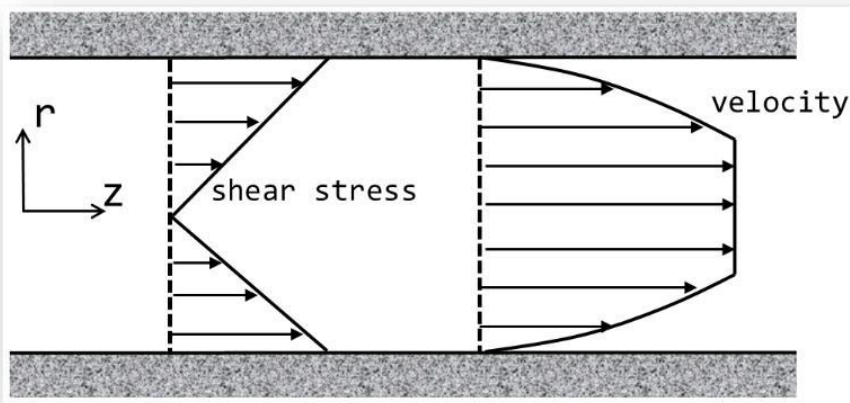
$$\frac{dV_z}{dr} = 0 \quad \text{εάν } \tau \leq \tau_o \quad (3.22-2)$$

Θα εξετάσουμε την απλούστερη έκδοση όπου $n = 1$, δηλαδή πρόκειται για μοντέλο Bingham. Ένα πλαστικό Bingham (ή ακριβέστερα ιδανικό πλαστικό Bingham) δεν θα ρέει εκτός εάν η διατμητική τάση υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή που ονομάζεται τάση διαρροής. Αυτή η συμπεριφορά εκφράζεται μαθηματικά από τις εξισώσεις:

$$\tau_{rz} = \tau_o + K \left(\frac{dV_z}{dr} \right) \quad \text{εάν } \tau > \tau_o \quad (3.22-3\alpha)$$

$$\frac{dV_z}{dr} = 0 \quad \text{εάν } \tau \leq \tau_o \quad (3.22-3\beta)$$

όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 ένα πλαστικό Bingham δεν είναι ένα "καθαρό" υγρό επειδή δεν ρέει κάτω από την τάση διαρροής τ_o . Με πίεση που οδηγεί σε ροή σε ένα σωλήνα η πίεση διάτμησης είναι μηδέν κατά μήκος του άξονα και αυξάνεται γραμμικά με το r . Έτσι, το πλαστικό Bingham θα συμπεριφέρεται σαν υγρό κοντά στα τοιχώματα του σωλήνα και θα κινείται σαν ένα «στερεό πώμα (τάπα)» στην κεντρική περιοχή $r < r_o$ όπου το $\tau \leq \tau_o$.



Σχήμα 3.1 Διατμητική τάση και προφίλ ταχύτητας για υγρό Bingham που ρέει μεταξύ δύο επίπεδων παράλληλων πλακών υπό την επίδραση κλίσης πίεσης. Στο κεντρικό τμήμα το υγρό κινείται σαν «στερεό πώμα (τάπα)».

(Πηγή: Vlachopoulos & Polychronopoulos, 2019)

Οι μαθηματικοί χειρισμοί των εξισώσεων (3.11) μέχρι (3.18) ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση. Οπότε έχουμε:

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta p}{2L} r \quad (3.23)$$

Έτσι για την περιοχή τιμών $r_0 < r < R$ έχουμε:

$$\tau_o + K \left(\frac{dv_z}{dr} \right) = -\frac{\Delta p}{2L} r \quad (3.24)$$

Αυτή μπορεί να ολοκληρωθεί σε συνθήκη χωρίς ολίσθηση, με όρια $V_z=0$ σε $r=R$ ώστε να δώσει την κατανομή ταχύτητας:

$$V_z = \frac{\Delta p}{4KL} R^2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] - \frac{\tau_o R}{K} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right) \right] \quad r_0 < r < R \quad (3.25)$$

Στο $r=r_0$ αυτό θα είναι ίσο με την ταχύτητα της εμβολικής ροής (*plug velocity*)

$$V_{plug} = \frac{\Delta p}{4KL} R^2 \left[1 - \left(\frac{r_o}{R} \right)^2 \right] - \frac{\tau_o R}{K} \left[1 - \left(\frac{r_o}{R} \right) \right] \quad (3.26)$$

Επίσης, από την εξίσωση (3.23) έχουμε:

$$\text{Για } r = r_o, \tau_o = \frac{\Delta p}{2L} r_o \quad \text{και για } r = R, \tau_w = \frac{\Delta p}{2L} R \quad (3.27)$$

Απαλείφοντας τα τ_o και $(\Delta p/2L)R$ παίρνουμε:

$$V_{plug} = \frac{\tau_w}{2K} R \left[1 - \frac{\tau_o}{\tau_w} \right]^2 \quad (3.28)$$

Ο συνολικός ογκομετρικός ρυθμός ροής ισούται με το άθροισμα των ογκομετρικών παροχών, της εμβολικής ροής και του «υγρού»:

$$Q = Q_{plug} + Q_{fluid} = \pi r_o^2 V_{plug} + 2\pi \int_{r_o}^R V_z r dr \quad (3.29)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (3.25) στο ολοκλήρωμα, ολοκληρώνοντας και χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις για τ_o , τ_w και V_{plug} έχουμε:

$$Q = \frac{\pi R^3 \tau_w}{4K} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_o}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_o}{\tau_w} \right)^4 \right] \quad (3.30)$$

3.3 Ροή υπό πίεση ρευστού Herschel-Bulkley σε σωλήνα

Τέλος, εξετάζεται η ροή υπό πίεση ενός ρευστού Herschel-Bulkley σε ένα σωλήνα. Ακολουθείτε η ίδια διαδικασία παραγωγής εξισώσεων που εφαρμόστηκε για το ρεολογικό μοντέλο Bingham, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση $n \neq 1$. Επομένως, για να καταλήξουμε στην κατανομή της ταχύτητας V_z για Herschel-Bulkley, εφαρμόζουμε διαφορικό λογισμό στην σχέση :

$$\tau_o + K \left(\frac{dV_z}{dr} \right) = -\frac{\Delta p}{2L} r, \text{ αφού πρώτα τη λύσουμε ως προς } dV_z \text{ και προκύψει:}$$

$$dV_z = \left(-\frac{\frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o}{K} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(-\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o \right)^{\frac{1}{n}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_z = \int \left(-\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o \right)^{\frac{1}{n}} dr + C = \left(-\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \int \left(\frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o \right)^{\frac{1}{n}} dr + C$$

Στη συνέχεια, θέτω:

$$I = \int \left(\frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o \right)^{\frac{1}{n}} dr$$

και

$$u = \frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o \Rightarrow du = \frac{\Delta P}{2L} dr + 0 \Rightarrow du = \frac{\Delta P}{2L} dr \Rightarrow dr = \frac{2L}{\Delta P} du$$

Άρα προκύπτει:

$$I = \int u^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} du = \frac{2L}{\Delta P} \int u^{\frac{1}{n}} du = \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{u^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1} + C_1$$

Επομένως:

$$V_z = \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{u^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1} + C$$

Όπου $u = \frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o$, άρα:

$$V_z = \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta P}{2L} r + \tau_o\right)^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1} + C$$

Για $r = R$ και $V_z = 0$ έχουμε:

$$0 = \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta P}{2L} R + \tau_o\right)^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1} + C$$

$$C = \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta P}{2L} R + \tau_o\right)^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1}$$

Με την αντικατάσταση του C στην:

$$V_z = \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{u^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1} + C$$

Καταλήγουμε στην κατανομή ταχύτητας:

$$V_z = \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{u^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1} + \left(-\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta P}{2L} R + \tau_o\right)^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\frac{1}{n}+1},$$

η οποία με απλοποίηση παίρνει τη μορφή:

$$V_z = \frac{2L}{(\Delta P)^{\left(\frac{1}{n}+1\right)} K^{\frac{1}{n}}} \left[(\tau_w - \tau_o)^{\frac{1}{n}+1} - \left(\frac{(\Delta P)r}{2L} - \tau_o\right)^{\frac{1}{n}+1} \right] \quad (3.31)$$

Όπως και στο ρεολογικό μοντέλο Bingham έτσι και σε αυτό του Herschel-Bulkley

$$\text{ισχύει ότι για } r = r_o, \tau_o = \frac{\Delta p}{2L} r_o \text{ και για } r = R, \tau_w = \frac{\Delta p}{2L} R \quad (3.32)$$

Επίσης, όταν $r = r_o$ προκύπτει η ταχύτητα εμβολικής ροής V_{plug} :

$$V_{plug} = \frac{2L}{(\Delta P) \left(\frac{1}{n}+1\right) K^{\frac{1}{n}}} \left[(\tau_w - \tau_o)^{\frac{1}{n}+1} - \left(\frac{(\Delta P)r_o}{2L} - \tau_o \right)^{\frac{1}{n}+1} \right] \quad (3.33)$$

Με την ολοκλήρωση του προφίλ ταχύτητας που προέκυψε, καταλήγουμε στον ρυθμός ογκομετρικής παροχής, ο οποίος είναι:

$$Q = \left(\frac{\pi R^3}{256} \right) \left(\frac{4n}{3n+1} \right) \left(\frac{\tau_w}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left[1 - \frac{(\tau_o/\tau_w)}{2n+1} \left[1 + \frac{2n}{n+1} \left(\frac{\tau_o}{\tau_w} \right) \left(1 + \frac{n\tau_o}{\tau_w} \right) \right] \right] \quad (3.34)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση της ροής εδώδιμων υλικών στο ακροφύσιο 3d

εκτυπωτή

4.1 Παραμετρική ανάλυση ροής - Διαγράμματα προφίλ ταχυτήτων και ογκομετρικής παροχής – πτώσης πίεσης

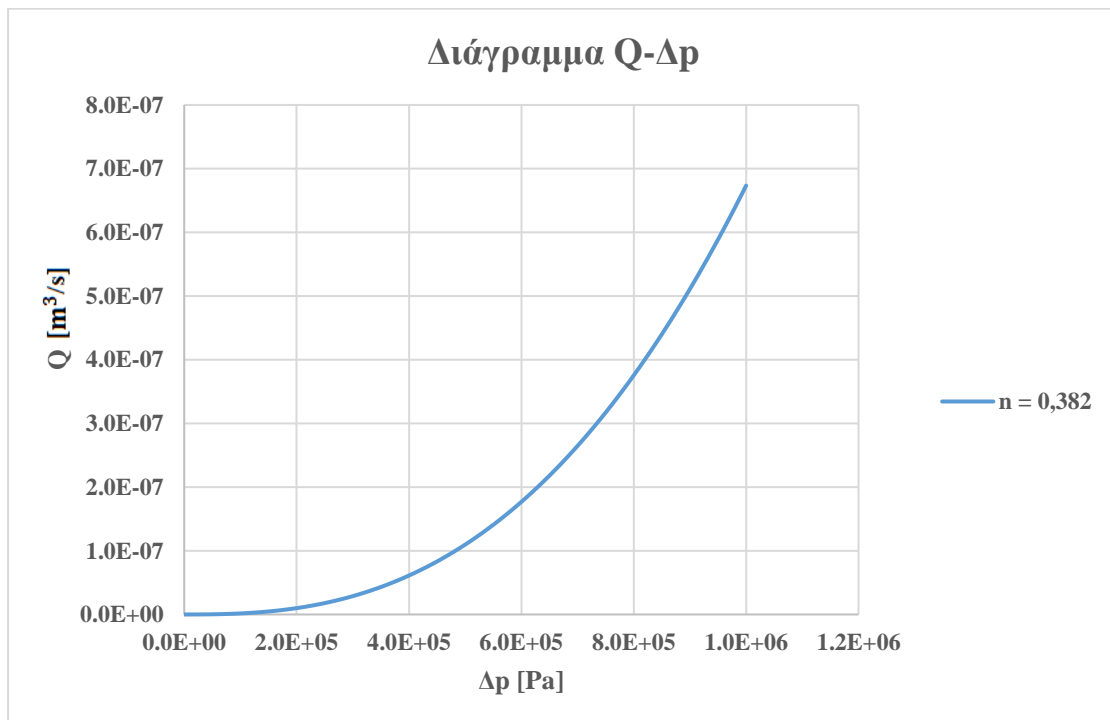
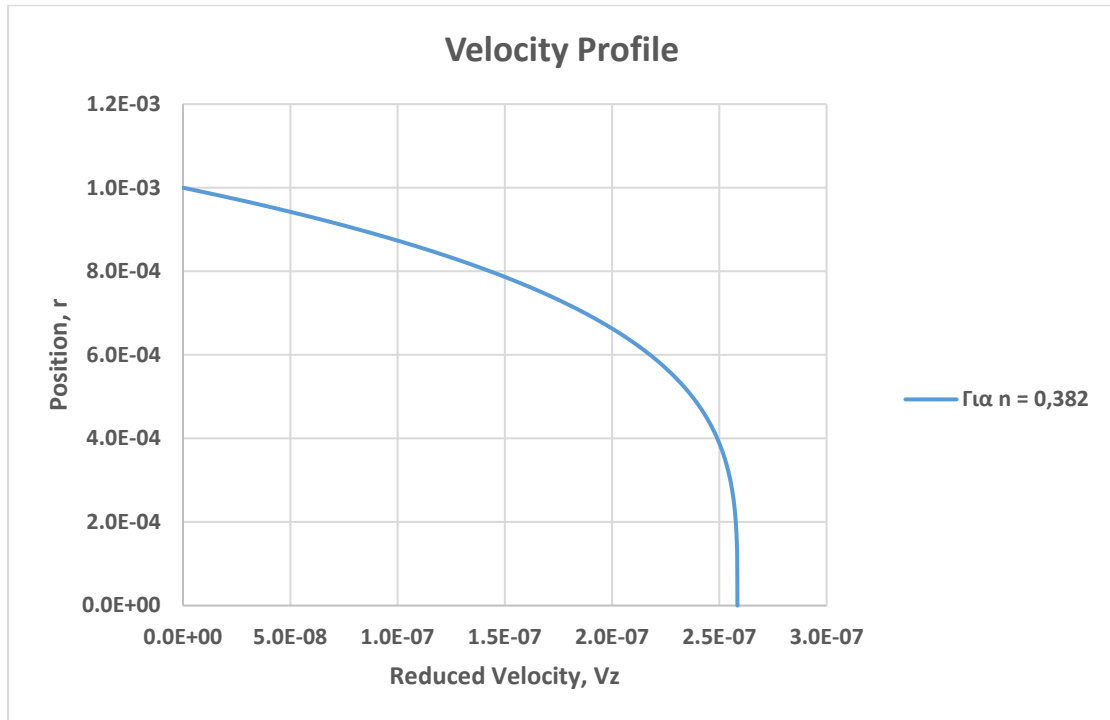
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα προφίλ ταχυτήτων καθώς και ογκομετρικής παροχής – πτώση πίεσης, των εδώδιμων υλικών που προέκυψαν μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση των άρθρων που αναγράφονται στην ενότητα 2.5 της διπλωματικής:

- Χονδροειδείς κόκκοι: Job's tear seeds (είδος σιταριού) και μαύρο ρύζι
- Σιρόπι σοκολάτας και πάστα σοκολάτας
- Πολτοποιημένη πατάτα (πουρές)

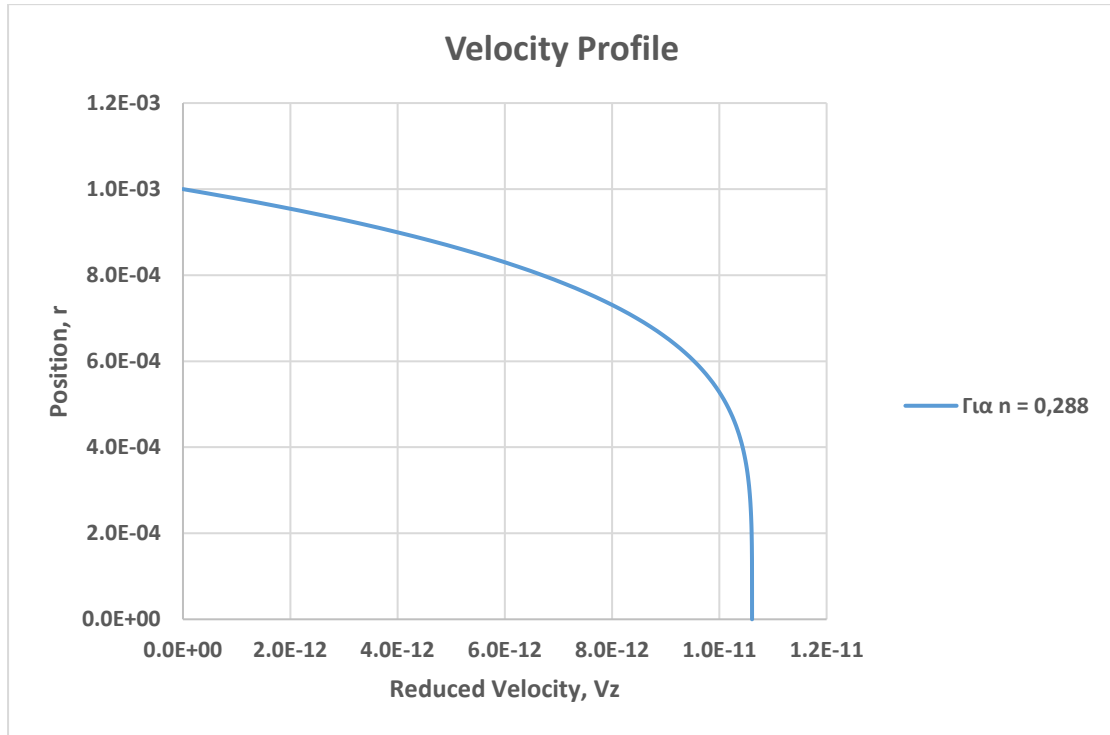
Σε αυτά τα υλικά γίνεται αναλυτική μελέτη της ροής στο ακροφύσιο τρισδιάστατου εκτυπωτή. Αξιοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα από τα τρία επιστημονικά άρθρα που μελετήσαμε ως προς τις ρεολογικές μεταβλητές και εφαρμόζοντας το κατάλληλο μαθηματικό ρεολογικό μοντέλο, αποτυπώσαμε γραφικά τις μεταβολές, οι οποίες μας οδηγούν σε συγκεκριμένα συμπεράσματα. Οι απεικονίσεις έγιναν σε πρόγραμμα Microsoft Excel και μεταφέρθηκαν ακολούθως.

4.1.1 Χονδροειδείς κόκκοι

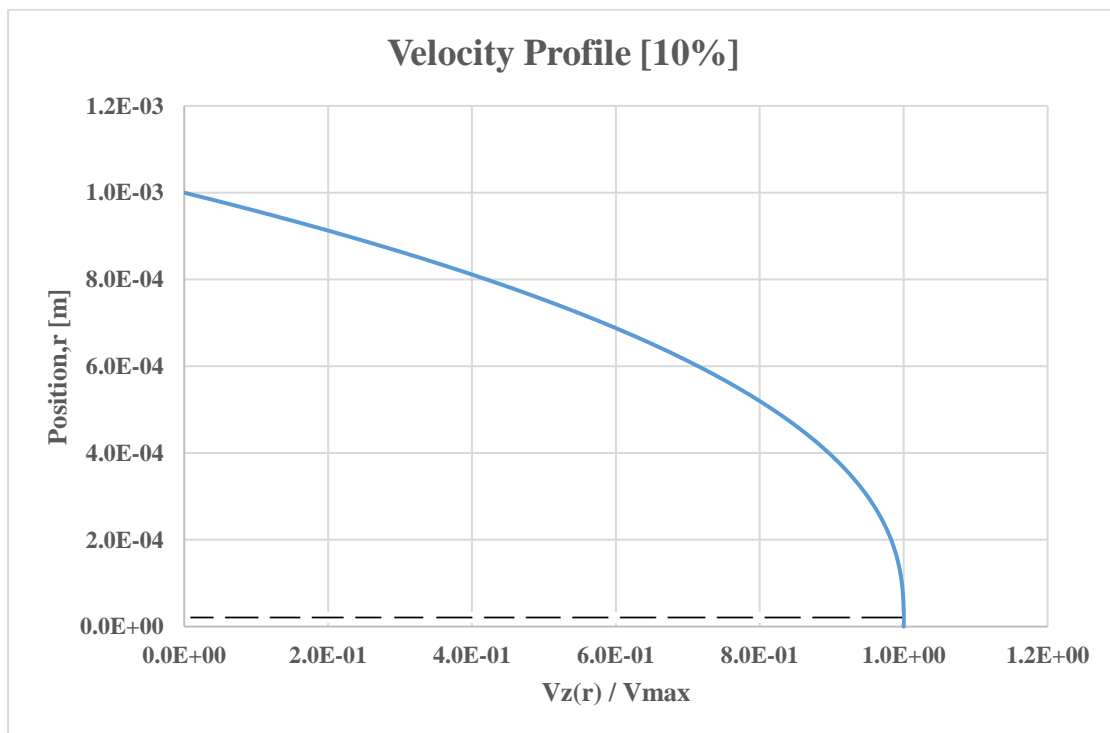
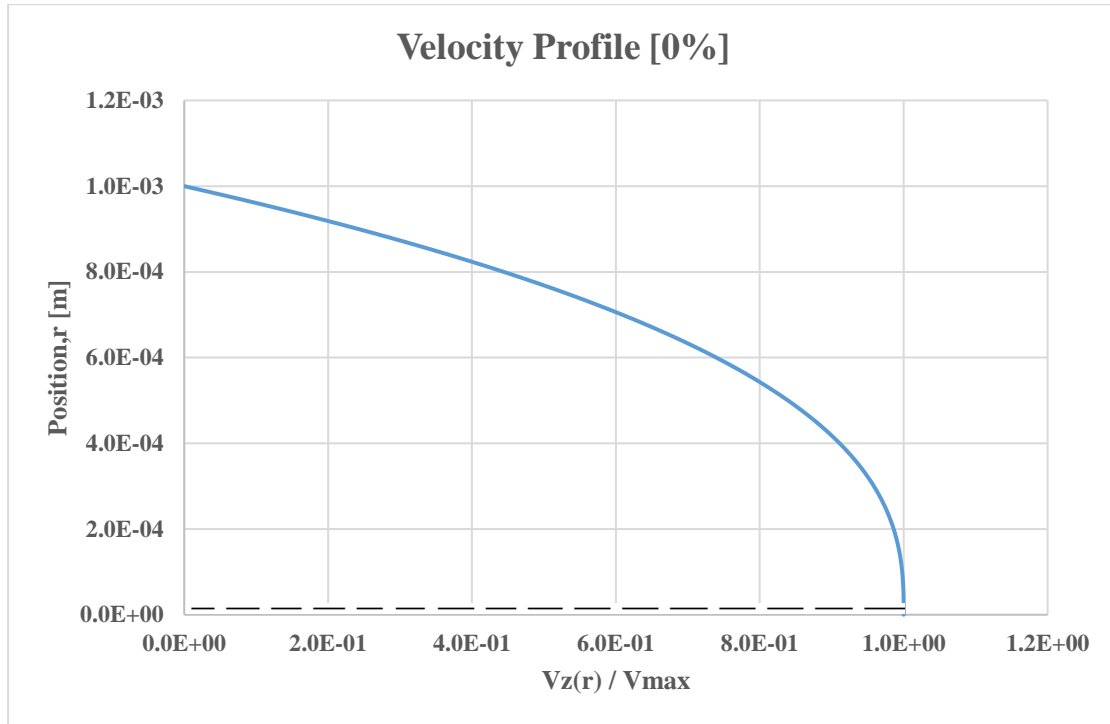
4.1.1.a Job's tear seeds

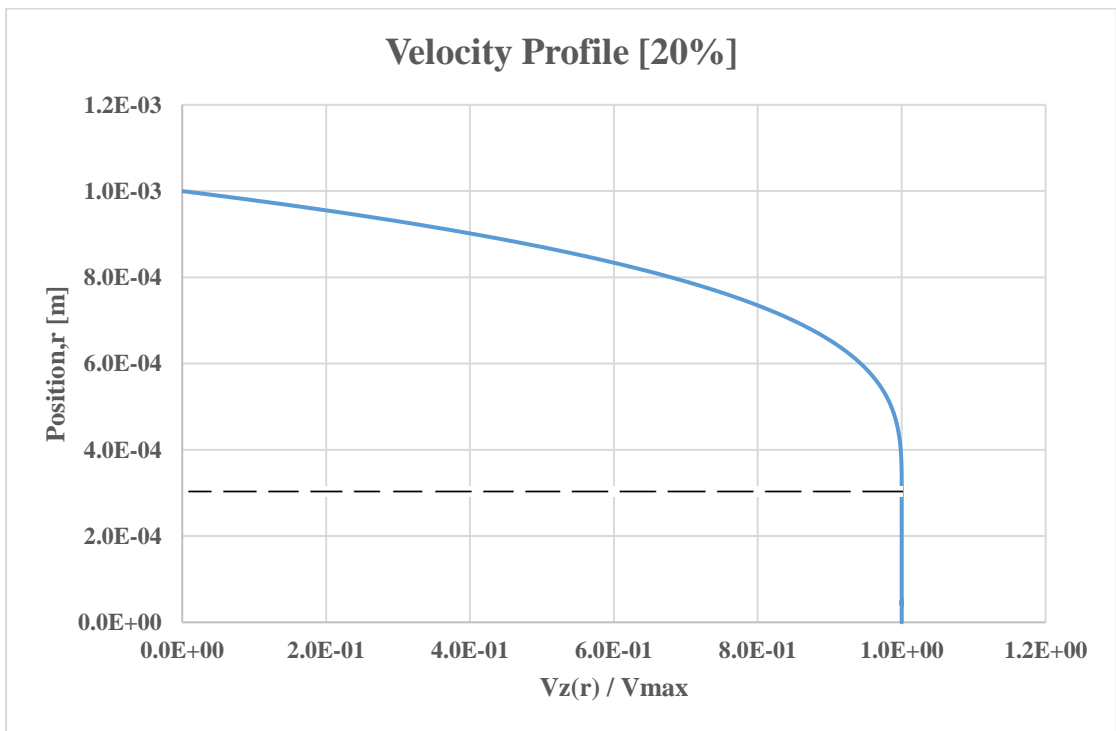
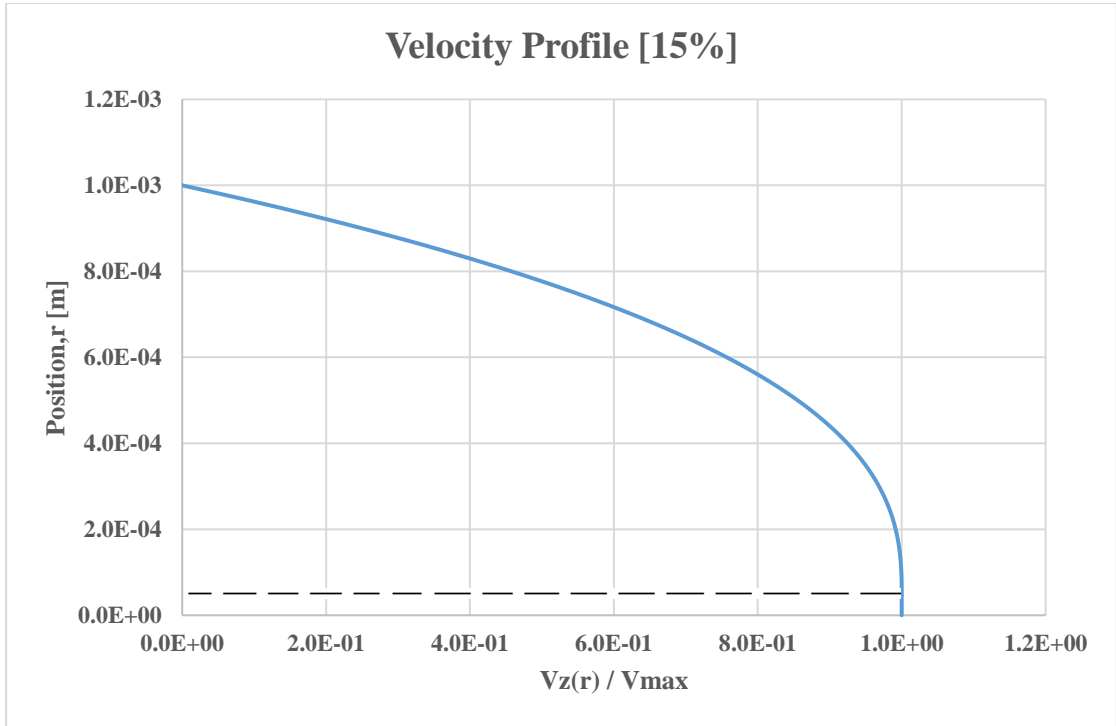


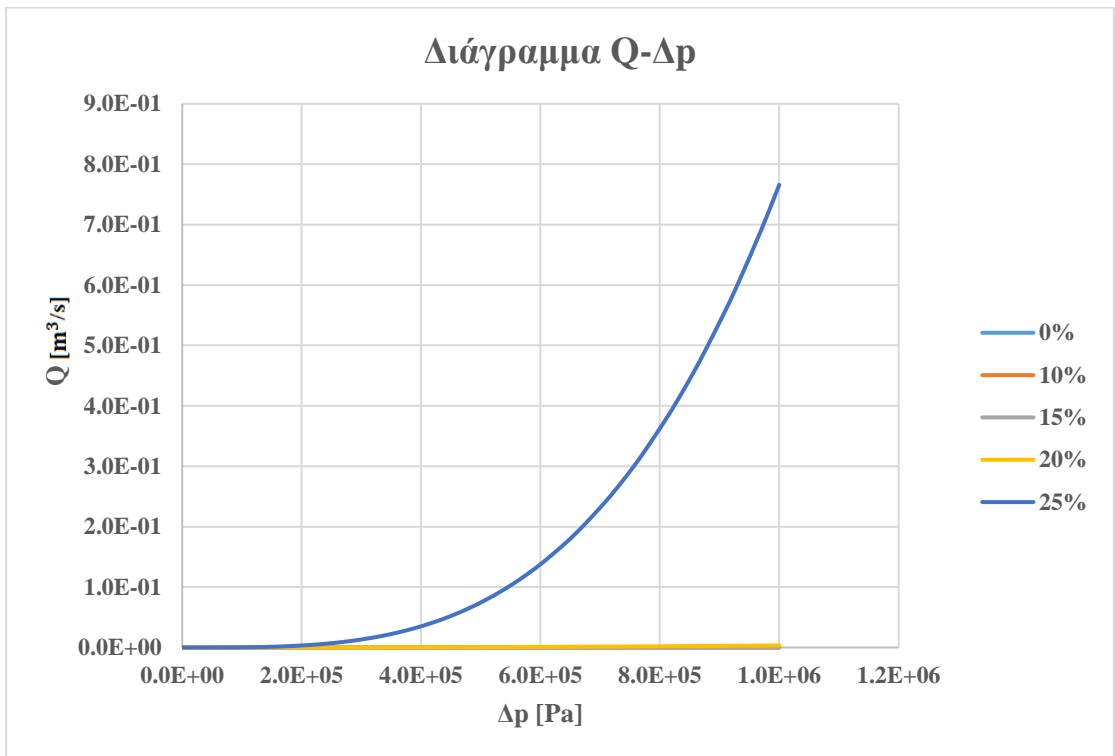
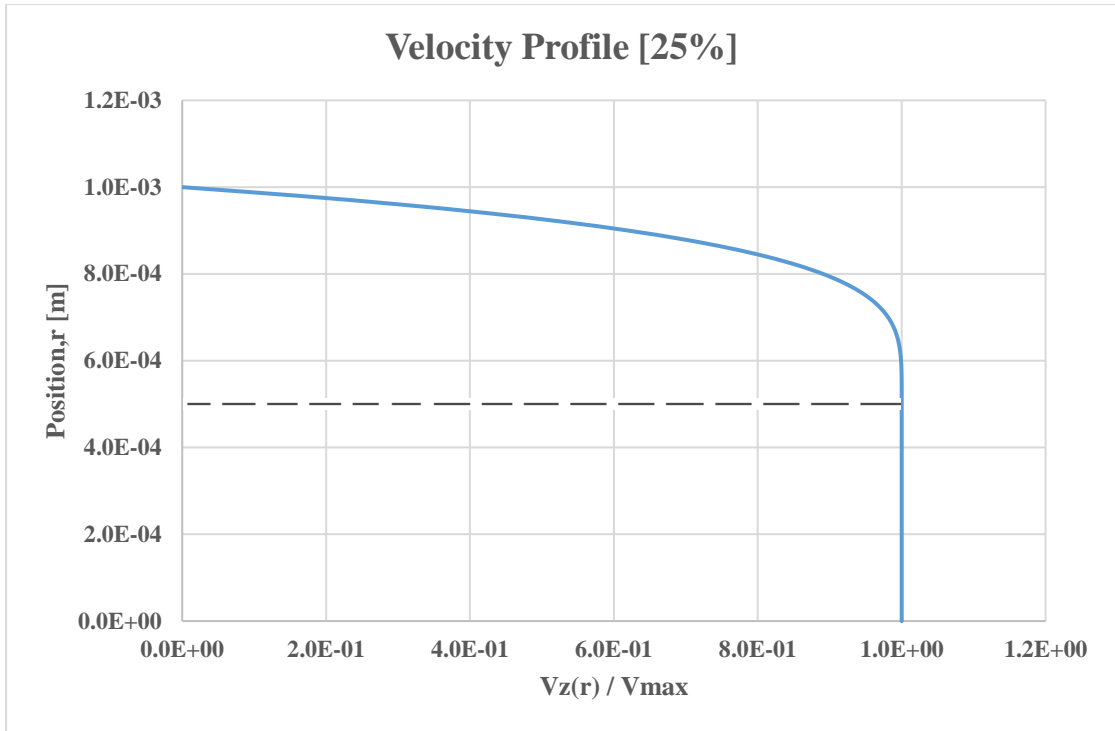
4.1.1.β Μαύρο ρύζι



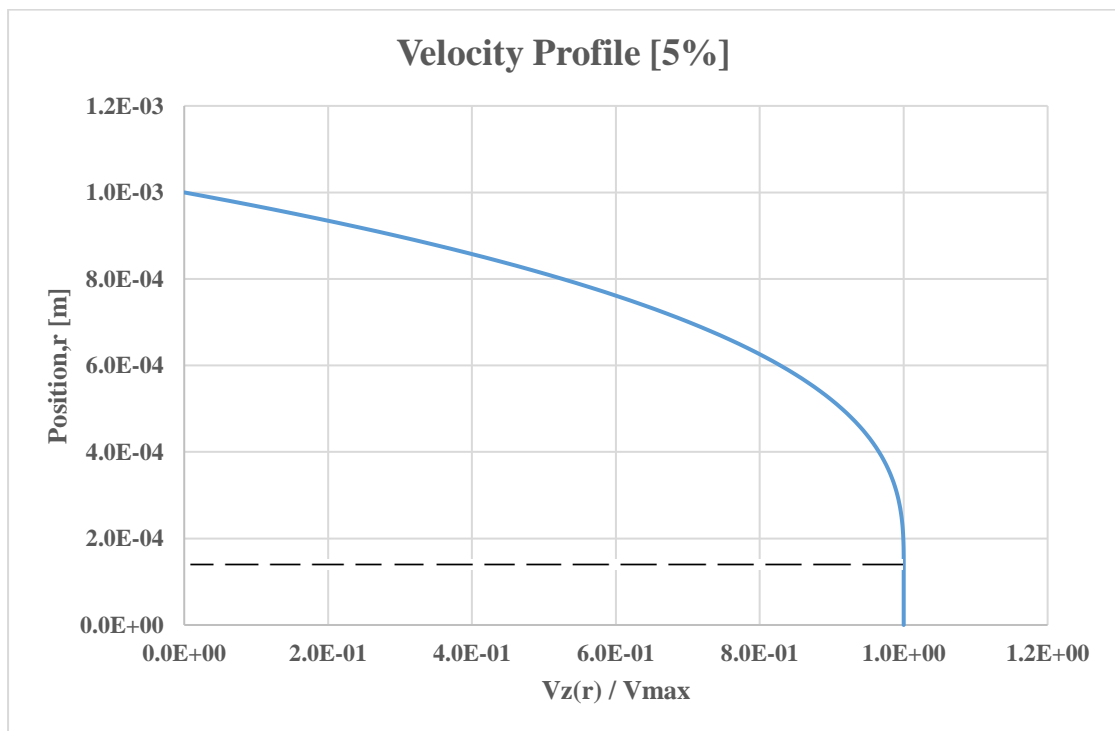
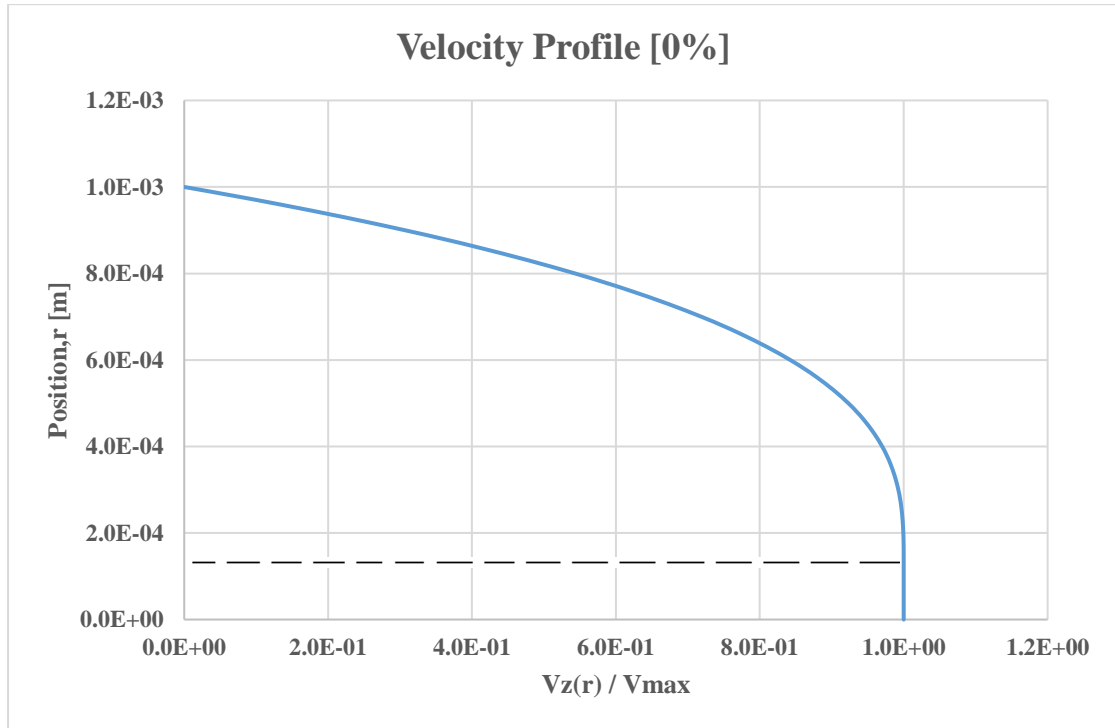
4.1.2 Σιρόπι σοκολάτας

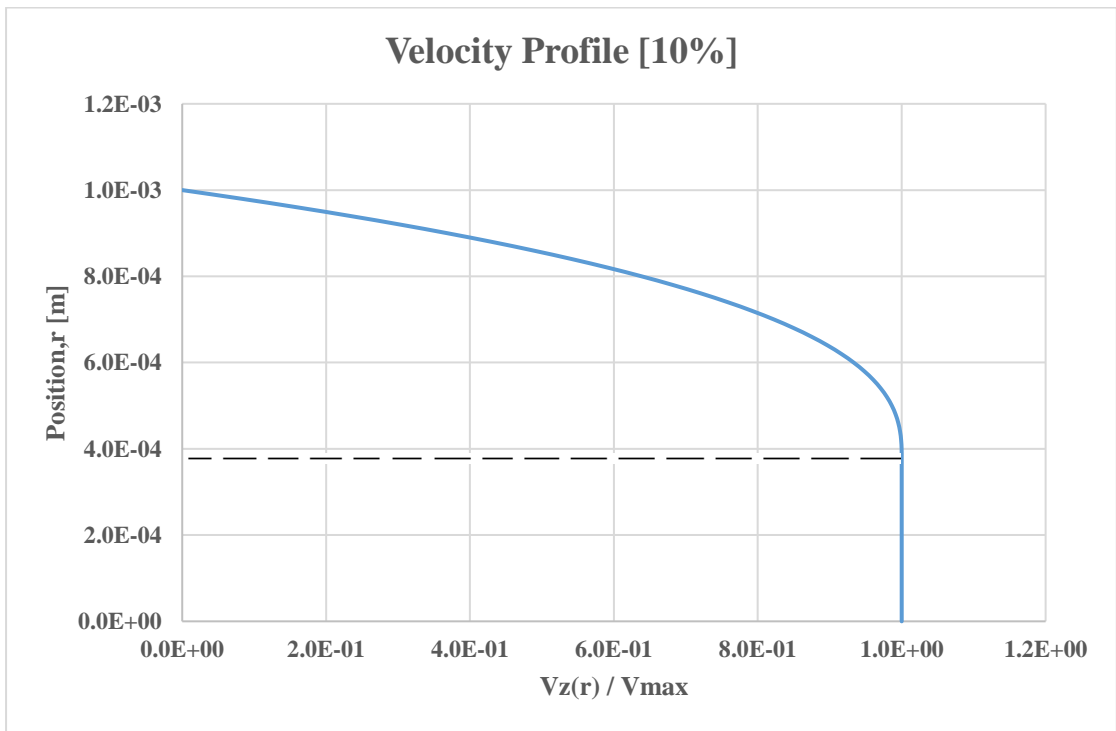
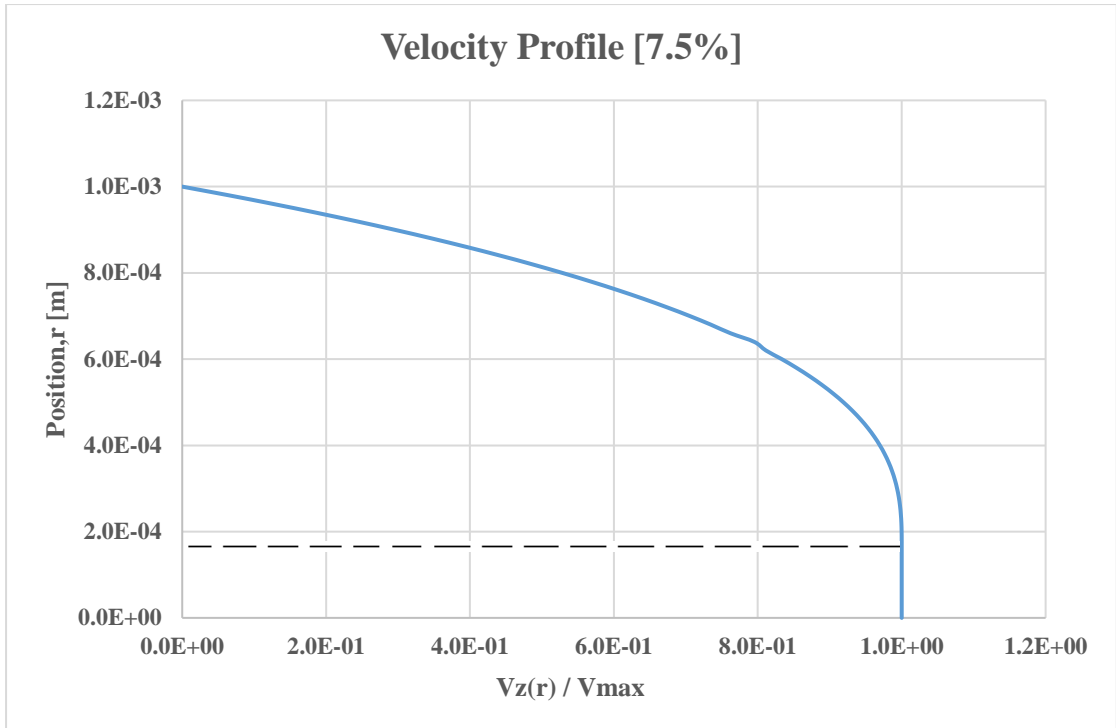


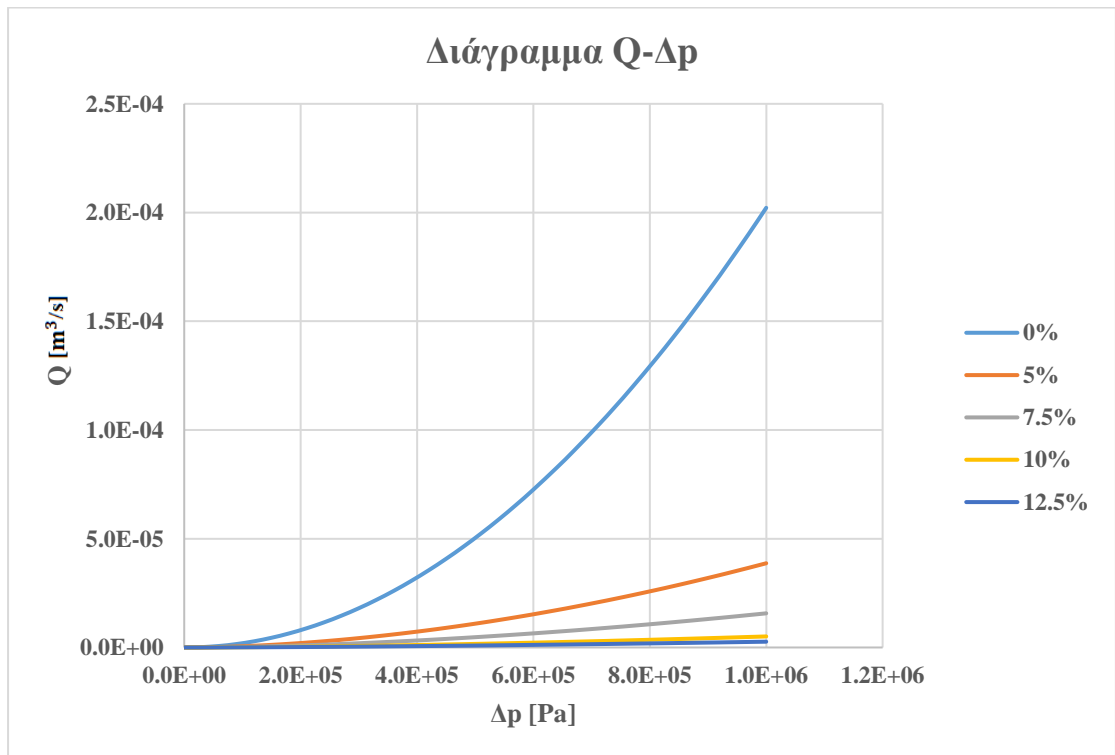
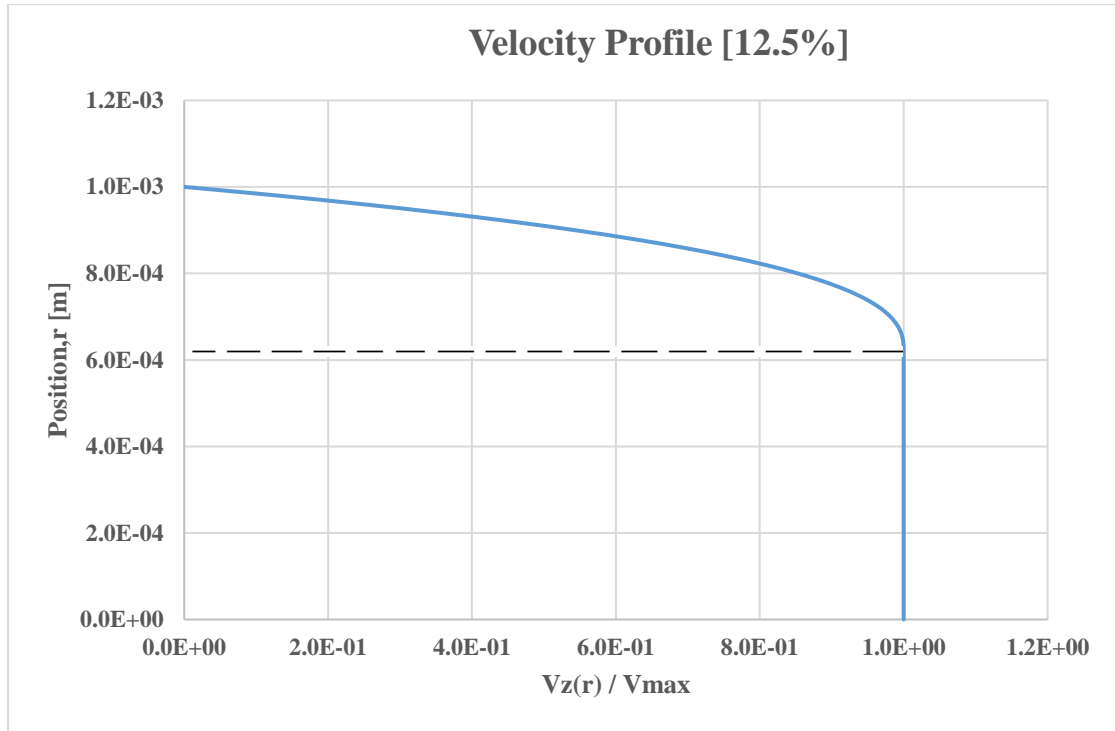




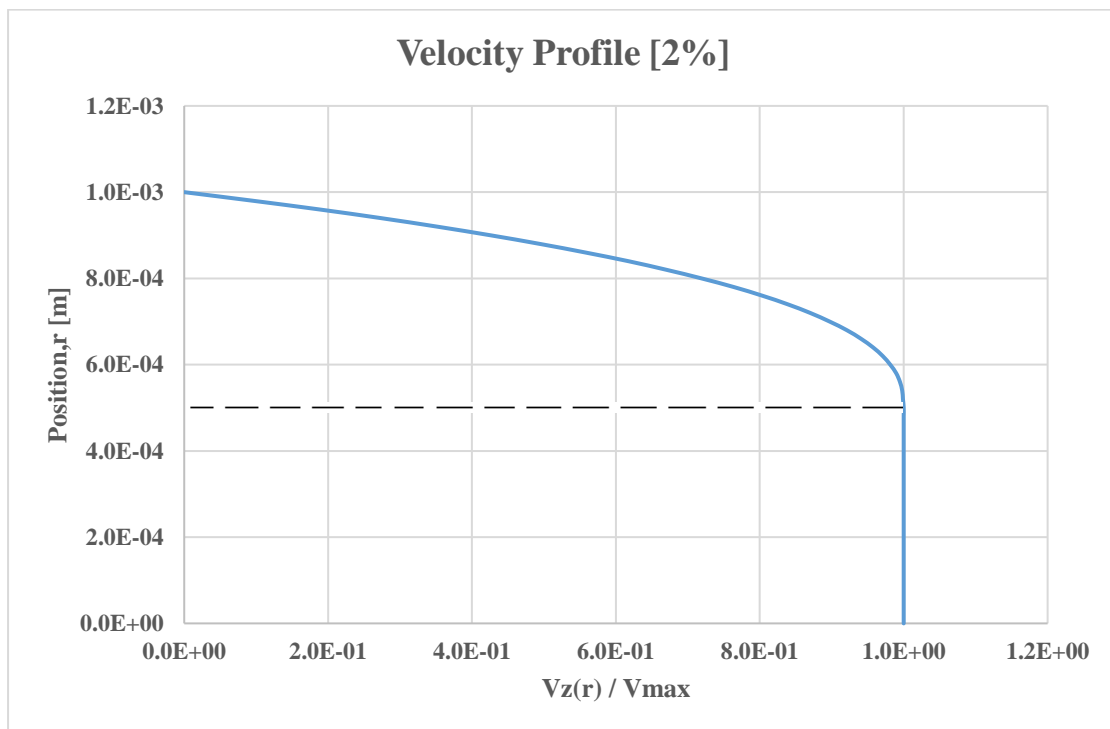
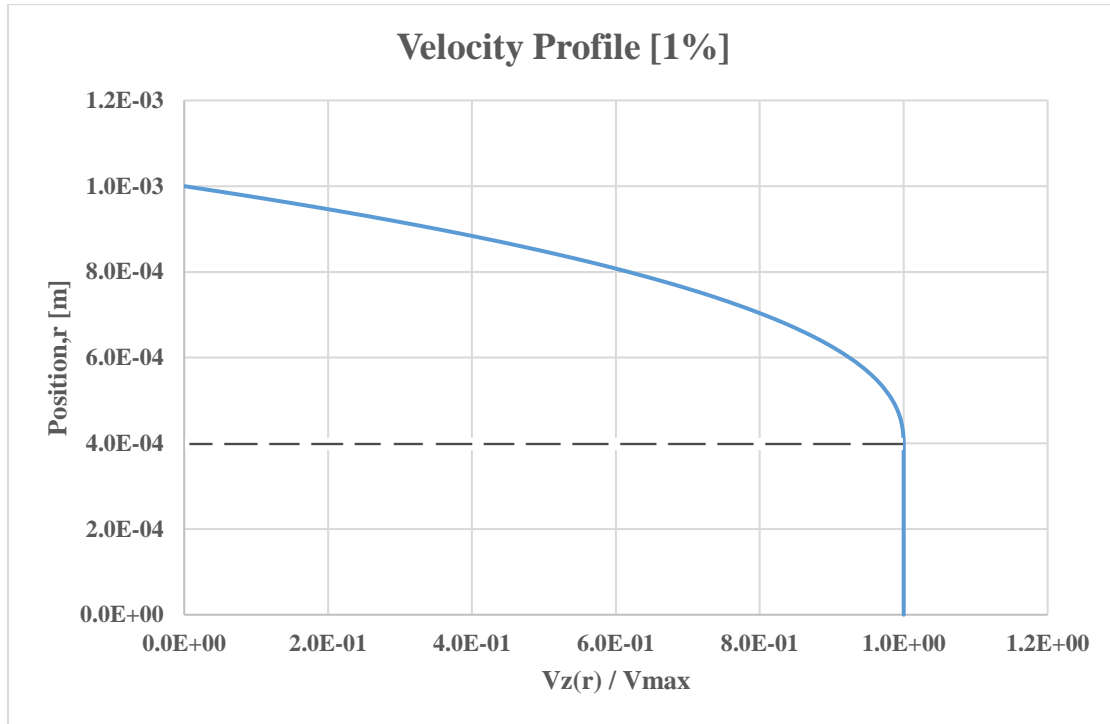
4.1.3 Πάστα σοκολάτας

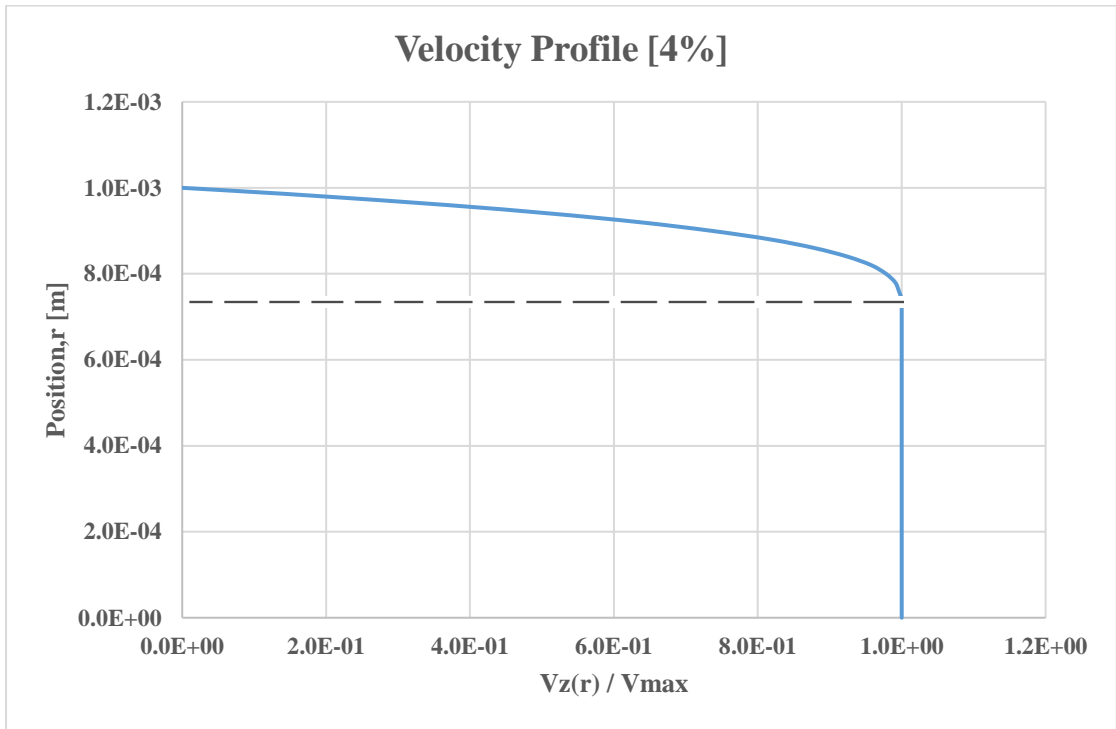
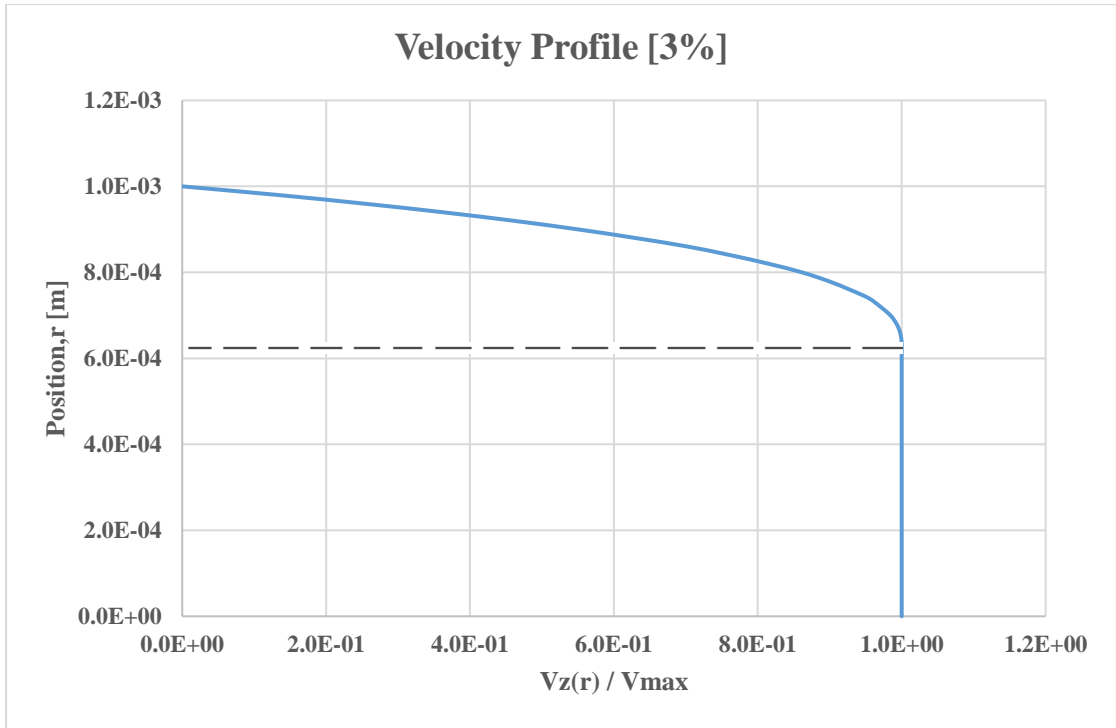


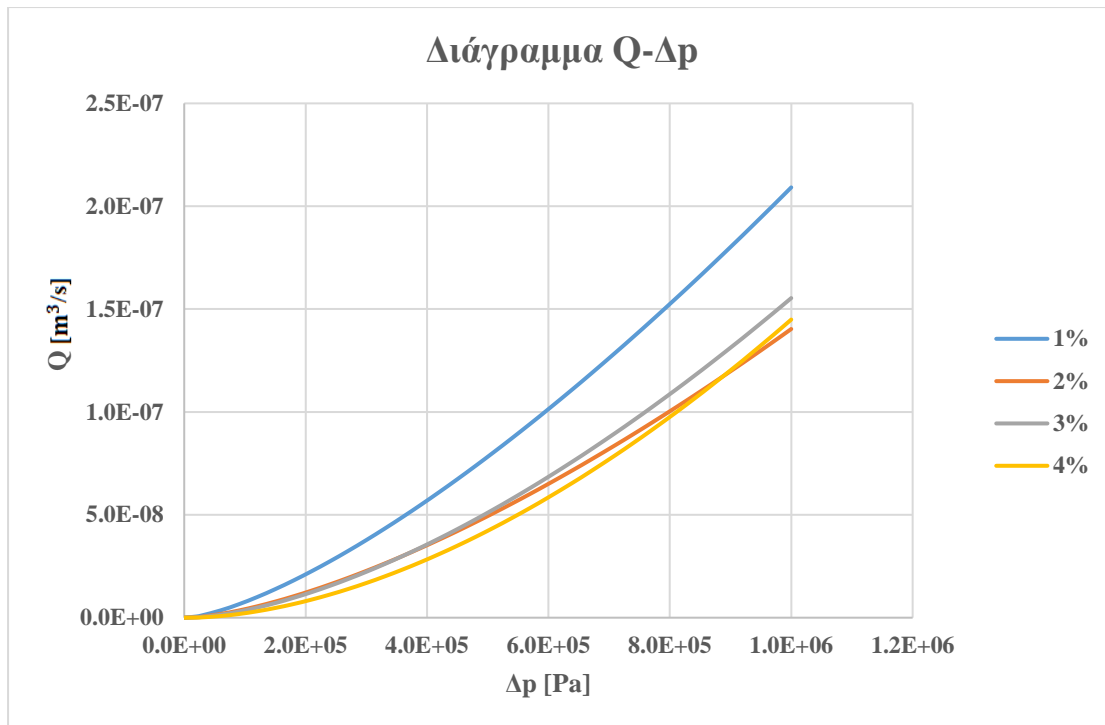




4.1.4 Πολτοποιημένη πατάτα







4.2 Σχόλια διαγραμμάτων

Οι ταχύτητες $V_z(r)$ που έχουν προκύψει υπολογιστικά από τις σχέσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, διαιρούνται με την αντίστοιχη μέγιστη ταχύτητα V_{max} του κάθε πειράματος, με σκοπό να γίνουν αδιάστατα μεγέθη. Γι' αυτό το λόγο, παρατηρείται ότι στα διαγράμματα προφίλ ταχυτήτων ο οριζόντιος άξονας λαμβάνει αδιάστατες τιμές ταχύτητας. Ξεκινώντας το σχολιασμό από τα συγκεκριμένα διαγράμματα των τριών υλικών που μελετήθηκαν και υπακούουν το μοντέλο Herschel-Bulkley, πρέπει να αναφερθεί πως η διακεκομμένη γραμμή που απεικονίζεται στα διαγράμματα προφίλ ταχυτήτων, διαχωρίζει δυο διαφορετικές περιοχές του υλικού ανάλογα με τη θέση τους κατά την κίνηση στον αγωγό του εκτυπωτή. Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία της καμπύλης που βρίσκονται κάτω από την διακεκομμένη υποδηλώνουν την unyielded περιοχή, δηλαδή την περιοχή που το υλικό δεν υπόκειται σε διάτμηση, γι' αυτό το ρευστό ρέει με τη μέγιστη ταχύτητα καθώς βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού. Σε αυτά τα σημεία η ταχύτητα παραμένει σταθερή, αφού δεν επηρεάζεται από την τοιχωματική επίδραση, με αποτέλεσμα να μην προκαλείται διάτμηση. Σε αντίθεση με τις τιμές που λαμβάνει η καμπύλη στην περιοχή πάνω από την διακεκομμένη γραμμή, όπου αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές ταχύτητας λόγω διάτμησης. Πρόκειται για την yielded περιοχή, στην οποία παρατηρείται πως η ταχύτητα του τοιχώματος (σε απόσταση r) μέχρι εκείνη στο κέντρο του αγωγού (σε

απόσταση r_0) αυξάνεται συνεχώς και ομαλά, μέχρι το σημείο της οριακής τάσης διάτμησης όπου η ταχύτητα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή. Στα άκρα των τοιχωμάτων οι τιμές ταχύτητας ισούνται με το μηδέν. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί διαφέρουν μεταξύ τους και έχουν κάθε φορά τις δικές τους ρεολογικές παραμέτρους, γι' αυτό το εύρος της unyielded περιοχής διαφοροποιείται.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όταν αναμειγνύουμε ένα ημίρρευστο εδώδιμο υλικό με κάποιο είδος σκόνης, δηλαδή με έναν πληρωτή, αλλάζει σε μεγάλο βαθμό η ρεολογική του συμπεριφορά και αυτό προφανώς επηρεάζει και τη ροή του υλικού εσωτερικά του ακροφυσίου. Ο πληρωτής έχει σημαντικό ρόλο στη εκτύπωση ενός ημίρρευστου τρόφιμου και στόχος της προσθήκης του είναι να δημιουργήσει την σταθεροποίηση του υλικού, ώστε να μη διαλυθεί στην εκτύπωση και συγχρόνως να κάνει τη ροή του μέσα από το ακροφύσιο «εύκολη». Παρατηρείται πως με την προσθήκη σκόνης κακάου στη πάστα και στο σιρόπι σοκολάτας, όπως και αμύλου στον πουρέ πατάτας, αυξάνεται το ιξώδες τους, αφού μειώνεται ο ρυθμός διατμητικής τάσης και με αυτόν τον τρόπο η εκτύπωση θα έχει μεγαλύτερη επιτυχία, αφού θα μπορεί να σταθεροποιηθεί το υλικό. Επομένως, είναι αντιληπτό πως οι διαφορετικές συστάσεις κακάου και αμύλου, αντίστοιχα στα τρόφιμα σοκολάτας και πουρέ πατάτας έχουν μεγάλη επίδραση στη δομή του εκτυπώσιμου υλικού. Και στα τρία υλικά που μελετήθηκαν και υπάγονται στο μοντέλο Herschel-Bulkley, παρατηρείται πως με την αύξηση της περιεκτικότητας του πληρωτή, ελαττώνεται η ταχύτητα και αυξάνεται η unyielded περιοχή. Ωστόσο, στα διαγράμματα των προφίλ ταχύτητας που αφορούν το σιρόπι σοκολάτας παρατηρείται πως υπάρχει επίδραση της ρεολογικής παραμέτρου n , η οποία δεν έχει σταθερή αύξηση ή μείωση αλλά υπάρχει διακύμανση στις τιμές της. Πιο συγκεκριμένα, για περιεκτικότητα 10% σκόνης κακάου στο σιρόπι σοκολάτας υπάρχει αύξηση του n συγκριτικά με αυτή για 0%. Όμως δεν φαίνεται να σταθεροποιείται αυτή η αυξητική τάση, αφού για περιεκτικότητα σε σκόνη κακάου 15% και πάνω αποτυπώνεται μείωση στην τιμή του συντελεστή n . Οι τελευταίες παρατηρήσεις έρχονται σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προφίλ ταχύτητας που είτε αυξάνεται συνεχόμενα η παράμετρος n (πάστα σοκολάτας), είτε ελαττώνεται (πουρές πατάτας). Επίσης, για 20% σκόνης κακάου στο σιρόπι δεν προκαλείται μείωση της ταχύτητας παρόλο που μεγαλώνει ο βαθμός πλήρωσης του κακάου και αυτό συμβαίνει γιατί η επίδραση της ρεολογικής παραμέτρου n απ' ότι φαίνεται είναι σημαντικότερη από τις υπόλοιπες.

Ανάλογα με την ρεολογία του εκάστοτε υλικού παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά της ογκομετρικής παροχής (Q) και της πτώσης πίεσης (ΔP). Τα διαγράμματα ($Q - \Delta P$) δίνουν χρήσιμα συμπεράσματα για την κατασκευή κατάλληλων ακροφυσίων, αφού από τη μελέτη τους μπορεί να προκύψει η ευκολία εξώθησης του υλικού. Σε γενικό πλαίσιο το υλικό που έχει μικρή πτώση πίεσης και μεγάλη ογκομετρική παροχή σημαίνει ότι ρέει εύκολα μέσα στο ακροφύσιο, ταυτόχρονα όμως αυτό δεν συνεπάγεται ότι είναι πολύ ρευστό, οπότε δυσκολεύεται η στρωματοποίηση. Για τα εδώδιμα υλικά πάστα σοκολάτας και πουρέ πατάτας με πληρωτές κακάο και άμυλο αντίστοιχα, παρατηρείται πως για ίδια τιμή πτώσης πίεσης όταν ο βαθμός πλήρωσης είναι μικρότερος, τότε η ογκομετρική παροχή μεγαλώνει. Ενώ για αυξημένες περιεκτικότητες πληρωτή η ογκομετρική παροχή γίνεται ολοένα και μικρότερη. Για παράδειγμα, για 0% περιεκτικότητα κακάου στη πάστα σοκολάτας, η ογκομετρική παροχή είναι μεγαλύτερη από αυτήν με 12,5%, για την ίδια τιμή πτώσης πίεσης. Απεναντίας για το διάγραμμα του σιροπιού που μπορούμε να πούμε ότι συμβαίνει το αντίθετο και αυτό μπορεί να οφείλεται στην επίδραση της ρεολογικής παραμέτρου n που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επίσης, φαίνεται ότι για 0%, 10%, 15% και 20% βαθμού πλήρωσης κακάου στο σιρόπι, οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται εφόσον οι τιμές ογκομετρικής παροχής που υπολογίστηκαν έχουν παρόμοιες τιμές, παρόλο που διαφέρουν οι ρεολογικές παράμετροί τους. Στην περίπτωση του πουρέ εντοπίζουμε σχεδόν την ίδια συμπεριφορά με την πάστα **με εξαίρεση την καμπύλη για 2% όπου παρατηρείται αύξηση των τιμών μεταξύ Q και ΔP , αλλά η μορφή της δεν ακολουθεί τη συμπεριφορά των**, φαίνεται παράξενο αλλά η αύξηση του ποσοστού του αμύλου μπορεί να επηρέασε τη ροή του υλικού στο ακροφύσιο. Σε κάθε περίπτωση όμως, όταν το Q αυξάνεται, αυξάνεται και το ΔP , για κάθε υλικό αυτή η αύξηση έχει διαφορετικό ρυθμό και σε γενικό επίπεδο παρατηρούμε ότι για την ίδια πτώση πίεσης το υλικό που έχει μικρότερο ρυθμό ογκομετρικής ροής, ρέει πιο αργά, άρα και εκρέει πιο δύσκολα από το ακροφύσιο.

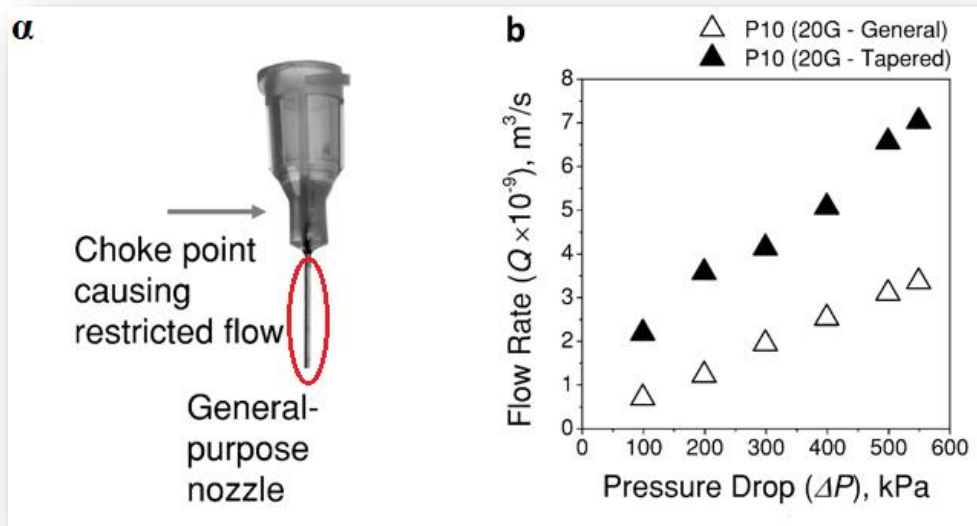
Όσο αναφορά τα διαγράμματα των προφίλ ταχυτήτων που αφορούν χονδροειδείς κόκκους (Job's tear seeds και μαύρου ρυζιού) παρατηρείται πως δεν έχουν οριακή διατμητική τάση. Τα συγκεκριμένα υλικά υπακούν στο ρεολογικό μοντέλο Bird-Carreau, ωστόσο όπως αναφέρθηκε στην 2.5 ενότητα, η μελέτη τους στην διπλωματική γίνεται σύμφωνα με το μοντέλο Power Law. Και για τα δύο είδη χονδρόκοκκων φαίνεται πως οι καμπύλες που σχηματίζουν το προφίλ ταχυτήτων έχουν παραβολική μορφή. Ωστόσο διακρίνεται πως το υλικό που έχει πιο μεγάλη τιμή του

ρεολογικού δείκτη n παρουσιάζει και μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας αλλά και πιο κυρτή καμπύλη. Και στις δύο περιπτώσεις, στα άκρα των τοιχωμάτων οι τιμές που καταλαμβάνει η ταχύτητα είναι μηδενικές. Ενώ πλησιάζοντας προς το κέντρο του αγωγού, η ταχύτητα αυξάνεται ομαλά μέχρι που μεγιστοποιείται στο κέντρο του.

Τέλος, στα διαγράμματα ογκομετρικής παροχής και πτώση πίεσης ($Q - \Delta p$) κάθε υλικού φαίνεται να υπάρχει σταδιακή αύξηση Q και Δp . Συγκρίνοντας τα δύο εδώδιμα υλικά είναι αντιληπτό πως για ίδιες τιμές πίεσης, το μαύρο ρύζι που έχει ρεολογική παράμετρο n μικρότερη από εκείνη του Job's tear seeds, έχει και πιο μικρή ογκομετρική παροχή. Ακόμη, θα μπορούσε να σημειωθεί πως τα συγκεκριμένα υλικά επειδή έχουν n μικρότερο της μονάδας ανήκουν στην κατηγορία των ψευδοπλαστικών.

4.3 Διάγραμμα σύγκρισης ογκομετρικής παροχής – πτώσης πίεσης βασισμένο σε πειραματικά δεδομένα

Παρακάτω θα αναδειχθεί η δυνατότητα πρόβλεψης του μοντέλου Herschel-Bulkley για μία ροή που αφορά την πάστα σοκολάτας με περιεκτικότητα σκόνης κακάου 10% w/w. Πιο συγκεκριμένα, για όλα τα πειράματα που αφορούν τρισδιάστατες εκτυπώσεις εδώδιμων υλικών είναι πολύ σπάνιο να βρεθεί βιβλιογραφία με περαιτέρω δεδομένα σχετικά με τη ροή τους στο ακροφύσιο. Αντίθετα, το εμπλουτισμένο άρθρο των Karyappa, & Hashimoto, (2019), με τα επιπλέον πειραματικά δεδομένα είναι η μοναδική βιβλιογραφική αναφορά που παρουσιάζει τιμές για βασικές ρεολογικές μεταβλητές που έχουν σημαντικό ρόλο για τη μελέτη του ακροφυσίου και εκτός αυτών, της ογκομετρικής ροής Q και της πτώσης πίεσης Δp . Στην Εικ. 4.1α διακρίνεται το ακροφύσιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε και σύμφωνα με αυτό προέκυψε το διπλανό διάγραμμα (Εικ. 4.1b) όπου αποτυπώνονται οι πειραματικές τιμές της πάστας σοκολάτας για γενικού τύπου ακροφύσιο, τις οποίες αντλήσαμε για τη συγγραφή της εργασίας μας. Χρησιμοποιήσαμε τα συγκεκριμένα δεδομένα προκειμένου να τα συγκρίνουμε με την καμπύλη Herschel-Bulkley, η οποία έχει προκύψει από τις κατάλληλες εξισώσεις Q και Δp και γνωρίζουμε τη μορφή της (Σχήμα 4.1).



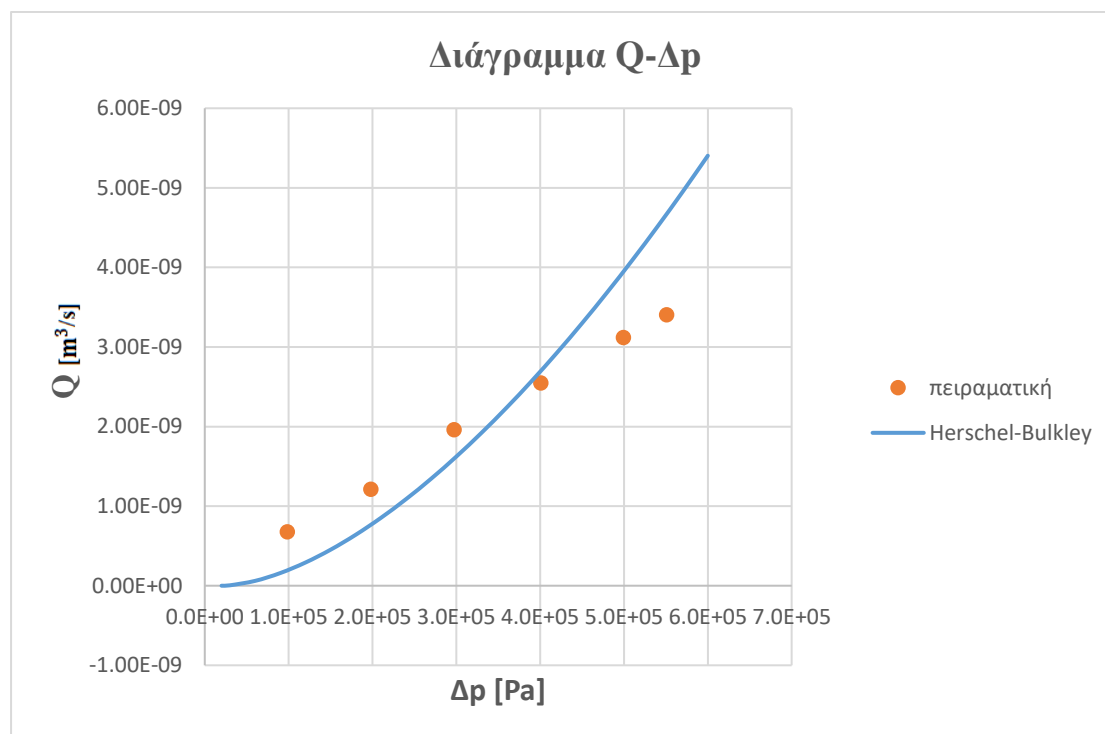
Εικ. 4.1: *a)* Τύπος ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε στο Ci3DP *b)* Πειραματικό διάγραμμα ογκομετρικής παροχής – πτώσης πίεσης για πάστα σοκολάτας με περιεκτικότητα 10% σκόνης κακάου

(Πηγή: Karyappa, & Hashimoto, 2019)

Στο διάγραμμα της Εικ. 4.1b διακρίνουμε την ογκομετρική παροχή στον κάθετο άξονα και στον οριζόντιο την πτώση πίεσης στο ακροφύσιο, τιμές που αφορούν την πάστα σοκολάτας με 10% w/w βαθμό πλήρωσης κακάου για γενικής χρήσης ακροφύσιο (σύμβολο: Δ). Επειδή όμως δεν αναφέρεται σε ποιο τμήμα του ακροφυσίου είναι υπολογισμένες οι συγκεκριμένες τιμές, αν και λογικά αφορούν ολόκληρο το ακροφύσιο (Εικ. 4.1α), εμείς μελετάμε το τελευταίο κυλινδρικό τμήμα του που βρίσκεται στον κύκλο (Εικ. 4.1α). Επίσης, στη συγκεκριμένη βιβλιογραφία αναφέρονται οι ρεολογικές τιμές (n , K , τ_0) καθώς και η διάμετρος του μεταλλικού ακροφυσίου η οποία είναι $d = 600\mu m$, άρα είναι γνωστή και η ακτίνα του. Ωστόσο, το μήκος του δεν αναγράφεται επομένως το θέτουμε ίσο με $L = 15mm$.

Η πάστα σοκολάτας υπάγεται στο μοντέλο Herschel-Bukley γι' αυτό και κάνουμε υπολογισμού από τα δεδομένα των Karyappa, & Hashimoto, (2019), αξιοποιώντας τις εξισώσεις του συγκεκριμένου ρεολογικού μοντέλου ώστε να προκύψει η καμπύλη του διαγράμματος (Σχήμα 4.1). Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα που απεικονίζονται με τελείες ακολουθούν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά με αποτέλεσμα να εμφανίζουν αποκλίσεις από την καμπύλη Herschel-Bukley. Η διαφορά που εμφανίζεται μεταξύ τους μπορεί να

οφείλεται στο γεγονός ότι η μελέτη μας έγινε στο μεταλλικό τμήμα του ακροφυσίου αγνοώντας το κομμάτι της ροής πριν από αυτό (στη σύριγγα). Επίσης, τα εδώδιμα υλικά (στην περίπτωση μας η πάστα σοκολάτας) που χρησιμοποιούνται στη τρισδιάστατη εκτύπωση ενδέχεται να έχουν ολίσθηση στο τοίχωμα, δεδομένο που δεν έχει ληφθεί υπόψη στη συγκεκριμένη ανάλυση.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ογκομετρικής παροχής – πτώσης πίεσης στο τελικό τμήμα του ακροφυσίου στο οποίο γίνεται σύγκριση μεταξύ καμπύλης *Herschel-Bulkley* και πραγματικών πειραματικών τιμών για την πάστα σοκολάτας με 10% σκόνη κακάου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Το τρισδιάστατο εκτυπωμένο τρόφιμο είναι το αποτέλεσμα της μεθόδου απόθεσης που γίνεται με συνένωση των διάφορων στρωμάτων. Είναι μία αυτοματοποιημένη διαδικασία όπου κατάλληλα συστατικά μπορούν να αναμιχθούν και να μεταποιηθούν σε πιο περίπλοκα, δίνοντας τους συγκεκριμένα σχήματα, δομές, υφές και γεύσεις. Κάτι αντίστοιχο είναι δύσκολο να επιτευχθεί με παραδοσιακές διαδικασίες και σε περίπτωση που γινόταν θα ήταν ασύμφορο οικονομικά. Η διαδικασία εκτύπωσης που ακολουθείται είναι αυτοματοποιημένη, μέσω επιλεγμένων συνταγών και χωρίς να απαιτείται παρουσία χειριστή σε όλη τη διάρκεια. Άλλος σημαντικός παράγοντας χρήσης τρισδιάστατων εκτυπωτών στα τρόφιμα είναι η παραγωγή σκευασμάτων συγκεκριμένης διατροφικής αξίας.

Η εκτύπωση εδώδιμων υλικών εμφανίζει δυσκολίες σε σχέση με την κλασική και παλαιότερη εκτύπωση συνθετικών ή μεταλλικών υλικών. Για το τελικό αποτέλεσμα απαιτείται εξατομικευμένη μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού που χρησιμοποιείται. Συνήθως υπάρχει ο περιορισμός της εκτύπωσης ξηρών συστατικών, επειδή έτσι επιτυγχάνεται η μείωση του κινδύνου αλλοίωσης. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι το υλικό προς εκτύπωση πρέπει αρχικά να μετατραπεί σε μορφή «πάστας», γεγονός που κάνει σχετικά χρονοβόρα τη διαδικασία. Επίσης δεν είναι δυνατή η εκτύπωση κλασικών φαγητών, άλλα μόνο συγκεκριμένων.

Οι 3D εκτυπωτές που αξιοποιούνται έχουν προκύψει από τροποποίηση αντίστοιχων που στο παρελθόν εκτύπωναν συνθετικό νήμα. Η κύρια μέθοδος για τη μετακίνηση του ρευστού εδώδιμου υλικού που εφαρμόζεται είναι η εξώθηση. Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται και ο κοχλίας.

Η ρεολογία είναι ένας κλάδος που καθορίζει βασικούς παράγοντες στη σωστή εκτύπωση τροφίμων, μέσα από τον έλεγχο των ιδιοτήτων που επηρεάζει τόσο την ποιότητα των τροφίμων, όσο και την αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών του υλικού. Επειδή η ρεολογία των τροφίμων είναι αρκετά περίπλοκη, έχουν αναπτυχθεί διάφορα ρεολογικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν τη σχέση του ρυθμού διάτμησης με το ιξώδες για μη νευτώνεια ρευστά και με την εφαρμογή του κατάλληλου μοντέλου που υπακούει το εκάστοτε εδώδιμο υλικό, προκύπτουν υπολογιστικές προσομοιώσεις.

Οι ιξώδεις συμπεριφορές των τροφίμων σχετίζονται άμεσα με τις λειτουργικές τους ιδιότητες, τα συστατικά τους και τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνονται στη μικροδομή των τροφίμων. Επειδή έχουν διαφορετικές μικροδομές, τα τρόφιμα παρουσιάζουν διαφορετικές συμπεριφορές ιξώδους που τα κάνουν να περιλαμβάνουν στοιχεία με διαφορετική λειτουργική συμπεριφορά. Το ιξώδες και οι ρεολογικές ιδιότητες της βρώσιμης μελάνης είναι κρίσιμες για το τελικό αποτέλεσμα. Γενικά, είναι απαραίτητο το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί να έχει χαμηλό ιξώδες έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να εκτοξευθεί μέσα από τα μικροσκοπικά στόμια της εκτυπωτικής κεφαλής. Τα περισσότερα τρόφιμα με συμπεριφορά εξαρτώμενη από τη διάτμηση αραιώνουν με αποτέλεσμα το ιξώδες τους να μειώνεται. Ωστόσο, με την προσθήκη πληρωτών αυξάνεται το ιξώδες τους και αποκτούν καλύτερη σταθεροποίηση-στρωματοποίηση και υφή, όμως η δυσκολία στην εξώθηση γίνεται ολοένα και περισσότερη.

Για την ίδια πτώση πίεσης παρατηρήσαμε ότι με την προσθήκη της εκάστοτε περιεκτικότητας πληρωτή η ογκομετρική παροχή παρουσίαζε μικρότερες τιμές το οποίο συνεπάγεται και δυσκολία στην εκροή του ρευστού από το ακροφύσιο. Επίσης, παρατηρήσαμε την επιρροή που έχουν οι ρεολογικές μεταβλητές σε όλες τις εκφάνσεις διαγραμμάτων των υλικών που μελετήσαμε. Σε όλες τις περιπτώσεις, στόχος είναι η επίτευξη της κατάλληλης εκτύπωσης με εύκολη εξώθηση, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτούνται αρκετές ρεολογικές τροποποιήσεις για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης, οι ρεολογικές ιδιότητες και η υφή των περισσότερων τροφίμων σχετίζονται άμεσα με την ποιότητα τους και την αποδοχή από τον καταναλωτή γι' αυτό είναι πολλή σημαντική η μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς των τροφίμων με τη χρήση κατάλληλων οργάνων.

Εξάλλου οι αριθμητικές τιμές που προκύπτουν από υπολογισμούς ρεολογικών παραμέτρων επηρεάζουν την κατασκευή τύπων αντλιών και ακροφυσίων του εκτυπωτή. Επομένως συμπεραίνουμε πως η κατασκευή του ακροφυσίου είναι βαρύνουσα σημασίας, γι' αυτό το λόγο η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με αναλύσεις ροών διαφόρων εδώδιμων υλικών, αλλά επικεντρωθήκαμε σε ένα από αυτά αναλύοντας τη ροή του, στο τελευταίο τμήμα του ακροφυσίου. Γενικά όμως, απαιτείται οργανωμένη μελέτη προκειμένου να δημιουργηθούν δισδιάστατες και τρισδιάστατες υπολογιστικές προσομοιώσεις που βασίζονται σε πακέτα προσομοίωσης ροής για ρευστά που υπακούν στη ρεολογική συμπεριφορά τύπου Herschel-Bulkley ή Power Law. Επιπροσθέτως, οι συγκεκριμένες προσομοιώσεις αν και είναι χρονοβόρες, το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα παρέχει περισσότερες πληροφορίες και λεπτομέρειες

και θα βοηθήσει περαιτέρω στην έρευνα. Όπως αποδείχθηκε από την σύγκριση που έγινε με τις πραγματικές πειραματικές τιμές, η προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε ήταν ικανοποιητική. Υπήρχαν μικρές αποκλίσεις, αλλά όπως αναφέρθηκε μπορεί να οφείλονται στην αγνόηση κάποιων παραγόντων όπως είναι η ροή στο επάνω τμήμα του ακροφυσίου και η τοιχωματική ολίσθηση. Ουσιαστικά, μελλοντικός στόχος είναι να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ροής που θα λαμβάνει υπόψη τους δύο παράγοντες που αναφέρθηκαν, ώστε να γίνει καλύτερη προσομοίωση σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8, 248e257
- Alfa Editors Technicos, 3D-printed food: A new frontier in personalized nutrition, 2009, <https://cutt.ly/2QN8Gy1>
- Barnes, H. A., & Walters, K. (1985). The yield stress myth. *Rheologica Acta*, 24, 324–326.
- Butler, F., & O'Donnell, H. J. (1999). Modelling the flow of a time-dependent viscous product (cultured buttermilk) in a tube viscometer at 5° C. *Journal of food engineering*, 42(4), 199-206.
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2014). *3D Printing and additive manufacturing: Principles and applications*. Singapore: World Scientific Publishers.
- DPAS, Barry Callebaut presenta su primer prototipo de impresora 3D de chocolate, 2017, <https://cutt.ly/GEjSDLJ>
- Doublier, J. L., & Durand, S. (2008). A rheological characterization of semi-solid dairy systems. *Food Chemistry*, 108(4), 1169-1175.
- Fabbaloo, Tasting the ChocEdge Chocolate 3D Printer, 2013, <https://cutt.ly/3QN36U0>
- Feng, C., Zhang, M., & Bhandari, B. (2018). Materials properties of printable edible inks and printing parameters optimization during 3D printing: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1481823>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>.
- Gonzalez-Gutierrez J., Cano S., Schuschnigg S., Kukla C., Sapkota J., Holzer C., 2018, «Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives», *Materials* 2018, 11, 840.
- Guo, C., Zhang, M., & Devahastin, S. (2020). 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation. *Journal of Food Engineering*, 286, 110113.
- Guth, E.; Simha, R. *Kolloid Z.* 1936, 74, 266.

- Hemphill T, Campos W, and Pilehvari A: "Yield-Power Law Model More Accurately Predicts Mud Rheology," *Oil & Gas Journal* 91, no. 34 (August 23, 1993): 45–50.
- Hugo Rodrigue, B. B. (2013). *The new world of 3D printing*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc
- Joyner, H. S. (Ed.). (2019). *Rheology of Semisolid Foods*. Springer Nature.
- Karyappa, R., & Hashimoto, M. (2019). Chocolate-based ink three-dimensional printing (Ci3DP). *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- Kubo, M. T., Rojas, M. L., Miano, A. C., & Augusto, P. E. (2019). *Rheological Properties of Tomato Products*.
- Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsa-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. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>
- Lipton, J. I., Cutler, M., Nigl, F., Cohen, D., & Lipson, H. (2015). Additive manufacturing for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 43, 114e123.
- 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.
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative food science & emerging technologies*, 44, 21-29.
- Martínez-Monzó, J., Cárdenas, J., & García-Segovia, P. (2019). Effect of temperature on 3D printing of commercial potato puree. *Food Biophysics*, 14(3), 225-234.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2008). Evaporation. *Unit Operations of Chemical Engineering*, WL McCabe, JC Smith, and P. Harriot (eds). McGraw-Hill, Tokyo, Japan, 473-503.
- McNulty, C. M., Arnas, N., & Campbell, T. A. (2012). Toward the printed world: Additive manufacturing and implications for national security. *Defense Horizons*, (73), 1.
- Murphy, S. V., & Atala, A. (2014). 3D Bioprinting of tissues and organs. *Nature biotechnology*, 32(8), 773.
- Polychronopoulos, N. D., Charlton, Z., Suwanda, D., & Vlachopoulos, J. (2018). Measurements and comparison to predictions of viscosity of heavily filled

- HDPE with natural fibers. *Advances in Polymer Technology*, 37(4), 1161-1167.
- Rao, M. A. (2010). *Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- Rao, M.A., 1995. Rheological properties of fluid foods. In: *Engineering Properties of Foods*, 2nd edition, M.A. Rao & S.S.H. Rizvi (eds.), Marcel Dekker, New York.
- Rao, M. A., & Cooley, H. J. (1993). Dynamic rheological measurement of structure development in high-methoxyl pectin/fructose gels. *Journal of Food Science*, 58, 876–879.
- Rehm, B., Haghshenas, A. (2012). *Chapter 2: Flow Drillind: Underbalance Drilling with Liquid Single-Phase Systems*. Underbalanced Drilling: Limits and extremes. Gulf Publishing Company, 39-108.
- Ross, M. M., Crowley, S. V., Crotty, S., Oliveira, J., Morrison, A. P., & Kelly, A. L. (2021). Parameters affecting the printability of 3D-printed processed cheese. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102730.
- Stroud, A. B., Morris, M., Carey, K., Williams, J. C., Randolph, C., & Williams, A. B. (2013, October). MU-L8: The design architecture and 3D printing of a Teen-Sized humanoid soccer robot. In *8th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Atlanta, GA*.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>.
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L.(2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- TechRepublic , Here's how 3D food printers are changing what we eat, 2017, <https://cutt.ly/cQN2dhc>
- VLACHOPOULOS, J., & POLYCHRONOPOULOS, N. D. RHEOLOGY AND TECHNOLOGY OF POLYMER EXTRUSION (2019).
- Vocaldo. (2007). Definition of viscosity. Encyclopedia. doi:2016-11-02.
- Yang, F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2015). Recent development in 3D food printing. *Critical Reviews in Food science and Nutrition*, 00e00.
- Yang, J., Wu, L., & Liu, J. (2001). US Patent No. 6280785. Washington, DC: US Patent and Trademark Office.
- Walters, K. (1962). Non-newtonian effects in some elastico-viscous liquids whose behaviour at small rates of shear is characterized by a general linear equation of

state. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 15, 63–76.
<https://doi.org/10.1093/qjmam/15.1.63>.

Willcocks, N. A., Shastry, A., Collins, T. M., Camporini, A. V., & Suttle, J. M. (2011). *U.S. Patent No. 7,884,953*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

YourNewzz, Benefits of 3D printing, 2018, <https://cutt.ly/3QN3STF>

Zeleny, P., & Ruzicka, V. (2017). The design of the 3d printer for use in gastronomy. *Modern Machinery (MM) Science Journal*, 1744-1747. Pei, E. (2014). 4D Printing: Dawn of an emerging technology cycle. *Assembly Automation*, 34(4), 310–314.

Zoran, A., & Coelho, M. (2011). Cornucopia: The concept of digital gastronomy. *Leonardo*, 44(5), 425–431.