



ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ:

**Προσομοίωση Ιξωδοελαστικής Ροής στο ANSYS-
Polyflow**
**(Simulation of Viscoelastic Flow Using ANSYS-
Polyflow)**

ΣΑΡΑΦΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ – ΜΑΡΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018

ΤΙΤΛΟΣ:

*Προσομοίωση Ιξωδοελαστικής Ροής στο ANSYS-Polyflow
(Simulation of Viscoelastic Flow Using ANSYS-Polyflow)*

ΣΑΡΑΦΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ – ΜΑΡΙΑ

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400
Θεσσαλονίκη ΤΘ 141

Υποβολή Πτυχιακής διατριβής που αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για την απονομή του
Πτυχίου του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Ημερομηνία Παρουσίασης:

2 Οκτωβρίου 2019

Εισηγητής:

Κουλούρης Αλέξανδρος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή – επόπτη μου κ. Κουλούρη Αλέξανδρο! Η συνεργασία μας ήταν άριστη, η οποία θα ήθελα να συνεχιστεί στο εγγύς μέλλον, και η βοήθεια του πάντα πολύτιμη σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα. Επίσης, τον ευχαριστώ πολύ κυρίως για την υπομονή του και τις γνώσεις, που μου πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας!

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον κ. Ραφαηλίδη Στυλιανό για όποια απορία προέκυψε σε όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας, και κυρίως για την βοήθεια του που μου πρόσφερε για να αναλυθούν και να διατυπωθούν τα συμπεράσματα!

ΤΙΤΛΟΣ:

Προσομοίωση Ιξωδοελαστικής Ροής στο ANSYS-Polyflow

(Simulation of Viscoelastic Flow Using ANSYS-Polyflow)

ΣΑΡΑΦΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ – ΜΑΡΙΑ

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400
Θεσσαλονίκη ΤΘ 141,

Περίληψη

Η ιξωδοελαστική ρεολογική συμπεριφορά είναι ιδιαίτερα συνήθης στα τρόφιμα. Η μελέτη διεργασιών τροφίμων στις οποίες η ιξωδοελαστικότητα παίζει σημαντικό ρόλο μπορεί να διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό από την ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της συμπεριφοράς αυτής.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με χρήση του λογισμικού Polyflow για την προσομοίωση της ροής ενός ημιστερεού τροφίμου με ιξωδοελαστική ρεολογική συμπεριφορά υπό συνθήκες ισοθερμικής συμπίεσης και ακόλουθης χαλάρωσης. Διάφοροι τύποι ζύμης με τις αντίστοιχες ιδιότητές τους αποτέλεσαν το φυσικό μοντέλο. Μελετήθηκαν δύο μοντέλα ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς που είναι εφαρμόσιμα στα τρόφιμα: το μοντέλο Maxwell και το μοντέλο White-Metzer.

Από την επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης προέκυψαν και καταγράφηκαν το προφίλ παραμόρφωσης του τροφίμου συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης και χαλάρωσης όπως και τα προφίλ ταχύτητας, πίεσης και ρυθμού διάτμησης. Από την ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων για διαφορετικά τρόφιμα με διαφορετικές τιμές παραμέτρων που καθορίζουν την ιξωδοελαστική συμπεριφορά συμπεραίνεται ότι το μοντέλο είναι αξιόπιστο καθώς τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα βάσει φυσικής ερμηνείας. Πλήρης επαλήθευση του μοντέλου μπορεί να γίνει μελλοντικά μέσω σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα εφόσον αυτά είναι δυνατόν να παραχθούν.

Abstract

The viscoelastic rheological behavior is very common in food. The study of food processes where viscoelasticity plays an important role can be greatly enhanced by the development of computational models simulating this behavior.

In this study, a CFD (Computational Fluid Dynamics) model was developed with the use of the software Polyflow to simulate the flow of a semi-solid food with viscoelastic characteristics under conditions of isothermal squeezing and subsequent relaxation. Various types of dough with different properties were considered for the physical model. Two different models of viscoelastic behavior which are pertinent to foods were studied: the Maxwell model and the White-Metzer model.

From the solution of the simulation model, the strain profile as a function of squeeze and relaxation time as well as the velocity, pressure and shear rate profiles were calculated and recorded. The analysis and comparison of results for various foods with different values of parameters that determine the viscoelastic behavior indicated that the developed model is reliable as the results were physically expected. A complete validation of the model will be possible if, as part of a future study, comparison with experimental results will be performed provided that such experiments on the same physical system can be conducted.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	1
2.	Θεωρητικό μέρος.....	2
2.1	Ιστορία της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	2
2.2.1	Εφαρμογές της CFD	2
2.2.2	Διαδικασία Ανάπτυξης CFD Μοντέλου.....	4
2.2.3	Χρήση και Εφαρμογή στα Τρόφιμα	5
2.3	Λογισμικά Μοντέλα - ANSYS	7
2.3.1	FLUENT.....	7
2.3.2	FIDAP.....	7
2.3.3	POLYFLOW	8
2.4	Ρεολογία.....	10
2.5	Ελαστική συμπεριφορά.....	11
2.6	Ιξώδης Συμπεριφορά: Νευτώνεια ροή.....	11
2.7	Μη Νευτώνεια Ροή	12
2.8	Ιξωδοελαστική συμπεριφορά.....	14
2.8.1	Ιξωδοελαστικά μοντέλα στο Polyflow	15
2.8.2	Ιξωδοελαστικότητα στα τρόφιμα	20
2.9	Εκτατικό ιξώδες.....	22
3.	Σκοπός της Εργασίας.....	25
4.	Πειραματικό Μέρος.....	26
4.1	Υπολογιστική Διαδικασία.....	26
4.2	Χαρακτηριστικά Ηλεκτρονικού Υπολογιστή – Μοντέλου Προσομοίωσης.....	27
4.3	Περιγραφή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh).....	30
5.	Αποτελέσματα – Συζήτηση	32
5.1	Ανάλυση Αποτελεσμάτων με το Μοντέλο Maxwell	32
5.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων με το Μοντέλο White – Metzner	39

6.	Συμπεράσματα.....	43
6.1	Συμπεράσματα μοντέλου Maxwell.....	43
6.2	Συμπεράσματα μοντέλου White - Metzger.....	45
7.	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	47
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48

1. Εισαγωγή

Τα φυσικά χαρακτηριστικά μίας οποιασδήποτε ροής ρευστού υπόκεινται στις ακόλουθες τρεις θεμελιώδεις αρχές: α) διατήρηση της μάζας, β) διατήρηση της ορμής (ο δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα) και γ) διατήρηση της ενέργειας. Αυτές οι θεμελιώδεις αρχές μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή εξισώσεων που στην πιο γενική τους μορφή είναι συνήθως μερικές διαφορικές εξισώσεις. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics ή CFD στο εξής) είναι εν μέρει η τέχνη της αντικατάστασης των μερικών αυτών διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικές μέσω αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, και η ολοκλήρωση αυτών στο χώρο και στο χρόνο για την απόκτηση μίας τελικής μαθηματικής περιγραφής του πλήρους πεδίου ροής που ενδιαφέρει να μελετηθεί. Το παραπάνω δεν είναι μία πλήρης ερμηνεία του CFD, διότι υπάρχουν κάποια προβλήματα που επιτρέπουν την άμεση λύση του ροϊκού πεδίου χωρίς την ολοκλήρωση του στο χώρο και χρόνο, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις που εμπεριέχουν κανονικές και αναλυτικά επιλύσιμες διαφορικές εξισώσεις αντί για μερικές. Παρ' όλα αυτά όλα τα περισσότερα προβλήματα βιομηχανικών εφαρμογών της Ρευστοδυναμικής απαιτούν τον χειρισμό και τη λύση με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων. Το τελικό προϊόν από την επίλυση των προβλημάτων CFD είναι μία συλλογή αριθμητικών τιμών για τις υπό μελέτη μεταβλητές σε αντίθεση με μία κλειστού τύπου αναλυτική λύση που και αυτή εμφανίζει μία ποσοτική περιγραφή του προβλήματος. Βέβαια το μέσο το οποίο επέτρεψε την ανάπτυξη της CFD είναι ο υπολογιστής. Οι λύσεις της CFD απαιτούν τον επαναληπτικό προσδιορισμό χιλιάδων ή και εκατομμυρίων τιμών, έργο αδύνατο για τον άνθρωπο χωρίς τον υπολογιστή. Έτσι, η ανάπτυξη της CFD και των εφαρμογών της σε προβλήματα ιδιαίτερα πολύπλοκα ή λεπτομερή είναι απόλυτα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη των υπολογιστών (hardware) ιδιαίτερα στο πεδίο της μνήμης και της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό η ανάγκη της CFD λειτούργησε σαν κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη των υπολογιστών (Φάτσης, 2018).

2. Θεωρητικό μέρος

2.1 Ιστορία της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Πιθανότατα το πρώτο παράδειγμα υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής να ήταν το έργο του KoraI που το 1947 υπολόγισε μία πληθώρα πινάκων για υπερηχητική ροή πάνω από αιχμηρούς κώνους με την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων (εξίσωση Taylor - Maccoll). Οι λύσεις αυτές έγιναν από έναν πρωτόγονο ψηφιακό υπολογιστή στη Μασαχουσέτη στο MIT. Παρ' όλα αυτά η πρώτη γενιά υπολογιστικών ρευστοδυναμικών λύσεων εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1950 και αρχές του 1960, προωθούμενες από την παράλληλη εξέλιξη των υπολογιστών σε πιο αποτελεσματικούς και πιο ταχείς, και την ανάγκη επίλυσης υψηλής ταχύτητας, υψηλής θερμοκρασίας προβλήματα επανεισόδου σωμάτων στην ατμόσφαιρα της γης (Φάτσης, 2018).

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική υπήρξε ενεργός, συναρπαστικός και παραγωγικός τομέας έρευνας στη μηχανική ρευστών και στην υπολογιστική φυσική για σχεδόν ογδόντα χρόνια μέχρι τώρα (Qingsong & Shaofan, 2017). Η υπολογιστική δυναμική του υγρού είναι η ανάλυση των συστημάτων που περιλαμβάνουν τη ροή ρευστών, τη μεταφορά θερμότητας και τα συναφή φαινόμενα, όπως οι χημικές αντιδράσεις με τη βοήθεια υπολογιστικής προσομοίωσης. Ο κύριος λόγος για τον οποίο η CFD έχει εξελιχθεί με βραδύ ρυθμό είναι η τρομερή πολυπλοκότητα της υποκείμενης συμπεριφοράς, η οποία αποκλείει μια περιγραφή της ροής ρευστών που να είναι οικονομική στον αριθμό εξισώσεων και μεταβλητών και ταυτόχρονα επαρκώς πλήρης (Versteeg & Malalasekera, 2007). Η CFD είναι ένα από τα πιο επιτυχημένα παραδείγματα υπολογιστικής φυσικής που χρησιμοποιεί αριθμητική ανάλυση για την επίλυση της εξίσωσης Navier - Stokes (διατήρηση της ορμής) σε οριακές και αρχικές συνθήκες που έχουν εφαρμογές σε τεράστιους και ποικίλους τομείς της μηχανικής και της επιστήμης (Qingsong & Shaofan, 2017). Όλες οι εξισώσεις που επιλύονται για κάθε κελί του πλέγματος ακολουθούν μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία έχει ως σκοπό την απεικόνιση και τη πρόβλεψη του προφίλ της ταχύτητας, της θερμοκρασίας, της πίεσης και άλλων παραμέτρων (Da-Wen Sun, 2007).

2.2.1 Εφαρμογές της CFD

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιεί ισχυρούς υπολογιστές και εφαρμοσμένα μαθηματικά για να απεικονίσει τις καταστάσεις στη ροή ρευστού. Το κριτήριο της επιτυχίας

είναι το πόσο καλά τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης συμφωνούν με το πείραμα σε περιπτώσεις όπου μπορούν να καθοριστούν προσεκτικά εργαστηριακά πειράματα και πόσο καλά οι προσομοιώσεις μπορούν να προβλέψουν πολύπλοκα φαινόμενα που δεν μπορούν να απομονωθούν στο εργαστήριο. Ως αναπτυσσόμενη επιστήμη, η CFD έχει λάβει μεγάλη προσοχή σε όλη τη διεθνή κοινότητα από την έλευση του ψηφιακού υπολογιστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η CFD να έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος του περιβάλλοντος σχεδιασμού και ανάλυσης πολλών εταιρειών λόγω της ικανότητάς της να προβλέπει την απόδοση νέων σχεδίων ή διαδικασιών πριν κατασκευαστούν ή εφαρμοστούν (Xia & Sun, 2002).

Η τεχνική της CFD είναι πολύ αποτελεσματική και καλύπτει ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών και μη βιομηχανικών πεδίων εφαρμογής. Μερικά παραδείγματα είναι τα εξής (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- ✚ Αεροδυναμική αεροσκαφών και οχημάτων: άνοση και οπισθέλκουσα
- ✚ Υδροδυναμική πλοίων
- ✚ Μονάδες παραγωγής ισχύος: καύση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και αεριοστρόβιλος
- ✚ Στροβιλομηχανές: ροή σε περιστρεφόμενα πτερύγια, διαχύτες κ.λ.π.
- ✚ Ηλεκτρική και ηλεκτρονική μηχανική: ψύξη ηλεκτρονικού εξοπλισμού συμπεριλαμβανομένων των μικροκυκλωμάτων
- ✚ Διεργασίες χημικής μηχανικής: ανάμιξη και διαχωρισμός, παραγωγή πολυμερών υλικών
- ✚ Εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον κτιρίων: φορτίο ανέμου και θέρμανση/αερισμός
- ✚ Θαλάσσια μηχανική: φορτία παράκτιων κατασκευών
- ✚ Μηχανική περιβάλλοντος: διασπορά ρύπων και λυμάτων
- ✚ Υδρολογία και ωκεανογραφία: ροές σε ποτάμια, εκβολές ποταμιών, ωκεανούς
- ✚ Μετεωρολογία: πρόβλεψη καιρικών συνθηκών
- ✚ Βιοϊατρική μηχανική: ροή του αίματος μέσω αρτηριών και φλεβών

Ορισμένα πλεονεκτήματα της CFD που υπάρχουν συγκριτικά με άλλες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό συστημάτων, είναι τα εξής (Versteeg & Malalasekera, 2007), (Xia & Sun, 2002):

- Σημαντική μείωση στους χρόνους προετοιμασίας και στο κόστος νέων σχεδιασμών.

- Ικανότητα μελέτης συστημάτων στα οποία η διεξαγωγή ελεγχόμενων πειραμάτων είναι από δύσκολη έως αδύνατη (π.χ. πολύ μεγάλα συστήματα).
- Ικανότητα μελέτης συστημάτων σε επικίνδυνες συνθήκες στα όρια της κανονικής απόδοσης τους και κάτω από αυτά (π.χ. μελέτες ασφάλειας και σενάρια ατυχημάτων).
- Πρακτικά απεριόριστο επίπεδο λεπτομέρειας αποτελέσματος.
- Παρέχει μια λεπτομερή κατανόηση της κατανομής ροής, της μεταφοράς μάζας και θερμότητας, του διαχωρισμού σωματιδίων κλπ, έτσι ώστε οι διαχειριστές να μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τι συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη διαδικασία ή σύστημα.
- Κάνει δυνατή την αξιολόγηση των γεωμετρικών μεταβολών με μικρότερο χρόνο και κόστος.
- Μπορεί να απαντήσει σε πολλές ερωτήσεις του τύπου «τι θα συμβεί αν» σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την προσομοίωση συνθηκών, όπου δεν είναι δυνατόν να ληφθούν λεπτομερείς μετρήσεις, όπως υψηλή θερμοκρασία ή επικίνδυνο περιβάλλον σε φούρνο.
- Δεδομένου ότι είναι ένα εργαλείο ανάλυσης και σχεδίασης, μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό της βασικής αιτίας και όχι μόνο του αποτελέσματος.

2.2.2 Διαδικασία Ανάπτυξης CFD Μοντέλου

Οι κώδικες CFD δομούνται γύρω από τους αριθμητικούς αλγόριθμους που μπορούν να επιλύσουν προβλήματα ροής ρευστών. Όλα τα εμπορικά πακέτα CFD περιλαμβάνουν σύγχρονες διεπαφές χρηστών για την εισαγωγή των παραμέτρων του προβλήματος και την εξέταση των αποτελεσμάτων. Έτσι όλοι οι κώδικες περιέχουν τρία κύρια στοιχεία (Versteeg & Malalasekera, 2007):

1. Αναγνώριση του προβλήματος (Pre-processing):
 - a) Ορισμός της γεωμετρίας της περιοχής
 - b) Τη παραγωγή του υπολογιστικού πλέγματος
 - c) Την επιλογή των φυσικών και χημικών φαινομένων που χρειάζεται να μοντελοποιηθούν
 - d) Τον ορισμό των ιδιοτήτων των ρευστών
 - e) Τον προσδιορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών σε κελιά που συμπίπτουν ή είναι σε επαφή με το όριο του χωρίου

2. Επίλυση (Processing):

- a) Ολοκλήρωση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή ρευστού για το σύνολο όγκων ελέγχου του χώρου
- b) Διακριτοποίηση – μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων
- c) Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με μια επαναληπτική μέθοδο

3. Επεξεργασία αποτελεσμάτων (Post – processing):

- a) Παρουσίαση υπολογιστικού χώρου και πλέγματος
- b) Διανυσματικά γραφήματα
- c) Διαγράμματα με γραμμές και σκιασμένα
- d) 2D και 3D διαγράμματα επιφανειών
- e) Προσομοίωση τροχιών σωματιδίων
- f) Χειρισμός όψης
- g) Έγχρωμες Post Script εικόνες.

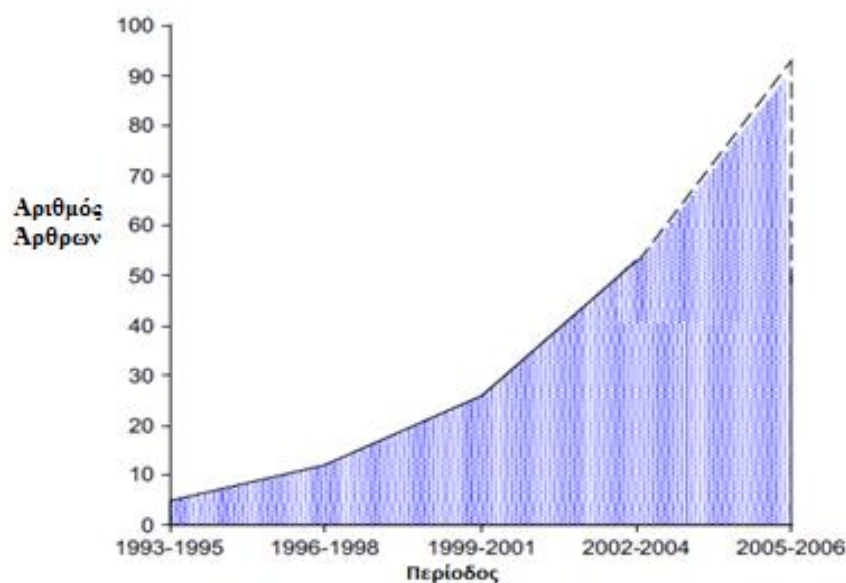
2.2.3 Χρήση και Εφαρμογή στα Τρόφιμα

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ένα ισχυρό αριθμητικό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως και για την προσομοίωση πολλών διαδικασιών στη βιομηχανία τροφίμων (Norton & Sun, 2006). Η εφαρμογή της CFD στη βιομηχανία τροφίμων μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές, οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η CFD είναι ένα ισχυρό και διαδεδομένο εργαλείο για τη βελτίωση των διαδικασιών και των προϊόντων στον τομέα της μεταποίησης τροφίμων (Kuriakose & Anandharamakrishnan, 2010). Οι δεσμοί μεταξύ της CFD και των διαδικασιών που σχετίζονται με τη βιομηχανία τροφίμων και ποτών είναι ισχυροί και αφορούν μία ευρεία γκάμα διεργασιών, όπως η ανάμειξη, η ξήρανση, το μαγείρεμα, η αποστείρωση, η ψύξη, η κατάψυξη κλπ. Τέτοιες διαδικασίες χρησιμοποιούνται τακτικά για τη βελτίωση της ποιότητας, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής των τροφίμων.

Επιπρόσθετα, η CFD μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες τροφίμων να ανταποκριθούν σε μια αναπτυσσόμενη αγορά ενισχύοντας και αναπτύσσοντας νέες μεθόδους επεξεργασίας, προσπαθώντας παράλληλα να διατηρήσουν υψηλά επίπεδα ποιότητας προϊόντων (Norton &

Sun, 2006). Για παράδειγμα, η θερμική επεξεργασία είναι μία από τις συνηθέστερες διεργασίες συντήρησης που επιτρέπουν την αύξηση της διάρκειας ζωής των τροφίμων, και την καθιστά ασφαλέστερη για την ανθρώπινη κατανάλωση λόγω της καταστροφής παθογόνων μικροοργανισμών και της απενεργοποίησης επιβλαβών ενζύμων (Rinaldi et al., 2018). Επίσης, ένα άλλο παράδειγμα αφορά ένα νέο μοντέλο θερμικής απενεργοποίησης πρωτεΐνης ορού γάλακτος που εφαρμόστηκε για τη ξήρανση αποβουτυρωμένου γάλακτος με ψεκασμό, όπου χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα μοντέλα εξάτμισης και σχηματισμού σωματιδίων για τον υπολογισμό της υγρασίας των περιεχομένων σωματιδίων, της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής (Jaskulski et al., 2017).

Σήμερα, οι λύσεις CFD χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση και την ανάπτυξη του εξοπλισμού και των μεθόδων επεξεργασίας στη βιομηχανία τροφίμων, όπου ο ρυθμός χρήσης τους έχει αυξηθεί εκθετικά. Αυτό αποδεικνύεται από τη σταθερή αύξηση των επιστημονικών άρθρων που αναφέρονται σε CFD τα τελευταία χρόνια (**Εικόνα 1**).



Εικόνα 1. Η διαχρονική μεταβολή του αριθμού δημοσιευμένων άρθρων με εφαρμογές CFD στη βιομηχανία τροφίμων (Norton & Sun, 2006).

Οι πολυάριθμοι τομείς της βιομηχανίας τροφίμων, όπου το CFD χρησιμοποιείται συνήθως για τον ποσοτικό προσδιορισμό των φυσικών φαινομένων, περιλαμβάνουν τις εγκαταστάσεις παραγωγής τροφίμων, τις διαδικασίες αποστείρωσης, ανάμειξης και ξήρανσης, με το φάσμα των εφαρμογών να επεκτείνεται συνεχώς (Norton & Sun, 2006).

2.3 Λογισμικά Μοντέλα - ANSYS

Σήμερα υπάρχουν πολλά λογισμικά πακέτα είτε εμπορικά είτε ελεύθερου κώδικα τα οποία προσφέρουν ολοκληρωμένες λύσεις για προβλήματα CFD. Η εταιρεία ANSYS Inc. (www.ansys.com) προσφέρει τρία πακέτα λογισμικού εντός του πλαισίου CFD που είναι κατάλληλα για τις ανάγκες προσομοίωσης μηχανικής τροφίμων. Αυτά είναι: το FLUENT (γενικού σκοπού με δυνατότητες πολυφυσικής), το FIDAP (για τη προσομοίωση σύνθετης φυσικής) και το POLYFLOW (για τη μοντελοποίηση πολυμερών και, γενικότερα, ιξωδοελαστικών ροών) (Norton & Sun, 2006).

2.3.1 FLUENT

Το λογισμικό FLUENT της ANSYS είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιείται με επιτυχία για την προσομοίωση διαφορετικών τεχνολογικών προβλημάτων, όπως τήξης και στερεοποίησης στη μηχανική, ανάπτυξης κρυστάλλων και στερεοποίησης. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση της αλλαγής φάσης που συμβαίνει σε μία μόνο θερμοκρασία (καθαρά μέταλλα) ή σε ένα εύρος θερμοκρασιών (μείγμα) (Al-abidi et al., 2013). Τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του FLUENT είναι ότι το λογισμικό περιλαμβάνει μοντέλα για εναλλάκτες θερμότητας, διακεκριμένα μοντέλα φάσης για ροές πολλαπλών φάσεων, πολυάριθμα μοντέλα αντίδρασης υψηλής ποιότητας και μοντέλα αλλαγής φάσης που παρακολουθούν την τήξη και την κατάψυξη στο υγρό. Τέλος, ενσωματώνει σε δυναμικά πλέγματα και σε μοντέλα χημικής ανάμειξης και αντίδρασης (Norton & Sun, 2006).

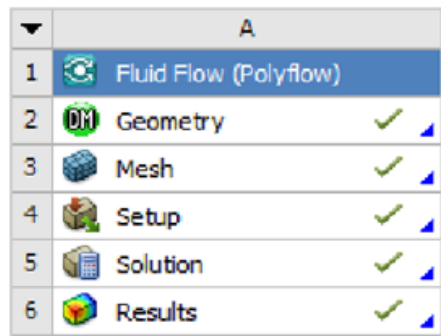
2.3.2 FIDAP

Το πρόγραμμα FIDAP περιλαμβάνει έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού για την προσομοίωση σταθερής ή μεταβατικής κατάστασης δισδιάστατης (με αξονικές συμμετρίες) ή τρισδιάστατης ροής για ασυμπίεστο ρευστό που ρέει σε πολύπλοκες γεωμετρίες, συμπεριλαμβανομένων και φαινομένων μεταφοράς θερμότητας. Στις κατηγορίες προβλημάτων που υπόκεινται σε ανάλυση μέσω FIDAP περιλαμβάνονται ισοθερμικές ροές νευτώνειων και μη νευτώνειων ρευστών, ροές φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής και ατμοσφαιρικές ροές (Engelman, 1978). Επίσης, το FIDAP περιέχει εξελιγμένα μοντέλα ακτινοβολίας, διασποράς και μεταφοράς θερμότητας (Norton & Sun, 2006).

2.3.3 POLYFLOW

Το λογισμικό POLYFLOW παρέχει προηγμένη τεχνολογία δυναμικής ρευστών με πολύπλοκη ρεολογική συμπεριφορά για την επίλυση διαφόρων διεργασιών (Gupta et al., 2013). Το σύστημα POLYFLOW είναι ένα εργαλείο CFD γενικής χρήσης πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της επεξεργασίας πολυμερών, όπως για το σχηματισμό γυαλιού, την θερμοδιαμόρφωση και τη περιστροφή ινών. Επιπλέον, το πρόγραμμα αυτό έχει μια σειρά εφαρμογών που μπορούν να επεκταθούν στη βιομηχανία τροφίμων και αποσκοπεί στην ολοκλήρωση και διαφοροποίηση της ιξωδοελαστικής ροής (Norton & Sun, 2006). Ακόμα, χρησιμοποιείται εκτεταμένα για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση διαδικασιών. Για παράδειγμα, οι μηχανικοί σχεδιασμοί έχουν χρησιμοποιήσει το λογισμικό POLYFLOW για περισσότερα από 25 χρόνια για να βελτιστοποιήσουν τα φυσικά πρότυπα, όταν προσπαθούσαν να μειώσουν τις διακυμάνσεις του πάχους για τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων (Gupta et al., 2013). Επιπλέον, το Polyflow χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση προβλημάτων ροής στην επεξεργασία πολυμερών και καουτσούκ, στη ρεολογία τροφίμων, στους φούρνους γυαλιού και σε πολλές άλλες ρεολογικές εφαρμογές. Η θεωρητική θεμελίωση του ANSYS Polyflow παρέχεται από τις γενικές αρχές της μηχανικής συνεχούς επεξεργασίας, μαζί με φαινομενολογικά ή κινητικά θεωρητικά μοντέλα για την περιγραφή της ρεολογικής συμπεριφοράς των ρευστών. Ο υπολογισμός αυτών των ροών βασίζεται σε μη Νευτώνεια μηχανική ρευστών, που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία μοντέλων ρευστών με ισχυρή μη γραμμική συμπεριφορά. Η ανάπτυξη του ANSYS Polyflow συνδέεται στενά με τις εξελίξεις στην αριθμητική προσομοίωση της μη-Νευτονικής ρευστομηχανικής. Η μη-Νευτώνεια συμπεριφορά έχει πολλές πτυχές, μεταξύ των οποίων είναι η εξάρτηση του ιξώδους από το ρυθμό διάτμησης, η παρουσία κανονικών τάσεων σε ιξωδομετρικές ροές, η υψηλή αντοχή σε επιμήκη παραμόρφωση και τα φαινόμενα μνήμης που συνδέονται με την ελαστικότητα του ρευστού. Η θεωρητική πρόκληση είναι να μεταφραστεί η σύνθετη ρεολογική συμπεριφορά των πολυμερικών υγρών σε κατάλληλες εξισώσεις και να χρησιμοποιηθούν αυτά τα μοντέλα για να προβλεφθούν οι ροές σε σύνθετες γεωμετρίες. Επίσης, το Polyflow μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση χημικώς αντιδρώντων ροών. Η μεταφορά ειδών καθώς και οι χημικές αντιδράσεις που δρουν ως πηγές ή νεροχύτες υλικών μπορούν να συμπεριληφθούν. Τέλος, το σύστημα αυτό παρέχει πρόσθετες δυνατότητες για φούρνους από γυαλί, όπως διοχέτευση με βροχή, διόρθωση ακτινοβολίας και ηλεκτρική θέρμανση (www.ansys.com).

Μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού ANSYS Workbench, το Polyflow, όπως και τα υπόλοιπα πακέτα CFD της ANSYS που υποστηρίζονται από το Workbench, ακολουθεί μια διαδικασία προσομοίωσης, η οποία περιλαμβάνει πέντε βήματα, τα οποία είναι η Γεωμετρία (Geometry), το Πλέγμα (Mesh), η Ρύθμιση (Setup), η Λύση (Solution) και τα Αποτελέσματα (Results), τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 2 (Gupta et al., 2013).



Εικόνα 2. Βήματα διαμόρφωσης μοντέλου στο Polyflow (www.ansys.com).

1. Γεωμετρία (Geometry):

Επιτρέπει να οριστούν οι γεωμετρικοί περιορισμοί της ανάλυσης για ένα μοντέλο. Επίσης, μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει το μενού για να εισάγει μια προ υπάρχουσα γεωμετρία στο σύστημα(www.ansys.com).

2. Πλέγμα (Mesh):

Επιτρέπει να οριστεί και να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό πλέγμα για την ανάλυση ενός μοντέλου. Ανοίγοντας την εντολή Mesh ανοίγει το ANSYS Meshing και φορτώνει την τρέχουσα βάση δεδομένων(www.ansys.com).

3. Ρύθμιση (Setup):

Επιτρέπει να οριστούν τα φυσικά μοντέλα και οι οριακές συνθήκες για την μαθηματική επίλυση του μοντέλου (www.ansys.com).

4. Λύση (Solution):

Επιτρέπει να υπολογιστεί η λύση χρησιμοποιώντας το Polyflow μέσω επαναληπτικών υπολογισμών (www.ansys.com).

5. Αποτελέσματα (Results):

Επιτρέπει να εμφανίζονται και να αναλύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης CFD μέσω του προγράμματος ANSYS CFD - Post, το οποίο φορτώνει το τρέχον αρχείο αποτελεσμάτων Polyflow καθώς και το τρέχον αρχείο κατάστασης CFD - Post ANSYS (www.ansys.com). Μέσω του προγράμματος αυτού είναι δυνατόν να

δημιουργηθούν γραφικές απεικονίσεις κάποιων μεταβλητών, όπως επίσης και οι μεταξύ τους σχέσεις σε κάθε πλέγμα της δομικής γεωμετρίας (Gupta et al., 2013).

2.4 Ρεολογία

Η πρώτη χρήση της λέξης ρεολογίας πιστώθηκε το 1928 στον Eugene C. Bingham, ο οποίος περιέγραψε το ρητό με θέμα ‘τα πάντα ρει’ από τη δουλειά του Ηράκλειτου και του φιλόσοφου Σωκράτη. Η ρεολογία είναι πλέον καθιερωμένη ως η επιστήμη της παραμόρφωσης και της ροής της ύλης. Είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα υλικά ανταποκρίνονται σε εφαρμοζόμενη τάση. Όλα τα υλικά έχουν ρεολογικές ιδιότητες και επομένως η ρεολογία είναι επιστημονικά συγγενής με πολλούς τομείς μελέτης, όπως πολυμερή και σύνθετα υλικά, ροή χρωμάτων και διασπορά χρωστικών ουσιών, δομικά υλικά κ.α. Ειδικά στα τρόφιμα, η κατανόηση της ρεολογίας είναι κρίσιμης σημασίας για τη βελτιστοποίηση των προσπαθειών ανάπτυξης προϊόντων, τη μεθοδολογία επεξεργασίας και τη ποιότητα ελέγχου του τελικού προϊόντος (James & Steffe, 1996). Η επιστήμη της ρεολογίας έχει πολλές εφαρμογές στους τομείς των τροφίμων, της επεξεργασίας τροφίμων και του χειρισμού αυτών. Οι ρεολογικές ιδιότητες προσδιορίζονται με τη μέτρηση της δύναμης και της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου (Munizaga & Babosa, 2005).

Στο μακρόκοσμο τα περισσότερα αντικείμενα υπόκεινται σε εξωτερικά πεδία δυνάμεων και οι παραγόμενες τάσεις μπορούν τελικά να τα παραμορφώσουν. Όμως, μπορούν όλα τα αντικείμενα να παραμορφωθούν; Δυνητικά ναι, εφόσον εφαρμοστεί σε αυτά η αντίστοιχη δύναμη για τον αντίστοιχο χρόνο. Στην πραγματικότητα είναι η λήψη του χρόνου που περιορίζει την αντίληψη της ροής. Η βασική ιδέα της ροής είναι ο λόγος της παρατηρούμενης μεταβολής (π.χ. η μετακίνηση του υγρού σε ένα σωλήνα) διά του χρόνου κατά τον οποίον αυτή παρατηρείται (Ριτζούλης, 2011).

Βασικές έννοιες της ρεολογίας είναι η τάση (stress) και η παραμόρφωση (strain). Η τάση (σ) είναι η μέτρηση της δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας και μετριέται σε Pascal (Pa). Η τάση διάτμησης συμβαίνει όταν οι δυνάμεις ενεργούν παράλληλα προς μία επιφάνεια. Αντίθετα, η εμφάνιση της παραμόρφωσης, καθορίζεται από τη κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης σε σχέση με την επιφάνεια του υλικού (Munizaga & Babosa, 2005).

Οι ρεολογικές συμπεριφορές διακρίνονται σε:

- a) Ελαστική συμπεριφορά (Νόμος του Hooke)

- b) Ιξώδης συμπεριφορά (Νόμος Newton)
- c) Ιξωδοελαστική συμπεριφορά

2.5 Ελαστική συμπεριφορά

Η βασική μηχανική συμπεριφορά ενός στερεού σώματος κατά την εφαρμογή τάσης περιγράφηκε από τον Hooke. Κατά την περιγραφή αυτήν, η σχέση μεταξύ της τάσης σ που εφαρμόζεται σε ένα σώμα και επαγόμενης παραμόρφωσης γ είναι γραμμική:

$$\sigma = \kappa \cdot \gamma \quad (\text{Νόμος του Hooke})$$

Η σταθερά αναλογίας κ περιγράφει κατά βάση την αντίδραση ενός ιδανικού ελατηρίου σε παραμόρφωση παράλληλη με τον άξονα αυτού (γραμμική παραμόρφωση). Έχει επικρατήσει η σταθερά αναλογίας να περιγράφεται με διαφορετικά ονόματα, ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης. Στην περίπτωση γραμμικής παραμόρφωσης ελατηρίου η κ ονομάζεται σταθερά του Hooke (Ριτζούλης, 2011).

2.6 Ιξώδης Συμπεριφορά: Νευτώνεια ροή

Η έννοια του ιξώδους περιγράφηκε πρώτη φορά από τον Νεύτωνα (1642-1727). Ας υποθέσουμε ένα υγρό που βρίσκεται περιορισμένο ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες επιφάνειας A και απομακρυσμένες κατά απόσταση. Αν δύναμη (F)εφαρμοσθεί στην άνω επιφάνεια, δημιουργείται μία διατμητική τάση: $\tau = F / A$, εκπεφρασμένη σε Pa. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση του άνω στρώματος παρασέρνει τα κατώτερα στρώματα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα μόρια των επιμέρους στρωμάτων αναπτύσσουν μεταξύ τους δεσμούς. Η μετάδοση της κίνησης από το ανώτερο στα κατώτερα στρώματα είναι προφανώς εντονότερη για υλικά με ισχυρότερους διαμοριακούς δεσμούς. Η μεταβολή της ταχύτητας με το βάθος καλείται ρυθμός διάτμησης.

Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να ορισθεί ο ρυθμός διάτμησης ($\dot{\gamma}$) ως η παράγωγος της ταχύτητας ως προς την κάθετη απόσταση ($\dot{\gamma} = dv/dx$). Οι μονάδες της ποσότητας αυτής θα είναι s^{-1} . Σε αυτό το σύστημα το ιξώδες (η)μπορεί να ορισθεί ως ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ τάσης και ρυθμού διάτμησης:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Από τα παραπάνω το ιξώδες φαίνεται ότι είναι η αντίσταση στη ροή ενός ρευστού. Οι μονάδες του κατά την παραπάνω εξίσωση θα είναι Pa*s. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να περιγράψει τη ροή των ιδανικών αερίων, καθαρών υγρών μικρού μοριακής μάζας, αραιών διαλυμάτων και αραιών κολλοειδών συστημάτων. Όλα τα παραπάνω ρευστά στα οποία ο ρυθμός διάτμησης είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης τάσης, καλούνται Νευτώνεια ρευστά. Όμως, μη νευτώνεια ρευστά (π.χ. τήγματα πολυμερών, πυκνά γαλακτώματα) μπορούν να εμφανίσουν Νευτώνεια συμπεριφορά σε περιορισμένο εύρος ρυθμών διάτμησης, αλλά αποκλίνουν από αυτή τη συμπεριφορά σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές τιμές ρυθμού διάτμησης (Ριτζούλης, 2011).

Πίνακα 1. Παραδείγματα τροφίμων – νευτώνειων ρευστών (Rao et al., 2005).

Γάλα
Καθαροί χυμοί φρούτων
Χυμός μήλου χωρίς πηκτίνες
Φιλτραρισμένος χυμός πορτοκαλιού
Χυμός σταφυλιού

2.7 Μη Νευτώνεια Ροή

Μη νευτώνεια ονομάζονται τα ρευστά στα οποία η σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ταχύτητα διάτμησης είναι μη γραμμική (McCabe et al., 2016). Τα ρευστά αυτά συνήθως εμφανίζουν τιμές ιξώδους υψηλότερες από αυτές του ιξώδους του ύδατος (Nicola et al., 2017),

Πίνακας 2. Παραδείγματα τροφίμων – ψευδοπλαστικών ρευστών (Rao et al., 2005).

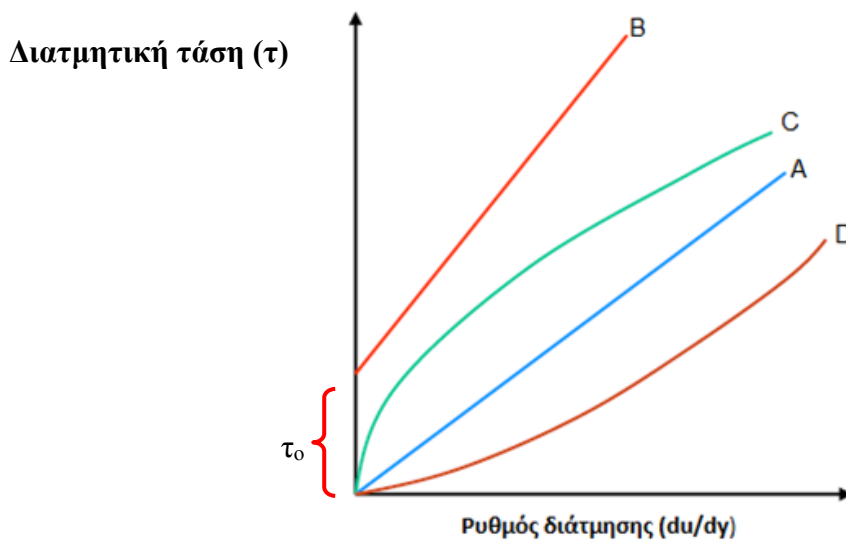
Συμπυκνωμένοι χυμοί φρούτων	Κρέμα γάλακτος
Μη αποπηκτινώμενος χυμός μήλου	Αποψυγμένο ολόκληρο αυγό
Χυμός passion fruit	Ασπράδι αυγού
Χυμός πορτοκαλιού	Πολτοί φρούτων και λαχανικών

Λιωμένη σοκολάτα	Διαλύματα κόμμεων – υψηλές συγκεντρώσεις
Γαλλική μουστάρδα	Συμπυκνώματα πρωτεϊνών

Οι σχέσεις που συνδέουν τη διατμητική τάση με το ρυθμό διάτμησης σε ένα πραγματικό ρευστό αποτελούν μέρος του αντικείμενου της επιστήμης της ρεολογίας (McCabe et al., 2016). Τα μη νευτώνεια ρευστά σύμφωνα με το χρόνο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- a) Ανεξάρτητα ρευστά από το χρόνο: το ιξώδες εξαρτάται μόνο από το ρυθμό διάτμησης, σε σταθερή θερμοκρασία (ψευδοπλαστικά, διασταλτικά).
- b) Εξαρτώμενα ρευστά από το χρόνο: το ιξώδες εξαρτάται και από τη διάρκεια της διάτμησης σε σταθερή θερμοκρασία (ρεοηκτικά, θιξοτροπικά) (Rao et al., 2005).

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται διάφορα παραδείγματα της ρεολογικής συμπεριφοράς των ρευστών. Οι καμπύλες αυτές είναι οι γραφικές παραστάσεις της διατμητικής τάσης ως προς το ρυθμό διάτμησης και αναφέρονται σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Η καμπύλη Α έχει τη πιο απλή συμπεριφορά που περνά από την αρχή των αξόνων (νευτώνεια ρευστά). Οι υπόλοιπες καμπύλες αφορούν τη ρεολογική συμπεριφορά των μη νευτώνειων ρευστών. Ορισμένα υγρά, π.χ. τα αιωρήματα των αποχετεύσεων, δεν ρέουν καθόλου μέχρι να πάρει μια συγκεκριμένη τιμή η διατμητική τάση (τ_0) και στη συνέχεια ρέουν γραμμικά ή σχεδόν γραμμικά σε διατμητικές τάσεις μεγαλύτερες του τ_0 (καμπύλη Β). Τα υγρά που συμπεριφέρονται με αυτό τον τρόπο ονομάζονται πλαστικά Bingham. Η καμπύλη C είναι κοίλη προς τα κάτω σε χαμηλές διατμητικές τάσεις και γίνεται σχεδόν γραμμική σε υψηλές διατμητικές τάσεις (ψευδοπλαστικό ρευστό), ενώ η καμπύλη D είναι κοίλη προς τα πάνω σε χαμηλές διατμητικές τάσεις και γίνεται σχεδόν γραμμική σε υψηλές διατμητικές τάσεις (εκτατό ή διασταλτικό ρευστό). Γενικά τα ψευδοπλαστικά γίνονται πιο λεπτόρευστα όσο αυξάνεται η διάτμηση ενώ τα διασταλτικά γίνονται πιο παχύρευστα (McCabe et al., 2016).



Σχήμα 1. Εξάρτηση της διατμητικής τάσης από τη διαφορική κλίση της ταχύτητας για νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά (McCabe et al., 2016).

2.8 Ιξωδοελαστική συμπεριφορά

Σε πραγματικά συστήματα η παραμόρφωση εξαρτάται όχι μόνο από την εφαρμοζόμενη τάση, αλλά και από το χρόνο εφαρμογής της. Στα περισσότερα βιολογικά συστήματα και κατά συνέπεια στα τρόφιμα υφίστανται ρεολογικά φαινόμενα εξαρτώμενα από το χρόνο. Αν οι παραμορφώσεις που υφίσταται ένα υλικό είναι πολύ μικρές, τότε ο λόγος τάσης προς παραμόρφωση είναι ανεξάρτητος της παραμόρφωσης. Αυτή η συμπεριφορά καλείται ιξωδοελαστικότητα. Σε αυτή την περιοχή των παραμορφώσεων ισχύει η αρχή της υπέρθεσης των τάσεων του Boltzmann. Αν ένα υλικό υποστεί μία σειρά από τάσεις σε διαφορετικές στιγμές, η παραμόρφωση σε κάποια δεδομένη στιγμή θα είναι ίση με το άθροισμα των παραμορφώσεων που υπέστη συνολικά το υλικό, σαν να υφίσταται μία προς μία τις προηγούμενες τάσεις ταυτόχρονα (Ριτζούλης, 2011). Επίσης, οι ιδανικές ελαστικές και οι ιδανικές ιξώδεις συμπεριφορές παρουσιάζουν δύο ακραίες αποκρίσεις των υλικών σε εξωτερικές τάσεις που αφορούν μόνο τα ιδανικά υλικά. Ωστόσο, τα πραγματικά υλικά παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία αποκρίσεων μεταξύ ιξώδους και ελαστικού. Οπότε, τα περισσότερα υλικά, που παρουσιάζουν ταυτόχρονα κάποια ιξώδη και κάποια ελαστική συμπεριφορά, ονομάζονται και αυτά ιξωδοελαστικά (Gunasekaran & Ak, 2000).

Ο απλούστερος τύπος ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς μπορεί να παρατηρηθεί:

- όταν πολύ μικρές παραμορφώσεις ασκούνται σε ορισμένα υλικά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα μόρια διαταράσσονται απειροελάχιστα από την κατάσταση ισορροπίας τους.
- όταν πολύ αργές παραμορφώσεις ασκούνται σε ορισμένα υλικά. Πολυμερικά τμήματα έχουν μία μειωμένη μνήμη και μπορούν να ρεύσουν. Εάν η παραμόρφωση είναι πολύ αργή, πραγματοποιείται χαλάρωση λόγω της κίνησης Brown (η τυχαία κίνηση στερεών σωματιδίων μέσα σε ένα υγρό ή αέριο), επειδή υπάρχει αρκετός χρόνος που τείνει να φέρει τα μόρια στην κατάσταση ισορροπίας τους. Έτσι, υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης που τείνει να διαταράξει τα μόρια, και της κίνησης Brown που τείνει να επαναφέρει τα μόρια στην κατάσταση ισορροπίας τους (www.ansys.com).

2.8.1 Ιξωδοελαστικά μοντέλα στο Polyflow

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο Polyflow για την επίλυση ενός προβλήματος είναι τα εξής:

- a) Maxwellmodel
- b) Oldroyd – Bmodel
- c) White – Metzner model
- d) Phan Thien – Tanner model
- e) Gieserus model
- f) Fene – P
- g) POMPOM (DCPP)
- h) Leonov

Από τα παραπάνω μοντέλα, αυτά που χρησιμοποιούνται για τα τρόφιμα είναι το Maxwell model και το White – Metzner model , ενώ τα υπόλοιπα (Oldroyd – B model, Phan Thien – Tanner model, Gieserus model, Fene – P, POMPOM (DCPP), Leonov) εφαρμόζονται για τα πολυμερή. Τα ιξωδοελαστικά μοντέλα που σχετίζονται με την παρούσα εργασία αναλύονται παρακάτω (Wenchang et al., 2003).

- Maxwellmodel

Σε πολλά πεδία, όπως η βιομηχανία τροφίμων, τα υγρά, είτε συνθετικά είτε φυσικά, είναι μείγματα διαφορετικών υλικών όπως νερό, σωματίδια, έλαια, ερυθρά αιμοσφαίρια και άλλα μόρια μακριάς αλυσίδας. Αυτός ο συνδυασμός παρέχει ισχυρά μη Νευτώνεια χαρακτηριστικά στα προκύπτοντα υγρά. Η συνάρτηση του ιξώδους μεταβάλλεται μη γραμμικά με την ταχύτητα διάτμησης. Η ελαστικότητα γίνεται αντιληπτή μέσω της παρατηρούμενης επιμήκυνσης και της χρονικής εξάρτησης των φαινομένων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα ρευστά κατηγοριοποιούνται ως ιξωδοελαστικά. Εξαιτίας της αδυναμίας να προταθεί ένα μοναδικό μοντέλο το οποίο να αποτυπώνει όλες τις συμπεριφορές των ιξωδοελαστικών ρευστών, τα ρευστά αυτά δεν είναι δυνατόν να περιγραφούν ως νευτώνεια ρευστά. Για αυτό το λόγο, πολλά διαφορετικά μοντέλα και καταστατικές εξισώσεις έχουν προταθεί. Ένα από τα απλούστερα μοντέλα που αποτυπώνει την συμπεριφορά ιξωδοελαστικών ρευστών είναι το μοντέλο Maxwell (Wenchang et al., 2003).

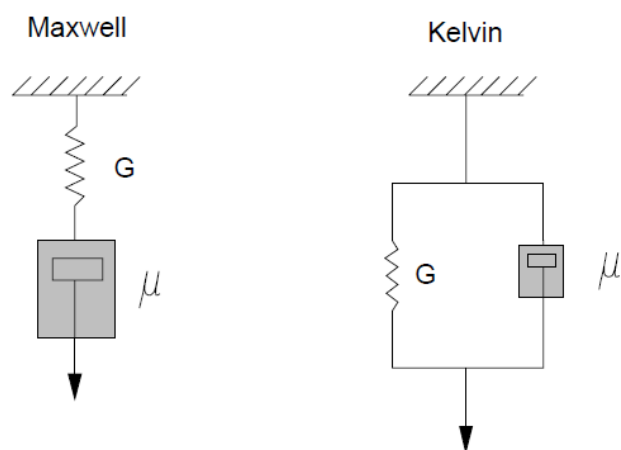
Τα μηχανικά μοντέλα, που αποτελούνται από ελατήρια και dashpots (μηχανισμός επαναφοράς), είναι χρήσιμα για τον σχεδιασμό της ρεολογικής συμπεριφοράς. Το ελατήριο θεωρείται ένα ιδανικό στερεό στοιχείο που υπακούει στον νόμο του Hooke:

$$\sigma = G \cdot \gamma$$

και το dashpot (μηχανισμός επαναφοράς) θεωρείται ένα ιδανικό ρευστό στοιχείο που υπακούει στον νόμο του Νεύτωνα:

$$\sigma = \mu \dot{\gamma}$$

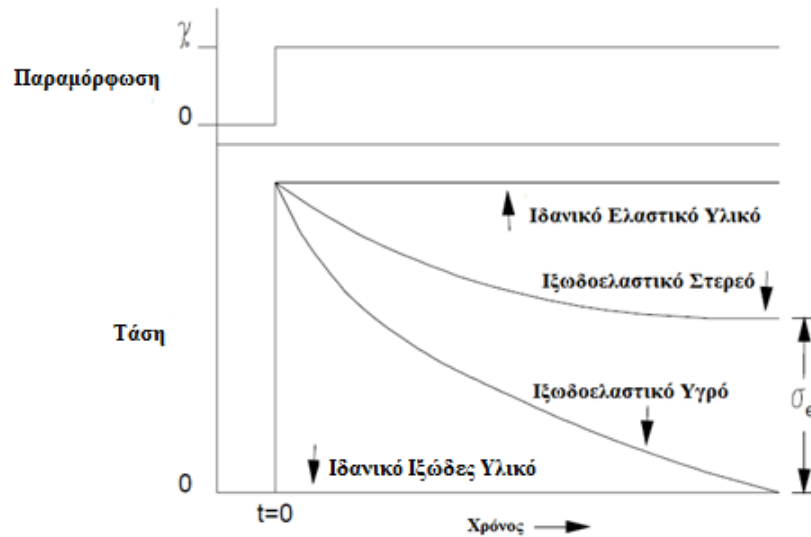
Τα ελατήρια και τα dashpots (μηχανισμοί επαναφοράς) μπορούν να συνδεθούν με διάφορους τρόπους ώστε να περιγράψουν τη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών; Ένας συγκεκριμένος συνδυασμός στοιχείων δεν είναι μοναδικός, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί για να μοντελοποιηθεί το ίδιο σύνολο πειραματικών δεδομένων. Τα συνηθέστερα μηχανικά μοντέλα ανάλογα με τη ρεολογική συμπεριφορά είναι του Maxwell και του Kelvin που απεικονίζονται στην Εικόνα 3 (Steffe, 1996).



Εικόνα 3. Τα μοντέλα Maxwell και Kelvin (Steffe, 1996).

Τα μηχανικά ανάλογα παρέχουν ένα χρήσιμο μέσο για τη διερεύνηση των δεδομένων ερπυσμού και σταδιακής παραμόρφωσης (step strain). Αυτά τα δεδομένα μπορούν επίσης να παρουσιαστούν με βάση διάφορες λειτουργίες διανομής, έρπυσης (creep compliance) και μέτρησης, καθώς και ηλεκτρικά μοντέλα. Επιπρόσθετα, οι καμπύλες τάσης και ερπυσμού μπορούν να ομαλοποιηθούν και να παρουσιαστούν σε γραμμική μορφή. Αυτή η τεχνική μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε βιολογικά υλικά όπου είναι συχνά δύσκολο να επιτευχθούν συνθήκες ισορροπίας (Steffe, 1996).

Σε μια δοκιμή βαθμιδωτής τάσης το δείγμα υφίσταται στιγμιαία συμπίεση και παρατηρείται η τάση που απαιτείται για τη διατήρηση της παραμόρφωσης ως συνάρτηση του χρόνου. Αυτό το πείραμα είναι κοινώς γνωστό ως δοκιμή χαλάρωσης τάσης και μπορεί να διεξαχθεί σε διατμητική, μονοαξονικό εφελκυσμό ή μονοαξονική συμπίεση. Τα δεδομένα χαλάρωσης τάσης μπορούν επίσης να ληφθούν υποβάλλοντας ένα υγρό σε ένα σταθερό ρυθμό συμπίεσης, στη συνέχεια να σταματήσει ξαφνικά την παραμόρφωση και να παρατηρήσει την μεταβολή της τάσης με την πάροδο του χρόνου (Steffe, 1996).



Σχήμα 2 . Καμπύλες χαλάρωσης τάσης (Steffe, 1996).

Ένα ευρύ φάσμα συμπεριφοράς παρατηρείται κατά την χαλάρωση τάσης διαφόρων υλικών στις καμπύλες του Σχήματος 2. Δεν θα παρατηρηθεί χαλάρωση σε ιδανικά ελαστικά υλικά. Τα ιξωδοελαστικά υλικά θα χαλαρώσουν σταδιακά με το τελικό σημείο ανάλογα με τη μοριακή δομή του προς τη δοκιμή υλικού: η τάση στα ιξωδοελαστικά στερεά θα εκφυλιστεί σε υπολειμματική τάση ισορροπίας, ενώ η υπολειμματική τάση στα ιξωδοελαστικά υγρά είναι μηδέν. Τα δεδομένα χαλάρωσης τάσης παρουσιάζονται συνήθως με βάση ένα συντελεστή χαλάρωσης τάσης:

$$G = f(t) = \frac{\sigma}{\gamma_{\text{συνεχής}}}$$

Εάν ένα υλικό είναι τελείως ελαστικό, ο συντελεστής χαλάρωσης θα είναι ίσος με το συντελεστή διάτμησης που ορίζεται από $\sigma = G \cdot \gamma$. G είναι μια παρόμοια, αλλά εξαρτώμενη από το χρόνο, ποσότητα που προσδιορίζεται από πειραματικά δεδομένα. Καμπύλες τάσης, επικαλύπτονται εάν συλλέγονται δεδομένα στη γραμμική ιξωδοελαστική περιοχή της συμπεριφοράς του υλικού. Σχετικές λειτουργίες υπάρχουν στην τάση ($E(t)$) και στη συμπίεση (bulk compression) ($K(t)$).

Το μοντέλο Maxwell, το οποίο περιέχει ένα ελατήριο Hookean σε σειρά με ένα νευτώνιο dashpot (μηχανισμό επαναφοράς), χρησιμοποιείται συχνά για την ερμηνεία δεδομένων χαλάρωσης τάσης για ιξωδοελαστικά υγρά, και ιδιαίτερα πολυμερικά υγρά. Η συνολική παραμόρφωση λόγω διάτμησης σε ένα στοιχείο υγρού Maxwell είναι ίση με το άθροισμα των παραμορφώσεων του ελατηρίου και του dashpot (μηχανισμού παραμόρφωσης):

$$\gamma = (\dot{\gamma})_{\text{spring}} + (\dot{\gamma})_{\text{dashpot}}$$

Η διαφοροποίηση αυτής της εξίσωσης σε σχέση με το χρόνο και η χρήση των ορισμών που παρέχονται από τις εξισώσεις $\sigma = G * \gamma$ και $\sigma = \mu * \dot{\gamma}$, και αποδίδουν στην εξής τελική εξίσωση (Steffe, 1996):

$$\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{1}{G} \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) + \frac{\sigma}{\mu}$$

Μία αδυναμία αυτού το μοντέλου είναι ότι σε απλές διατμητικές ροές πραγματικών ρευστών δεν περιγράφει με ακρίβεια την τυπική σχέση μεταξύ ρυθμού διάτμησης και τάσης. Αντίθετα, προβλέπει μια γραμμική σχέση η οποία είναι πιθανό να ισχύει μόνο σε πολύ μικρούς ρυθμούς παραμόρφωσης (Wenchang et al., 2003).

- White – Metznermodel

Το 1954 και το 1956 οι Lodge και Yamomoto ανέπτυξαν ένα μοριακό μοντέλο βασισμένο στην κινητική θεωρία της ελαστικότητας του ελαστικού. Σε αυτή τη θεωρία, ένα πολυμερές σύστημα θεωρείται ότι αποτελείται από μόρια μακριάς αλυσίδας συνδεδεμένα σε μία συνεχώς μεταβαλλόμενη δομή δικτύου με προσωρινές διασυνδέσεις. Το μοντέλο White-Metzner προέρχεται από μια τέτοια θεωρία δικτύων και πρόκειται για μια τροποποιημένη ημι-εμπειρική μορφή, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στο μοντέλο. Κανονικά η ίδια λειτουργία χρησιμοποιείται για το χρόνο χαλάρωσης και το ιξώδες. Στην τρέχουσα εργασία χρησιμοποιείται η συνάρτηση τύπου Bird-Carreau τόσο για το χρόνο ιξώδους, όσο και για το χρόνο χαλάρωσης (Dhanasekharan et al., 1999).

Το μοντέλο White-Metzner είναι σε θέση να αναπαράγει ιξωδομετρικά χαρακτηριστικά, όπως η ψευδοπλαστικότητα (shear thinning) και το μη τετραγωνικό πρώτο διαφορικό της κανονικής τάσης (normal stress) που χαρακτηρίζει τα περισσότερα υγρά. Το μοντέλο White-Metzner παρέχει επιπλέον ευελιξία, επιτρέποντας τη χρήση διαφορετικών λειτουργιών για την εξάρτηση διάτμησης του ιξώδους και του χρόνου χαλάρωσης. Ο νόμος Bird-Carreau συνιστάται για τον χρόνο χαλάρωσης, διότι αποδίδει έναν σταθερό (και περιορισμένο) χρόνο χαλάρωσης με χαμηλό ρυθμό διάτμησης και επιτρέπει μια ευκολότερη και επιτυχημένη έναρξη της εξέλιξης ενός φαινομένου. Η εξάρτηση από τον εκθετικό νόμο (power law) για τον χρόνο χαλάρωσης θα πρέπει να αποφεύγεται, διότι οδηγεί σε υψηλούς χρόνους χαλάρωσης για χαμηλές ταχύτητες διάτμησης. Παρά τα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του από άποψη ιξωδομετρίας, το μοντέλο White-Metzner προκαλεί μερικές φορές ψευδείς

διακυμάνσεις στη λύση σε υψηλές ταχύτητες διάτμησης (www.ansys.com). Το μοντέλο White-Metzner υπολογίζει T_1 από:

$$\mathbf{T}_1 + \lambda \overset{\nabla}{\mathbf{T}}_1 = 2\eta_1 \mathbf{D}$$

Ο χρόνος χαλάρωσης (λ) και το ιξώδες (η) μπορούν να είναι σταθερά ή να εκφράζονται από τον εκθετικό νόμο (power law) ή τον νόμο Bird - Carreau για την εξάρτηση της διάτμησης. Η έκφραση του εκθετικού νόμου (power law) για το συνολικό ιξώδες είναι:

$$\eta = K_\eta (\Lambda_\eta \dot{\gamma})^{n_\eta - 1}$$

όπου K_η είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας, n_η είναι ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς, και Λ είναι ο φυσικός χρόνος δηλαδή η σταθερά του χρόνου που απαιτείται να διαρραγούν οι διασυνδέσεις των δεσμών (entanglements or junction zones) ή να επανασυνδεθούν.

Η αναπαράσταση του ιξώδους Bird - Carreau είναι:

$$\eta = (\eta_0 - \eta_\infty) \left(1 + \Lambda_\eta^2 \dot{\gamma}^2 \right)^{\frac{n_\eta - 1}{2}} + \eta_\infty$$

όπου Λ είναι ο φυσικός χρόνος (δηλαδή, αντίστροφος του ρυθμού διάτμησης με τον οποίο το ρευστό αλλάζει από τη Νευτώνεια στη συμπεριφορά του εκθετικού νόμου) και n_η είναι ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς. Η έκφραση του εκθετικού νόμου για το χρόνο χαλάρωσης είναι:

$$\lambda = K_\lambda (\Lambda_\lambda \dot{\gamma})^{n_\lambda - 1}$$

Η σχέση Bird - Carreau για τον χρόνο χαλάρωσης είναι (www.ansys.com):

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \Lambda_\lambda^2 \dot{\gamma}^2 \right)^{\frac{n_\lambda - 1}{2}}$$

2.8.2 Ιξωδοελαστικότητα στα τρόφιμα

Κάποια από τα τρόφιμα που παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά, είναι τα εξής (Belitz et al., 2015), (Ριτζούλης, 2011):

- Τραγακανθινόκομμα: το ιξώδες εξαρτάται πολύ από τη ταχύτητα διάτμησης.
- Κόμμα γκουάρ: σχηματίζει ιδιαιτέρως ιξώδη διαλύματα, των οποίων το ιξώδες εξαρτάται από τη ταχύτητα διάτμησης.
- Πηκτίνη: είναι αλυσιδωτό πολυμερές που χρησιμοποιείται στα παγωτά.

- d) Ασπράδι αυγού
- e) Μαγιονέζα
- f) Κρέμα
- g) Τυριά
- h) Ζύμη από αλεύρι
- i) Πολυμερικάτήγματα
- j) Πυκνό γαλάκτωμα

Συγκεκριμένα για το ζυμάρι από σιτάλευρο είναι ένα τρόφιμο το οποίο παρουσιάζει ιξωδοελαστικότητα και έχει χαρακτηριστεί σαν το πιο σύνθετο υλικό, όσον αφορά τη ρεολογική συμπεριφορά. Επειδή τα ρεολογικά του χαρακτηριστικά συνδέονται με τις αρτοποιητικές ιδιότητες του αλεύρου, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές δοκιμές για τη μέτρησή τους πολύ πριν κατανοηθεί πλήρως και μετρηθεί η ιξωδοελαστική συμπεριφορά (Τζιά et al., 2007). Η βασική πρωτεΐνη του σίτου είναι η γλουτένη, η οποία προσδίδει στο ζυμάρι συνεκτικότητα και ελαστικότητα. Η γλουτένη αποτελεί περίπου 80% της πρωτεΐνης του σίτου και αποτελείται από δύο κλάσματα:

- a) γλοιοαδίνη, η οποία περιέχει θείο, και σε αυτήν οφείλεται η ελαστικότητα της γλουτένης και συνεπώς στο ζυμάρι,
- b) γλουτενίνη, η οποία είναι λιγότερη διαλυτή με μεγάλο μοριακό βάρος, και σε αυτήν οφείλεται η αντίσταση που προβάλλει η γλουτένη και συνεπώς στο ζυμάρι όταν εκτείνεται.

Η ιξωδοελαστική αυτή συμπεριφορά της γλουτένης του σίτου οφείλεται στο ότι οι δεσμοί που σχηματίζουν το πρωτεϊνικό πλέγμα δεν είναι μόνιμοι. Με τη δύναμη που δέχεται η γλουτένη για να υποστεί έκταση, σπάζουν ορισμένοι δισουλφιδικοί δεσμοί και δίνουν τη δυνατότητα σε μία πολυπεπτιδική αλυσίδα να γλιστρήσει δίπλα στην άλλη υποκύπτοντας στην εξωτερική δύναμη παραμόρφωσης. Όταν η κίνηση των δύο αλυσίδων σταματήσει, δημιουργούνται νέοι δισουλφιδικοί δεσμοί που σταθεροποιούν τις αλυσίδες και κατ' επέκταση το πρωτεϊνικό πλέγμα στη νέα τους θέση (Κεφαλάς, 2009).

Αναφορικά με τα γαλακτομικά προϊόντα και ειδικότερα το τυρί, οι ρεολογικές ιδιότητες του τυριού είναι εκείνες που καθορίζουν την αντίδρασή του σε μια τάση ή μια παραμόρφωση (π.χ. συμπίεση, διάτμηση ή κοπή) που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας (π.χ. τεμαχισμός, άλεση) και της κατανάλωσης (τεμαχισμός, επάλειψη, μάζημα). Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά καθορίζονται από την εφαρμογή μιας σταθερής τάσης ή μιας παραμόρφωσης

σε ένα δείγμα τυριού κάτω από καθορισμένες πειραματικές συνθήκες. Η ρεολογία του τυριού εξαρτάται από τη σύστασή του, τη μικροδομή (δηλαδή τη δομική διεύθυνση των συστατικών του), τη φυσικοχημική κατάσταση των συστατικών του και τη μακροδομή του, η οποία απεικονίζει ετερογένειες, όπως ρωγμές και σχισμές του τυροπήγματος. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν παραμέτρους, όπως το ποσοστό συσσωμάτωσης του λίπους, την αναλογία στερεού λίπους προς υγρό λίπος, το βαθμό υδρόλυσης και ενυδάτωσης του παρακαζεϊνικού πλέγματος, και τη διαμοριακή έλξη μεταξύ παρακαζεϊνικών μορίων (Fox et al., 2000).

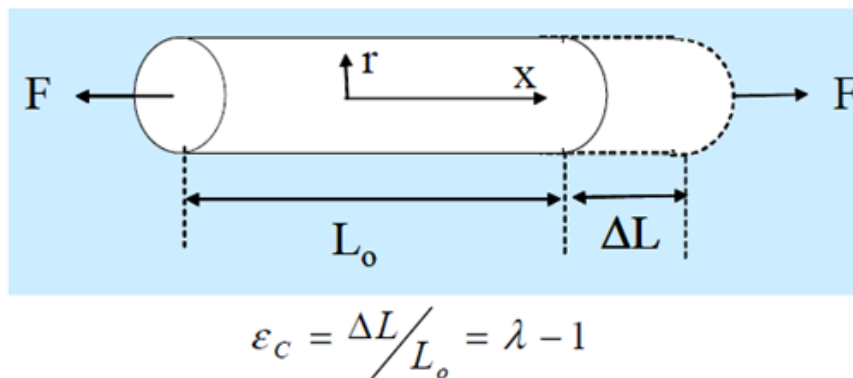
2.9 Εκτατικό ιξώδες

Οι ρίζες της εκτατικής ρεομετρίας βρίσκονται στις αρχές του 20ού αιώνα. Ο Trouton το 1906 ήταν ο πρώτος που πειραματίστηκε με μία τέτοιου είδους μελέτη, από την οποία ανακαλύφθηκε μέσω των έξυπνα σχεδιασμένων πειραμάτων του ότι το εκτατό ιξώδες των Νευτώνειων ρευστών είναι τρεις φορές το διατμητικό ιξώδες (Korplmayr et al., 2016). Παρά τα πρώτα πειράματα, οι εξελίξεις στην εκτατή ρεομετρία ήταν λίγες μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '60. Από το 1955 έγιναν κι άλλες πειραματικές μετρήσεις με τη χρήση εκτατών ρεομέτρων, όμως το 1969 ξεκίνησε η συναρπαστική φάση της μελέτης της εκτατής ρεομετρίας με τους Meissner και Vinogradov. Ενώ, όλες οι πειραματικές προσεγγίσεις μέχρι τότε βασίζονταν στην έλξη ενός δείγματος μορφής ράβδου εκ των άκρων, ο Meissner εισήγαγε μια νέα ιδέα, η οποία άλλαξε το πεδίο της επιμήκυνσης. Αντικατέστησε τους κινούμενους σφικκτήρες με σταθερούς στρεφόμενους σφικκτήρες. Το δείγμα συγκρατείται μεταξύ δύο ζευγών περιστρεφόμενων οδοντωτών τροχών που τραβούν το δείγμα και αποβάλλουν το υλικό από το σταθερό τμήμα δοκιμής. Ένα πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η ολική επιμήκυνση δεν περιορίζεται από το μέγεθος της συσκευής (www.ansys.com). Εν τέλει, το εκτατικό ιξώδες μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση στην τάνυση του υγρού και το διατμητικό ιξώδες μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση στη ροή ρευστού μεταξύ στιβάδων (Korplmayr et al., 2016).

Γιατί είναι σημαντικά τα πειράματα επιμήκυνσης και γιατί έχει δοθεί τόση προσπάθεια στο σχεδιασμό και την κατασκευή των εκτατικών ρεομέτρων, ενώ οι ρεολογικές μετρήσεις στη διάτμηση με τη χρήση περιστροφικών ρεομέτρων είναι τόσο ευκολότερες;

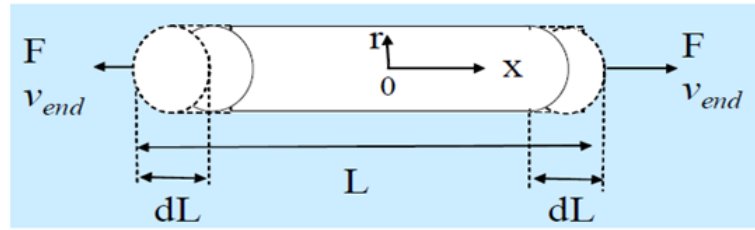
1. Ο πρώτος λόγος είναι ότι οι παραμορφώσεις λόγω έκτασης παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλές διαδικασίες επεξεργασίας. Η περιδίνηση των ινών, η εμφύσηση μεμβράνης, η χύτευση με εμφύσηση, η θερμοδιαμόρφωση κ.λπ. κυριαρχούν ουσιαστικά από την εκτατική ροή. Σε πολλές διαδικασίες οι εκτατικές ροές είναι απαραίτητες.
2. Ο δεύτερος λόγος για την εκτέλεση μετρήσεων έκτασης σχετίζεται με την ευαισθησία αυτών των ροών στη μοριακή δομή, όπως η διακλάδωση. Το εκτατικό ιξώδες σε μεγάλες διακυμάνσεις είναι περισσότερο ευαίσθητο στις μεταβολές της διακλάδωσης μακράς αλυσίδας από τις γραμμικές ιδιότητες ιξωδοελαστικής διάτμησης.
3. Ο τρίτος λόγος είναι ακαδημαϊκός. Δεδομένου ότι οι ιδιότητες επιμήκυνσης διαφέρουν τόσο από τις ιδιότητες διατμήσεως, τα πειράματα επιμήκυνσης είναι ιδανικά για τη δοκιμή καταστατικών εξισώσεων και μοντέλων ροής. (www.ansys.com).

Η πιο συνηθισμένη μέτρηση επιμήκυνσης είναι η μηχανική καταπόνηση ή παραμόρφωση Cauchy, που ορίζεται ως η αύξηση του μήκους ΔL διαιρούμενη με το αρχικό μήκος L_0 (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Παραμόρφωση Cauchy ή μηχανική καταπόνηση (www.ansys.com).

Η παραμόρφωση Cauchy είναι ένα μέτρο παραμόρφωσης που ισχύει για μικρές παραμορφώσεις. Για μεγάλες παραμορφώσεις ($\Delta L \gg L_0$), η παραμόρφωση Cauchy αντικαθίσταται από τη παραμόρφωση Hencky. Ο ρυθμός Hencky σχετίζεται με την ταχύτητα ενός σωματιδίου κατά μήκος του άξονα παραμόρφωσης $v_x = (d\varepsilon_H / dt) * x$ (Εικόνα 5).

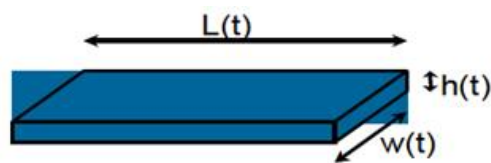


$$v_x = \dot{\epsilon}x \quad L(t) = L_o e^{\dot{\epsilon}t}$$

$$\epsilon_H(t) = \dot{\epsilon}t = \ln \frac{L(t)}{L_o}$$

Εικόνα 5. Η παραμόρφωση Hencky και ο ρυθμός Hencky (www.ansys.com).

Σε ένα πείραμα σταθερού ρυθμού (τα δύο άκρα κινούνται με την ίδια ταχύτητα), το σωματίδιο στο κέντρο της ράβδου έχει μηδενική ταχύτητα και η ταχύτητα σωματιδίων αυξάνεται με την απόσταση από το κέντρο. Η τεχνική περιστρεφόμενου σφινγκτήρα παραμορφώνει το υλικό σε σταθερό ρυθμό Hencky, σε σταθερή απόσταση $x = L_o / 2$ από το κέντρο του δείγματος με σταθερή ταχύτητα v_x που εφαρμόζεται από τους περιστρεφόμενους σφινγκτήρες. Σε ένα κλασικό πείραμα επιμήκυνσης, με τη σταθερά όγκου δείγματος, τα άκρα του δείγματος πρέπει να κινούνται με ταχύτητα $v_{end} = (L / 2) d\epsilon_H / dt$. Η ενσωμάτωση από το L_o στο τελικό μήκος L_f οδηγεί σε μια εκθετική αύξηση του μήκους του δείγματος με τον χρόνο $L(t) = L_{oexp} [(d\epsilon_H / dt) t]$. Η τελική παραμόρφωση μπορεί έτσι να εκφραστεί ως $\epsilon_H = \ln [L_f / L_o]$. Το ιξώδες επιμηκύνσεως η_E ορίζεται ως τάση διαιρούμενη με την ταχύτητα επιμηκύνσεως. Η τάση είναι η δύναμη που διαιρείται με την επιφάνεια που είναι κανονική προς την κατεύθυνση της παραμόρφωσης. Για ένα ασυμπίεστο υλικό, ο όγκος διατηρείται και το εμβαδόν της επιφάνειας πρέπει να μειώνεται εκθετικά με $A(t) = A_{oexp} \{-(d\epsilon_H / dt) t\}$ με το μήκος του δείγματος να αυξάνεται (Εικόνα 6) (www.ansys.com).



$$L_o w_o h_o = L_o A_o = const. \quad (\text{incompressible})$$

$$\Rightarrow A(t) = A_o e^{-\dot{\epsilon}_o t} \quad \text{and} \quad h(t) = h_o e^{-\frac{1}{2}\dot{\epsilon}_o t}$$

$$\Rightarrow \sigma_E(t) = \frac{F(t)}{A(t)} = \frac{F(t)}{A_o} e^{\dot{\epsilon}_o t} \quad \text{and} \quad \eta_E(t) = \frac{\sigma_E(t)}{\dot{\epsilon}_o}$$

Εικόνα 6. Εκτακτική τάση και ιξώδες σε ένα πείραμα μονοδιάστατης επιμήκυνσης (www.ansys.com).

3. Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με χρήση του λογισμικού Polyflow για την προσομοίωση της ροής ενός ημιστερεού τροφίμου με ιξωδοελαστική ρεολογική συμπεριφορά υπό συνθήκες ισοθερμικής συμπίεσης. Μελετήθηκαν μαθηματικά μοντέλα ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς που διατίθενται στην βιβλιοθήκη του Polyflow τα οποία όμως είναι εφαρμόσιμα στα τρόφιμα. Πιο συγκεκριμένα, τα μοντέλα που μελετήθηκαν ήταν το Maxwell και το White-Metzer. Οι τιμές των ιδιοτήτων (πυκνότητα, ιξώδες κλπ.) του τροφίμου που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε προϊόντα τύπου ζύμης. Ο στόχος της ανάπτυξης και επίλυσης του υπολογιστικού μοντέλου ήταν η εξαγωγή του προφίλ παραμόρφωσης του τροφίμου συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης, όπως και των προφίλ ταχύτητας, πίεσης και ρυθμού διάτμησης.

4. Πειραματικό Μέρος

Το φυσικό μοντέλο το οποίο θεωρήθηκε προς επίλυση με το λογισμικό Polyflow, είναι μία ποσότητα τροφίμου σε ημισφαιρική διαμόρφωση ανάμεσα σε δύο πλάκες εκ των οποίων η μία είναι κινούμενη συμπιέζοντας το τρόφιμο. Το τρόφιμο θεωρείται ότι είναι σε ημιστερεή κατάσταση και έχει ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Με την μοντελοποίηση του παραπάνω φυσικού συστήματος προσομοιάζεται μία ροή συμπίεσης (squeeze flow), η οποία προσεγγιστικά αντιστοιχεί στην διαδικασία της μάσησης καθώς το τρόφιμο συμπιέζεται ανάμεσα στην γλώσσα και τον ουρανίσκο. Ως μοντέλο τροφίμου θεωρήθηκε η ζύμη, και συγκεκριμένα για το μοντέλο του Maxwell ανασυσταμένη ζύμη cassava (reconstituted cassava dough) και για το μοντέλο White – Metzger σκληρό αλεύρι από σιτάρι. Η βάση για την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν ένα παράδειγμα (Example 40), το οποίο περιλαμβάνεται στις λυμένες μελέτες περιπτώσεων για πολυμερή υλικά που συνοδεύουν το λογισμικό (www.ansys.com). Για την επίλυση αυτού του φυσικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα του Maxwell και του White – Metzger, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές τιμές και παραμέτρους για την επίλυση τους. Το κάθε ένα εφαρμόστηκε για διαφορετικούς λόγους που θα εξηγηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1 Υπολογιστική Διαδικασία

Προτού ξεκινήσει η ανάλυση – λύση ενός προβλήματος με υπολογιστική ρευστοδυναμική, θα πρέπει να προσδιοριστούν από το χρήστη όλες οι παράμετροι του προβλήματος, καθώς επίσης και τα φυσικά φαινόμενα που το διέπουν. Αφού γίνει αυτό και ξεκαθαριστούν οι στόχοι και τα ζητούμενα του προβλήματος, τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να επιτευχθεί η λύση του είναι τα εξής:

1. Κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου (Geometry)
2. Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στη γεωμετρία (Mesh)
3. Προσθήκη όλων των παραμέτρων που χρειάζονται για την επίλυση του προβλήματος (Setup)
4. Λύση του προβλήματος (Solution)
5. Αποτελέσματα, εξέταση και αξιολόγηση (Results)

4.2 Χαρακτηριστικά Ηλεκτρονικού Υπολογιστή – Μοντέλου Προσομοίωσης

Δεδομένου ότι η προσομοίωση (συνεπώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν), γίνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, είναι σημαντικό να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά αυτού καθώς επίσης και η έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Έτσι, για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS Polyflow σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής: Intel(R) Core(TM) i5-4690 CPU @ 3,50GHz 3,50 GHz

Εγκατεστημένη μνήμη (RAM): 8GB

Λειτουργικό σύστημα: Windows 7 Professional

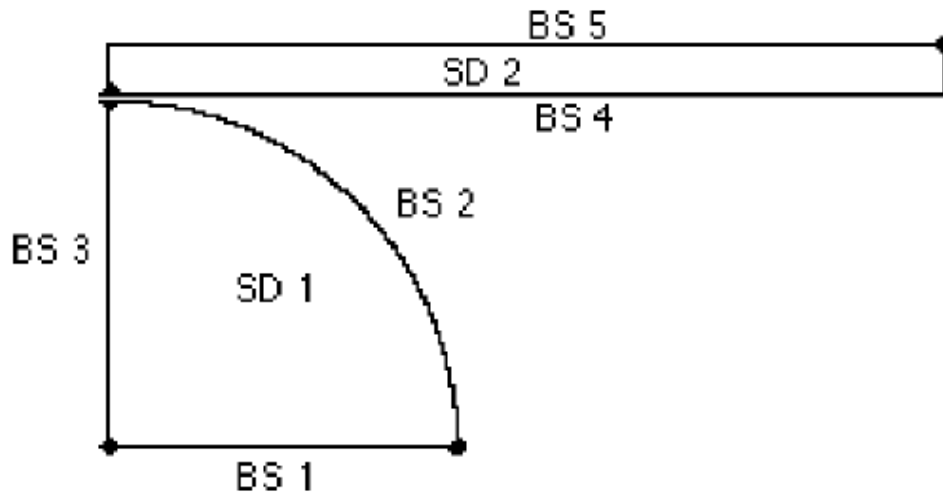
Λόγω αξονικής συμμετρίας, το παραπάνω φυσικό σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί με βάση το ισοδύναμο δισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 3, το οποίο περιλαμβάνει δύο περιοχές και πέντε πλευρικές δομές. Η περιοχή SD 1 είναι το ένα τέταρτο ενός κύκλου και αντιστοιχεί στο τρόφιμο, ενώ η περιοχή SD 2 είναι η κινούμενη πλάκα. Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, η ολίσθηση θεωρείται κατά μήκος, ενώ οι συνθήκες συμμετρίας επιβάλλονται κατά μήκος του άξονα. Η BS 2 είναι η ελεύθερη επιφάνεια του τροφίμου, η οποία κατά την συμπίεση έρχεται σε επαφή με την κινούμενη πλάκα. Οι διαστάσεις του Σχήματος 3 είναι οι εξής:

a) Για την πλάκα (SD2):

- Ύψος: 0,01m
- Μήκος: 0,05m (BS 4 και BS 5)

b) Για το κομμάτι δίσκου (SD1):

- Ύψος: 0,03m (BS 3)
- Μήκος: 0,03m (BS 1)
- Ακτίνα: 0,05m (BS 2)



Σχήμα 3. Γεωμετρία σχήματος.

1. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Maxwell για το ζυμάρι ορίστηκαν οι εξής φυσικές ιδιότητες:

- **Πυκνότητα:** $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$
- **Ειδική θερμότητα:** $C_p = 2000 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- **Θερμική αγωγιμότητα:** $K = 0,5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

Η ροή είναι ισοθερμική οπότε δεν θεωρήθηκε εξάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία. Για την επίλυση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιούνται δύο τιμές, του ιξώδους και του χρόνου χαλάρωσης, οι οποίες θα αναλυθούν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, διότι εφαρμόστηκαν 4 διαφορετικά πειράματα.

2. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του White – Metzger για το ζυμάρι ορίστηκαν οι εξής φυσικές ιδιότητες:

- **Πυκνότητα:** $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$
- **Ειδική θερμότητα:** $C_p = 2000 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- **Θερμική αγωγιμότητα:** $K = 0,5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

Η ροή είναι ισοθερμική οπότε δεν θεωρήθηκε εξάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία. Για την επίλυση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιήθηκαν τιμές παραμέτρων του ρεολογικού μοντέλου που πάρθηκαν από το άρθρο των Dhanasekharan et al., 1999. Με το μοντέλο αυτό εξετάστηκαν 2 περιπτώσεις, το ένα σχετίζεται με τη συμπίεση του τροφίμου από πάνω προς τα κάτω, και το δεύτερο ακριβώς το αντίθετο (από κάτω προς τα πάνω). Οι

εξισώσεις και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο περιπτώσεις είναι οι εξής:

- ✚ Για το ιξώδες (viscosity) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση με τις αντίστοιχες τιμές παραμέτρων:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + \lambda_v^2 \dot{\gamma}^2)^{(n_v - 1)/2}$$

$$\left. \begin{array}{l} n_0 = 4 \cdot 10^6 \text{ (fac)} \\ \lambda_v = 10^5 \\ \gamma = g = 10^{-6} \text{ m/s}^2 \end{array} \right\} \gamma * \lambda_v = 0,1 \text{ (tnat)}$$

$$n_v = 0,35 \text{ (expo)}$$

$$n_{\infty} = 10 \text{ (facinf)}$$

- ✚ Για το χρόνο χαλάρωσης (relaxation time) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση με τις αντίστοιχες τιμές παραμέτρων:

$$\lambda(\dot{\gamma}) = \lambda_0 (1 + \lambda_r^2 \dot{\gamma}^2)^{(n_r - 1)/2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_0 = 10^2 \text{ (fac)} \\ \lambda_r = 10^2 \\ \gamma = g = 10^{-6} \text{ m/s}^2 \end{array} \right\} \gamma * \lambda_r = 0,1 \text{ (tnatr)}$$

$$n_v = 0,35 \text{ (expo)}$$

Συνθήκες Λειτουργίας:

Μια σχετική παράμετρος λειτουργίας είναι η κατακόρυφη ταχύτητα πλάκας. Η μετατόπιση της πραγματοποιείται με ταχύτητα 0,01 m/s και σε σύντομο χρονικό διάστημα 1,5s για το μοντέλο του Maxwell. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο του White – Metzger πραγματοποιείται με ταχύτητα -0,01 m/s και χρόνο λειτουργίας 1,0s για το κατέβασμα και 0,6s για το ανέβασμα της πλάκας. Επίσης, για το μοντέλο του Maxwell η ακρίβεια (tolerance) είναι 10^{-3} και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (max number of successful steps) είναι 500, ενώ για το μοντέλο White – Metzger η ακρίβεια (tolerance) είναι 10^{-4} και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (max number of successful steps) είναι 1000.

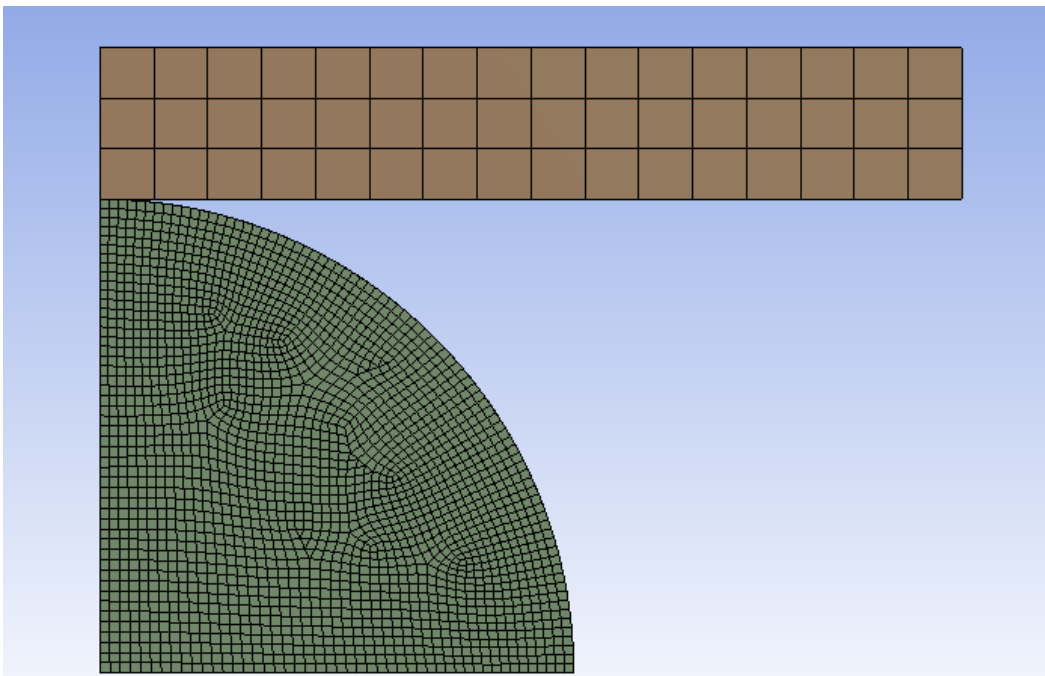
Οριακές Συνθήκες:

- **BS 1** είναι η κάτω οριακή πλευρά, πάνω στην οποία «γλιστρά» το ρευστό (Σχήμα 2).

- **BS 2** είναι η ελεύθερη επιφάνεια που θα έρθει σε επαφή με την κινούμενη πλάκα SD 2. Η πλάκα κινείται προς τα κάτω με σταθερή ταχύτητα 10^{-2} m/s (Σχήμα 2).
- **BS 3** είναι ο κεντρικός άξονας συμμετρίας (Σχήμα 2).
- **BS 4** είναι η κάτω πλευρά της πλάκας που ακουμπάει και συμπιέζει το ημισφαίριο σχήμα (Σχήμα 2).
- **BS 5** είναι η πάνω πλευρά της πλάκας (Σχήμα 2).

4.3 Περιγραφή Υπολογιστικού Πλέγματος (Mesh)

Το υπολογιστικό πλέγμα στηρίζεται στη δημιουργία ενός τεστ διακριτών σημείων, στα οποία επιλύονται οι εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Συνήθως, το δημιουργούμενο πλέγμα μετατρέπεται σε ένα ορθογωνικό πλέγμα, αποτελούμενο από ισαπέχοντα σημεία. Τόσο ο αριθμός των σημείων, όσο και η πυκνότητα του πλέγματος, ποικίλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα του μοντέλου και με την ακρίβεια που επιζητά ο χρήστης του προγράμματος. Στο Σχήμα 4 εμφανίζεται το mesh που επιλέχθηκε για τη περίπτωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 4. Πλέγμα (mesh) των πεπερασμένων στοιχείων.

Έτσι, στο πλέγμα του ενός τετάρτου του κύκλου υπάρχουν 2349 κομβικά σημεία (nodes) με 2244 κελιά (elements / cells). Το συγκεκριμένο πλέγμα, ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της προσομοίωσης των μελετημένων μοντέλων.

5. Αποτελέσματα – Συζήτηση

Όπως προαναφέρθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν δυο μοντέλα ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς, του Maxwell και του White – Metzger, για την επίλυση του φυσικού μοντέλου. Για το μοντέλο του Maxwell εκτελέστηκαν 4 υπολογιστικά πειράματα για διαφορετικές τιμές ρεολογικών ιδιοτήτων (που αντιστοιχούν σε διαφορετικά υλικά) και για να συγκριθούν τα αποτελέσματα ως προς τα πεδία ταχύτητας, πίεσης και ταχύτητας διάτμησης. Το μοντέλο του White–Metzger χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση ενός πειράματος συμπίεσης – αποσυμπίεσης ζύμης άρτου. Στα επόμενα υποκεφάλαια θα αναφερθούν ξεχωριστά και αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτά τα δύο μοντέλα.

5.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων με το Μοντέλο Maxwell

Το μοντέλο του Maxwell απαιτεί την χρήση δύο τιμών παραμέτρων, του ιξώδους και του χρόνου χαλάρωσης (relaxation time). Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, προέρχονται από το άρθρο των (Sandoval et al., 2009). Σε αυτό μελετήθηκαν τα ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά της ανασυσταμένης ζύμης cassava (reconstituted cassava dough), τα οποία αξιολογήθηκαν με δοκιμή χαλάρωσης τάσης (stress relaxation). Αυτή η δοκιμή προσδιορίζει τη συμπεριφορά της ζύμης, κατά την οποία το ιξωδοελαστικό υλικό παρουσιάζει μια τάση πτώσης της δύναμης – πίεσης ως συνάρτηση του χρόνου.

Στη παρούσα εργασία με το μοντέλο του Maxwell, ο χρόνος συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδιος σε όλα τα πειράματα, δηλαδή 1,5 s. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω υλοποιήθηκαν 4 διαφορετικά πειράματα, στα οποία μία κινούμενη πλάκα συμπιέζει προς τα κάτω το τρόφιμο δημιουργώντας παραμόρφωση στο ημισφαιρικό σχήμα (κομμάτι ζύμης άρτου). Τα αποτελέσματα αφορούν τα πεδία ταχύτητας, πίεσης και ταχύτητας διάτμησης σε μορφή διαγραμμάτων ισοϋψών καμπυλών (contour diagrams). Για την ευκολότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν ενιαίες κλίμακες σε όλα τα ομοειδή διαγράμματα για τα τέσσερα πειράματα.

1. Για το 1^ο πείραμα εφαρμόστηκαν οι εξής τιμές (Sandoval et al., 2009):

Ιξώδες: 13500 Pa*s

Χρόνος χαλάρωσης: 1s

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα Σχήματα 5, 6 και 7.

2. Για το 2^ο πείραμα εφαρμόστηκαν οι εξής τιμές(Sandoval et al., 2009):

Ιξώδες: 13500 Pa*s

Χρόνος χαλάρωσης: 2s

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα Σχήματα 8, 9 και 10.

3. Για το 4^ο πείραμα εφαρμόστηκαν οι εξής τιμές (Sandoval et al., 2009):

Ιξώδες: 11900 Pa*s

Χρόνος χαλάρωσης: 5s

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα Σχήματα 11, 12 και 13.

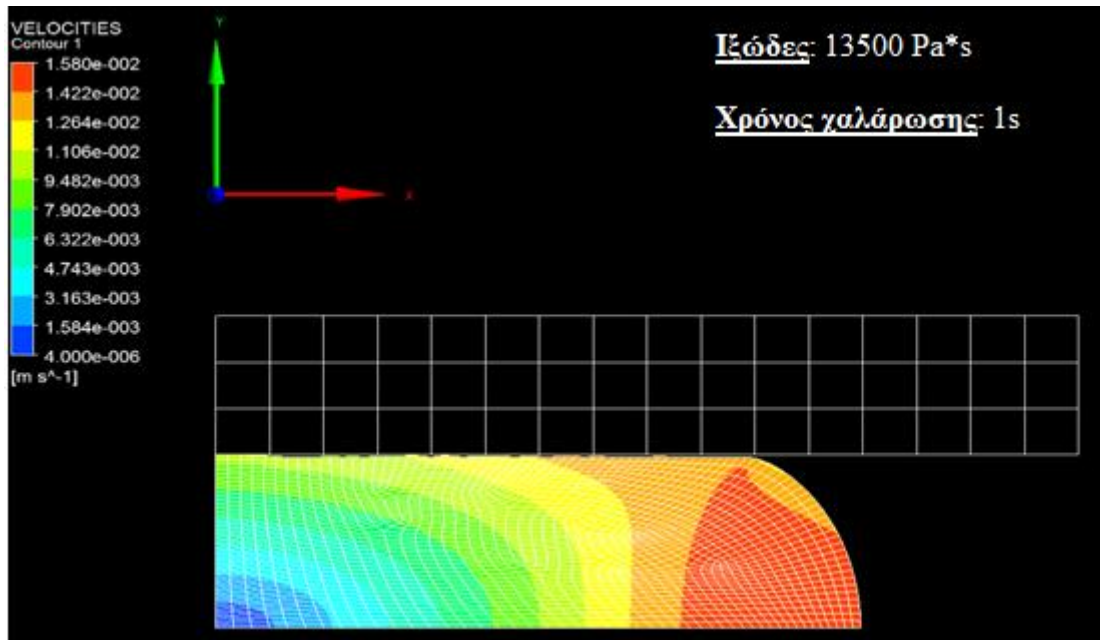
4. Για το 3^ο πείραμα εφαρμόστηκαν οι εξής τιμές (Sandoval et al., 2009):

Ιξώδες: 7200 Pa*s

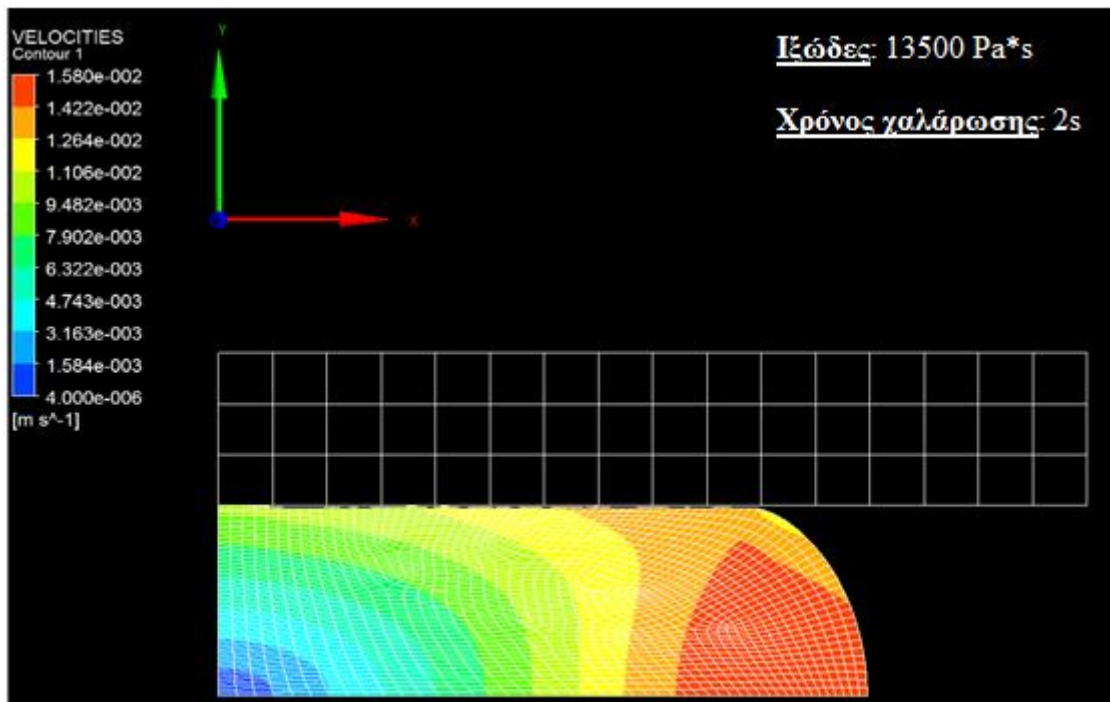
Χρόνος χαλάρωσης: 70s

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα Σχήματα 14, 15 και 16.

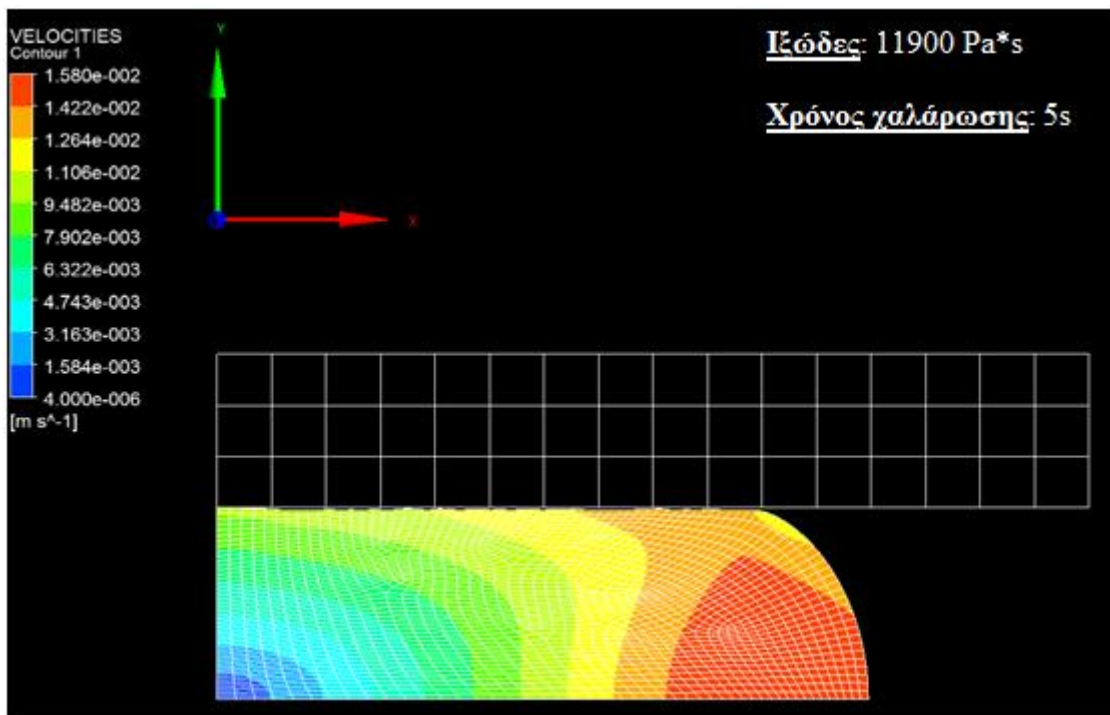
Παρακάτω θα αναφερθούν τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων. Θα γίνει σύγκριση μεταξύ των παραμέτρων για την καλύτερη κατανόηση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων.



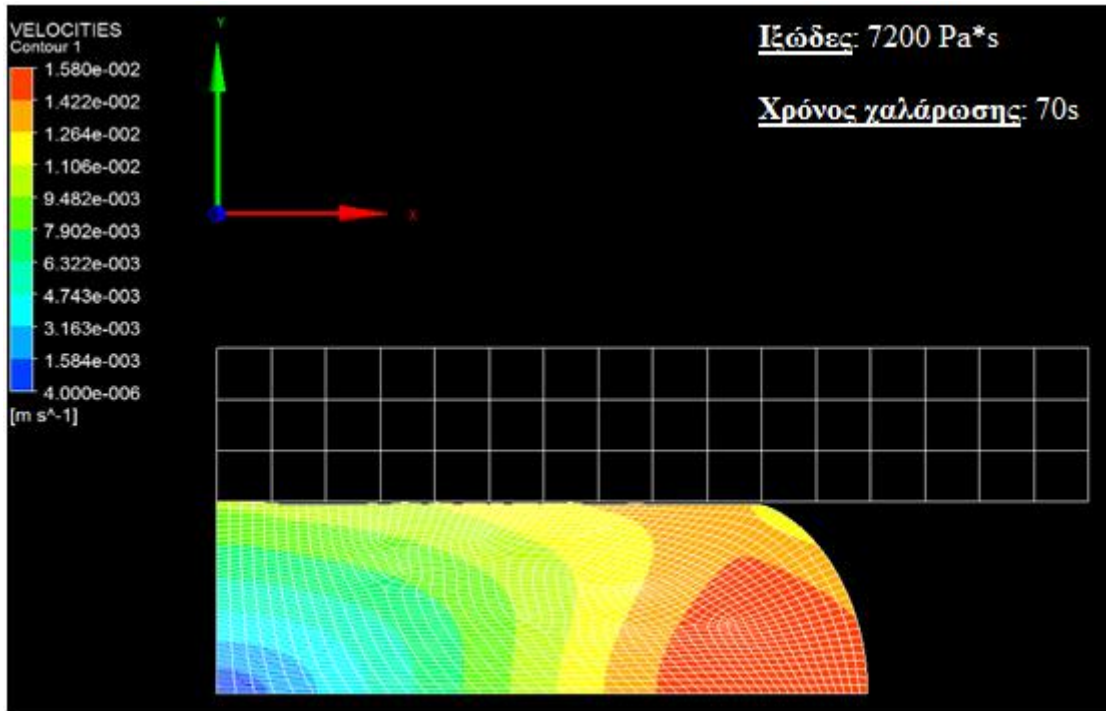
Σχήμα 5. Προφίλ ταχύτητας για το Πείραμα 1.



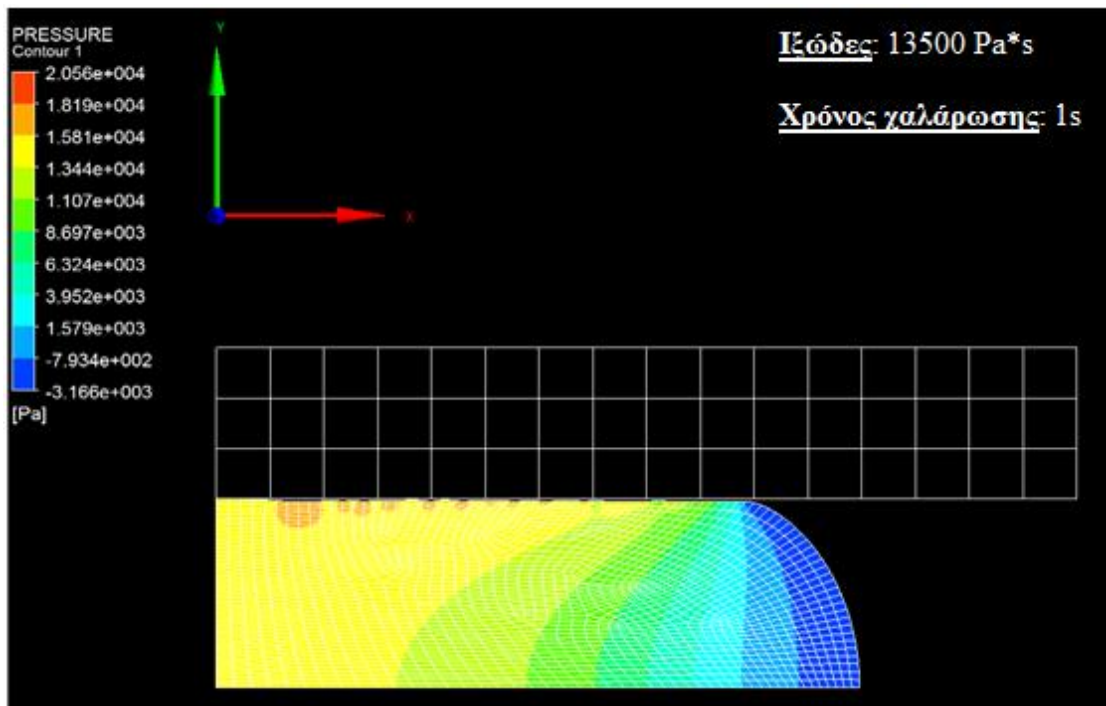
Σχήμα 8. Προφίλ ταχύτητας για το Πείραμα 2.



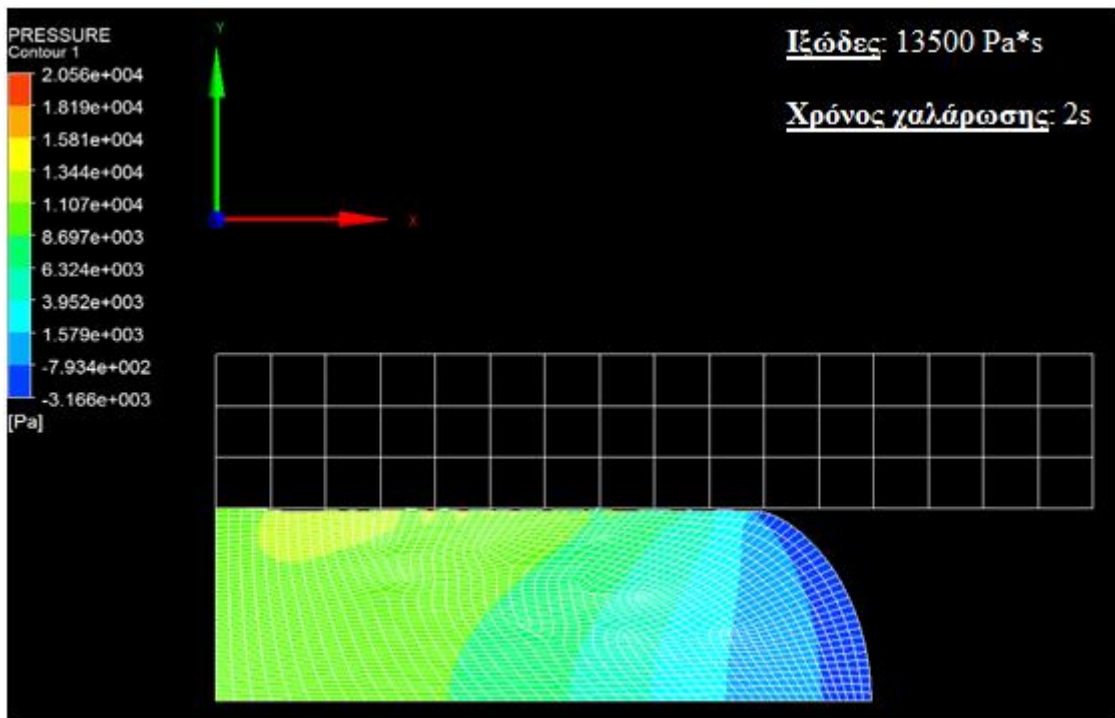
Σχήμα 11. Προφίλ ταχύτητας για το Πείραμα 3.



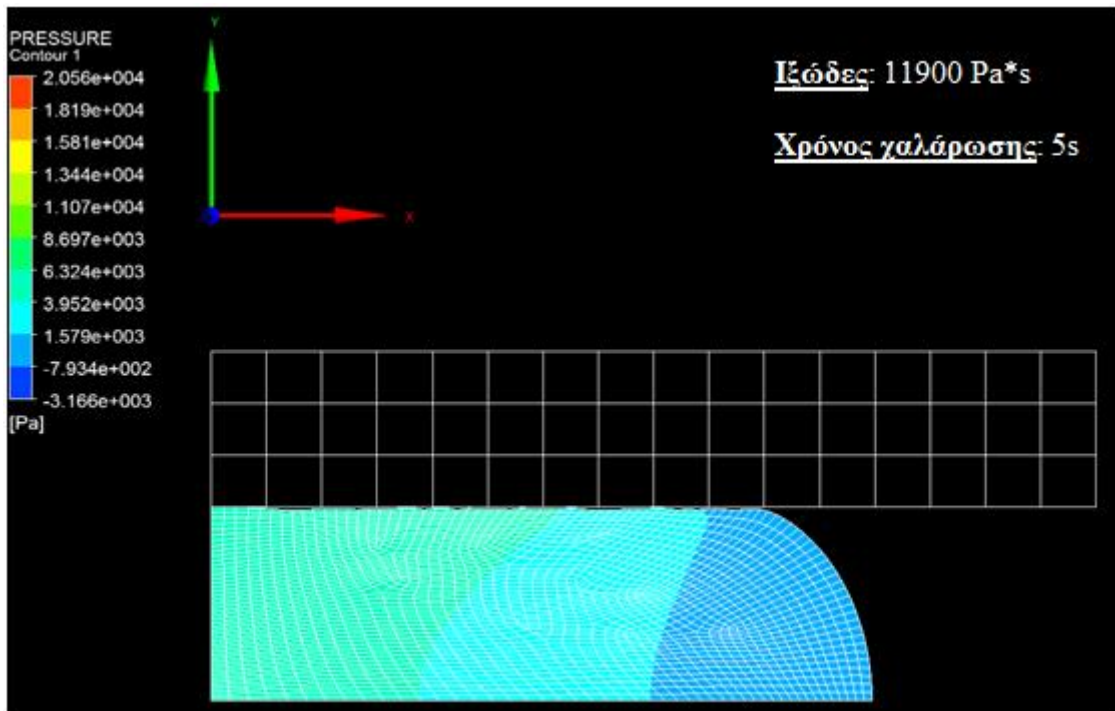
Σχήμα 14. Προφίλ ταχύτητας για το Πείραμα 4.



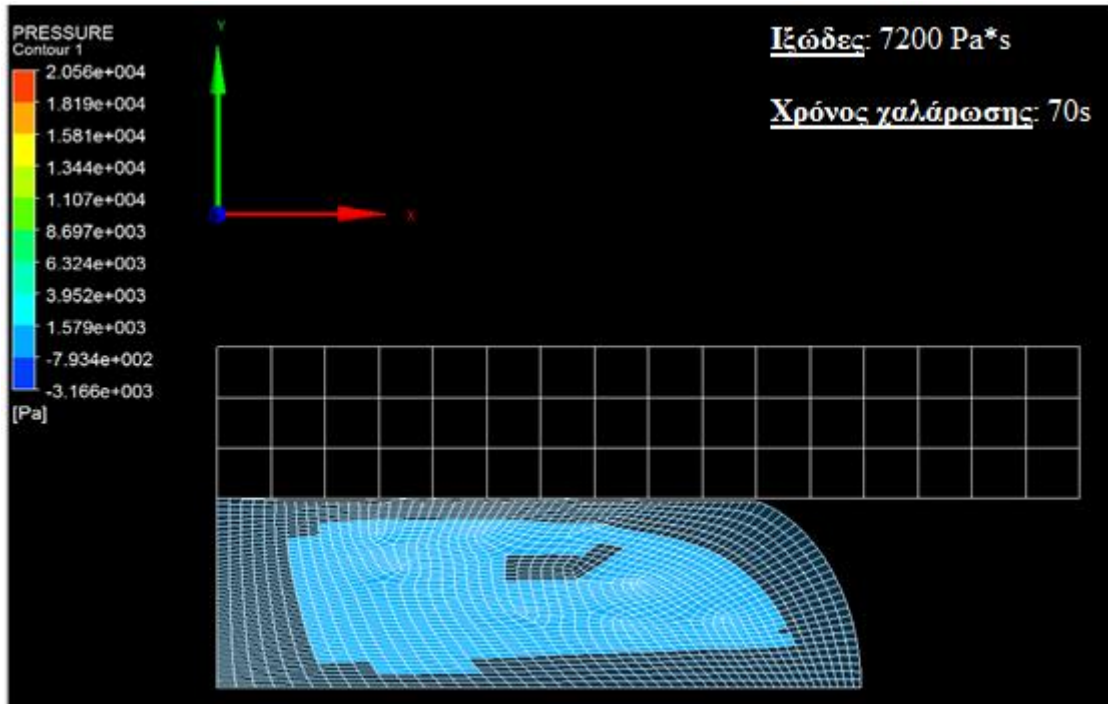
Σχήμα 6. Προφίλ πίεσης για το Πείραμα 1.



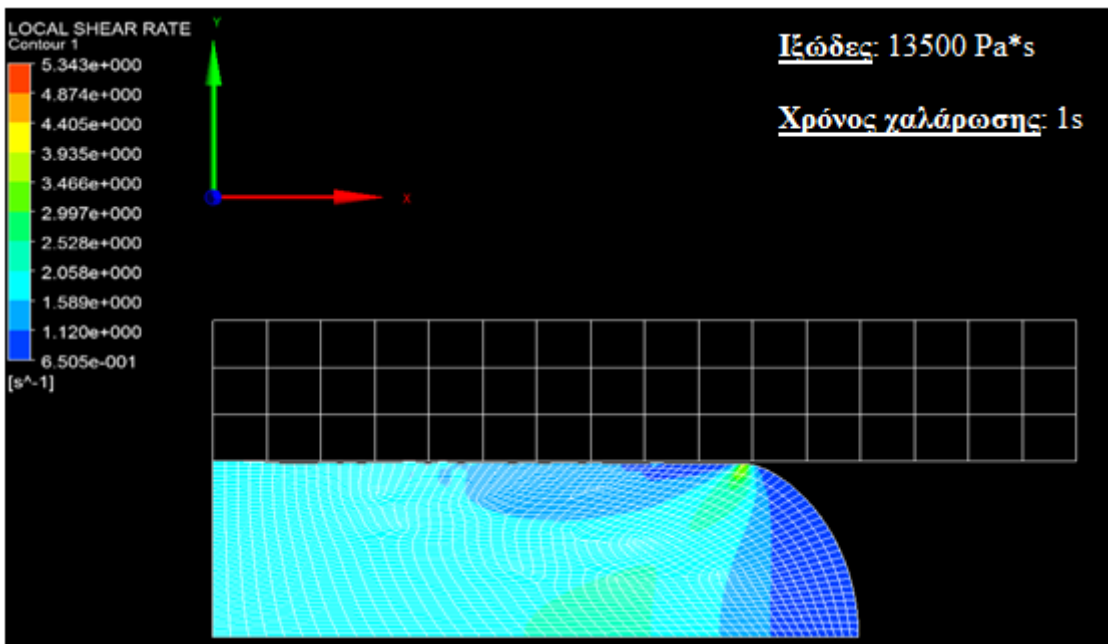
Σχήμα 9. Προφίλ πίεσης για το Πείραμα 2.



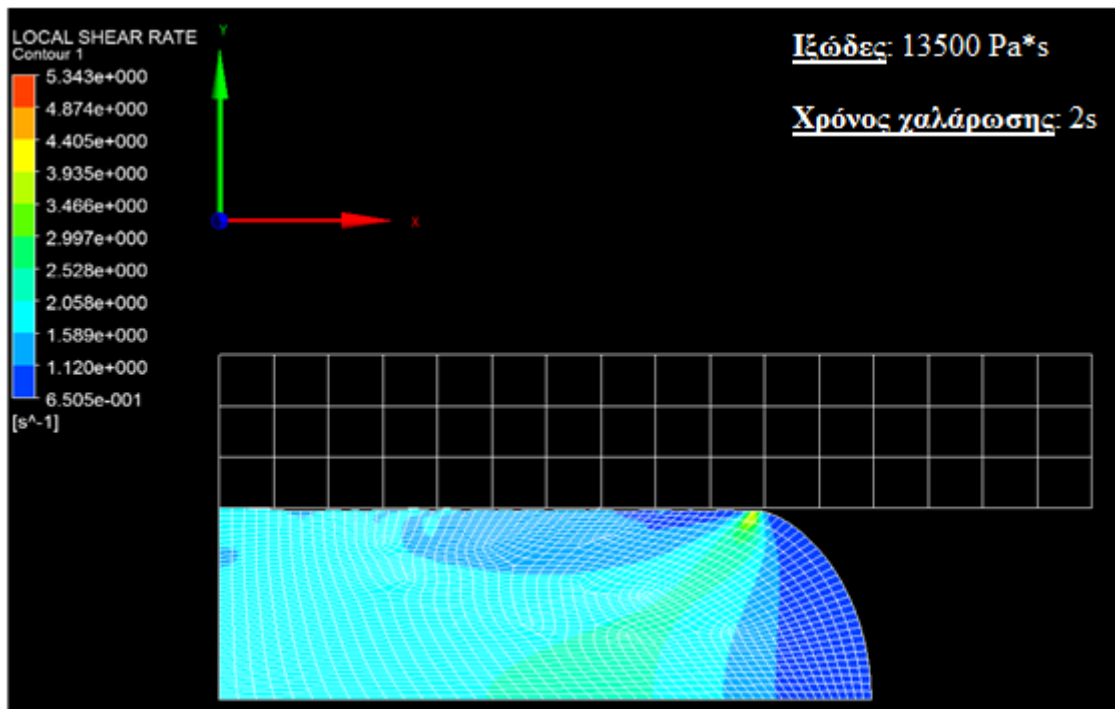
Σχήμα 12. Προφίλ πίεσης για το Πείραμα 3.



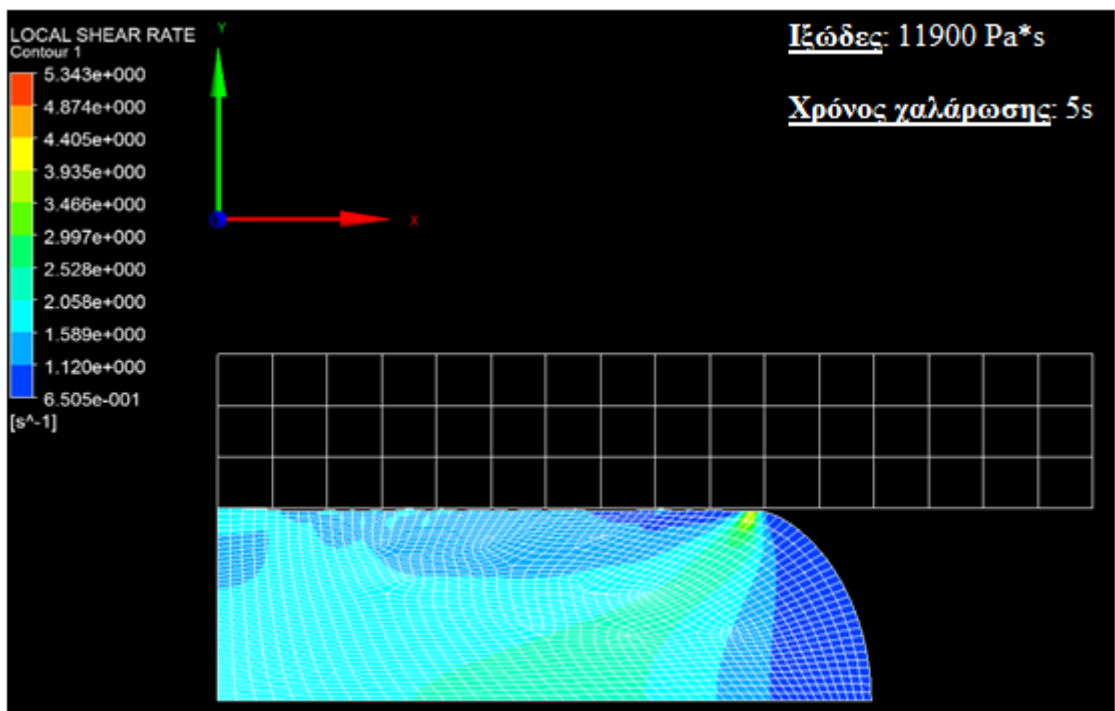
Σχήμα 15. Προφίλ πίεσης για το Πείραμα 4.



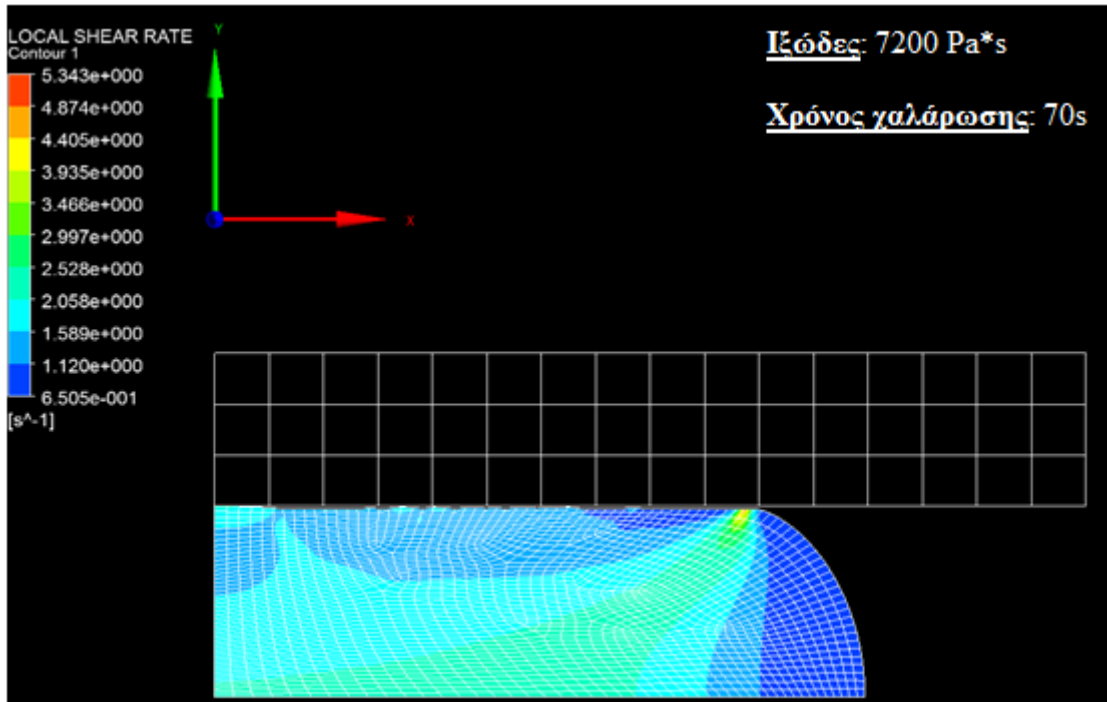
Σχήμα 7. Προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης για το Πείραμα 1.



Σχήμα 10. Προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης για το Πείραμα 2.



Σχήμα 13. Προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης για το Πείραμα 3.

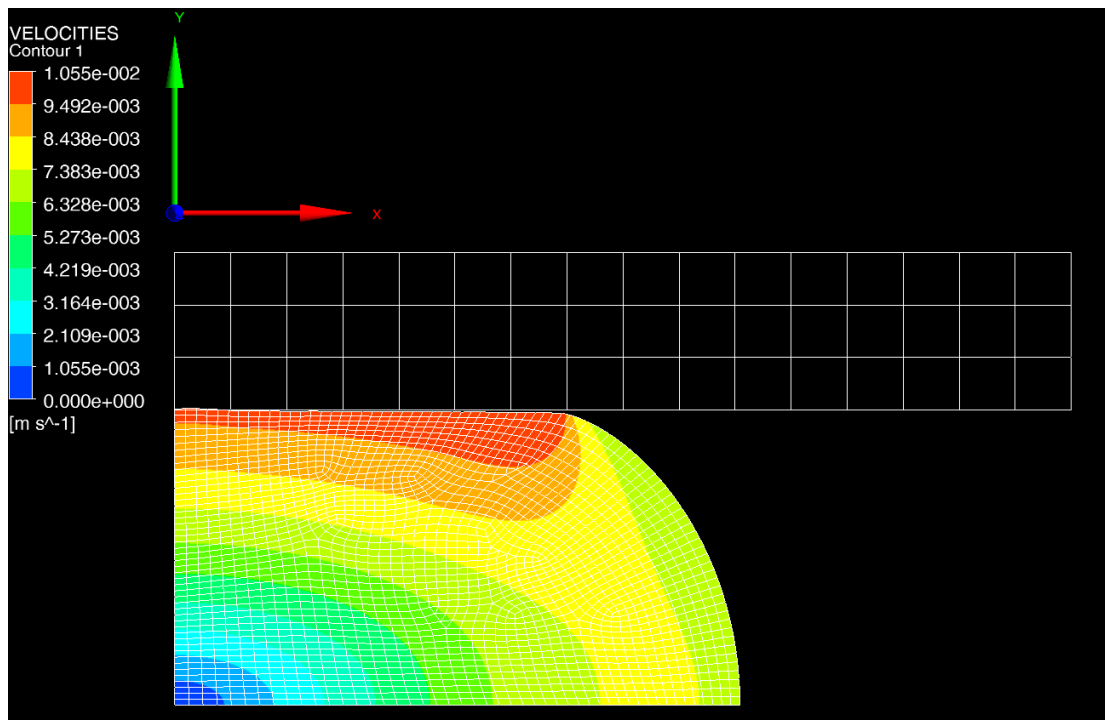


Σχήμα 16. Προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης για το Πείραμα 4.

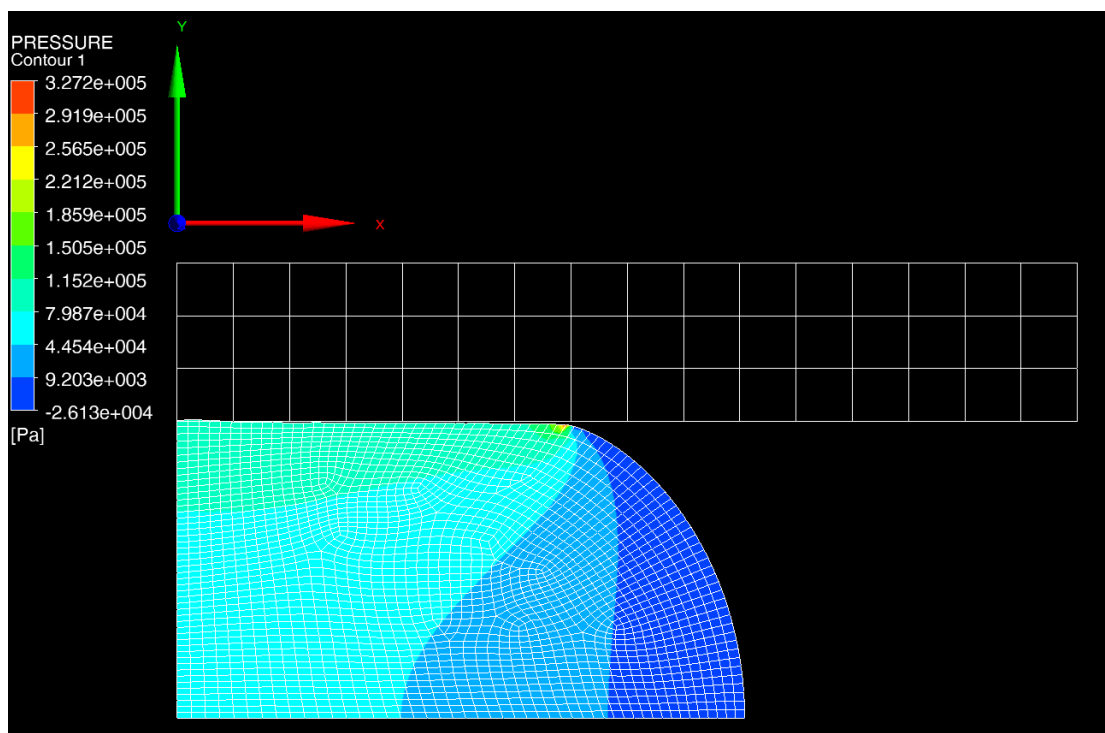
5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων με το Μοντέλο White – Metzger

Για μία πιο λεπτομερή ανάλυση του φυσικού μοντέλου, εφαρμόστηκε το μοντέλο του White – Metzger. Αυτό το μοντέλο είναι πιο εξειδικευμένο πάνω στα ιξωδοελαστικά τρόφιμα σε σύγκριση με του Maxwell. Είναι στην ουσία ένα τροποποιημένο μοντέλο του Maxwell που επιτρέπει την ενσωμάτωση πειραματικών δεδομένων στο ιξώδες ως συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης. Το White – Metzger απαιτεί την εφαρμογή περισσότερων τιμών, που σχετίζονται με το ιξώδες και το χρόνο χαλάρωσης, για την εκτέλεση του προγράμματος, οι οποίες αναφέρθηκαν στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Οπότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα 2 διαφορετικά πειράματα είναι τα εξής:

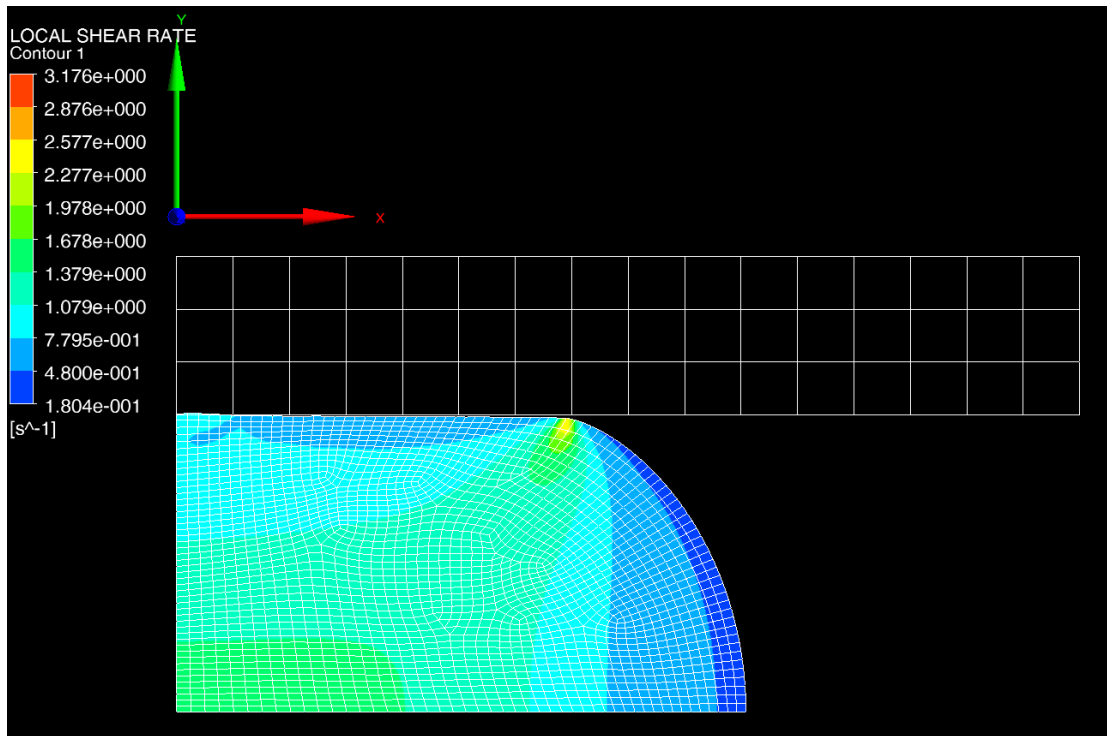
1. Για τη περίπτωση που κατεβαίνει η πλάκα και συμπιέζει το ημισφαιρικό σχήμα (ζύμη άρτου), τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 17, 18 και 19.



Σχήμα 17. Προφίλ ταχύτητας μετά από συμπίεση της ζύμης άρτου από πάνω προς τα κάτω.

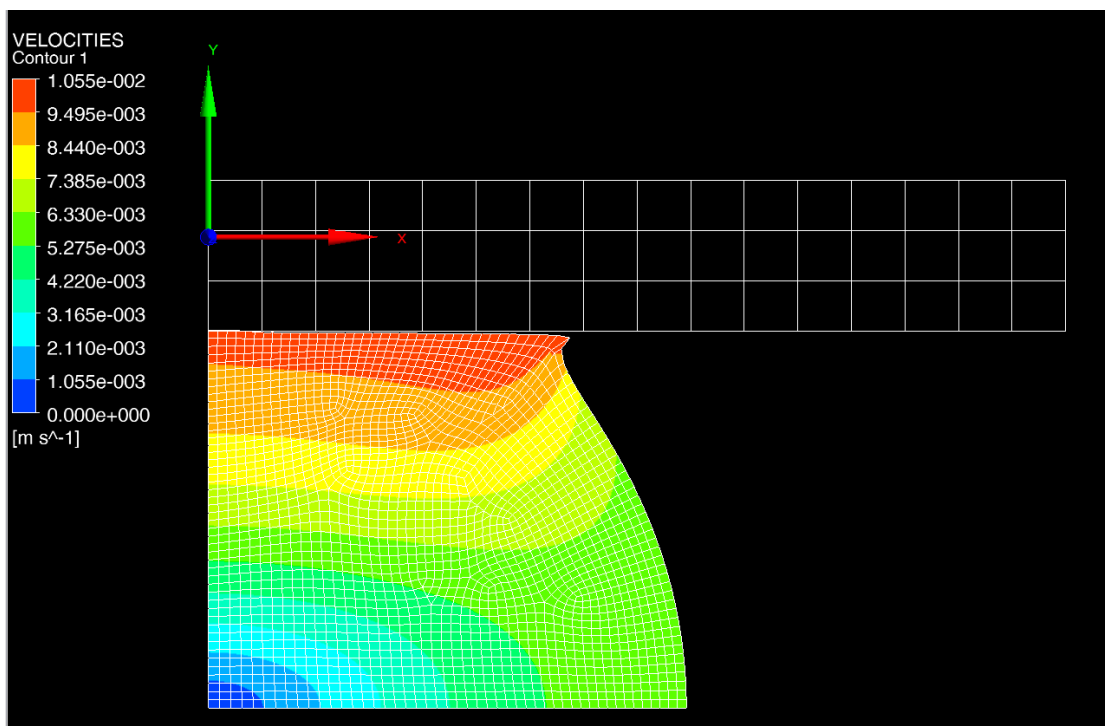


Σχήμα 18. Προφίλ πίεσης μετά από συμπίεση της ζύμης άρτου από πάνω προς τα κάτω.

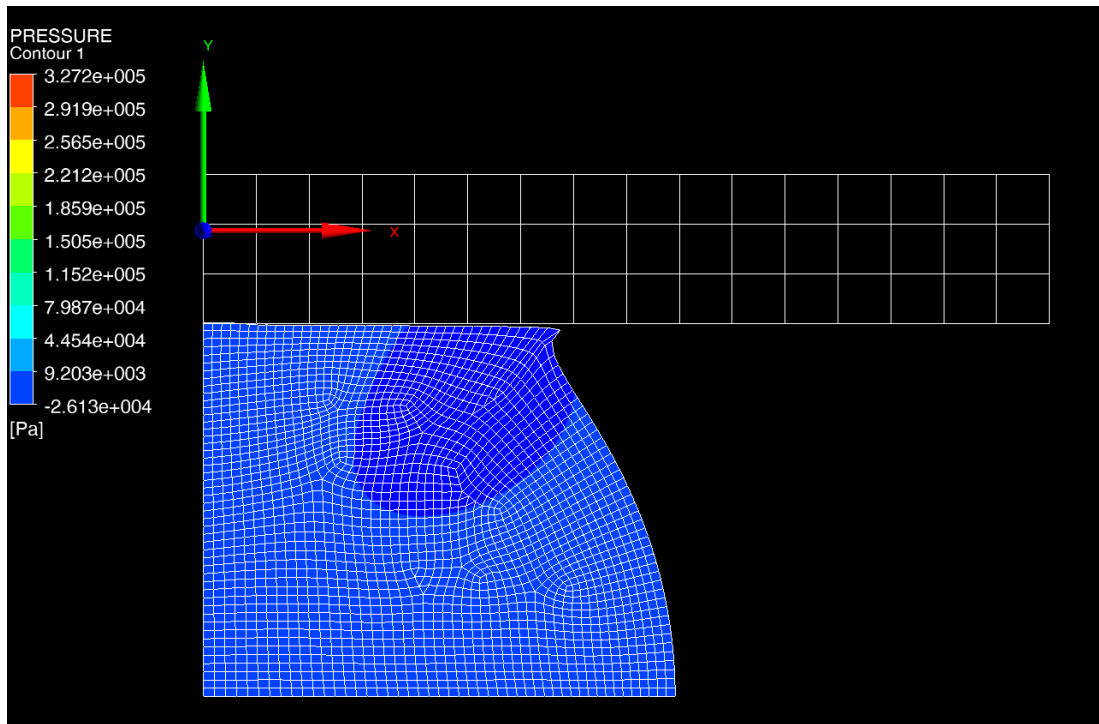


Σχήμα 19. Προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης μετά από συμπίεση της ζύμης άρτου από πάνω προς τα κάτω.

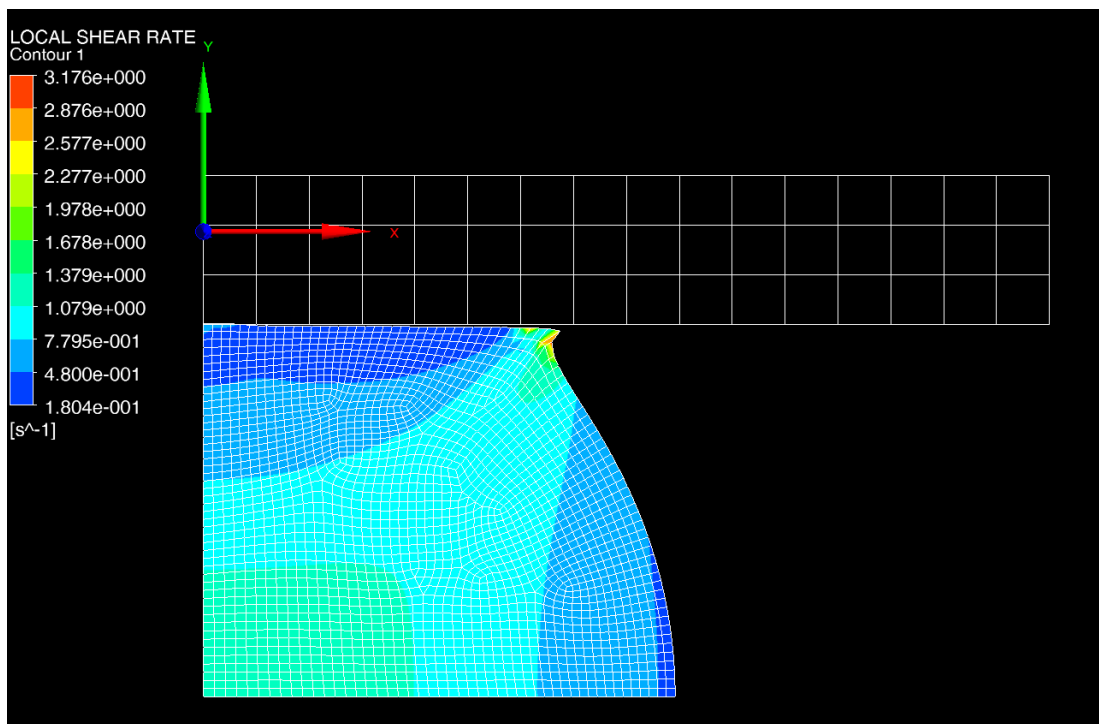
2. Για τη περίπτωση που ανεβαίνει η πλάκα και συμπιέζει το ημισφαιρικό σχήμα (ζύμη άρτου), τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 20, 21 και 22.



Σχήμα 20. Προφίλ ταχύτητας μετά από συμπίεση της ζύμης άρτου από κάτω προς τα πάνω.



Σχήμα 21. Προφίλ πίεσης μετά από συμπίεση της ζύμης άρτου από κάτω προς τα πάνω.



Σχήμα 22. Προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης μετά από συμπίεση της ζύμης άρτου από κάτω προς τα πάνω.

6. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση τεσσάρων διαφορετικών πειραμάτων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα αυτά θα αναλυθούν σε δύο μέρη, το ένα σύμφωνα με το μοντέλο του Maxwell και το άλλο με το μοντέλο του White–Metzer. Εν συνεχεία, θα αναλυθούν και για τα δύο μοντέλα τα προφίλ ταχυτήτων, πίεσης και τοπικού ρυθμού διάτμησης.

6.1 Συμπεράσματα μοντέλου Maxwell

A. Συμπεράσματα που αφορούν το προφίλ ταχύτητας:

Παρατηρώντας το Σχήμα 5, φαίνεται πως υπάρχει μία μικρή περιοχή με μπλε χρώμα, το οποίο σημαίνει ότι σε εκείνο το σημείο είναι η χαμηλότερη ταχύτητα. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ιξώδες του τροφίμου, διότι όπως η πλάκα πιέζει το τρόφιμο, αναπτύσσεται εσωτερική τριβή μεταξύ των μορίων. Επίσης, οφείλεται στο σχήμα, επειδή το σημείο που ακουμπάει η πλάκα το τρόφιμο, χρειάζεται περισσότερη ώρα για να συμπιεστεί, ενώ στη περιοχή που δεν ακουμπάει η πλάκα (κόκκινο χρώμα) η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη, επειδή μπορεί να συμπιεστεί πιο εύκολα και γρήγορα. Το σημείο στην ελεύθερη επιφάνεια που δεν πιέζεται άμεσα (πορτοκαλί χρώμα), κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα σε σχέση με το σημείο του κόκκινου χρώματος, διότι σε εκείνο το σημείο υπάρχουν δύο ανταγωνιστικές μεταξύ τους ροές, όπου η μία ροή, λόγω του ιξώδους το υποχρεώνει, χωρίς να πιέζεται, να εξακολουθήσει να κινείται, ενώ το επάνω μέρος επειδή δεν πιέζεται και να επιβραδύνει λόγω χαλάρωσης (recoiling).

Στο Σχήμα 8, η περιοχή με μπλε χρώμα είναι ακριβώς ίδια με του Σχήματος 5 και ισχύουν τα ίδια πράγματα. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτά τα δύο σχήματα είναι ο χρόνος χαλάρωσης, που είναι διπλάσιος από το χρόνο του προηγούμενου πειράματος, που σημαίνει ότι έχει μεγαλύτερη ρεολογική «μνήμη». Επειδή ο χρόνος χαλάρωσης είναι μεγαλύτερος στο δεύτερο πείραμα, σημαίνει ότι η ταχύτητα δεν είναι τόσο μεγάλη, διότι σε 2s θα αργήσουν να επανασυνδεθούν οι δεσμοί μεταξύ τους. Επίσης, και στο Σχήμα 11 υπάρχουν ίδια αποτελέσματα για το μπλε χρώμα, και φαίνεται ότι εδώ είναι πιο αδύνατο το πλέγμα, δηλαδή υπάρχουν λιγότεροι δεσμοί για αυτό και υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με τα προηγούμενα αποτελέσματα. Στη περίπτωση του Σχήματος 14 λόγω της μείωσης του ιξώδους και της αύξησης του χρόνου χαλάρωσης, το τρόφιμο συμπεριφέρεται σαν ιξωδοελαστικό

υγρό, ενώ στις άλλες περιπτώσεις σαν ιξωδοελαστικό στερεό. Ακόμα, επειδή ο χρόνος χαλάρωσης είναι μεγαλύτερος, επανασυνδέονται πολύ πιο αργά οι δεσμοί μεταξύ τους.

B. Συμπεράσματα που αφορούν το προφίλ πίεσης:

Σύμφωνα με τα Σχήματα 6,9,12 και 15, και παρατηρώντας τα ίδια χρώματα (μπλε και κόκκινο) στα ανάλογα αποτελέσματα, φαίνεται πως όσο αυξάνεται ο χρόνος χαλάρωσης, η πίεση μικραίνει, κάτι που είναι αναμενόμενο. Αυτό συμβαίνει διότι το τρόφιμο για να μπορέσει να συμπιεστεί σε 1s, πρέπει να ασκηθεί μεγαλύτερη πίεση για να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρατηρώντας το Σχήμα 6, το σημείο με μπλε χρώμα έχει αρνητική τιμή πίεσης που σημαίνει ότι οι δεσμοί είναι πολύ ισχυροί και προσπαθούν να επανασυνδεθούν μεταξύ τους, οπότε συμβαίνει συρρίκνωση και όχι έκταση.

Στο Σχήμα 9 αλλάζει το σημείο επαφής με την πλάκα και σε συνδυασμό με τα 2s του χρόνου χαλάρωσης, αλλάζει και η ενεργειακή ποιότητα των δεσμών. Άρα, σαν γενικό συμπέρασμα και από τα τέσσερα σχήματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω είναι ότι, όσο αυξάνεται ο χρόνος χαλάρωσης σημαίνει ότι αυτοί οι δεσμοί είναι είτε πιο αδύναμοι ή ότι υπάρχει μικρότερη πυκνότητα δεσμών στη συγκεκριμένη μάζα. Επίσης, όσο αυξάνεται ο χρόνος χαλάρωσης, τόσο περισσότερο χαλαρώνει το τρόφιμο και μπορεί να υποστεί σχεδόν μόνιμη παραμόρφωση. Οπότε, λόγω της διαφοροποίησης των τιμών πίεσης δεν υπάρχουν συνθήκες εμβολικής ροής (ίδια ταχύτητα και άρα ίδια πίεση), και σε κανένα από τα αποτελέσματα πίεσης δεν υπάρχει το κόκκινο χρώμα, δηλαδή αυξημένη πίεση.

C. Συμπεράσματα που αφορούν το προφίλ τοπικού ρυθμού διάτμησης:

Το Σχήμα 7 απεικονίζει το προφίλ των ρυθμών διάτμησης ενός παχύρευστου υλικού, που εξαιτίας του υψηλού ιξώδους και της τριβής, κινείται με χαμηλό ρυθμό διάτμησης, συγκεκριμένα στο άκρο της μάζας του δείγματος που δεν ασκείται η πίεση. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει μετάδοση της ορμής, η οποία σχετίζεται με το ρυθμό διάτμησης και το ιξώδες. Το υλικό ολισθαίνει με πολύ χαμηλή ταχύτητα κυρίως λόγω της ώθησης που δέχεται από την υπόλοιπη μάζα που βρίσκεται υπό σταθερή πίεση. Η κίτρινη περιοχή οφείλεται λόγω ανάπτυξης δευτερευουσών ροών (end effects, φαινόμενα άκρων).

Παρατηρώντας το Σχήμα 10 και εδώ φαίνεται η μετάδοση της ορμής και ότι μειώθηκε ο ρυθμός διάτμησης και που εμφανίζεται ανομοιογενής, διότι αυξήθηκε ο χρόνος χαλάρωσης. Στη περίπτωση με χρόνο χαλάρωσης 5s (Σχήμα 13) είναι ακόμη πιο αδύναμοι οι δεσμοί με μικρότερο ρυθμό διάτμησης στη περιοχή με μπλε χρώμα. Λόγω αυτών των δεσμών και του μεγάλου ιξώδες, ο ρυθμός διάτμησης είναι σχετικά μεγάλος στη μεγαλύτερη μάζα του

τροφίμου, εκτός από το τελευταίο τμήμα, το οποίο δεν έρχεται σε επαφή. Στο Σχήμα 16 ισχύουν όσα προαναφέρθηκαν πιο πριν, αλλά υπάρχουν ακόμη πιο αδύναμοι δεσμοί, εξαιτίας του μεγάλου χρόνου χαλάρωσης στα 70s.

6.2 Συμπεράσματα μοντέλου White - Metzger

Στο Σχήμα 17 ο βαθμός παραμόρφωσης είναι πολύ μικρός. Λόγω ισχυρού πλέγματος που δημιουργεί η γλουτένη, εμφανίζεται περισσότερη αντίσταση σε σχέση με το άλλο μοντέλο του Maxwell, στο οποίο η ζύμη που χρησιμοποιήθηκε δεν περιέχει γλουτένη. Στο σημείο που γίνεται η πρώτη επαφή της πλάκας με το τρόφιμο είναι λογικό να υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες, ενώ στη περιοχή με το μπλε χρώμα οι ταχύτητες είναι πολύ μικρότερες έως και μηδενικές. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει μεγάλη ελαστικότητα και καθώς συμπιέζεται το τρόφιμο η ταχύτητα σε εκείνο το σημείο η ταχύτητα μειώνεται σε εκείνο το σημείο λόγω φαινομένων προσπάθειας επαναφοράς των δεσμών στη πρότερα τους κατάσταση και πιθανόν θέση.

Μεγάλη πίεση εμφανίζεται στο κίτρινο σημείο του Σχήματος 18, επειδή οι δεσμοί είναι πάρα πολύ ισχυροί λόγω της μεγάλης ελαστικότητας, και αυτό το σημείο δεν πιέζεται, δηλαδή μόλις έρθει σε επαφή με την πάνω πλάκα αποκτά μεγάλη πίεση. Όπως φαίνεται όλη η μάζα κινήθηκε προς τη δεξιά πλευρά και παραμορφώθηκε, λόγω της εσωτερικής συμπίεσης του τροφίμου από την πλάκα χωρίς να ασκηθεί δύναμη. Άρα, επανέρχεται και για αυτό το λόγω έχει αρνητική τιμή πίεσης, δηλαδή εμφανίζει ανάκαμψη σε αυτή τη περιοχή εξαιτίας του ισχυρού πλέγματος που έχει η γλουτένη.

Παρατηρώντας το Σχήμα 19 φαίνεται ότι ο ρυθμός διάτμησης εμφανίζει παντού αντίσταση στη ροή λόγω της ελαστικότητας. Στο κίτρινο σημείο συμβαίνει και ισχύει το ίδιο πράγμα με αυτό που αναφέρθηκε στο Σχήμα 18. Οι τιμές των ρυθμών διάτμησης είναι πολύ μικρές, διότι το τρόφιμο δέχθηκε την πίεση από την πλάκα και έχοντας μικρό χρόνο χαλάρωσης 1s εμφανίζονται φαινόμενα αδράνειας (yield stress).

Στο Σχήμα 20 απεικονίζεται η ταχύτητα με υψηλότερη τιμή (κόκκινο χρώμα) στη επάνω περιοχή του τροφίμου, γιατί στην αρχή ήταν το πρώτο σημείο που δέχθηκε τη συμπίεση από την πλάκα και μετά κατά την αποσυμπίεση είναι η πρώτη περιοχή που θα αρχίσει να κινείται λόγω της ώθησης από το κάτω μέρος. Από την άλλη πλευρά, το σημείο με μπλε χρώμα έχει τη χαμηλότερη τιμή ταχύτητας, επειδή είναι η τελευταία περιοχή που θα μετακινηθεί προς τα

πάνω, και από πάνω υπάρχει το βάρος, το οποίο έχει συμπιεστεί. Και σε αυτή τη περίπτωση ισχύει το φαινόμενο της αδράνειας.

Η πίεση του Σχήματος 21 εμφανίζεται να έχει αρνητική τιμή στη περιοχή με το σκούρο μπλε και ανεβεί πιο εύκολα προς τα πάνω, γιατί υπάρχει πολύ μικρότερη επίδραση από όλο το υπόλοιπο υλικό, και είναι το σημείο που δεν δέχεται καθόλου πίεση. Όλο το υπόλοιπο μπλε χρώμα φαίνεται να είναι ισότροπο σύστημα, δηλαδή υπάρχει παντού ίδια πίεση, και να έχει υπολειμματική δράση (θετικές τιμές). Και εδώ υπάρχει το φαινόμενο αδράνειας, δηλαδή ενώ έχει αποσυμπιεστεί αυτό εξακολουθεί να δείχνει ότι έχει πίεση.

Ο ρυθμός διάτμησης του Σχήματος 22 έχει τη μεγαλύτερη τιμή με το κόκκινο χρώμα, επειδή δεν υφίσταται καθόλου πίεση, οπότε επανέρχεται πολύ πιο εύκολα και υπόκειται σε επανάκαμψη. Από τη στιγμή που έχει μετακινηθεί προς τα πάνω η πλάκα με το τρόφιμο αυτό κινείται, και η ταχύτητα με την οποία κινείται (ρυθμός διάτμησης) είναι συνάρτηση της σταθεράς του χρόνου που απαιτείται για να γίνει η επανασύνδεση των δεσμών. Στη περιοχή του γαλάζιου χρώματος παρατηρείται πως γίνεται πιο γρήγορα η διασύνδεση μεταξύ των δεσμών, γιατί δεν υπάρχει επαφή με τη πλάκα. Το μπλε χρώμα σημαίνει ότι επειδή υπάρχουν τριβές ανάμεσα στη πλάκα και στο τρόφιμο, και απομακρυνθούν μεταξύ τους οι δεσμοί από τη συμπίεση είναι πιο δύσκολο να συνδεθούν ξανά, και για αυτό υπάρχουν μικρότερες τιμές ρυθμού διάτμησης.

Σαν γενικό συμπέρασμα και από τα δύο μοντέλα είναι πως το πλέγμα του μοντέλου Maxwell είναι σαφώς πιο αδύναμο. Αυτό συμβαίνει επειδή στο μοντέλο του Maxwell η ζύμη είναι cassava, δηλαδή η πρωτεΐνη αυτής δεν έχει γλουτένη. Ενώ, από την άλλη πλευρά στο μοντέλο του White – Metzger η ζύμη είναι από σιτάρι, δηλαδή η πρωτεΐνη έχει γλουτένη.

7. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε θα μπορούσε να επεκταθεί στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας στις ακόλουθες κατευθύνσεις:

- Εφαρμογή σε διαφορετικά τρόφιμα με διαφορετικές τιμές ιδιοτήτων (κυρίως ιξώδους) και σύγκριση των αποτελεσμάτων
- Εφαρμογή του μοντέλου για διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς
- Επίλυση του μοντέλου σε διαφορετικές συνθήκες και μεγαλύτερους χρόνους συμπίεσης και χαλάρωσης ώστε να γίνει πιο εμφανής η εξωδοελαστική συμπεριφορά
- Επέκταση του μοντέλου σε μη ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, ώστε να μελετηθεί και η εξάρτηση της ρεολογικής συμπεριφοράς του τροφίμου από την θερμοκρασία
- Σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα για την πληρέστερη πιστοποίηση του μοντέλου

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία:

- ❖ Abduljalil A. A., Mat S. B., Sopian K., Sulaiman M. Y., Abdularhman M. T., (2013). *CFD applications for latent heat thermal energy storage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, pp 353 – 363
- ❖ Dhanasekharanm M., Huangh H., Kokin J.L., (1999). *Comparison Of Observed Rheological Properties Of Hard Wheat Flour Dough With Predictions Of The Giesekus-Leonov, Whita-Metzner And Phan-Thien Tanner Models*. Department of Food Science, pp 603 – 623
- ❖ Engelman M. S., (1978). *FIDAP (A Fluid Dynamics Analysis Program)*. Advances in Engineering Software, 4, pp 163 – 166
- ❖ Fox P. F., Guinee, T. P., Cogan T. M., McSweeney P. L. H., (2000). *Fundamentals of cheese science*, Aspen Publishers, Gaithersburg, Maryland
- ❖ Gunasekaran S., Ak M., (2000). *Dynamic oscillatory shear testing of foods – selected applications*. Trends in Food Science and Technology, 11, pp 115 – 127
- ❖ Gupta S., Uday V., Ranghuwanshi A. S., Chowshey S., Das S. N., Suresh S., (2013). *Simulation of Blow Molding Using ANSYS Polyflow*. APCBEE Procedia, 5, pp 468 – 473
- ❖ Huong T. L. N., Naksit P., Vilia D. P., Nitin M., Stefan K., (2018). *Physicochemical and viscoelastic properties of honey from medical plants*. Food Chemistry, 241, pp 143 – 149
- ❖ Jaskulski M., Atuonwn J. C., Tran T. T. H., Stapley A. G. F., Tsotsas E., (2017). *Predictive CFD modeling of whey protein denaturation in skim milk spray drying powder production*. Advanced Powder Technology, 28, pp 3140 – 3147
- ❖ Kapplmayr T., Luger H. – J., Burzic I., Battisti M. G., Perko L., Friesenbichler W., Miethlinger J., (2016). *A novel online rheometer for elongation viscosity measurement of polymer melts*. Polymer Testing, 50, pp 208 – 215
- ❖ Kuriakose R., Anandharamakvishnan C., (2010). *Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products*. Trends in Food Science and Technology, 21, pp 383 – 398

- ❖ Mehdi M. M., Fariborz R., (2017). *Analysis of axial annular flow for viscoelastic fluid with temperature dependent properties*. International Journal of Thermal Sciences, 120, pp 162 – 174
- ❖ Munizaga G., Barbosa – Canovas G., (2005). *Rheology for the food industry*. Journal of Food Engineering, 67, pp 147 – 156
- ❖ Norton T., Sun D. W., (2006). *Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient desing and analysis tool for the food industry*. Trends in Food Science and Technology, 17, pp 600 – 620
- ❖ Qingsong T., Shaofan L., (2017). *An updated Lagrangian particle hydrodynamics (ULPH) for Newtonian fluids*. Journal of Computational Physics, 348, pp 493 – 513
- ❖ Rao M. A., Rizvi S. H., Datta K. A., (2005). *Engineering Properties Of Foods*. CRC Press, 3rd, pp 41 – 47
- ❖ Rinaldi M., Molavasi M., Cordioli M., Barbanti D., (2018). *Investigation of influence of container geometry and starch concentration on thermal treated in – package food models by means of Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Food and Bioproducts Processing, 108, pp 1 – 11
- ❖ Rodriguez-Sandoval E., Fernandez-Quintero A., Cuvelier G., (2009). *Stress relaxation of reconstituted cassava dough*. LWT - Food Science and Technology, 42, pp 202 - 206
- ❖ Steffe J. F., (1996). *Rheological methods in food process engineering*. Professor of Food Process Engineering, 2nd, pp 1 – 300
- ❖ Xia B., Sun D. – W., (2002). *Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry*. Computers and Electronics in Agriculture, 34, pp 5 – 24
- ❖ Yanxia W., Yanbin L., Rui X., Yunfei X., Jian Y., Ji Z., (2015). *The flow behavior thixotropy and dynamical viscoelastic of fenugreek gum*. Journal of Food Engineering, 166, pp 21 – 28
- ❖ Wenchang T., Wenxiao P., Mingyu Y., (2003). *A note on unsteady flows of a viscoelastic fluid with the fractional Maxwell model between two parallel plates*. International Journal of Non-Linear Mechanics, 38, pp 645 – 650

Ελληνική Βιβλιογραφία:

- ❖ Belitz H. – D., Grosch W., Schieberle P., (2015). *Χημεία Τροφίμων*. Εκδόσεις Τζιόλα, 4^η, pp 338 – 343
- ❖ Τζιά Κ., Ταούκης Π., Ωραιπούλου Β., (2007). *Επιστήμη και Μηχανική Τροφίμων: Συστατικά – Ιδιότητες – Ρεολογία – Μικροβιολογία – Ποιότητα – Συσκευασία*. Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα, pp 292 – 309
- ❖ Κεφαλάς Π. Σ., (2009). Τρόφιμα από σιτηρά. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης. 1^η, pp 40 – 43
- ❖ McCabe W., Smith J., Harriot P., (2016). *Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής*. Εκδόσεις Τζιόλα, 7^η, pp 41 – 42
- ❖ Παπαιωάννου Θ. Α., (2002). *Μηχανική των Ρευστών*. 2^η, pp 222 – 259
- ❖ Ριτζούλης Χ., (2011). *Φυσικοχημεία Τροφίμων*. Εκδόσεις Τζιόλα, pp 157 – 1
- ❖ Φάτσης Α., (2018). *Στοιχεία Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής – Αεροδυναμικής*. Σημειώσεις εργαστηρίου θερμοκινητήρων και θερμικών στροβιλομηχανών, pp 5 – 6
- ❖ Versteeg H. K., Malalasekera W., (2016). *Εισαγωγή στην υπολογιστική ρευστοδυναμική μέθοδος των πεπερασμένων όγκων*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η, pp 15 – 20

Ιστοσελίδα:

www.ansys.com