



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ &
ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

Ρεολογική μελέτη συστημάτων μαγιονέζας

Επιμέλεια
Κανάρης Ιωάννης
Αδαμοπούλου Καλλιόπη

Επίβλεψη
Ραφαηλίδης Στυλιανός
Ριζούλης Χρήστος

Θεσσαλονίκη 2010

ΡΕΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΑΓΙΟΝΕΖΑΣ

ΚΑΝΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ – ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

ΥΠΟΒΟΛΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ, ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΜΕΡΟΣ ΤΩΝ
ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΝΟΜΗ ΤΟΥ ΠΤΥΧΙΟΥ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΤΟΥ ΑΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2010

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ

ΡΑΦΑΗΛΙΔΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΡΙΤΖΟΥΛΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα επιθυμούσαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους καθηγητές μας κ. Στυλιανό Ραφαηλίδη και κ. Χρήστο Ριτζούλη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους, καθ' όλο το διάστημα προετοιμασίας και συγγραφής της εργασίας αυτής.

ΡΕΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΑΓΙΟΝΕΖΑΣ

ΚΑΝΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ – ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογίας Τροφίμων και Διατροφής

Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400

Θεσσαλονίκη Τ.Θ. 141

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η ρεολογία συστημάτων μαγιονέζας, με κλάσμα όγκου διεσπαρμένης λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8. Έγιναν μετρήσεις λιπανόμενης συμπιεστής ροής, διατμητικής ιξωδοελαστικότητας με παλινδρόμηση και δοκιμές ερπυσμού (creep).

Σε συνθήκες λιπανόμενης συμπιεστής ροής βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης και της ταχύτητας συμπίεσης. Βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης και του κλάσματος όγκου της λιπαρής φάσης, καθώς για σταθερό διαξονικό ρυθμό τάνυσης, η αύξηση του κλάσματος όγκου προκαλεί αντίστοιχη αύξηση στις τιμές του η_B^+ .

Οι μετρήσεις διατμητικής παλινδρόμησης έδειξαν αντίστοιχη συσχέτιση του συντελεστή αποθήκευσης G' με το κλάσμα όγκου της διεσπαρμένης φάσης. Αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη σαφών δυνάμεων συνοχής μεταξύ των σταγονιδίων. Οι δυνάμεις αυτές αυξάνουν με τον αριθμό των λιποσφαιριδίων και πρέπει να αποδοθούν στη γεφύρωση των λιποσφαιριδίων. Τα δεδομένα υπακούουν στους κανόνες των Princen και Kiss για τη ρεολογία υπέρπυκνων γαλακτωμάτων. Τέλος, βρέθηκε ότι υφίσταται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της αυξημένης αντοχής στην επιμήκυνση σε σχέση με την αντίστοιχη αύξηση του κλάσματος όγκου, η οποία πρέπει αν αποδοθεί πάλι σε αυξημένες δυνάμεις συνοχής μεταξύ γειτονικών λιποσφαιριδίων, από γεφύρωση.

Περιεχόμενα

1. Υπέρπυκνα γαλακτώματα

1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Παρασκευή υπέρπυκνων γαλακτωμάτων	2
1.3 Σταθερότητα υπέρπυκνων γαλακτωμάτων	2

2. Ρεολογία υπέρπυκνων γαλακτωμάτων

2.1 Αρχές της ρεολογίας πηκτών και κολλοειδών αιωρημάτων	4
2.2 Εκτατική ροή (extensional flow)	4
2.3 Μονοαξονική τάνυση (uniaxial extension)	5
2.4 Διαξονική τάνυση (biaxial extension)	6
2.5 Δοκιμές μικρής παραμόρφωσης	10
2.5.1 Δυναμική δοκιμή (ταλάντωσης)	10
2.5.2 Δοκιμή ερπυσμού (creep)	13

3. Πειραματικό μέρος

3.1 Προετοιμασία μαγιονέζας	17
3.2 Πείραμα διαξονικής τάνυσης με λίπανση	17
3.3 Πείραμα δυναμικής δοκιμής ταλάντωσης και ερπυσμού	18
3.4 Σκοπός	19

4. Αποτελέσματα

4.1 Δοκιμές συμπίεσης	20
4.2 Δοκιμές διάτμησης	25
4.3 Δοκιμές ερπυσμού	30

5. Συμπεράσματα

6. Βιβλιογραφία

Παράρτημα Α

Παράρτημα Β

1. Υπέρπυκνα γαλακτώματα

1.1 Εισαγωγή

Τα υπέρπυκνα γαλακτώματα αποτελούν μια ενδιαφέρουσα ομάδα γαλακτωμάτων και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εσωτερική τους φάση παρουσιάζει κλάσμα όγκου που υπερβαίνει το 0.74. Μακροσκοπικά συμπεριφέρονται σαν ιξωδοελαστικές πηκτές, με τη μαγιονέζα να αποτελεί ένα καλό παράδειγμα (*Friberg et al., 2004*). Η δομή τους αποτελείται από πολύεδρα ή/και πολυδιασπαρμένα σταγονίδια (διασπαρμένη ή εσωτερική φάση) τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα λεπτό φιλμ της συνεχούς φάσης (εξωτερική φάση), και η δομή αυτή παραπέμπει στη δομή αερίου-υγρού αφρού.

Τα υπέρπυκνα γαλακτώματα καλούνται και Υψηλής Εσωτερικής Φάσης γαλακτώματα (HIPE) και αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως πηκτές, ως γαλακτώματα δυο υγρών και ως υδρογονανθρακικές πηκτές.

Η εσωτερική ή διασπαρμένη φάση των υπέρπυκνων γαλακτωμάτων μπορεί να είναι είτε πολική είτε μη πολική και όπως συμβαίνει και με τα κοινά γαλακτώματα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: νερού σε έλαιο (W/O) και ελαίου σε νερό (O/W). Παρόλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν και σύμφωνα με άλλα κριτήρια όπως τη μικροδομή της συνεχούς φάσης ή τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των σταγονιδίων της διασπαρμένης φάσης.

Μελέτες της συμπεριφοράς των φάσεων έδειξαν ότι τα υπέρπυκνα γαλακτώματα χωρίζονται σε δυο φάσεις: η μια φάση αποτελείται από διάλυμα επιφανειοδραστικών υπομικκυλίων σε νερό (ή επιφανειοδραστικό διάλυμα σε έλαιο) και η άλλη φάση είναι είτε ένα μικρογαλάκτωμα, είτε μια υγρή κυβική κρυσταλλική φάση.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των σταγονιδίων, τα υπέρπυκνα γαλακτώματα μπορούν να ταξινομηθούν ως κολλοειδή ή μη κολλοειδή. Τα κολλοειδή γαλακτώματα με την παρουσία των ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των σταγονιδίων, δεν χαλαρώνουν και διατηρούν τη σφικτή δομή των σταγονιδίων. Τα μη κολλοειδή γαλακτώματα, όταν έρχονται σε επαφή με τη συνεχή φάση, χαλαρώνουν με τρόπο που το γαλάκτωμα διαστέλλεται ώστε φθάνει στην κατάσταση να γίνει σφαιρικό (*Esquena et al., 2006*).

1.2 Παρασκευή υπέρπυκνων γαλακτωμάτων

Η συμβατική μέθοδος παρασκευής υπέρπυκνων γαλακτωμάτων έγκειται στη διάλυση του κατάλληλου γαλακτωματοποιητή στο συστατικό που θα αποτελέσει τη συνεχή φάση και ακολουθεί η προσθήκη του συστατικού που θα αποτελέσει τη διασπαρμένη φάση, με συνεχή μέτρια ανάδευση.

Επίσης μπορεί να παρασκευαστεί ζυγίζοντας όλα τα συστατικά κατά την τελική σύνθεση και με ανάδευση να παρασκευαστεί το υπέρπυκνο γαλάκτωμα. Αυτή η μέθοδος παρασκευής έχει επονομαστεί ως μέθοδος πολλαπλής γαλακτωματοποίησης, επειδή σε ένα συγκεκριμένο βήμα της γαλακτωματοποίησης το μίγμα αποτελείται από ένα W/O/W γαλάκτωμα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γαλακτωματοποίηση με τη συμβατική μέθοδο και τη μέθοδο πολλαπλής γαλακτωματοποίησης έχει ως αποτέλεσμα η διασπορά της εσωτερικής φάσης να αποτελείται από σχετικά μεγάλα σταγονίδια (η διάμετρος των σταγονιδίων είναι της τάξης των μm).

Μια ενδιαφέρουσα μέθοδος παρασκευής, η οποία παρουσιάζει πλεονέκτημα στην εναλλαγή φάσεων που παράγονται κατά τη διάρκεια της γαλακτωματοποίησης, είναι η αυθόρμητη γαλακτωματοποίηση, η οποία παράγει γαλακτώματα με μικρότερου μεγέθους σταγονίδια από αυτά που λαμβάνουμε με τις άλλες μεθόδους. Η αυθόρμητη γαλακτωματοποίηση βασίζεται στη θερμοκρασία αναστροφής φάσεων (PIT). Η PIT είναι η θερμοκρασία στην οποία το μη ιονικό επιφανειοδραστικό 'πολυοξυαιθυλένιο' αλλάζει προτίμηση της διαλυτότητας του από νερό σε έλαιο και προκαλεί την μετατροπή του γαλακτώματος από O/W σε W/O. Τα υπέρπυκνα W/O γαλακτώματα σχηματίζονται σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία PIT του αντίστοιχου συστήματος, ενώ τα υπέρπυκνα O/W γαλακτώματα σχηματίζονται κάτω από αυτή τη θερμοκρασία (Esquena et al.,2006).

1.3 Σταθερότητα υπέρπυκνων γαλακτωμάτων

Η σταθερότητα των υπέρπυκνων γαλακτωμάτων επηρεάζεται σημαντικά, όπως και στα απλά γαλακτώματα, από τη φύση των συστατικών, το κλάσμα όγκου της διασπαρμένης φάσης, το λόγο βάρους ελαίου/επιφανειοδραστικού, την παρουσία πρόσθετων συστατικών και τη θερμοκρασία. Ο χρόνος που απαιτείται ώστε να γίνει ο διαχωρισμός των φάσεων, το οποίο ποικίλλει από ημέρες, εβδομάδες έως και χρόνια, μπορεί να επιβραδυνθεί σημαντικά με την κατάλληλη επιλογή των προαναφερθέντων μεταβλητών και της θερμοκρασίας (Esquena et al.,2006).

Επίσης η σταθερότητα των υπέρπυκνων γαλακτωμάτων μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά, μειώνοντας τις ελκτικές δυνάμεις van der Waals μεταξύ των σταγονιδίων (Ngee et al.,2009).

Τα υπέρπυκνα γαλακτώματα όπως και τα απλά γαλακτώματα, είναι ετερογενή θερμοδυναμικώς ασταθή φυσικοχημικά συστήματα, και έχουν την τάση να διαχωριστούν έτσι ώστε να μειώσουν την ελεύθερη ενέργεια τους. Σε καθαρές φάσεις (χωρίς πρόσθετες ουσίες), αυτό πραγματοποιείται με ταχεία συνένωση των σταγονιδίων της διασπαρμένης φάσης που πλησιάζουν μεταξύ τους χωρίς να παρεμβαίνει η συνεχής φάση. Η προσρόφηση επιφανειοδραστικών ουσιών μπορεί να παράσχει στο γαλάκτωμα σταθερότητα παρόλο που δε θα αποτρέψει το διαχωρισμό του εν τέλει(Esquena et al.,2006).

2. Ρεολογία υπέρπυκνων γαλακτωμάτων

2.1 Αρχές της ρεολογίας πηκτών και κολλοειδών αιωρημάτων

Η ρεολογία, είναι ο κλάδος της επιστήμης που μελετά τη δομή των υλικών, υποβάλλοντας τα σε παραμόρφωση υπό την επίδραση τάσης (δύναμης/επιφάνεια), που ασκείται σε αυτά σε συνάρτηση με το χρόνο άσκησης της τάσης. Η κατεύθυνση εφαρμογής της δύναμης σε σχέση με την υπό τάση επιφάνεια καθορίζει και τον τύπο της τάσης. Εάν η δύναμη εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια, τότε η τάση ονομάζεται κανονική (normal stress). Σ' αυτή τη περίπτωση το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται η δύναμη θα βρίσκεται υπό καθεστώς συμπίεσης ή εφελκυσμού. Όταν η δύναμη εφαρμόζεται παράλληλα (εφαπτομενικά) με την επιφάνεια του υλικού στην οποία ασκείται, τότε ονομάζεται τάση διάτμησης (shear stress).

Με βάση τα ανωτέρω, έχουν αναπτυχθεί σειρά από ρεολογικές δοκιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τη δομή ενός υλικού ανάλογα με τη φύση του ως ρευστό (αέριο, υγρό), πηκτική ή στερεό.

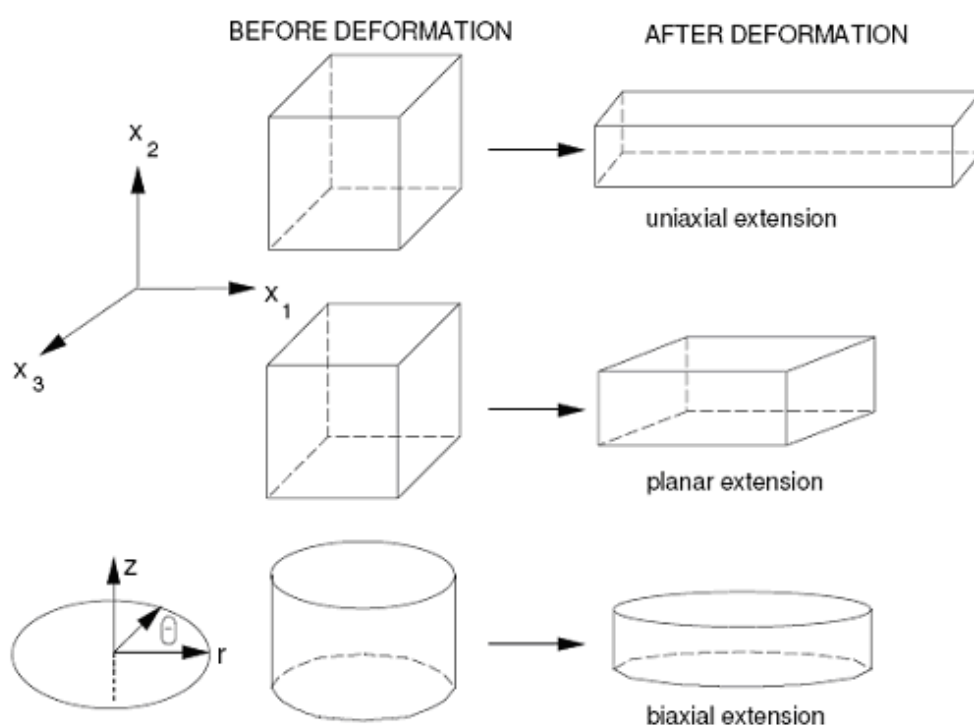
Τα υπέρπυκνα γαλακτώματα έχουν δομή παρόμοια με αυτή των πηκτών (gel) και ως τέτοια θα μελετηθούν στη παρούσα εργασία. Η πηκτική (gel) αποτελεί ειδική περίπτωση δομής ενός υλικού η οποία παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον για την επιστήμη και τη τεχνολογία τροφίμων, γιατί ένας σημαντικός αριθμός προϊόντων τροφίμων είναι σε κατάσταση πηκτής, πχ. μαρμελάδες, γιαούρτη κλπ. Ένα υγρό υλικό που περιέχει μεγαλομόρια, μπορεί να μεταπέσει σε κατάσταση πηκτής όταν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, στη μάζα του αναπτυχθούν σταυροειδείς δεσμοί διασύνδεσης μεταξύ των μεγαλομορίων. Συνέπεια των δεσμών αυτών, η μάζα του υλικού μπορεί να είναι αυτοϋποστηριζόμενη δίχως να απαιτείται η τοποθέτηση του σε ένα περιέκτη, ώστε η δομή του να μη καταρρεύσει. Οι πηκτές μελετούνται τόσο υπό καθεστώς συμπίεσης, όσο και υπό καθεστώς διάτμησης.

2.2 Εκτατική ροή (extensional flow)

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι εκτατικής ροής :

- μονοαξονική (uniaxial)
- διαξονική (biaxial)
- επίπεδη (planar)

Κατά την μονοαξονική εκτατική ροή, το υλικό υπόκειται σε τάνυση προς μια κατεύθυνση, με αντίστοιχη μείωση μεγέθους προς τις άλλες δύο κατευθύνσεις. Κατά την επίπεδη εκτατική ροή, ένα στρώμα υλικού υπόκειται σε τάνυση προς την κατεύθυνση x_1 , με αντίστοιχη μείωση στο πάχος του (κατεύθυνση x_2), αλλά το πλάτος του (κατεύθυνση x_3) παραμένει αμετάβλητο. Η διαξονική εκτατική ροή μοιάζει με την μονοαξονική, αλλά συνήθως θεωρείται ως ροή που δημιουργεί ακτινική τάση. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι τρεις εκτατικές ροές.



Σχήμα 2.1 . Μονοαξονική, επίπεδη και διαξονική εκτατική ροή. (Steffe, 1996)

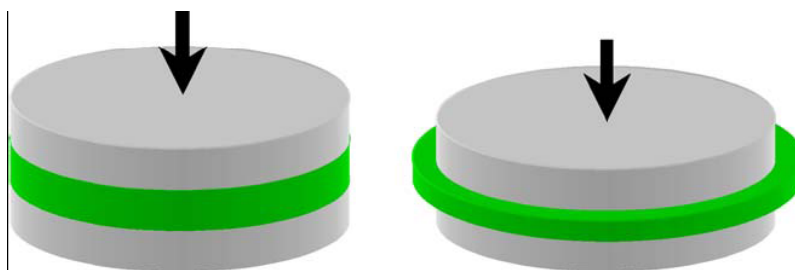
2.3 Μονοαξονική τάνυση (uniaxial extension)

Κατά τη μονοαξονική τάνυση, το υλικό μπορεί να συμπιεσθεί στα όρια της γραμμικής του ελαστικότητας, ώστε να υποστούν θραύση ένα μέρος από τους πλέον ασθενείς δευτερεύοντες δεσμούς, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του υλικού, οι οποίοι όμως ξαναδημιουργούνται με την άρση εφαρμογής της τάσης. Εναλλακτικά, το υλικό συμπιέζεται σε μεγάλο βαθμό παραμόρφωσης οπότε είτε υπόκειται σε μόνιμη παραμόρφωση είτε η δομή του καταρρέει γιατί έχει υποστεί θραύση πολύ μεγάλος αριθμός πρωτεύοντων και δευτερευόντων δεσμών και μάλιστα από τους πλέον ισχυρούς. Οι δοκιμές αυτές εφαρμόζονται στη

βιομηχανία τροφίμων τόσο στο ποιοτικό έλεγχο για την αποτίμηση της μηχανικής αντοχής των υπέρπυκνων γαλακτωμάτων, όσο και για οργανοληπτικό έλεγχο. Επιπλέον, οι δοκιμές είναι χρήσιμες για ερευνητικούς σκοπούς όταν η δομή των υπέρπυκνων γαλακτωμάτων είναι συνεκτική λόγω του μεγάλου αριθμού μεγαλομορίων στη μάζα του δείγματος. Όταν όμως τα μεγαλομόρια είναι σχετικά λίγα και στη μάζα του δείγματος κυριαρχούν τα μικρά μόρια (π.χ. νερού, λιπαρών υλών κλπ) και αποτελούν τη κύρια φάση, τότε αυτές οι δοκιμές μπορεί να προκαλέσουν τη δημιουργία ψευδοφαινομένων, που θα οδηγήσουν σε λανθασμένες μετρήσεις και κατά συνέπεια σε λανθασμένα συμπεράσματα. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της ολίσθησης, κατά την εφαρμογή της τάσης, οπότε οι μετρήσεις που καταγράφονται είναι αμφισβητούμενες.

2.4 Διαξονική τάνυση (biaxial extension)

Διαξονική τάνυση μπορεί να επιτευχθεί κατά τη λιπαινόμενη συμπίεσή ροή (lubricated squeeze flow), σε ένα σύστημα παράλληλων πλακών (Σχήμα 2.2). Σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο της ολίσθησης, που κατά την μονοαξονική τάνυση είναι μειονέκτημα, αποτελεί προαπαιτούμενο. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον διότι δίνει πληροφόρηση για τον τύπο της δομής ενός υλικού, ενώ ταυτόχρονα είναι και εξαιρετικά απλή στην εφαρμογή.

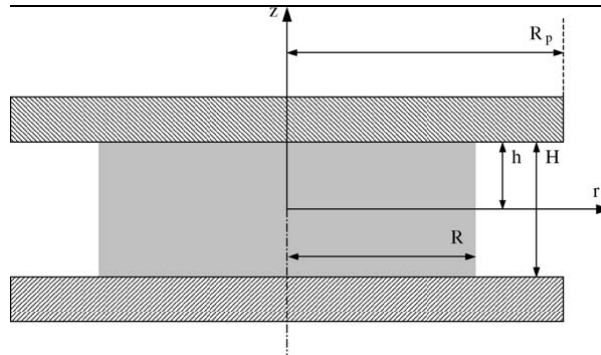


Σχήμα 2.2 . Συμπίεση σε συνθήκες λιπαινόμενης διαξονικής ροής. (Engmann et al., 2005)

Για ένα ασυμπίεστο Νευτώνειο ρευστό που ρέει σε συνθήκες ροής απαλλαγμένης από τριβές, η στιγμιαία δύναμη $F(t)$, που επενεργεί σ' αυτό, δίνεται από τη σχέση :

$$F(t) = -\frac{3\pi\eta R^2(t)}{H(t)} \frac{dH(t)}{dt} \quad (1)$$

όπου η είναι το νευτώνειο ιξώδες,
 $R(t)$ είναι η στιγμιαία ακτίνα και
 $H(t)$ το στιγμιαίο ύψος του υπό συμπίεση δείγματος



Σχήμα 2.3 . Σύστημα συντεταγμένων και βασικές διαστάσεις για τη λιπαινόμενη συμπιεστή ροή(Engmann et al., 2005) .

Αν η επιφάνεια παραμένει σταθερή και η συμπίεση γίνεται με σταθερό ρυθμό V , τότε η σχέση (1) μεταπίπτει στην

$$F(t) = \frac{3\pi\eta R^2 V}{H(t)} \quad (2)$$

Σε περίπτωση που υπάρχει τριβή, τότε η συμπεριφορά του ρευστού διέπεται από τη σχέση γνωστή ως εξίσωση Stefan

$$F(t) = -\frac{3\pi\eta R^4(t)}{2H^3(t)} \frac{dH(t)}{dt} \quad (3)$$

η οποία για σταθερή επιφάνεια και ρυθμό συμπίεσης μεταπίπτει στην

$$F(t) = \frac{3\pi\eta R^4 V}{2H^3(t)} \quad (4)$$

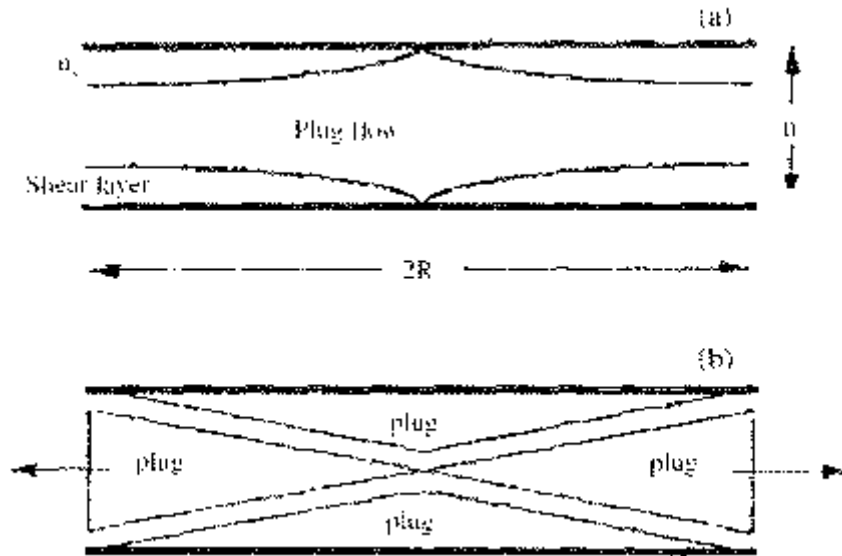
Όταν το ρευστό είναι μη νευτώνιο (ψευδοπλαστικό) τότε για κατάσταση που υπάρχει τριβή, η σχέση γίνεται

$$F(t) = \frac{2\pi K R^{n+3}}{n+3} \left[\frac{2n+1}{n} \right]^n \left[-\frac{dH}{dt} \right]^n \frac{1}{H^{2n+1}} \quad (5)$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση του Scott (Lee & Peleg, 1990), όπου, K είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας και ο n είναι ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς. Στη περίπτωση απουσίας τριβής (λιπαινόμενη ροή), η επίδραση της διαμητρικής τάσης εξαφανίζεται και η εξίσωση γίνεται

$$F(t) = 3^{\frac{n+1}{2}} \pi K R^2 \left[-\frac{dH}{dt} \right]^n \frac{1}{H^n} \quad (6)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, μπορεί να υπολογιστεί το εκτατό ιξώδες (elongational viscosity), με την προϋπόθεση η παραμόρφωση να είναι ομογενής, δηλαδή ότι υπάρχει πλήρης ολίσθηση του δείγματος, που σημαίνει να λαμβάνει χώρα εμβολική ροή (plug flow) στην περιφέρεια του δείγματος, όπως στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 . Μορφή εμβολικής ροής (Engmann et al., 2005)

Οι εξισώσεις που ισχύουν στο πεδίο της ταχύτητας της εκτατής ροής είναι οι ακόλουθες (Chatraei et al., 1981, Campanella, et al., 1987)

$$V_z = \dot{\epsilon}_T H(t) \quad (7)$$

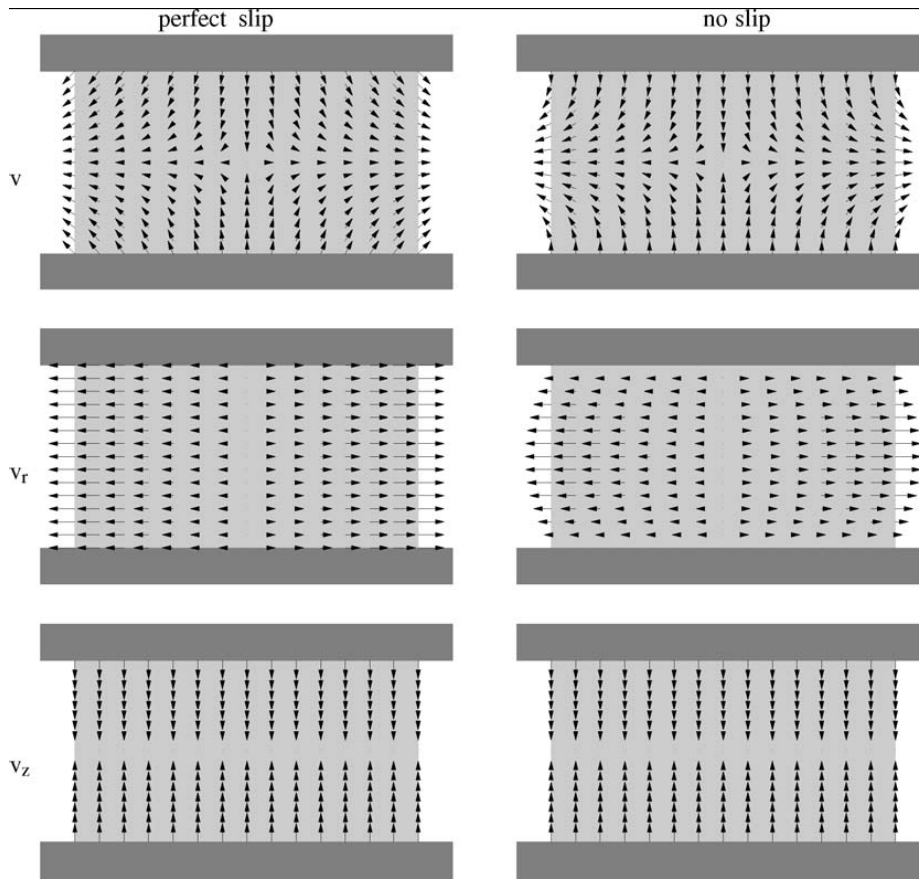
$$V_r = -\dot{\epsilon}_T \frac{r}{2} \quad (8)$$

$$V_\omega = 0 \quad (9)$$

Όπου V_z , V_r and V_ω είναι τα διανυσματικά μεγέθη της ταχύτητας κάθετη, ακτινική και γωνιακή ταχύτητα αντίστοιχα, $H(t)$ είναι το στιγμιαίο ύψος του δείγματος σε χρόνο t και r είναι η ακτινική απόσταση (Σχήμα 2.4).

Ο στιγμιαίος ρυθμός παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}_T$ ορίζεται ως

$$\dot{\epsilon}_T = \left[-\frac{dH(t)}{dt} \right] \frac{1}{H(t)} \quad (10)$$



Σχήμα 2.5 . Τα διανυσματικά μεγέθη της ταχύτητας για συμπιεζόμενη ροή, με τέλεια ολίσθηση και καθόλου ολίσθηση (Engmann et al., 2005) .

Η μέση διαφορά κάθετης (normal) τάσης $\sigma = T_{rr} - T_{zz}$ μπορεί να υπολογιστεί ως η στιγμιαία δύναμη συμπίεσης $F(t)$ που ασκείται στο επίπεδο της επιφάνειας του δείγματος δηλ..

$$\sigma = \frac{F(t)}{\pi R^2} \quad (11)$$

Ο διαξονικός ρυθμός παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}_b$ ορίζεται ως (Chatraei, et al, 1981)

$$\dot{\epsilon}_b = \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_T \quad (12)$$

Από τις προηγούμενες εξισώσεις (11) και (12) ο συντελεστής ανάπτυξης τάσης (stress growth coefficient) $\eta_B^+(t, \dot{\epsilon}_b)$ μπορεί να προσδιορισθεί (Dealy, 1994):

$$\eta_B^+(t, \dot{\epsilon}_b) = \sigma / \dot{\epsilon}_b \quad (13)$$

Η εξίσωση (13) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ασταθής κατάσταση ροής δηλ. είτε η τάση είτε η παραμόρφωση είτε αμφότερες είναι συναρτήσεις του χρόνου (*Shukla et al., 1995*).

Στη περίπτωση που έχει επιτευχθεί σταθερή ροή, ώστε η τάση και η παραμόρφωση να έχουν προσεγγίσει σταθερές τιμές, τότε το εκτατό ιξώδες $\eta_B(\dot{\epsilon}_b)$ προκύπτει από την εξίσωση (13) (*Dealy, 1994*)

$$\eta_B(\dot{\epsilon}_b) = \lim_{t \rightarrow \infty} [\eta_B^+(t, \dot{\epsilon}_b)] \quad (14)$$

2.5 Δοκιμές μικρής παραμόρφωσης

Μέχρι τώρα έγινε αναφορά σε δοκιμές μεγάλης παραμόρφωσης, οι οποίες αν και σημαντικές για το χαρακτηρισμό της δομής ενός υλικού, δεν παρέχουν πληροφόρηση για τη φύση του, κατά πόσο συμπεριφέρεται ως στερεό (ελαστικό) και κατά πόσο ως υγρό (ιξώδες). Για την εκτίμηση της ρεολογικής συμπεριφοράς ενός υλικού (πηκτική, ψευδοπηκτική, πυκνό διάλυμα/αιώρημα), περιγράφονται δύο δοκιμές που διερευνούν τον ιξωδοελαστικό χαρακτήρα των υλικών.

2.5.1 Δυναμική δοκιμή (ταλάντωσης)

Κατά τη δοκιμή αυτή, το δείγμα υποβάλλεται σε περιοδική τάση διάτμησης ή συμπίεσης μέσα στα όρια της γραμμικής ελαστικότητας (μικρό ποσοστό παραμόρφωσης) του. Το δείγμα βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων πλακών εκ των οποίων η κάτω παραμένει ακίνητη ενώ η επάνω κινείται παλινδρομικά και στη περίπτωση της διάτμησης κινείται σε οριζόντια διεύθυνση πάντα σε επαφή με το δείγμα. Αν υποθεθεί ότι εφαρμόζεται απλή ημιτονοειδής διάτμηση τότε η παραμόρφωση γ σε συνάρτηση με το χρόνο t δίνεται από τη σχέση

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (15)$$

όπου γ_0 είναι το πλάτος της παραμόρφωσης και ω είναι η συχνότητα σε rad/s.

Οπότε, στη περίπτωση αυτή ο περιοδικός ρυθμός διάτμησης προκύπτει από τη σχέση (15) ως παράγωγος της παραμόρφωσης γ

$$\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{d(\gamma_0 \sin(\omega t))}{dt} \quad (16)$$

η οποία μετατρέπεται σε

$$\dot{\gamma} = \gamma_0 \omega \cos(\omega t) \quad (17)$$

Για παραμορφώσεις εντός των ορίων της γραμμικής ελαστικότητας, κατά την προαναφερθείσα παραμόρφωση, αναπτύσσεται η ακόλουθη διατμητική τάση σ

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (18)$$

όπου σ_0 είναι το πλάτος της διατμητικής τάσης και δ είναι η καθυστέρηση φάσης ή μετατόπιση φάσης.

Αν αμφότεροι οι όροι της εξίσωσης διαιρεθούν με γ_0 προκύπτει

$$\frac{\sigma}{\gamma_0} = \left[\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right] \sin(\omega t + \delta) \quad (19)$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από μια ημιτονοειδή παραμόρφωση μπορεί να γραφεί και ως

$$\sigma = G' \gamma + (G''/\omega) \dot{\gamma} \quad (20)$$

όπου

G' ο συντελεστής ελαστικότητας διάτμησης (shear storage modulus)

G'' ο συντελεστής απώλειας διάτμησης (shear loss modulus)

και αμφότεροι είναι συναρτήσεις της συχνότητας και μπορούν να εκφραστούν ως λόγος πλάτους και μετατόπισης φάσης

$$G' = \left[\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right] \cos(\delta) \quad (21)$$

και

$$G'' = \left[\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right] \sin(\delta) \quad (22)$$

Το $G' \gamma_0$ μπορεί να ερμηνευθεί ως το μέρος της τάσης σε φάση με τη παραμόρφωση και το $G'' \gamma_0$ το μέρος της τάσης που είναι κατά 90° εκτός φάσης με τη παραμόρφωση.

Άλλες παράμετροι που περιλαμβάνουν το μιγαδικό συντελεστή G^* (complex modulus) :

$$G^* = \left[\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right] = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (23)$$

και το μιγαδικό ιξώδες η^* (complex viscosity)

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (24)$$

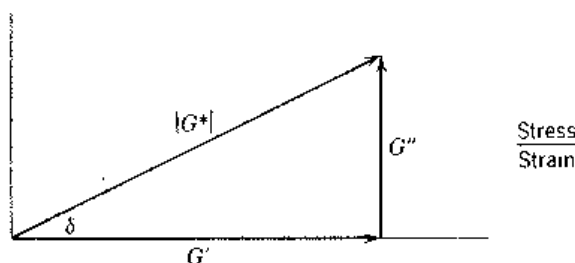
Όπου, η' είναι το δυναμικό ιξώδες

η'' είναι το εκτός φάσης μέρος του η^* .

Μια άλλη παράμετρος που συχνά χρησιμοποιείται είναι η εφαπτομένη της γωνίας δ , που επίσης είναι συνάρτηση της συχνότητας

$$\tan(\delta) = G'' / G' \quad (25)$$

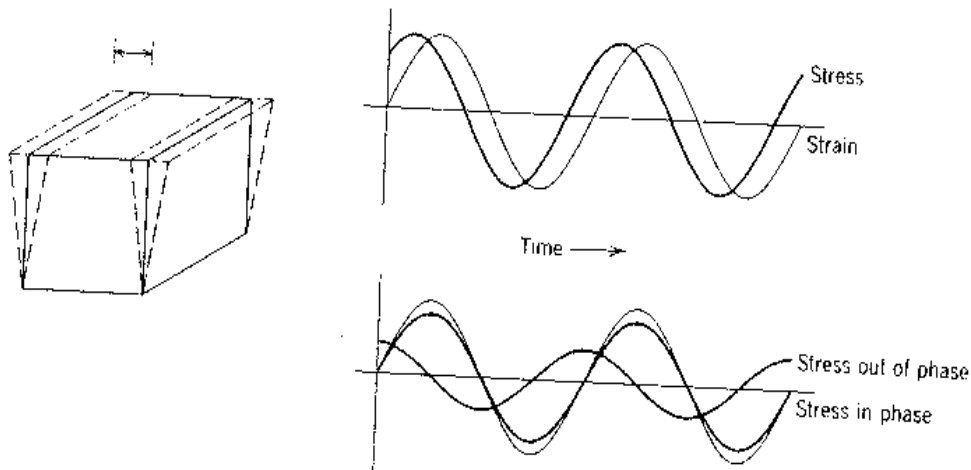
Η παράμετρος αυτή εκφράζει το λόγο της απώλειας ενέργειας ανά κύκλο ταλάντωσης προς την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά κύκλο ταλάντωσης (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 . Διανυσματική ανάλυση των συντελεστών απώλειας διάτμησης και ελαστικότητας διάτμησης σε ημιτονοειδή διάτμηση (Engmann et al., 2005).

Αναφορικά με τη δοκιμή ταλάντωσης υπό καθεστώς διάτμησης οι ρεολογικές παράμετροι, που συνήθως μετρούνται, είναι ο συντελεστής ελαστικότητας (storage modulus, G'), ο συντελεστής απώλειας (loss modulus, G'') και η εφαπτομένη δ .

Για καλύτερη κατανόηση της φυσική σημασίας των παραμέτρων αυτών θα αναφερθεί η συμπεριφορά των ιδανικών στερεών υλικών (Hookean solids) και των ιδανικών υγρών υλικών (Newtonian liquids). Η ρεολογική συμπεριφορά των στερεών χαρακτηρίζεται από το ότι η τάση με τη παραμόρφωση είναι σε φάση και η γωνία δ έχει τιμή μηδέν. Οπότε G'' και η' είναι μηδέν, διότι δεν υπάρχει καμιά απώλεια ενέργειας λόγω απουσίας του ιξώδους και το G' είναι σταθερό και ίσο με το συντελεστή διάτμησης G . Η ρεολογική συμπεριφορά των υγρών χαρακτηρίζεται από το ότι η τάση με τη παραμόρφωση είναι εκτός φάσης κατά 90° . Σ' αυτή τη περίπτωση το G' και το η'' είναι μηδέν, διότι το υλικό δεν έχει την ιδιότητα να αποθηκεύει ενέργεια. Οπότε, το η' είναι ίσο με το νευτώνειο ιξώδες (Σχήμα 2.7).



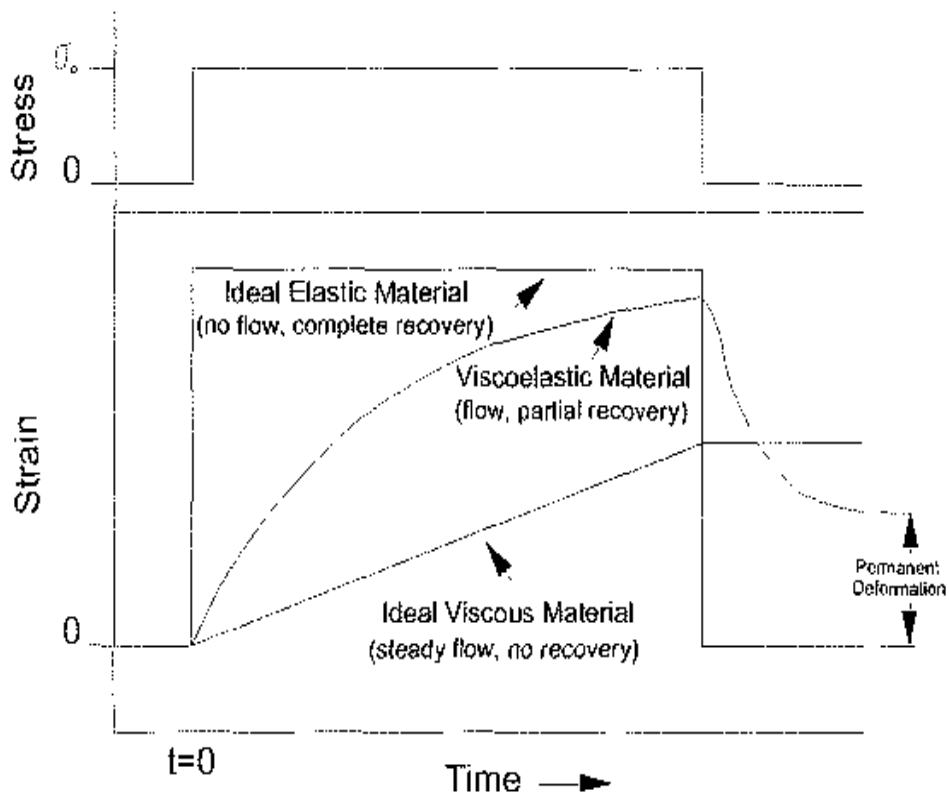
Σχήμα 2.7 . Γεωμετρία και χρονικό προφίλ ενός απλού πειράματος διάτμησης με ημιτονοειδή διάτμηση (*Engmann et al., 2005*).

2.5.2 Δοκιμή ερπυσμού (creep)

Η δοκιμή αυτή έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα και σημασία, διότι βοηθά στη μελέτη της φύσης των δευτερευόντων δεσμών συνοχής ενός υλικού και συγχρόνως επιτρέπει τον υπολογισμό του νευτώνειου ιξώδους. Επιπλέον, υπό προϋποθέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μέσου μοριακού βάρους των μεγαλομορίων του υπό μελέτη συστήματος.

Η δοκιμή ερπυσμού μπορεί να γίνει είτε υπό καθεστώς διάτμησης είτε υπό καθεστώς μονοαξονικής συμπίεσης ή εφελκυσμού.

Στη περίπτωση της διάτμησης στο δείγμα, που βρίσκεται μεταξύ δύο πλακών, εφαρμόζεται αιφνίδια καθορισμένη τάση, το μέγεθος της οποίας έχει προϋπολογισθεί ώστε να βρίσκεται εντός των ορίων της γραμμικής ελαστικότητας. Η τάση ασκείται για ορισμένο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το δείγμα έρπει ανάλογα με τον τύπο του (πυκνό διάλυμα, πηκτή ή στερεό) και κατόπιν η τάση παύει να ασκείται και το δείγμα επανακάμπτει δομικά στη προηγούμενη κατάσταση του είτε ολοκληρωτικά αν πρόκειται για στερεό(ελαστικό) είτε εν μέρει αν πρόκειται για πηκτή (ιξωδοελαστικό) είτε και καθόλου αν πρόκειται για πυκνό διάλυμα(ιξώδες) (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 . Καμπύλες ερπυσμού και επανάκαμψης. (Steffe, 1996)

Τα πειραματικά δεδομένα από τη δοκιμή ερπυσμού μπορούν περιγραφούν από την ακόλουθη συνάρτηση

$$J = f(t) = \gamma / \sigma_{\text{const}} \quad (26)$$

Όπου,

J , είναι η υποχώρηση του δείγματος λόγω ερπυσμού (creep compliance)

γ , είναι η παραμόρφωση του δείγματος και

σ , είναι η εφαρμοζόμενη τάση διάτμησης για χρόνο t

Όταν το υλικό είναι τέλεια ελαστικό τότε ισχύει

$$J = 1/G ,$$

Είναι δηλαδή το αντίστροφο του συντελεστή ελαστικότητας.

Για ένα ιζωδοελαστικό υλικό η γενική σχέση που περιγράφει τη δοκιμή του ερπυσμού είναι

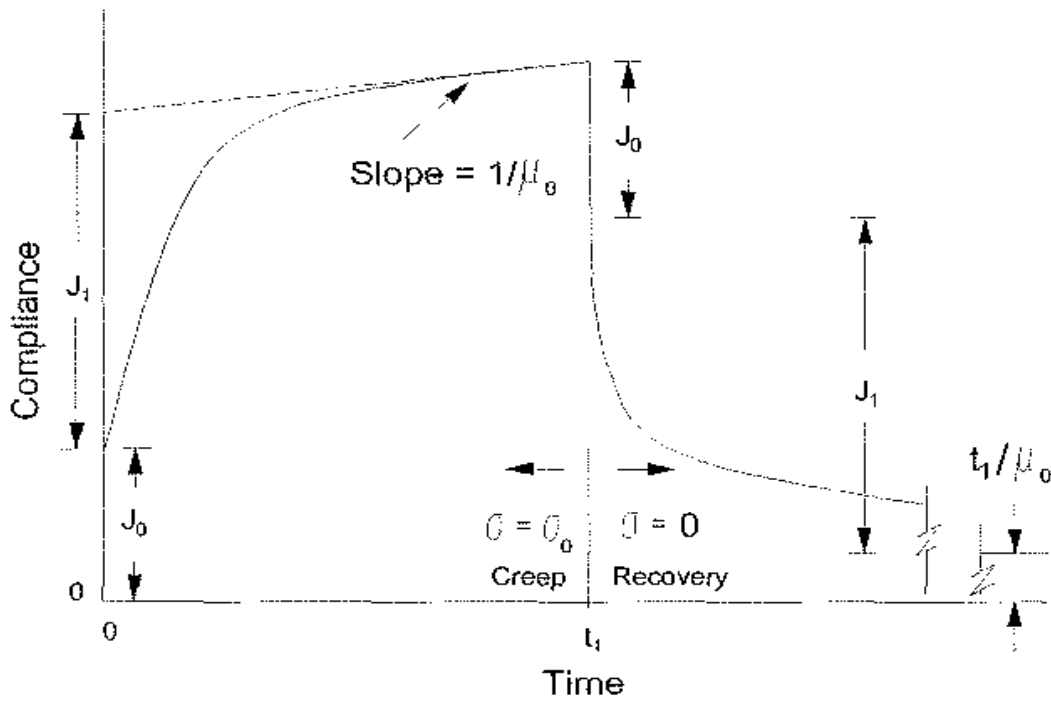
$$J(t) = J_o + \sum_{r=1}^m [J_r [(1 - \exp(\frac{-t}{\lambda_{ret}}))] + \frac{t}{\mu_o} \quad (27)$$

Όπου,

J_o , είναι η στιγμιαία υποχώρηση (instantaneous compliance)

J_r , είναι η επιβραδυνόμενη υποχώρηση (retarded compliance)
 λ_{ret} , είναι ο χρόνος επιβράδυνσης
 μ_0 , είναι το νευτώνειο ιξώδες.

Η παραπάνω σχέση γραφικά παριστάνεται με το Σχήμα 2.9.

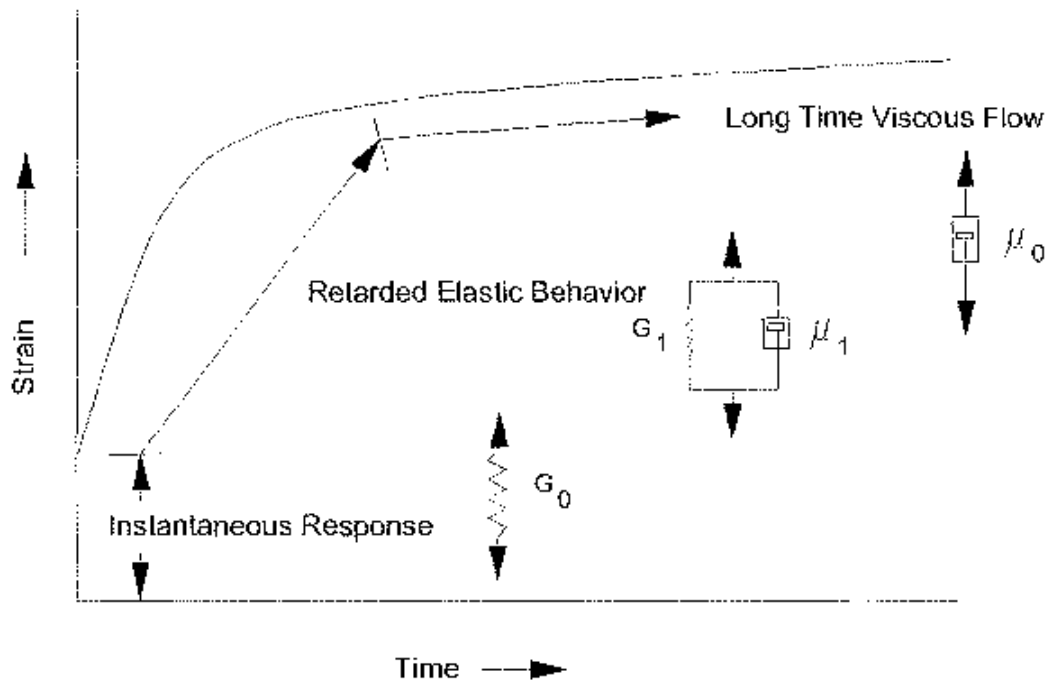


Σχήμα 2.9 . Καμπύλη υποχώρησης και επανάκαμψης. (Steffe, 1996)

Εναλλακτικά η σχέση αυτή μπορεί να παρουσιασθεί με τους συντελεστές ελαστικότητας αντί για τις υποχωρήσεις

$$\frac{\gamma}{\sigma_0} = f(t) = \frac{1}{G_0} + \sum_{r=1}^m \left[\frac{1}{G_r} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_{ret}}\right) \right] \right] + \frac{t}{\mu_0} \quad (28)$$

και παριστάνεται γραφικά με τη καμπύλη του Σχήματος 2.10.



Σχήμα 2.10 . Τυπική καμπύλη ερπυσμού. (Steffe, 1996)

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Προετοιμασία μαγιονέζας

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν μαγιονέζες με κλάσματα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8. Για την παρασκευή της μαγιονέζας χρησιμοποιήθηκαν απιονισμένο νερό -ώστε να διασφαλιστεί η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων-, ηλιέλαιο, κρόκος αυγού και εμπορικό ξύδι.

Ως γαλακτωματοποιητής χρησιμοποιήθηκε ο κρόκος του αυγού. Για να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα, πριν την έναρξη των πειραματικών μετρήσεων, σε 28 αυγά, έγινε διαχωρισμός του κρόκου από το ασπράδι. Ο κρόκος ξηράθηκε με την μέθοδο της λυοφιλίωσης (-18°C για 48 ώρες), και στην συνέχεια, σε μορφή σκόνης, αποθηκεύτηκε αεροστεγώς συσκευασμένος στο ψυγείο.

Οι μαγιονέζα ετοιμάστηκε με διάλυση κατάλληλης ποσότητας (20 g) κρόκου αυγού σε απιονισμένο νερό. Η διάλυση του κρόκου στο απιονισμένο νερό έγινε υπό συνεχή ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα του εργαστηρίου. Στην συνέχεια το λάδι προστέθηκε σταδιακά, ομογενοποιώντας παράλληλα το μίγμα σε εργαστηριακό ομογενοποιητή. Δεδομένου ότι η ποσότητα του λαδιού ήταν πολύ μεγάλη, η προσθήκη του πραγματοποιήθηκε πολύ αργά και σε πολύ μικρές δόσεις ώστε να αποφευχθεί η αναστροφή φάσης. Σε όλα τα δείγματα προστέθηκαν επίσης 10g εμπορικού ξυδιού κατά την ομογενοποίηση, αφού είχε προστεθεί αρχικά μια μικρή ποσότητα λαδιού. Τα δείγματα ομογενοποιήθηκαν για διαφορετικό χρόνο το καθένα (όσο αυξανόταν το κλάσμα όγκου, αντίστοιχα αυξανόταν και ο χρόνος ομογενοποίησης) ώστε όλα τα δείγματα, για όλα τα κλάσματα όγκου, να έχουν το ίδιο μέγεθος σταγονιδίων. Όλα τα δείγματα που παρασκευάστηκαν ήταν 300g.

Πριν την έναρξη του πειράματος γινόταν μέτρηση του μεγέθους των σταγονιδίων του λαδιού στο δείγμα με μετρήσεις σκέδασης φωτός (δδ νερού 1.43, λαδιού 1.33) και το δείγμα τοποθετούνταν στο ψυγείο καλυμμένο με διαφανή μεμβράνη για 30 min.

3.2 Πείραμα διαξονικής τάνυσης με λίπανση

Η μαγιονέζα διαμορφώθηκε σε κυλινδρικό δείγμα με την βοήθεια ενός δακτυλιδίου με διαστάσεις 50 mm (διάμετρος) × 5 mm (ύψος). Το δακτυλίδι είχε τοποθετηθεί στην κορυφή μιας γυάλινης επιφάνειας με

παραφινέλαιο. Στη συνέχεια έγινε προσεκτικά η πλήρωση με μαγιονέζα. Το δακτυλίδι αφαιρέθηκε ώστε να μελετηθεί το αυτοφερόμενο δείγμα. Χρησιμοποιήθηκε παραφινέλαιο ώστε να καλύψει το πάνω μέρος του δείγματος, και το γυαλί με το δείγμα τοποθετήθηκε πάνω στην επιφάνεια δοκιμής συσκευής μηχανικών αναλύσεων TA-XT σε διαμόρφωση συμπίεσης. Χρησιμοποιήθηκε κώνος συμπίεσης διαμέτρου 50 mm (ίδιες διαμέτρου με το δείγμα), ώστε να επιτευχτεί σταθερή επιφάνεια επαφής μεταξύ κεφαλής και δείγματος (Steffe, 1996). Οι συμπίεσεις πραγματοποιήθηκαν υπό καθεστώς ελεγχόμενου ρυθμού τάνυσης (strain rate) σε $1\% s^{-1}$, $2\% s^{-1}$, $5\% s^{-1}$ και σε κάποια δείγματα $3\% s^{-1}$, μέχρι το 90% της παραμόρφωσης του δείγματος (ονομαστική τιμή 5mm έως 0,5 mm).

Όλα τα πειράματα επαναλήφθηκαν δύο φορές. Ο χειρισμός των δειγμάτων έγινε με προσοχή, ειδικά σε ό,τι αφορά την κάλυψη τους με παραφινέλαιο, ώστε να διασφαλιστεί η συμπίεστη ροή και παράλληλα να αποφευχθεί το φαινόμενο του αποκυλινδρισμού (barreling). Τα νέα δείγματα κάθε φορά είχαν απολύτως όμοια πρωτόκολλα παρασκευής, μετακίνησης και χειρισμού δείγματος. Όλα τα αποτελέσματα έχουν καταγραφεί στα διαγράμματα που παρουσιάζονται, ως ένδειξη επαναληψιμότητας των δεδομένων.

3.3 Πείραμα δυναμικής δοκιμής ταλάντωσης και ερπυσμού (creep)

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων υπό καθεστώς διάτμησης χρησιμοποιήθηκε ο δυναμικός μηχανικός αναλυτής Bohlin μοντέλο C-VOR 150. Μικρή ποσότητα μαγιονέζας τοποθετήθηκε στην ακίνητη πλάκα (δειγματοφορέας) του μηχανικού αναλυτή. Στη συνέχεια η πάνω κυλινδρική πλάκα του οργάνου μετακινήθηκε προς το δείγμα έτσι ώστε να έρθει σε πλήρη επαφή με την επιφάνειά του. Περιμετρικά το δείγμα καλύφθηκε με παραφινέλαιο, ώστε να μην χάσει την υγρασία του και στη συνέχεια δόθηκε εντολή για έναρξη της μέτρησης.

Κατά τη δοκιμή σάρωσης συχνοτήτων υπό σταθερή θερμοκρασία, η συχνότητα κυμαινόταν από 0,1-1 Hz, ενώ οι θερμοκρασίες που επιλέχθηκαν ήταν $4^{\circ}C$ και $25^{\circ}C$, ως χαρακτηριστικές, καθότι συνήθως η αποθήκευση στο ψυγείο γίνεται στους $4^{\circ}C$ και η κατανάλωση της μαγιονέζας σε θερμοκρασία δωματίου $25^{\circ}C$.

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο δυναμικός μηχανικός αναλυτής Bohlin μοντέλο C-VOR 150 ακολουθώντας το ίδιο πρωτόκολλο με την δοκιμή ταλάντωσης για την τοποθέτηση του δείγματος.

Η δοκιμή ερπυσμού πραγματοποιήθηκε με άσκηση διατμητικής τάσης 2 Pa επί 100 s, ενώ πραγματοποιήθηκε έλεγχος για να επιβεβαιωθεί ότι τα πειράματα διεξάγονται εντός των ορίων της γραμμικής ελαστικότητας.

3.4 Σκοπός

Η διεξαγωγή των πειραμάτων αποσκοπεί στη μελέτη της εξάρτησης της ρεολογίας υπέρπυκνων γαλακτώματων τροφίμων (μαγιονέζας) υπό καθεστώς συμπίεσης και διάτμησης. Η μεταβλητή που θα μελετηθεί είναι το κλάσμα όγκου της διεσπαρμένης φάσης (από 0,7 ως 0,8) για σταθερή κατανομή μεγέθους των λιποσφαιριδίων της μαγιονέζας.

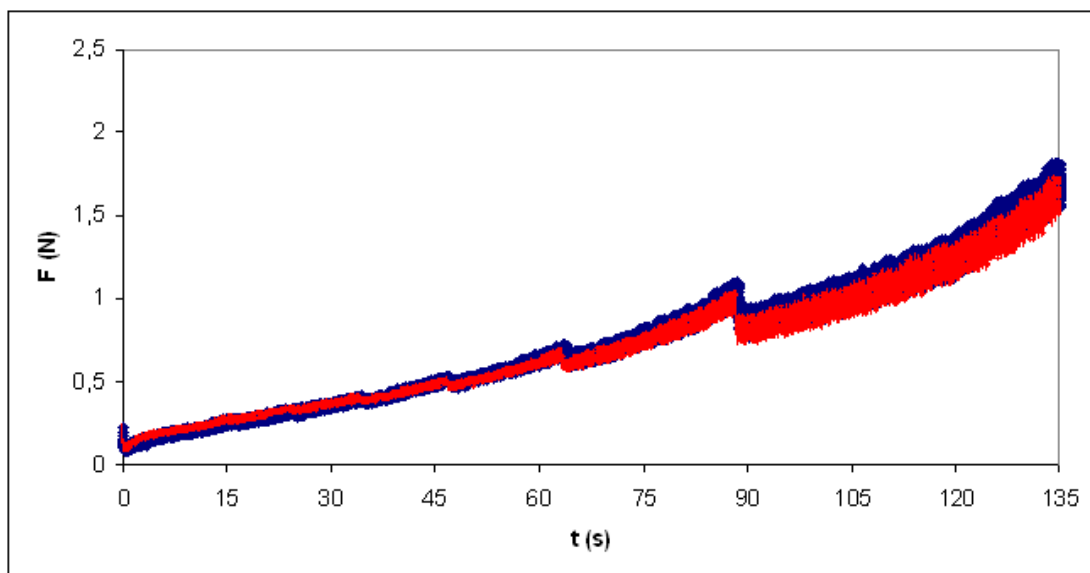
4. Αποτελέσματα

4.1 Δοκιμές συμπίεσης

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα δύναμης – χρόνου, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης (strain rate). Όπως φαίνεται, στα αρχικά στάδια της συμπίεσης η δύναμη αυξάνει απότομα μέχρι να επιτευχθεί το ανώτατο όριο (στο Σχήμα 4.1) (Rohm 1993, Shukla et al., 1995). Ο ρυθμός μεταβολής της δύναμης αυξάνει έως ότου το δείγμα καθίσταται πιο συμπιεσμένο. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη τάνυση που επιτεύχθηκε ισούται με :

$$(\varepsilon_B)_{\max} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{0,5}{5}\right) \approx 1.15$$

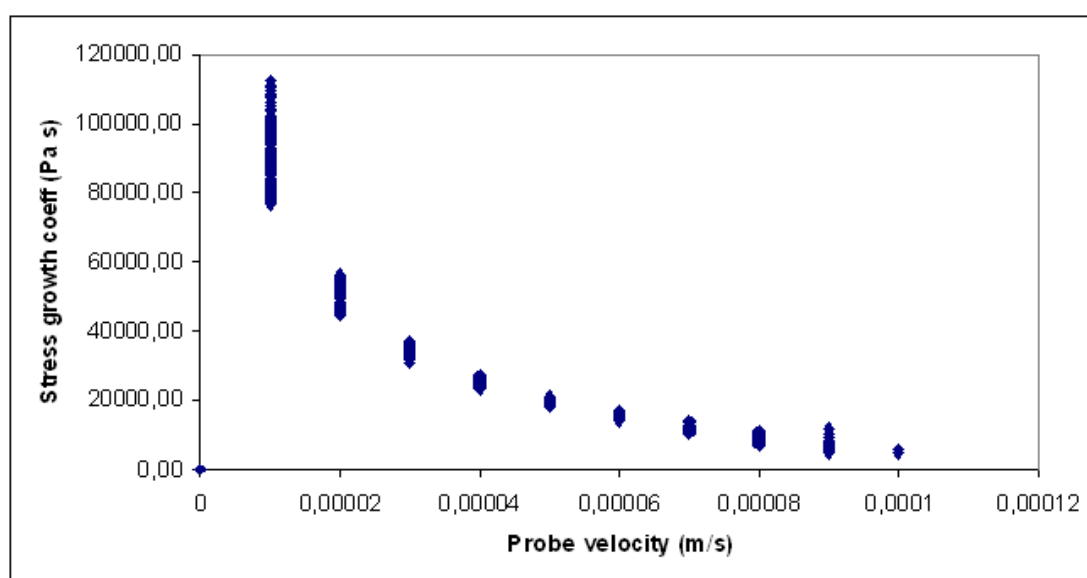
Γίνεται η παραδοχή ότι σε καμία περίπτωση δεν υπήρξε απώλεια λιπαντικού κατά την διάρκεια της συμπίεσης, ακόμη και για υψηλούς ρυθμούς τάνυσης. Στο Παράρτημα Α παρατίθενται όλα τα διαγράμματα, για όλες τις μετρήσεις, που έλαβαν χώρα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.



Σχήμα 4.1 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.7), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Το πρώτο ερώτημα, που προκύπτει, είναι η καταγωγή των οδοντωτών κορυφών του γραφήματος 4.1. Για την ερμηνεία των εν λόγω μεγίστων, τα δεδομένα αναλύθηκαν (Σχήμα 4.2) ως προς την στιγμιαία ταχύτητα της κεφαλής. Η μελέτη του γραφήματος 4.2 καταδεικνύει ότι οι επιμέρους κορυφές αντιστοιχούν σε αλλαγές της ταχύτητας της κεφαλής, προκειμένου να ικανοποιηθεί συνολικά η συνθήκη του σταθερού ρυθμού τάνυσης.

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, ο σταθερός ρυθμός τάνυσης επιτυγχάνεται με την μείωση της ταχύτητας της κεφαλής, καθώς αυτή προσεγγίζει την κάτω πλάκα. Ο υπολογισμός της ταχύτητας, για κάθε θέση της κεφαλής, οδηγεί σε διαγράμματα, όπως αυτό του σχήματος 4.2.



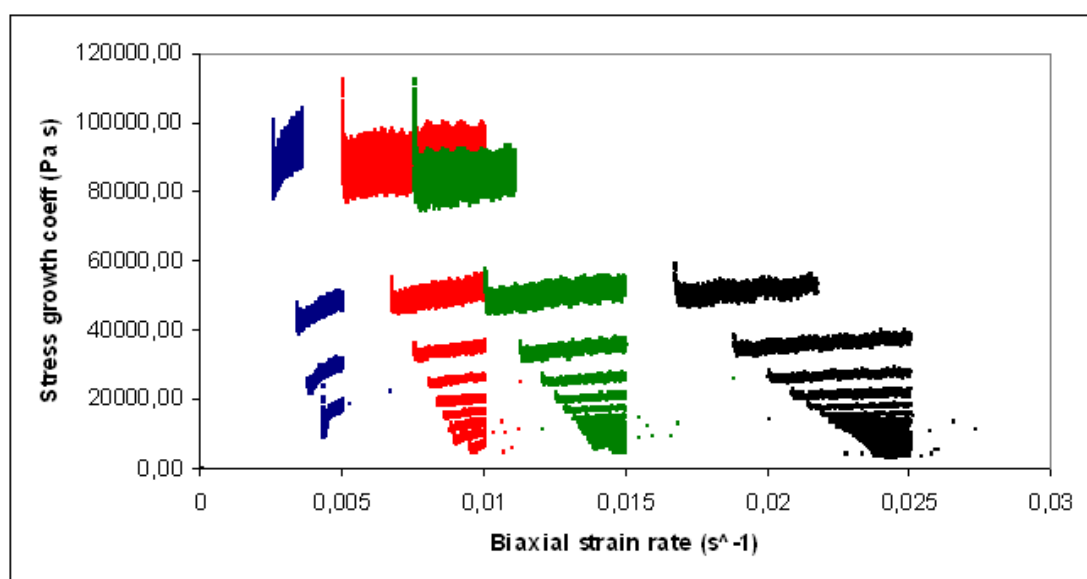
Σχήμα 4.2 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%.

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζονται οι υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης η_B^+ σε σχέση με την ταχύτητα της κεφαλής. Η ταχύτητα U υπολογίζεται χωριστά για κάθε θέση της κεφαλής, από τα δεδομένα ως $U = dh / dt$. Να σημειωθεί ότι η κίνηση της κεφαλής, άρα και η ταχύτητά της, είναι κάθετες προς το επίπεδο της κατεύθυνσης της ανάπτυξης του δείγματος. Δύο ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις προκύπτουν από τα ανωτέρω διάγραμμα

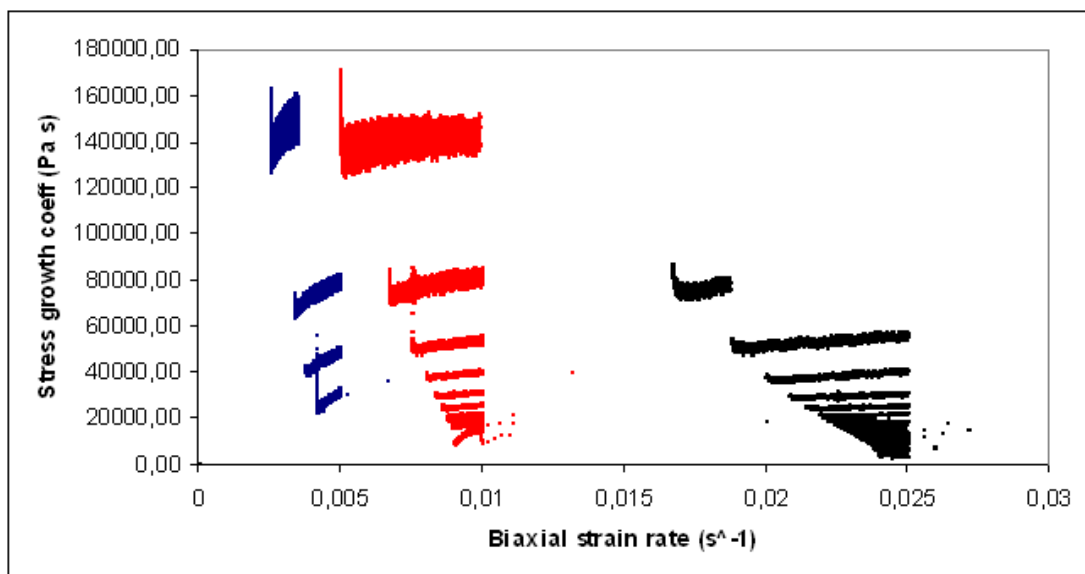
- ο σταθερός ρυθμός τάνυσης επιτυγχάνεται με μικρές μεταβολές στην ταχύτητα της κεφαλής, σε κλίμακα δευτερολέπτων.
- τα διαγράμματα υποδεικνύουν μια ενδιαφέρουσα συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης και της ταχύτητας της κεφαλής, ο οποίος δείχνει να μειώνεται όσο η ταχύτητα αυξάνει.

Στο Παράρτημα Β παρατίθενται όλα τα διαγράμματα, για όλες τις μετρήσεις, που έλαβαν χώρα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

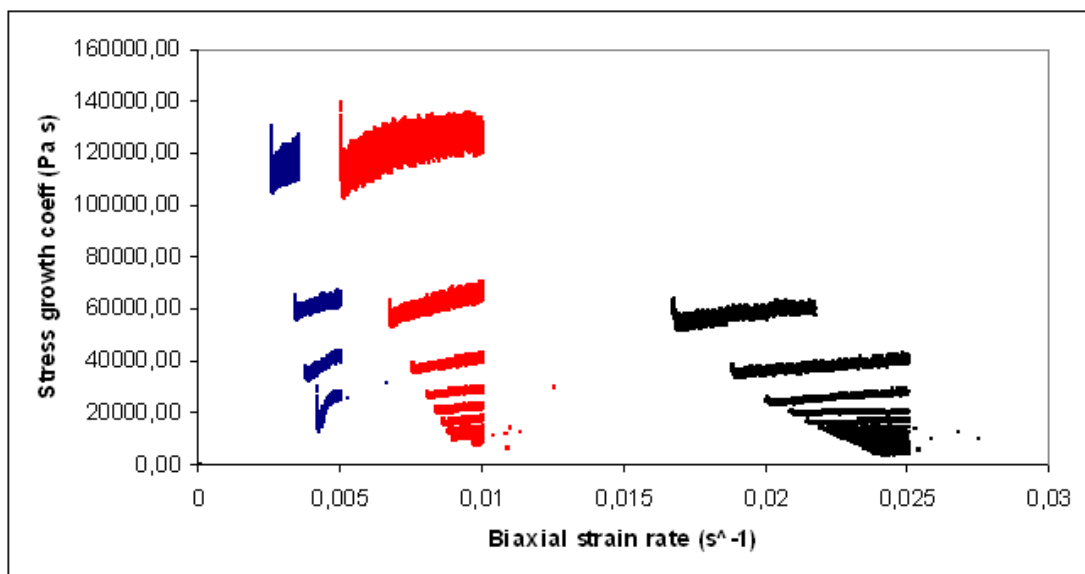
Τώρα, σύμφωνα με το σημείο α πιο πάνω, εάν καταστρωθεί το διάγραμμα του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι του διαξονικού ρυθμού τάνυσης, διαπιστώνεται ότι κάθε τιμή του θα αντιστοιχεί σε περισσότερους από έναν συντελεστές ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, ανάλογα με την ταχύτητα της κεφαλής. Στα Σχήματα 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7 απεικονίζεται με μπλε σημεία ο συντελεστής ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι του ρυθμού τάνυσης, για πειραματική διαδικασία με σταθερό (κατά μέσο όρο) ρυθμό τάνυσης $1\% \text{ s}^{-1}$. Αντίστοιχα με κόκκινα σημεία απεικονίζεται ο συντελεστής για ρυθμό τάνυσης $2\% \text{ s}^{-1}$, με πράσινο για $3\% \text{ s}^{-1}$ και με μαύρο για $5\% \text{ s}^{-1}$. Τα Σχήματα 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7 ανταποκρίνονται σε κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8 αντίστοιχα. Προκύπτει μια σειρά καμπυλών, που συσχετίζουν τον η_B^+ με τον ϵ_B , ως αποτέλεσμα των πειραμάτων, όπου χαμηλότερες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης φαίνονται να αντιστοιχούν σε υψηλότερες ταχύτητες.



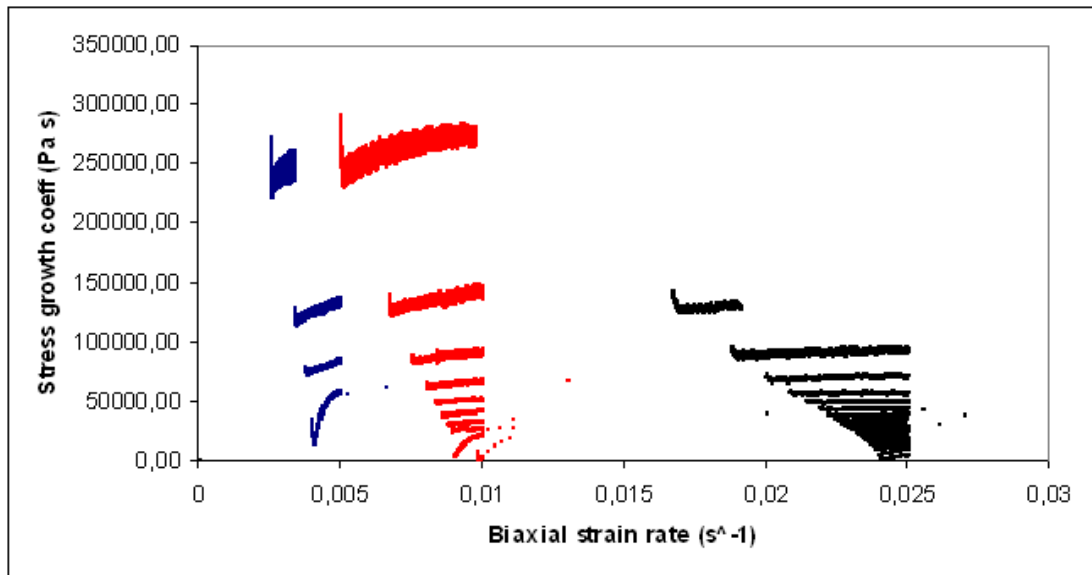
Σχήμα 4.3 . Αθροιστικό διάγραμμα του διαξονικού ρυθμού τάνυσης έναντι του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, για πειράματα που διεξήχθησαν με 1% (μπλε), 2% (κόκκινο), 3% (πράσινο) και 5% (μαύρο). Το κλάσμα όγκου της λιπαρής φάσης του δείγματος είναι 0.7. Η ταχύτητα, από κάτω προς τα πάνω, αυξάνεται από $9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ έως 10^{-4} m s^{-1} .



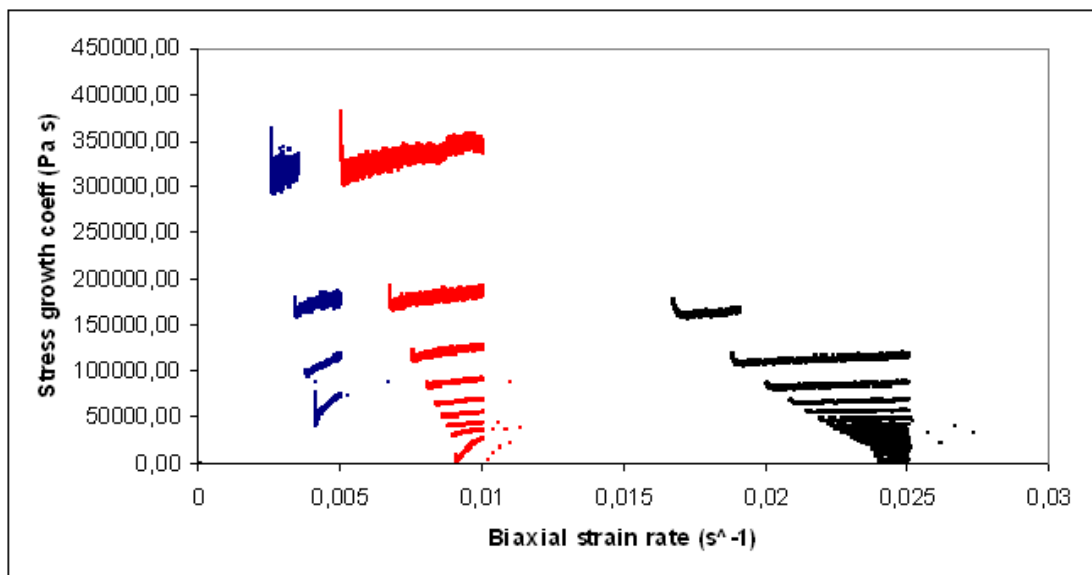
Σχήμα 4.4 . Αθροιστικό διάγραμμα του διαξονικού ρυθμού τάνυσης έναντι του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, για πειράματα που διεξήχθησαν με 1% (μπλε), 2% (κόκκινο) και 5% (μαύρο). Το κλάσμα όγκου της λιπαρής φάσης του δείγματος είναι 0.725. Η ταχύτητα, από κάτω προς τα πάνω, αυξάνεται από $9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ έως 10^{-4} m s^{-1} .



Σχήμα 4.5 . Αθροιστικό διάγραμμα του διαξονικού ρυθμού τάνυσης έναντι του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, για πειράματα που διεξήχθησαν με 1% (μπλε), 2% (κόκκινο) και 5% (μαύρο). Το κλάσμα όγκου της λιπαρής φάσης του δείγματος είναι 0.75. Η ταχύτητα, από κάτω προς τα πάνω, αυξάνεται από $9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ έως 10^{-4} m s^{-1} .



Σχήμα 4.6 . Αθροιστικό διάγραμμα του διαξονικού ρυθμού τάνυσης έναντι του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, για πειράματα που διεξήχθησαν με 1% (μπλε), 2% (κόκκινο) και 5% (μαύρο). Το κλάσμα όγκου της λιπαρής φάσης του δείγματος είναι 0.775. Η ταχύτητα, από κάτω προς τα πάνω, αυξάνεται από $9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ έως 10^{-4} m s^{-1} .



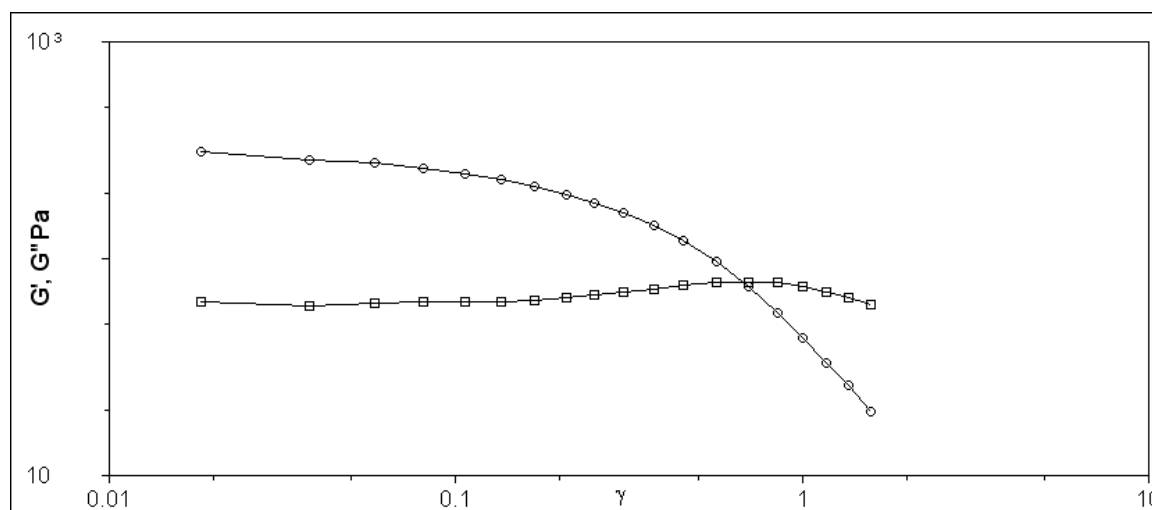
Σχήμα 4.7 . Αθροιστικό διάγραμμα του διαξονικού ρυθμού τάνυσης έναντι του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, για πειράματα που διεξήχθησαν με 1% (μπλε), 2% (κόκκινο) και 5% (μαύρο). Το κλάσμα όγκου της λιπαρής φάσης του δείγματος είναι 0.8. Η ταχύτητα, από κάτω προς τα πάνω, αυξάνεται από $9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ έως 10^{-4} m s^{-1} .

Είναι προφανές ότι τα σημεία των συνόλων αντιστοιχούν στις ίδιες ταχύτητες και μπορούν να συνδεθούν με μία γραμμή, που προκύπτει από τη σχέση εκθετικής μορφής, μεταξύ η_B^+ και ϵ_B . Αυτού του είδους η

συμπεριφορά είναι αναμενόμενη στις διαζονικές εκτατικές ροές (Rohm, 1994 Campanella and Peleg, 2002). Αυτό είναι εμφανές μεταξύ ρυθμού τάνυσης 1% και 2% και λιγότερο για 5%. Επίσης, παρατηρείται ότι η αύξηση του κλάσματος όγκου, επιφέρει αντίστοιχα αύξηση των απόλυτων τιμών του συντελεστή ανάπτυξης της διαζονικής τάσης.

4.2 Δοκιμές διάτμησης

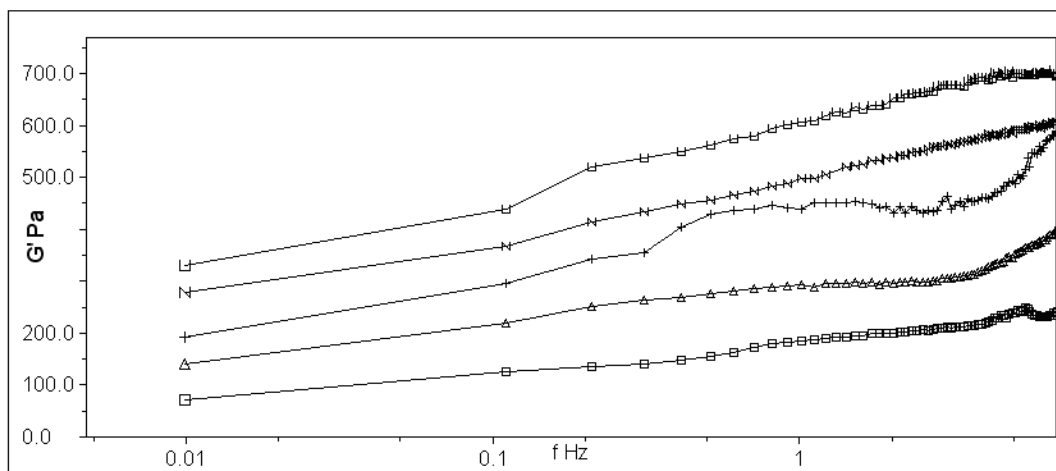
Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζονται οι συντελεστές ελαστικότητας διάτμησης G' και απώλειας διάτμησης G'' έναντι στην παραμόρφωση γ , για δείγμα στους 25°C. Παρατηρώντας το διάγραμμα διαπιστώθηκε ότι για τάση 2 Pa βρισκόμαστε εντός των ορίων της γραμμικής ελαστικότητας.



Σχήμα 4.8 . Οι συντελεστές ελαστικότητας διάτμησης G' και απώλειας διάτμησης G'' έναντι της παραμόρφωσης γ , σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 25° C.

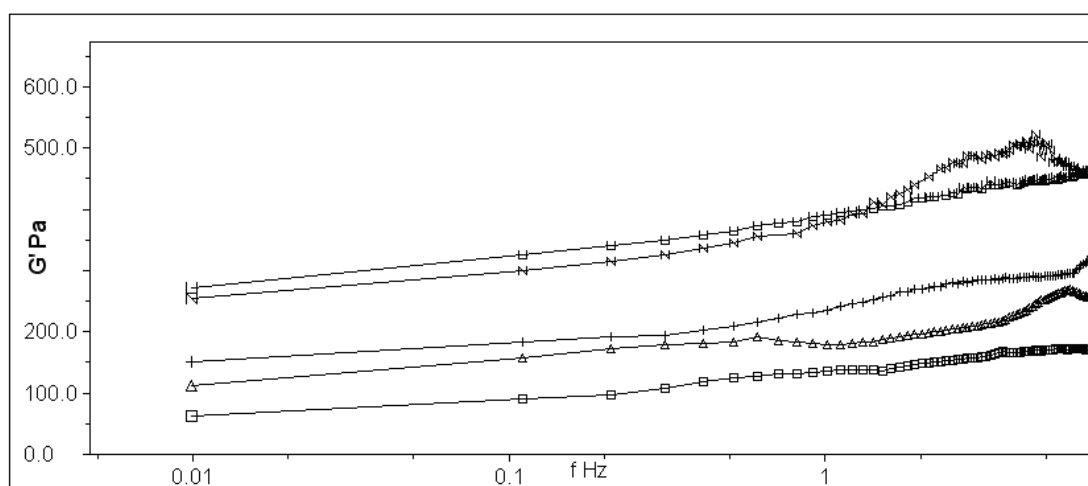
Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται ο συντελεστής ελαστικότητας διάτμησης G' (shear storage modulus), δειγμάτων μαγιονέζας τα οποία υπόκεινται σε ημιτονοειδή παραμόρφωση, έναντι της συχνότητας, της οποίας το πλάτος αυξάνει. Οι δοκιμές διεξήχθησαν υπό σταθερή θερμοκρασία 4°C, ενώ τα δείγματα έχουν διαφορετικό κλάσμα όγκου διεσπαρμένης λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8. Παρατηρείται ότι αύξηση της συχνότητας προκαλεί αύξηση του συντελεστή σε όλα τα δείγματα. Το γεγονός υποδηλώνει ότι αυξάνει η ελαστικότητα των δειγμάτων, δηλαδή ενέργεια συσσωρεύεται ανά κύκλο ταλάντωσης, με αποτέλεσμα να τείνουν να συμπεριφέρονται ως στερεά υλικά. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι τα λιποσφαιρίδια της μαγιονέζας συγκρατούνται μεταξύ τους στο πλέγμα του υλικού με σαφείς δυνάμεις. Η πιθανότερη εξήγηση είναι η γεφύρωση μεταξύ γειτονικών σταγονιδίων από επιφανειακή συμπροσρόφηση πρωτεϊνών. Η γεφύρωση, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, είναι εντονότερη καθώς ο λόγος πρωτεΐνης προς

ελεύθερη επιφάνεια μειώνεται (Golding et al. 1997). Αυτό ακριβώς συμβαίνει καθώς η λιποπεριεκτικότητα αυξάνει με την αύξηση του κλάσματος όγκου, χωρίς αντίστοιχη αύξηση της πρωτεΐνης του αυγού.



Σχήμα 4.9 . Ο συντελεστής ελαστικότητας διάτμησης (G'), συναρτήσει της συχνότητας, σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 4°C . Τα δείγματα μαγιονέζας έχουν τα εξής κλάσματα όγκου : \square 0.7, Δ 0.725, $+$ 0.75, \times 0.775, \circ 0.8.

Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται ο συντελεστής ελαστικότητας διάτμησης G' (shear storage modulus), δειγμάτων μαγιονέζας, τα οποία υπόκεινται σε ημιτονοειδή παραμόρφωση, έναντι της συχνότητας, της οποίας το πλάτος αυξάνει. Οι δοκιμές διεξήχθησαν υπό σταθερή θερμοκρασία 25°C , ενώ τα δείγματα έχουν διαφορετικό κλάσμα όγκου διεσπαρμένης λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8. Παρατηρείται ότι αύξηση της συχνότητας προκαλεί και σ' αυτή τη θερμοκρασία αύξηση του συντελεστή σε όλα τα δείγματα.

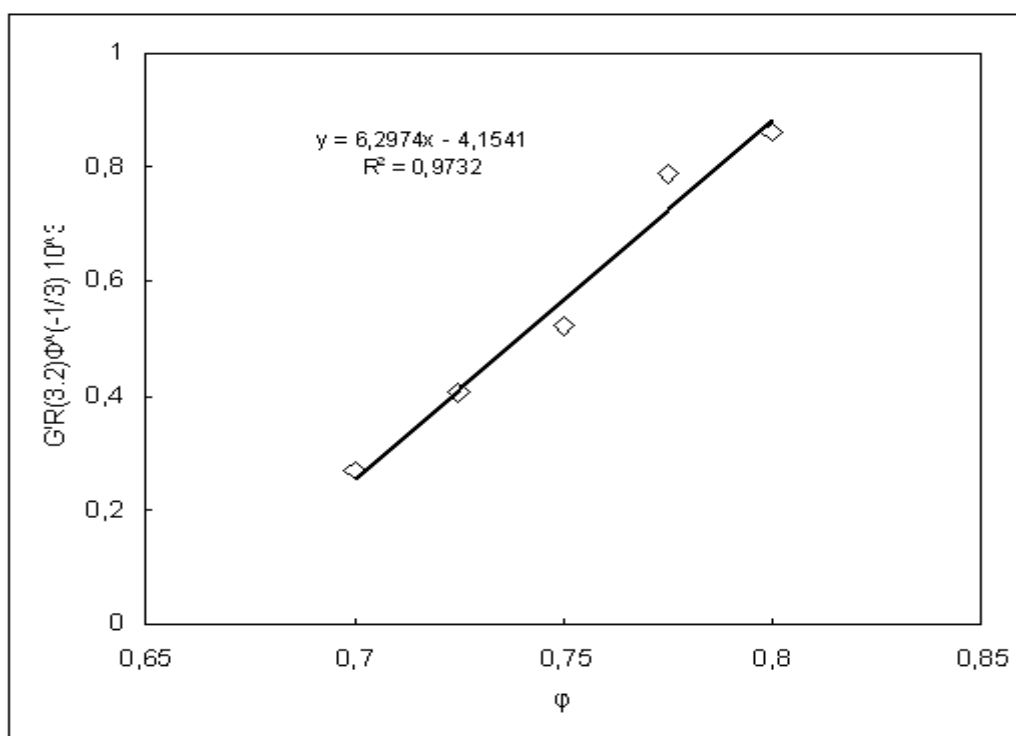


Σχήμα 4.10 . Ο συντελεστής ελαστικότητας διάτμησης (G'), συναρτήσει της συχνότητας, σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 25°C . Τα δείγματα μαγιονέζας έχουν τα εξής κλάσματα όγκου : \square 0.7, Δ 0.725, $+$ 0.75, \times 0.775, \circ 0.8.

Επιπρόσθετα, μελετώντας τα δύο διαγράμματα (Σχήματα 4.9 και 4.10) παρατηρείται ότι σε θερμοκρασία 4°C οι απόλυτες τιμές του συντελεστή ελαστικότητας διάτμησης είναι υψηλότερες, σε σχέση με αυτές σε θερμοκρασία 25°C. Αυτό υποδεικνύει ότι στη θερμοκρασία των 4°C τα δείγματά μας εμφανίζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα.

Η αυξημένη ελαστικότητα σε αυτή την περίπτωση δεν οφείλεται σε διεπιφανειακά φαινόμενα, καθώς οι διεπιφανειακές ιδιότητες των πρωτεϊνών του αυγού είναι εν γένει ανεξάρτητες της θερμοκρασίας. Η αύξηση της ελαστικότητας πρέπει να αποδοθεί στην αύξηση του ιξώδους του ηλιελαίου, το οποίο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μεταβολές της θερμοκρασίας (Abramovic and Kofutov, 1998), το οποίο σε κολλοειδή συστήματα μεταφράζεται σε αύξηση της ελαστικότητας.

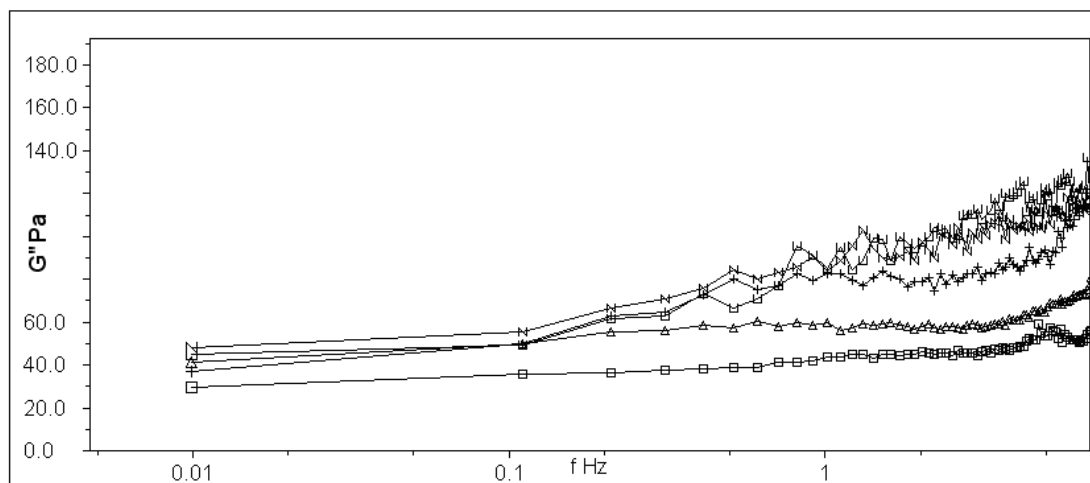
Το Σχήμα 4.11 παρουσιάζει την γραφική απεικόνιση της παραμέτρου $G'R_{32}\phi^{-1/3}$ ως προς το κλάσμα όγκου της διεσπαρμένης φάσης.



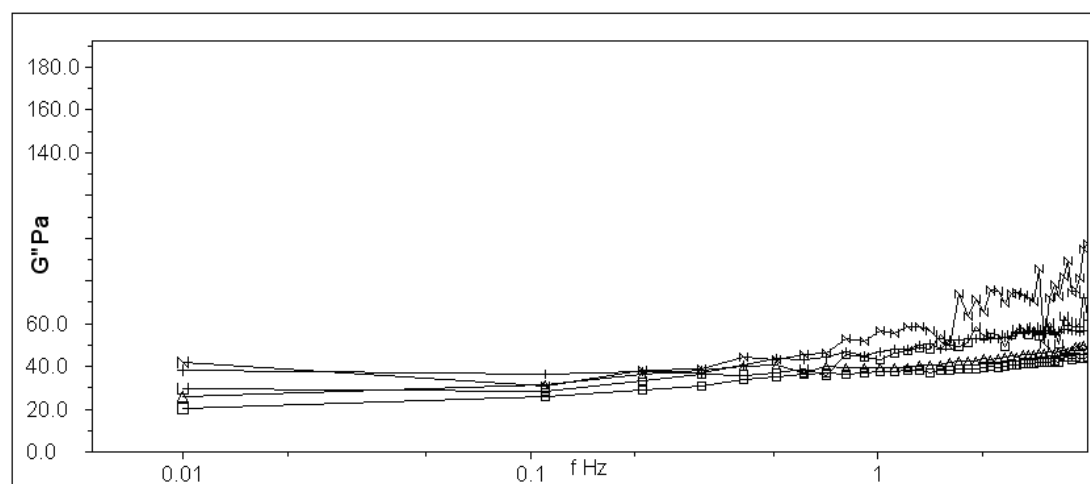
Σχήμα 4.11 . Η παράμετρος $G'R_{32}\phi^{-1/3}$ έναντι στο κλάσμα όγκου της διεσπαρμένης λιπαρής φάσης.

Εφαρμόζοντας την αναλογία των Princen και Kiss (1989) για υπέρπυκνα γαλακτώματα, βρίσκουμε ότι η παράμετρος $G'R_{32}\phi^{-1/3}$ συνδέεται γραμμικά με το κλάσμα όγκου της διεσπαρμένης φάσης. Η προκύπτουσα ευθεία τέμνει τον άξονα ϕ στην τιμή $\phi=0.6596$, καταδεικνύοντας κατά τη συνθήκη $G'R_{32}\phi^{-1/3} = K (\phi-\phi_0)$ (η K είναι σταθερά σχετιζόμενη με τη διεπιφανειακή τάση) ως οριακή συγκέντρωση για υπέρπυκνα γαλακτώματα, την τιμή $\phi_0 \approx 0.66$.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων μετρήθηκε και ο συντελεστής απώλειας διάτμησης G'' (shear loss modulus). Οι συνθήκες ήταν οι ίδιες, δηλαδή οι δοκιμές διεξήχθησαν υπό σταθερή θερμοκρασία 4°C και 25°C, ενώ τα δείγματα έχουν διαφορετικό κλάσμα όγκου διεσπαρμένης λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75%, 0.775 και 0.8. Τα αποτελέσματα, έναντι της συχνότητας, απεικονίζονται στα Σχήματα 4.12 και 4.13.



Σχήμα 4.12 . Ο συντελεστής απώλειας διάτμησης (G''), συναρτήσει της συχνότητας, σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 4° C. Τα δείγματα μαγιονέζας έχουν τα εξής κλάσματα όγκου : □ 0.7, Δ 0.725, + 0.75, N 0.775, Ι 0.8.

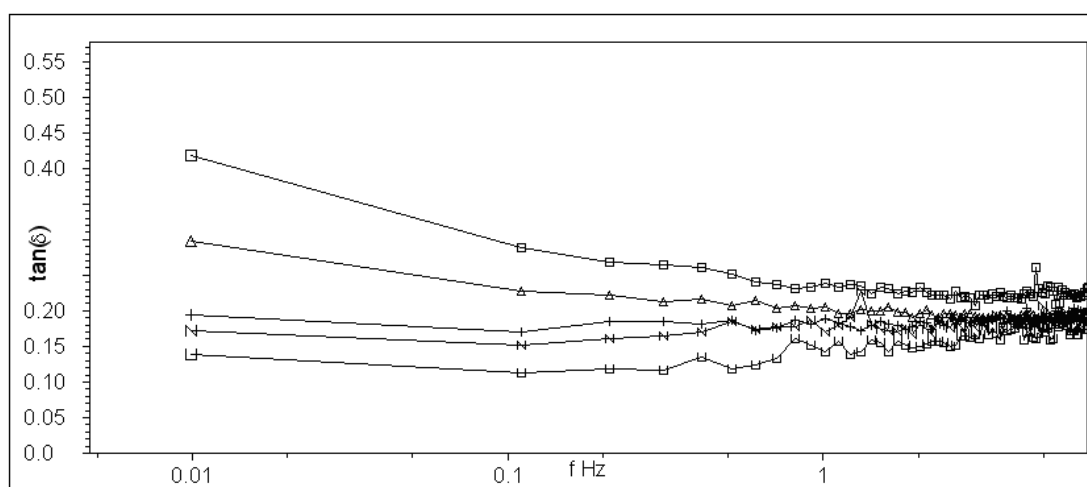


Σχήμα 4.13 . Ο συντελεστής απώλειας διάτμησης (G''), συναρτήσει της συχνότητας, σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 25° C. Τα δείγματα μαγιονέζας έχουν τα εξής κλάσματα όγκου : □ 0.7, Δ 0.725, + 0.75, N 0.775, Ι 0.8.

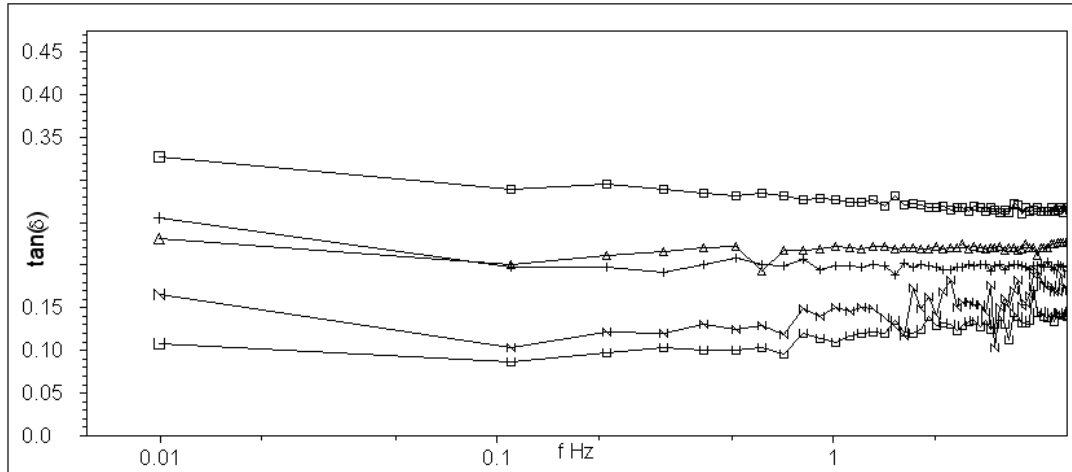
Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση του συντελεστή, η οποία είναι –σε απόλυτες τιμές- λίγο μεγαλύτερη σε θερμοκρασία 4°C. Παρουσιάζει δηλαδή μικρή αύξηση της απώλειας ενέργειας ανά κύκλο ταλάντωσης, που οδηγεί σε αύξηση του ιξώδους χαρακτήρα των δειγμάτων.

Η σύγκριση των δύο συντελεστών δίνει πιο ξεκάθαρη εικόνα για τη ρεολογική συμπεριφορά των δειγμάτων. Σε όλα τα δείγματα, εξετάζοντας ανά κλάσμα όγκου, οι τιμές του συντελεστή ελαστικότητας διάτμησης είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή απώλειας διάτμησης. Μάλιστα, οι διαφορές είναι σημαντικές, γεγονός που επιβεβαιώνει τη συμπεριφορά των δειγμάτων περισσότερο ως ιδανικών στερεών (Hookean solids). Συνεπώς, οι παραμορφώσεις είναι ουσιαστικά ελαστικές ή ανακτιήσιμες.

Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγεί η παρατήρηση των Σχημάτων 4.14 και 4.15. Σε αυτά απεικονίζεται η εφαπτομένη δ της γωνίας φάσης, συναρτήσει της συχνότητας της ημιτονοειδούς παραμόρφωσης, για τα δείγματα μαγιονέζας με διαφορετικό κλάσμα όγκου διεσπαρμένης φάσης, στους 4°C και 25°C αντίστοιχα.



Σχήμα 4.14 . Γραφική απεικόνιση της εφαπτομένης της γωνίας φάσης δ , συναρτήσει της συχνότητας, σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 4° C. Τα δείγματα μαγιονέζας έχουν τα εξής κλάσματα όγκου : □ 0.7, Δ 0.725, + 0.75, N 0.775, C 0.8.



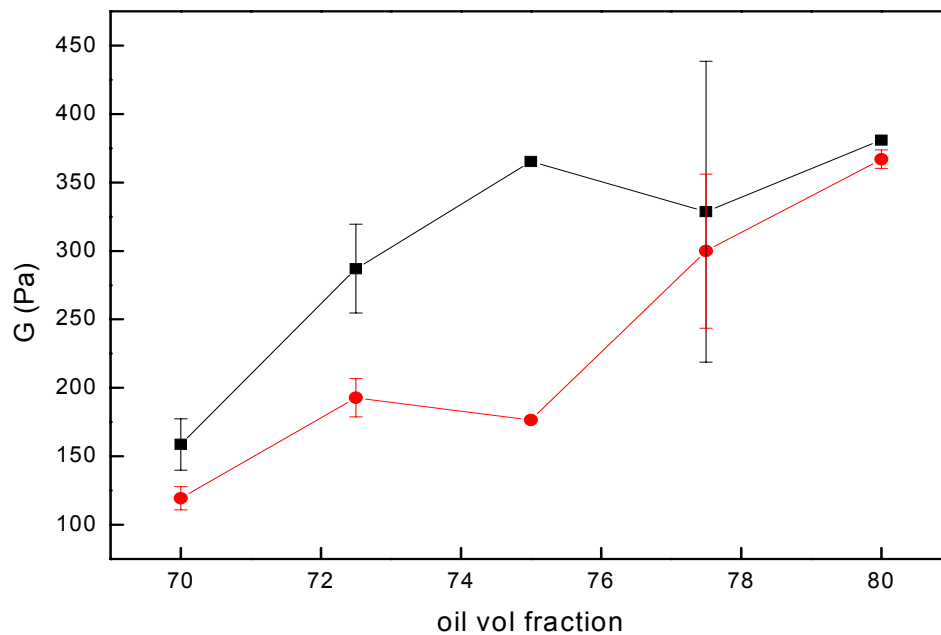
Σχήμα 4.15 . Γραφική απεικόνιση της εφαπτομένης της γωνίας φάσης δ , συναρτήσει της συχνότητας, σε δείγματα μαγιονέζας υπό σταθερή θερμοκρασία 25° C. Τα δείγματα μαγιονέζας έχουν τα εξής κλάσματα όγκου : □ 0.7, Δ 0.725, + 0.75, N 0.775, I 0.8.

Οι απόλυτες τιμές της εφαπτομένης αρχικά είναι μεγαλύτερες, για μικρότερο κλάσμα όγκου, όμως μειώνονται στη συνέχεια, με την αύξηση της συχνότητας. Αντιθέτως, για τα μεγαλύτερα κλάσματα όγκου διεσπαρμένης φάσης 0.775 και 0.8 δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή, σε σχέση με την αύξηση της συχνότητας. Προκύπτει ότι η μεταβολή της γωνίας φάσης είναι μικρή, οπότε η τάση με την παραμόρφωση δεν έχουν μεγάλη διαφορά φάσης, όπως φαίνεται από τις τιμές της εφαπτομένης. Συνεπώς, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τον ισχυρισμό ότι τα δείγματα συμπεριφέρονται περισσότερο ως ιδανικά στερεά υλικά (Hooken solids), παρά ως ιδανικά υγρά (Newtonian liquids).

4.3 Δοκιμές ερπυσμού

Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται ο συντελεστής ελαστικότητας G , που υπολογίζεται από τη δοκιμή ερπυσμού (creep), για δείγματα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου διεσπαρμένης λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8, στους 4°C (μπλε χρώμα) και 25°C (κόκκινο χρώμα). Το ενδιαφέρον που παρουσιάζει το συγκεκριμένο γράφημα, έγκειται στο γεγονός πως παρέχει πληροφόρηση αναφορικά με το όριο επιμήκυνσης, που επιδέχεται κάθε δείγμα, χωρίς να προκληθεί θραύση στους δεσμούς του. Παρατηρείται ότι η αύξηση του κλάσματος όγκου της λιπαρής φάσης επιφέρει μια τάση αύξησης του συντελεστή ελαστικότητας. Επιπρόσθετα, σε θερμοκρασία 4°C οι απόλυτες τιμές του G είναι μεγαλύτερες από αυτές σε θερμοκρασία 25°C.

Είναι προφανές ότι αύξηση του κλάσματος όγκου των διεσπαρμένων λιποσφαιριδίων προσδίδει στο σύστημα μεγαλύτερη αντοχή στην επιμήκυνση. Αυτό πρέπει να αποδοθεί στην αυξημένη παραμόρφωση των σταγονιδίων, που συνοδεύει την αύξηση του κλάσματος όγκου στα υπέρπυκνα γαλακτώματα.



Σχήμα 4.18 . Ο συντελεστής ελαστικότητας G για δείγματα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου διεσπαρμένης λιπαρής φάσης 0.7, 0.725, 0.75, 0.775 και 0.8, στους 4°C (μαύρο) και 25°C (κόκκινο)

5. Συμπεράσματα

Μια ισχυρή συσχέτιση υφίσταται μεταξύ της ταχύτητας της συμπίεσης και του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης, όπως φαίνεται να προκύπτει από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και την επεξεργασία τους. Αύξηση της ταχύτητας προκαλεί μείωση του η_B^+ .

Η γραφική απεικόνιση του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι του διαξονικού ρυθμού τάνυσης, υποδεικνύουν αύξηση του η_B^+ με ταυτόχρονη αύξηση του κλάσματος όγκου, για την ίδια ταχύτητα συμπίεσης και τον ίδιο διαξονικό ρυθμό τάνυσης.

Σε ότι αφορά τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των σταγονιδίων των γαλακτωμάτων μαγιονέζας, τα αποτελέσματα δεν είναι σαφή. Υπάρχει ένδειξη ύπαρξης σαφών δυνάμεων συνοχής, που το πιο πιθανό είναι να οφείλονται στο φαινόμενο της γεφύρωσης.

Η αυξημένη ελαστικότητα των δειγμάτων όμως μπορεί να οφείλεται και στην αύξηση του ιξώδους του περιεχόμενου ηλιελαίου.

Τέλος, υφίσταται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της αυξημένης αντοχής στην επιμήκυνση σε σχέση με την αντίστοιχη αύξηση του κλάσματος όγκου.

6. Βιβλιογραφία

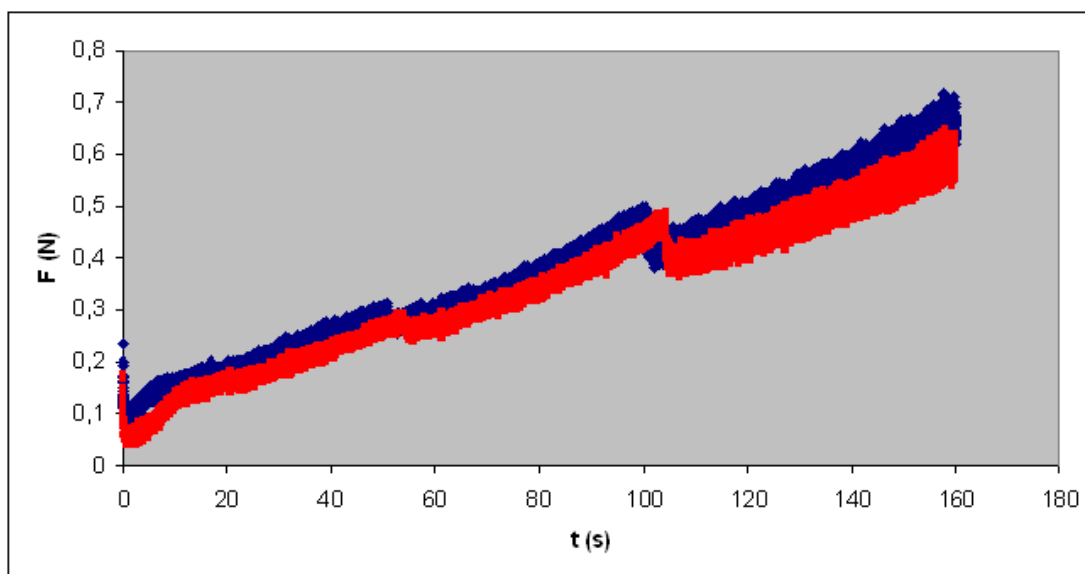
- Abramovic H. & Klofutar C. (1998) The temperature dependence of dynamic viscosity for some vegetable oils. *Acta chim. Slov.*, 45 (1), 69-77
- Campanella O.H & Peleg M. (1987) Squeezing flow viscosimetry of peanut butter. *Journal of Food Science*, 52, 180 – 184
- Campanella O.H., Popplewell L.M., Rosenau J.R. & Peleg M. (1987) Elongational viscosity measurements of melting American process cheese. *Journal of Food Science*, 52, 1249 – 1251
- Campanella O.H. & Peleg M. (2002) Squeezing flow viscometry for Nonelastic Semiliquid Foods – Theory and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42, 241 -264
- Chatraei S.H., Macosko C.W. & Winter H.H. (1981) A new biaxial extensional rheometer. *Journal of Rheology*, 25, 433 – 443
- Dealy J.M. (1984) Official nomenclature for material functions describing the response of a viscoelastic fluid to various shearing and extensional deformations. *Journal of Rheology*, 28, 181 – 195
- Dickinson E., Golding M. & Povey J.W. (1997) Creaming and flocculation of oil-in-water emulsions containing sodium caseinate. *Journal of colloid and interface science*, 185, 515-529
- Engmann J., Servais C. & Burbidge A. (2005) Squeeze flow theory and application, to rheometry reviw. *Journal of non-newtonian fluid mechanisms*, 132, 1-27
- Esquena J. & Solans C. (2006) Highly concentrated emulsions as templates for solid foams In Sjöblom (Ed), *Emulsions and emulsion stability*, 2^d edition, CRC Press
- Friberg S. & Larsson K. (2004) Food Emulsions. 2^d edition, Marcel Dekker
- Lee S.J. & Peleg M. (1990) Lubricated and nonlubricated squeezing flow of double layered array of two power law liquids, *Rheologica Acta*, 29, 360 – 365
- Princen H.M. & Kiss A.D. (1986) Rheology of foams and highly concentrated emulsions, *Journal of colloid and interface science*, 112 , 427-437
- Rohm H. (1993) Rheological Behaviour of butter at large deformations. *Journal of texture studies*, 24, 139 – 155

Rohm H. & Kovac A. (1994) Effects of starter cultures on linear viscoelastic and physical properties of yogurt gels. *Journal of texture studies*, 25, 311 – 329

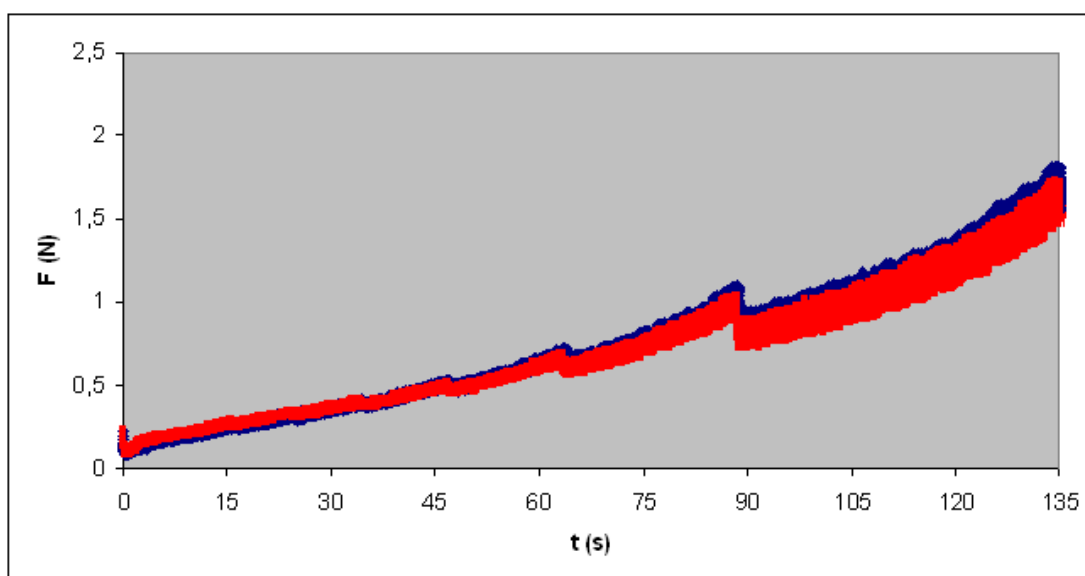
Shukla A. Rizvi S.S.H., Bartsch J.A. (1995) Rheological characterization of butter using lubricated squeeze flow. *Journal of texture studies*, 26, 313 – 323

Steffe J.F. (1996) *Rheological Methods in food process engineering*, 2^d edition, Freeman Press, East Lansing

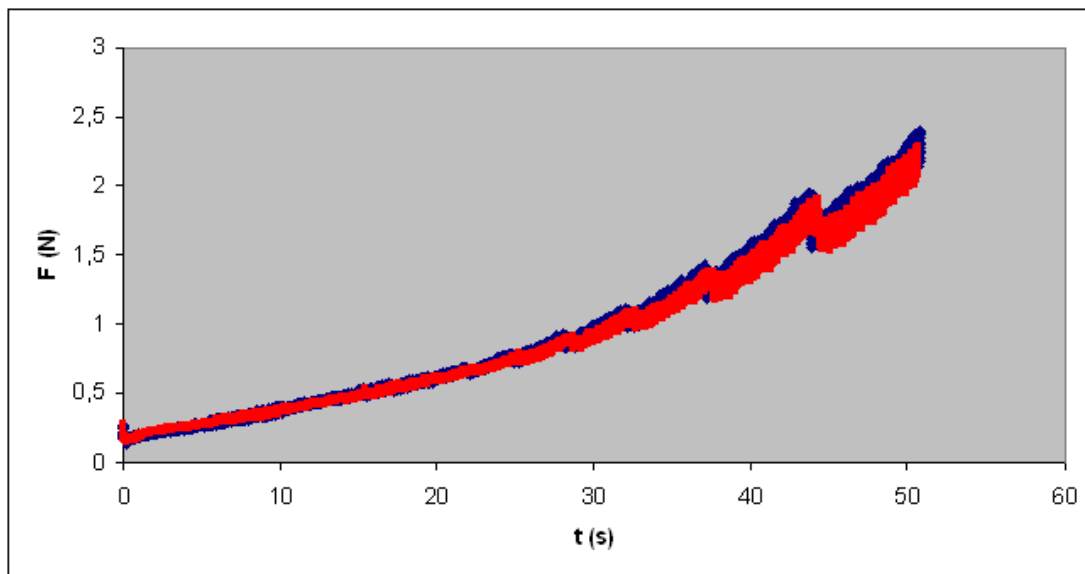
Παράρτημα Α



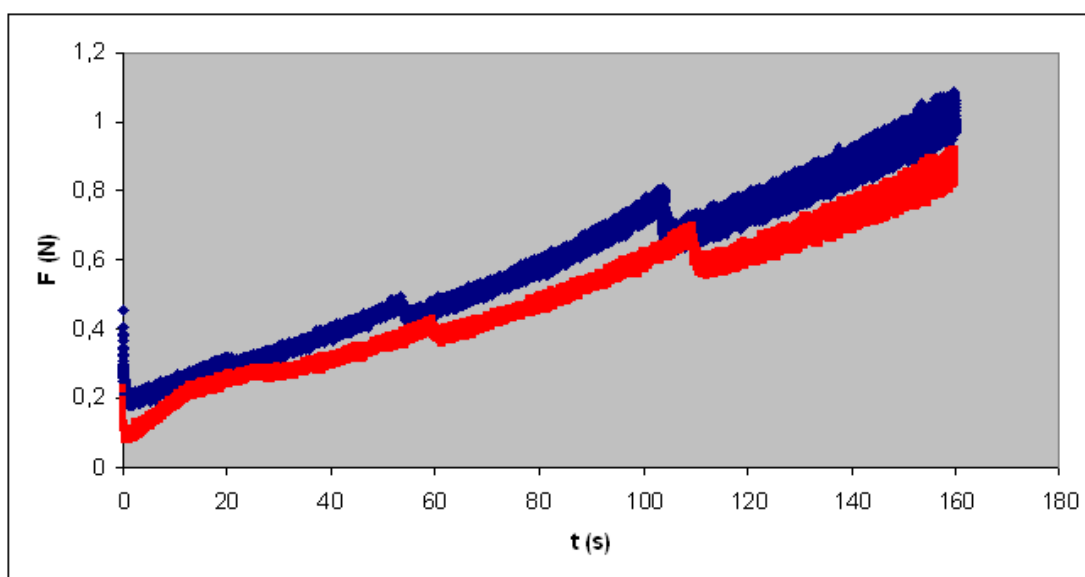
Σχήμα Α1 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.7), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



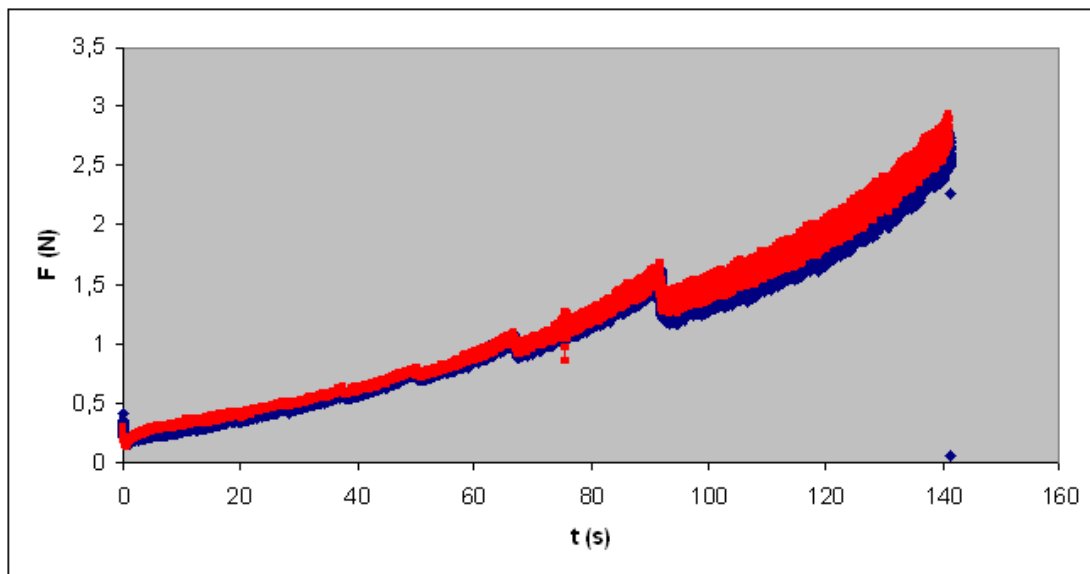
Σχήμα Α2 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.7), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



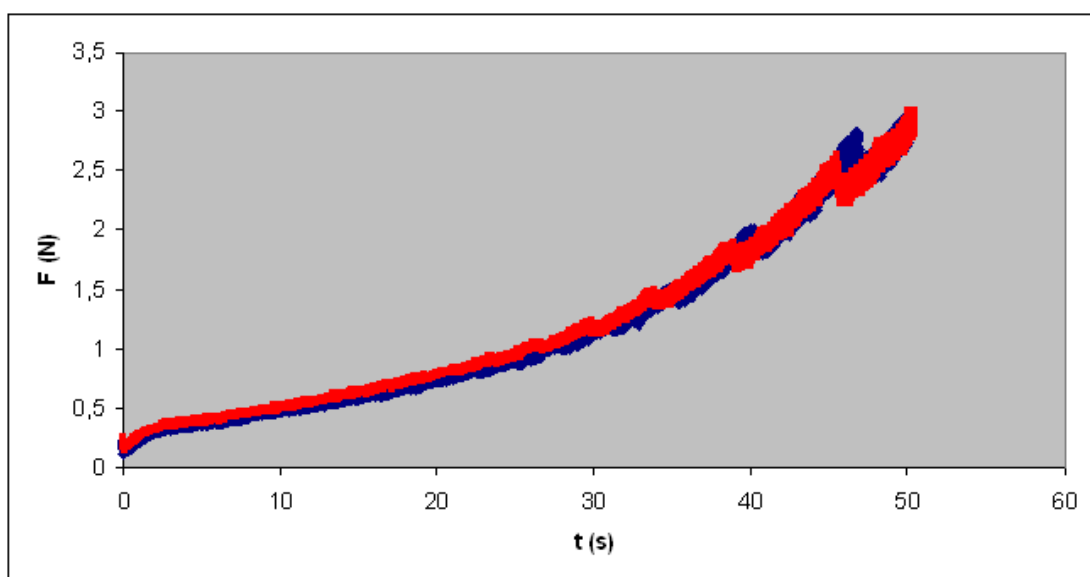
Σχήμα A3 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.7), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



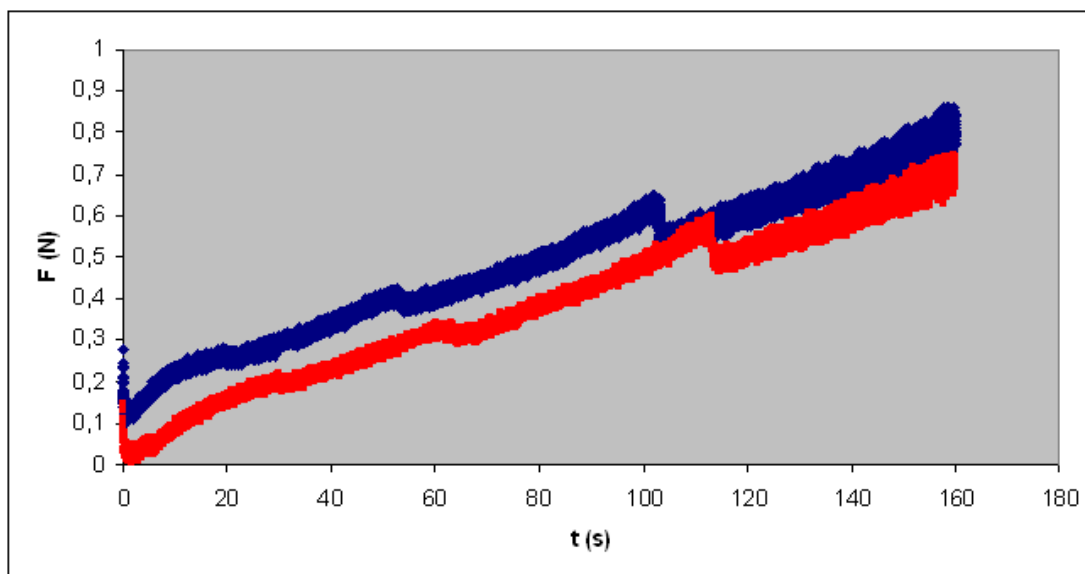
Σχήμα A4 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.725), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



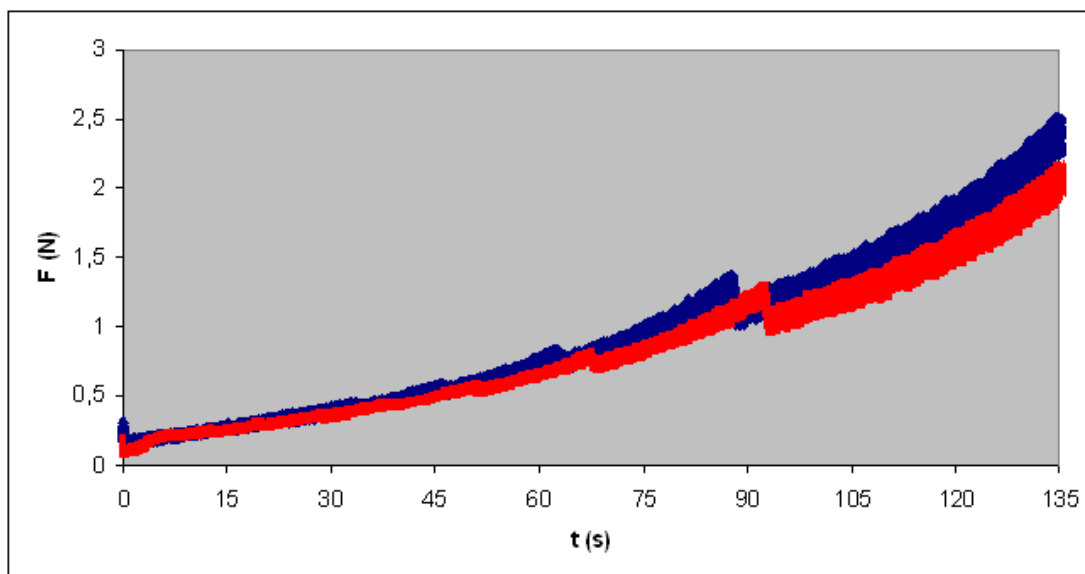
Σχήμα A5 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.725), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



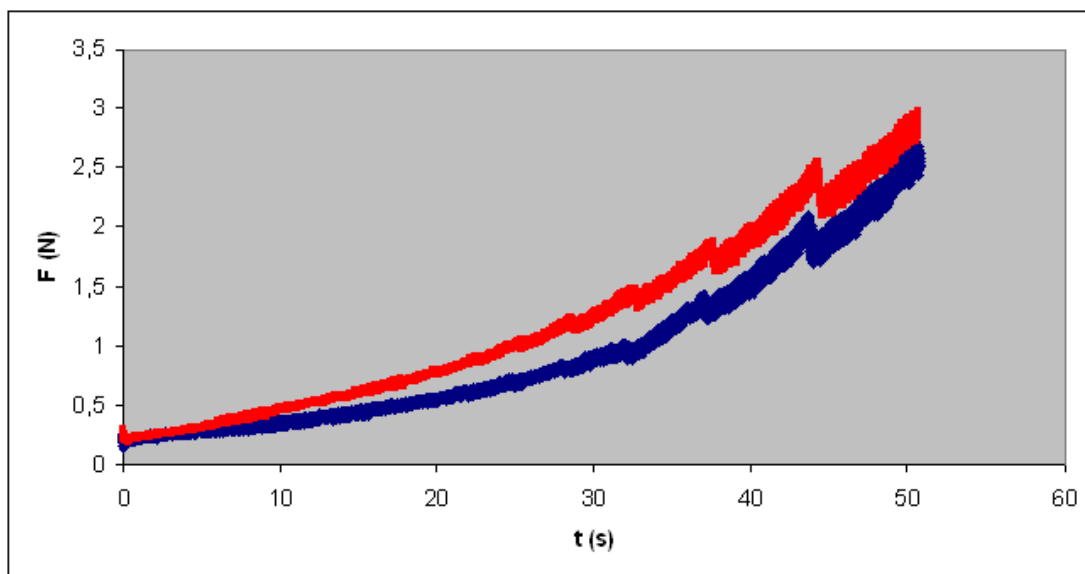
Σχήμα A6 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.725), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



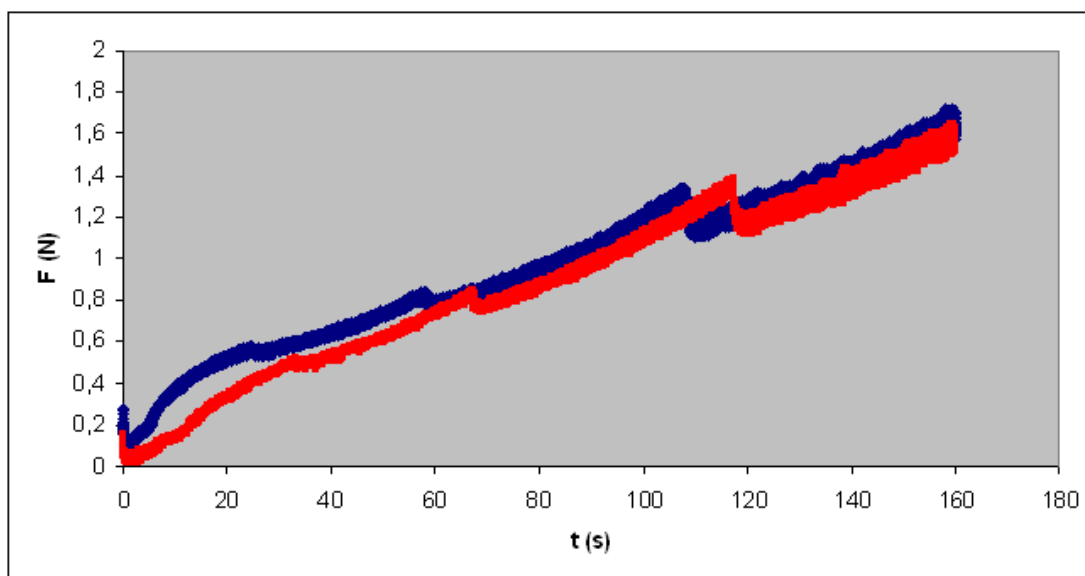
Σχήμα A7 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.75), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



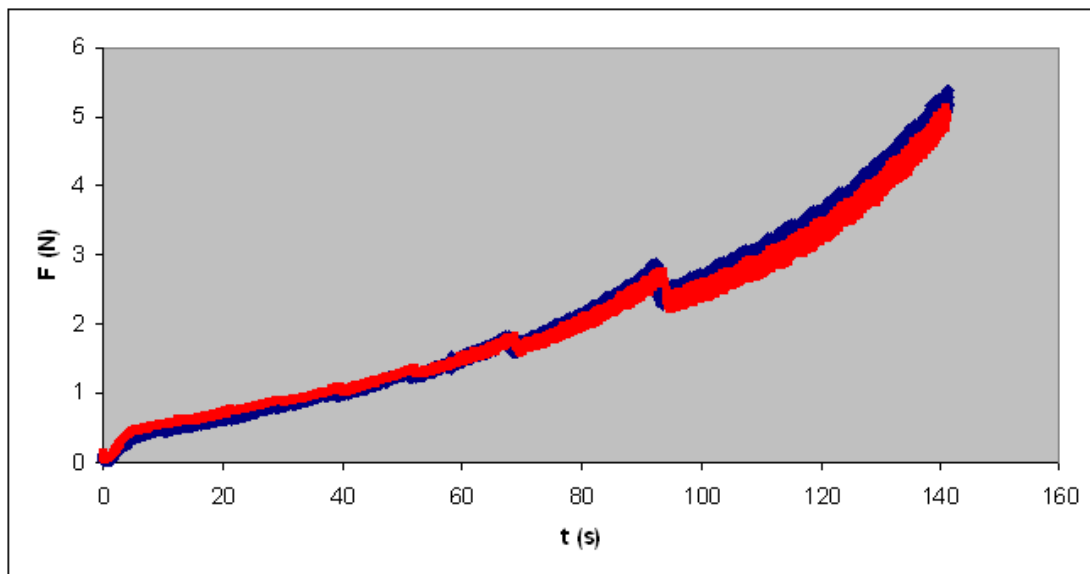
Σχήμα A8 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.75), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



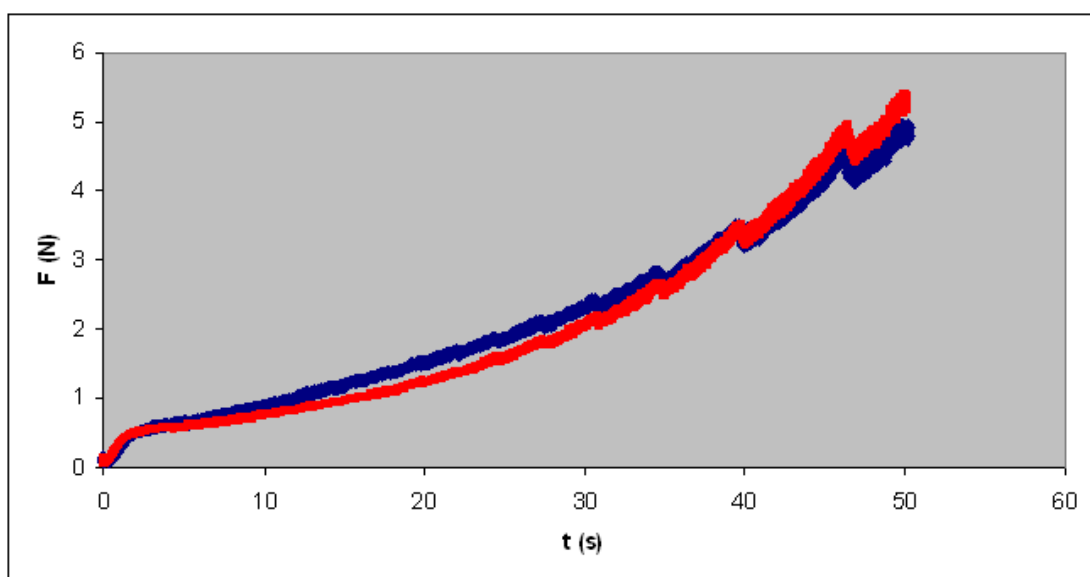
Σχήμα A9 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.75), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



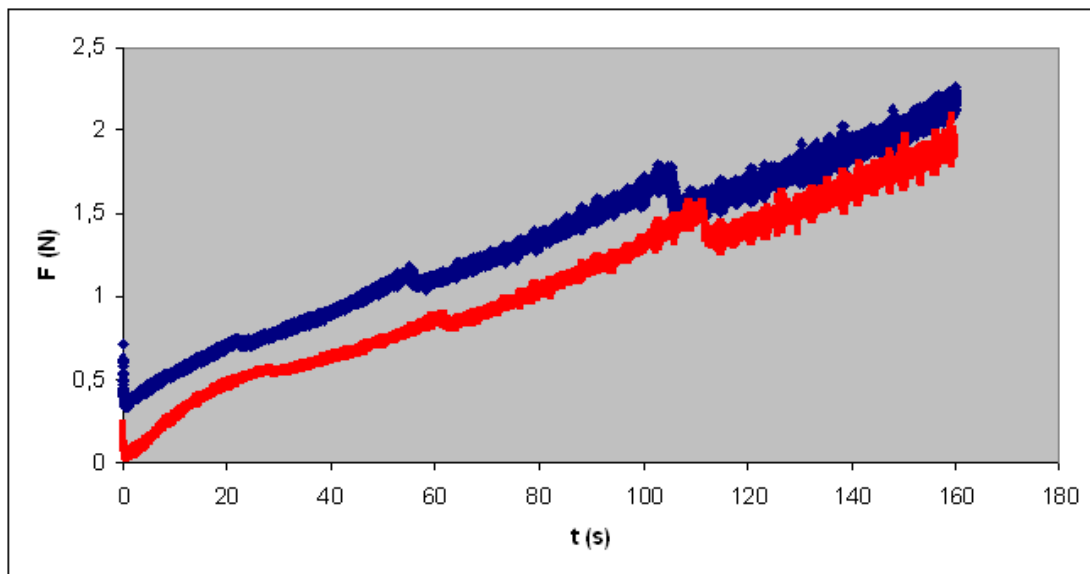
Σχήμα A10 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.775), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



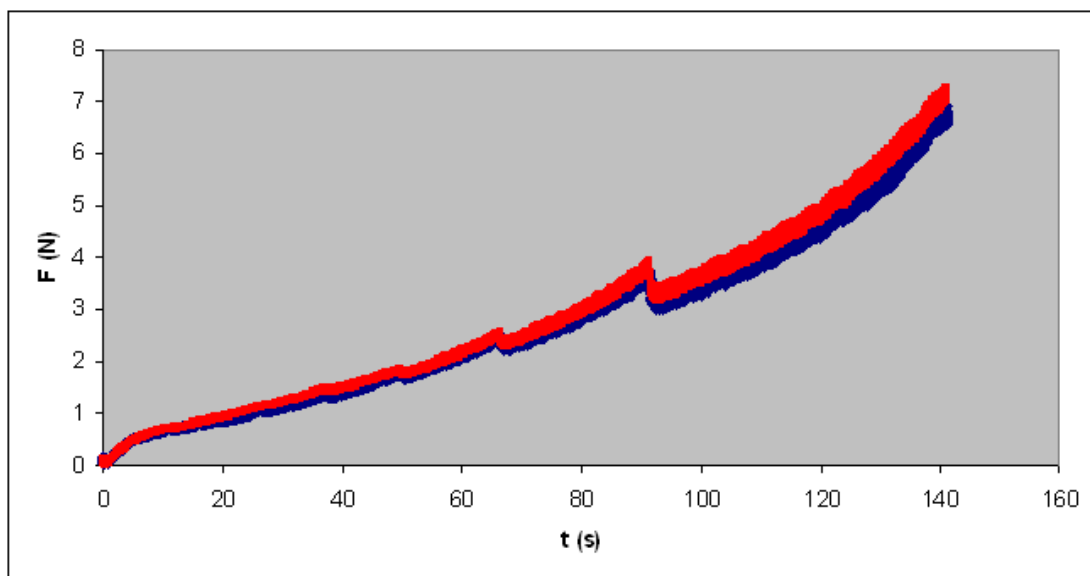
Σχήμα A11 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.775), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



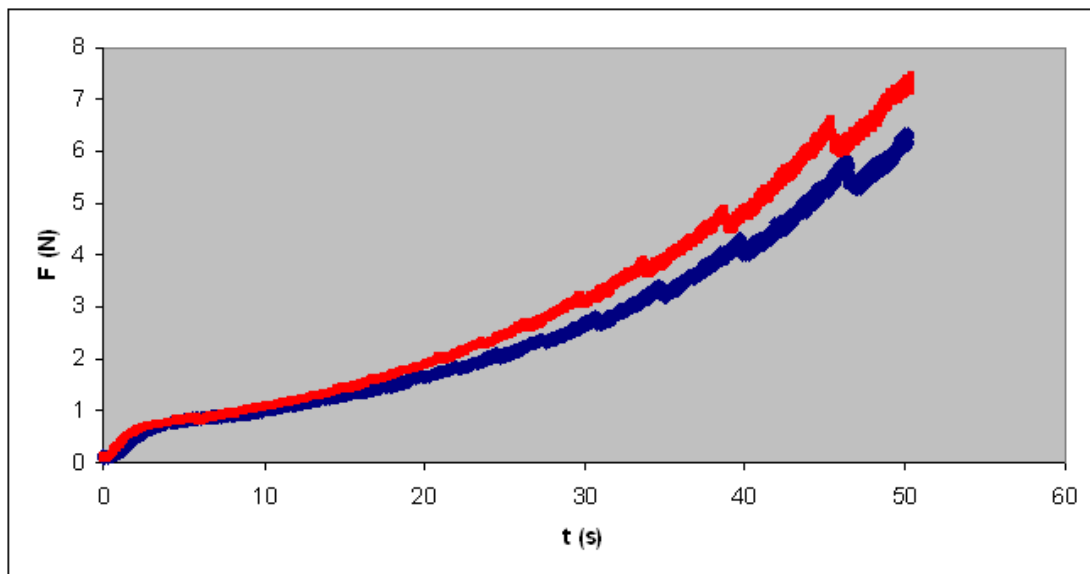
Σχήμα A12 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.775), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.



Σχήμα A13 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.8), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

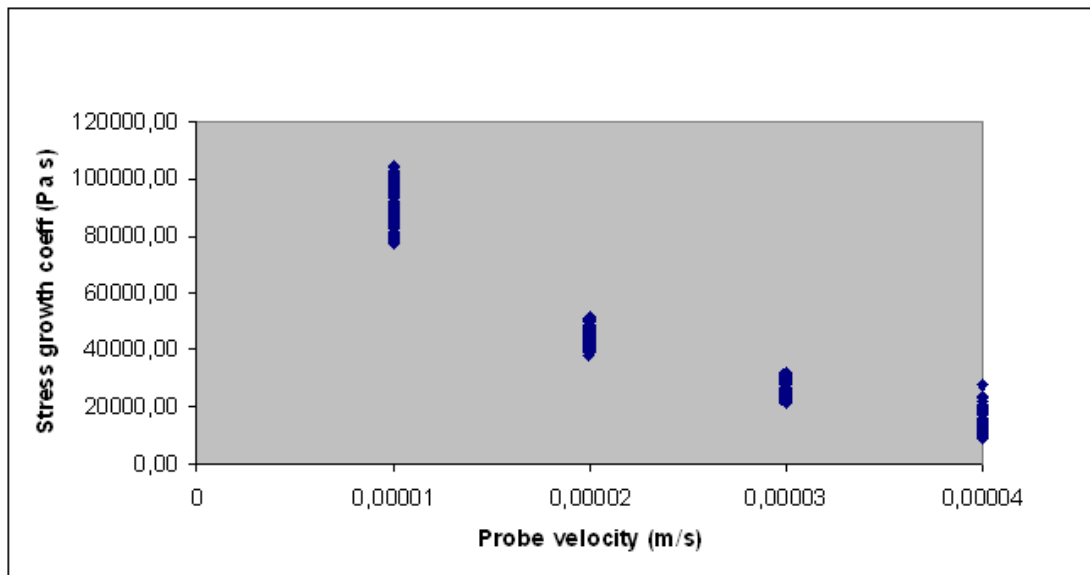


Σχήμα A14 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.8), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

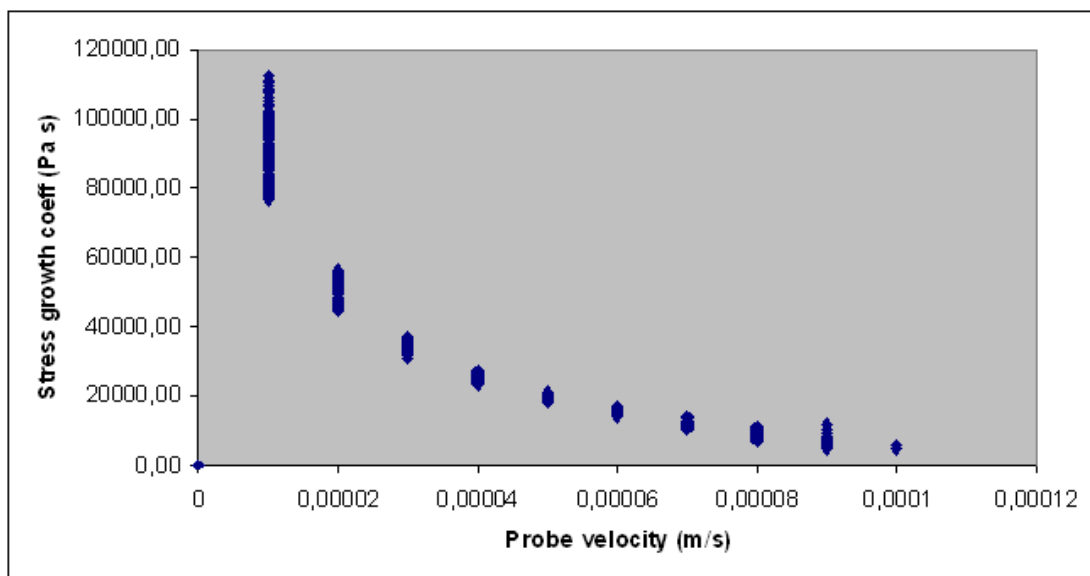


Σχήμα A15 . Διάγραμμα δύναμης-χρόνου διαξονικής λιπαινόμενης συμπίεσης σε δείγματα μαγιονέζας. Αποτελέσματα δύο δειγμάτων με ίδια κατ' όγκο λιπαρή φάση (0.8), υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μαζί, ώστε να διαφανεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

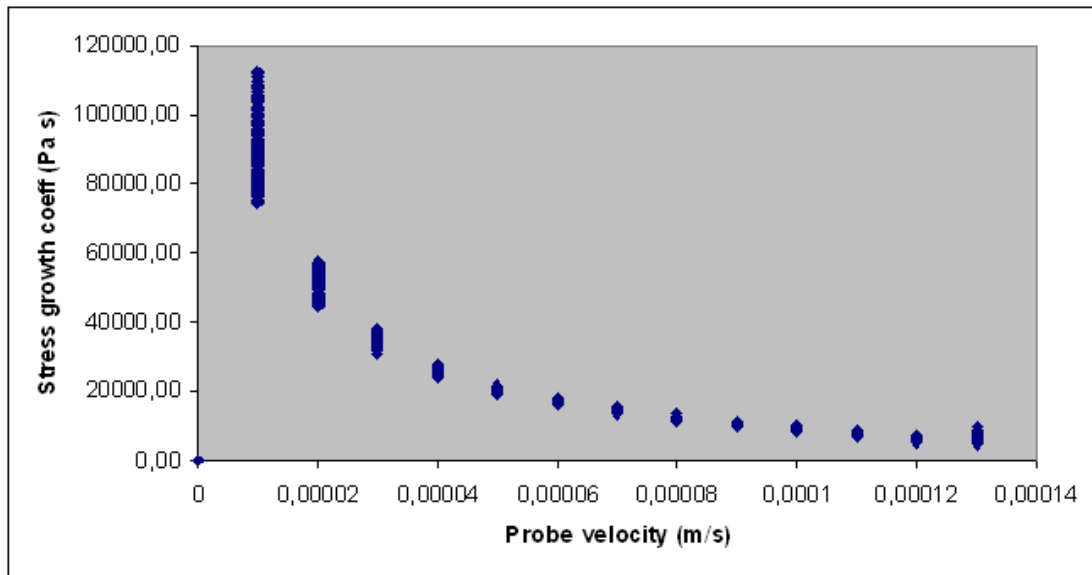
Παράρτημα Β



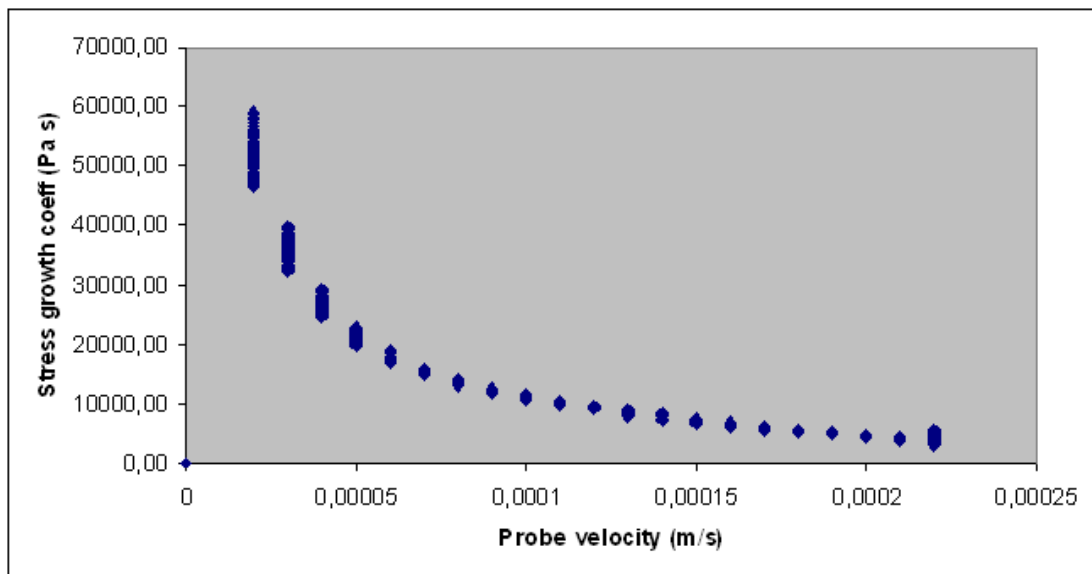
Σχήμα Β1 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%.



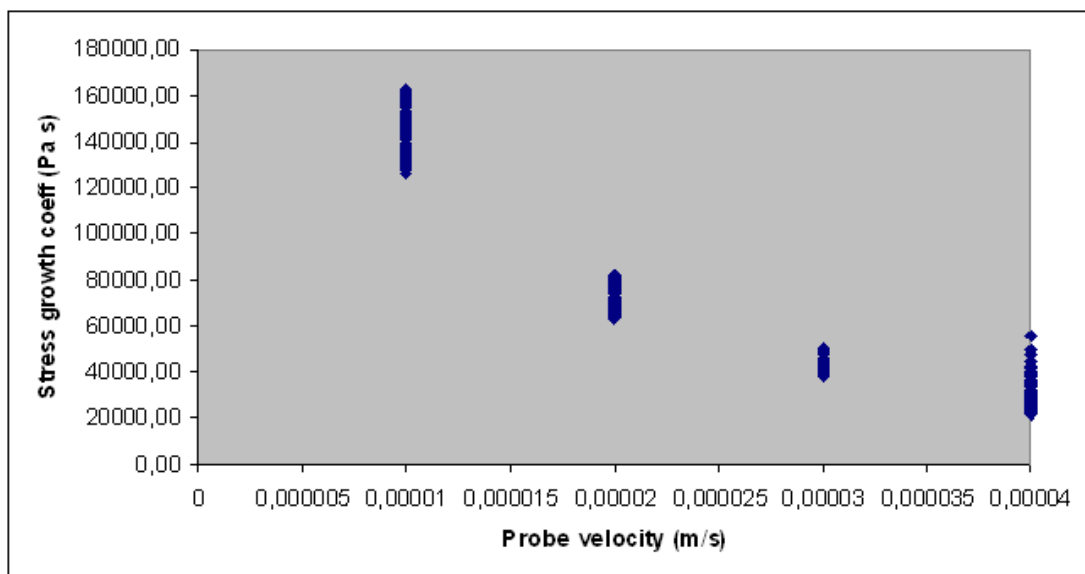
Σχήμα Β2 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%.



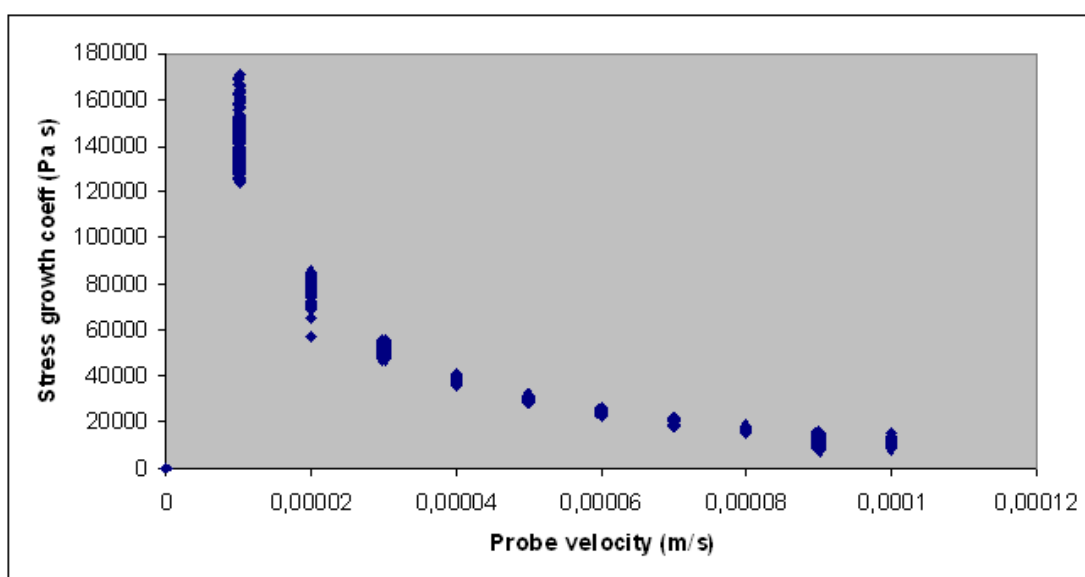
Σχήμα Β3 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 3%.



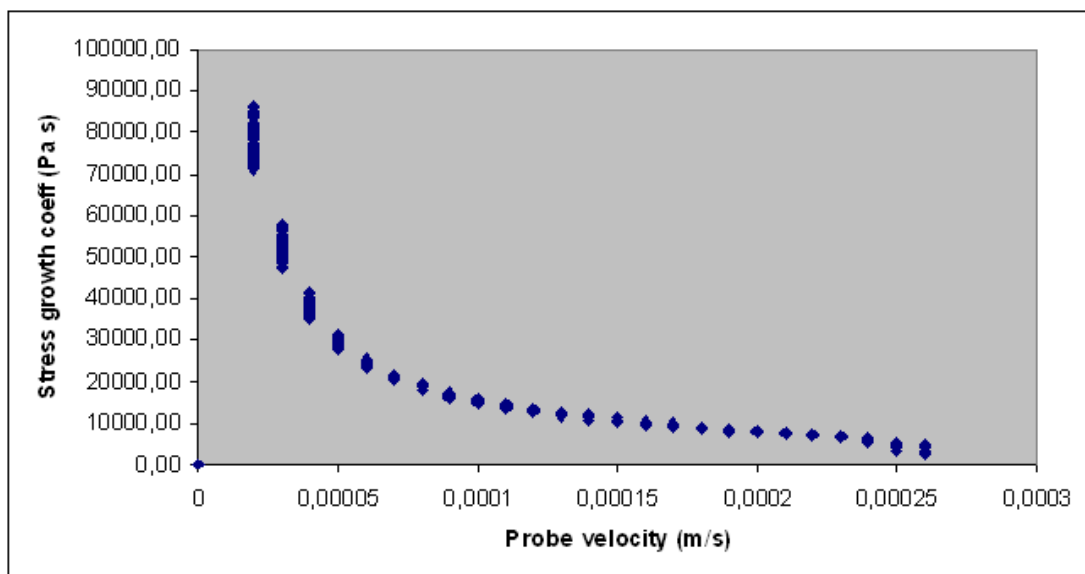
Σχήμα Β4 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.7, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%.



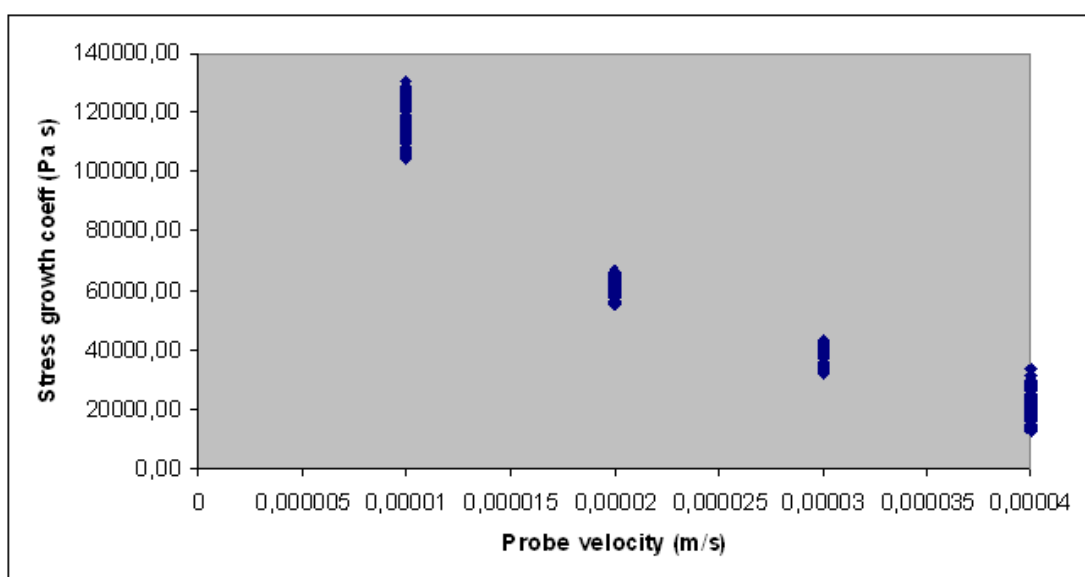
Σχήμα B5 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.725, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%.



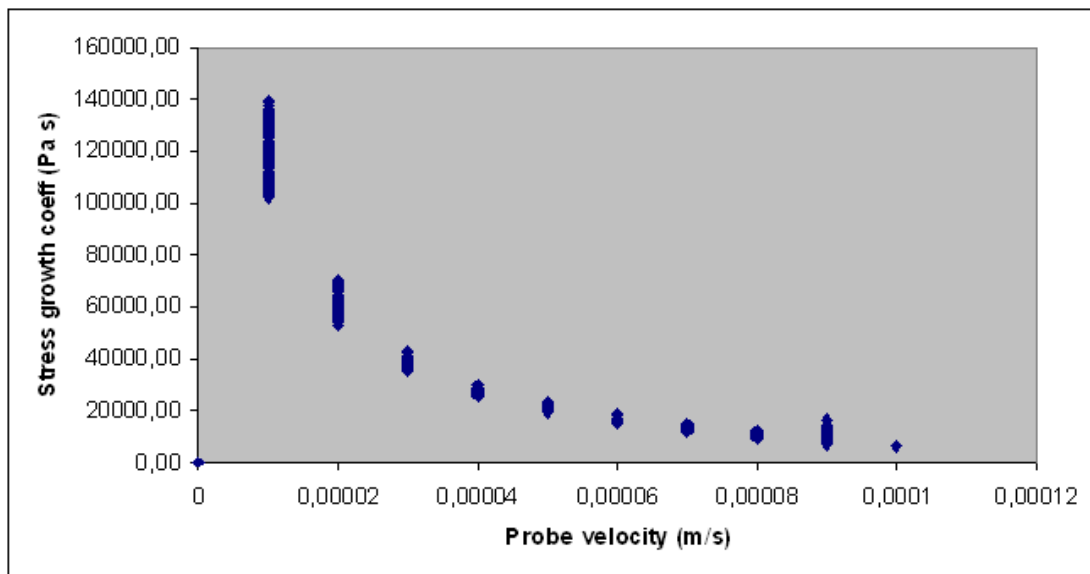
Σχήμα B6 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.725, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%.



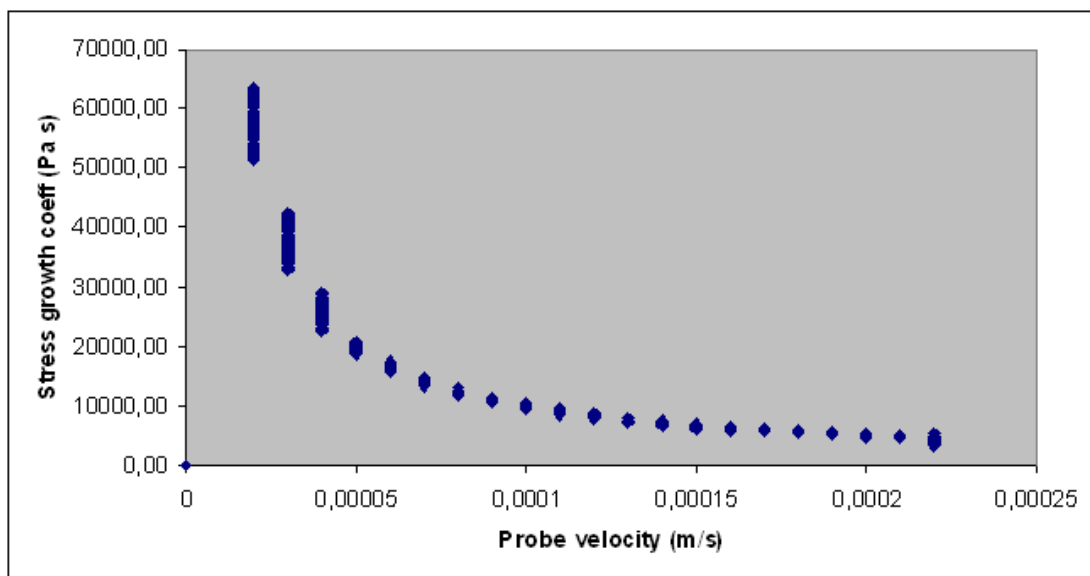
Σχήμα B7 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.725, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%.



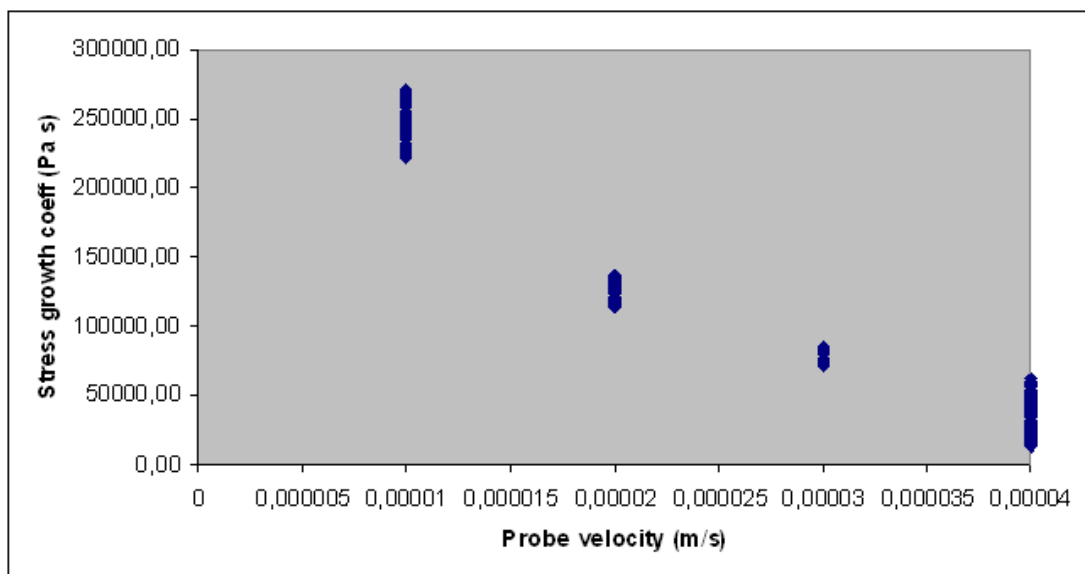
Σχήμα B8 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.75, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%.



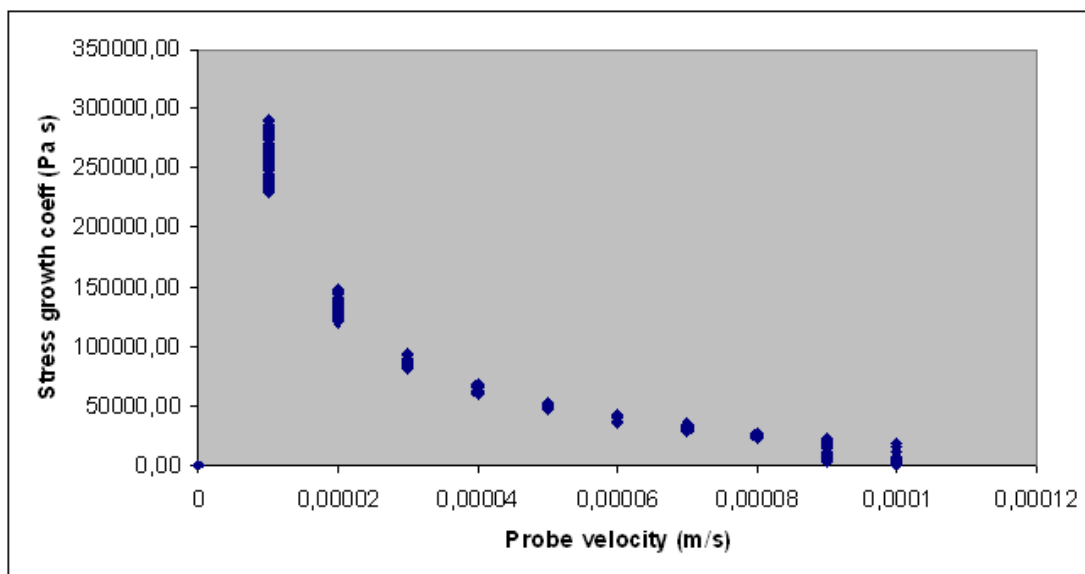
Σχήμα B9 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.75, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%.



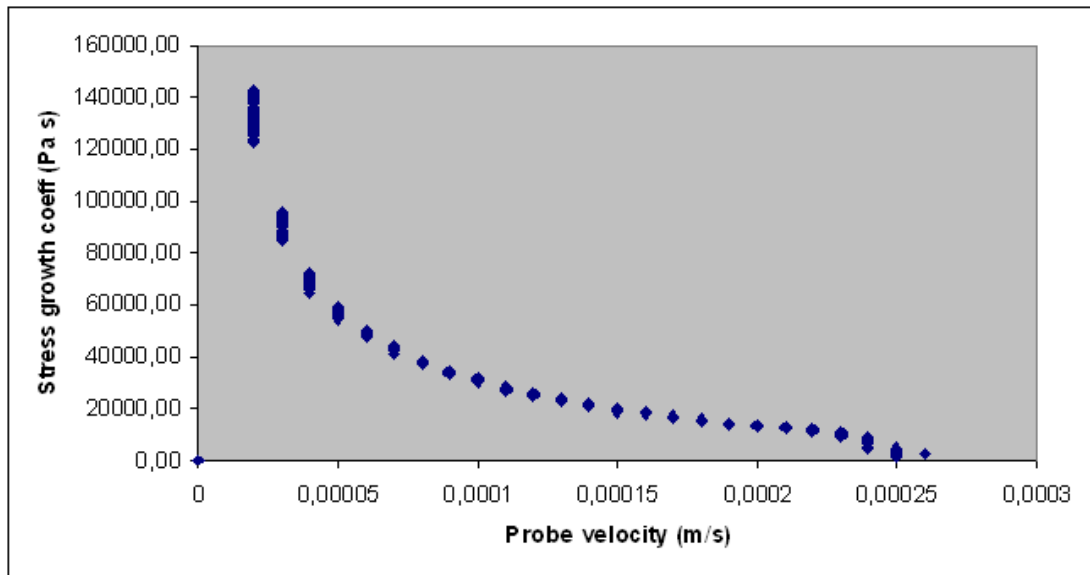
Σχήμα B10 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.75, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%.



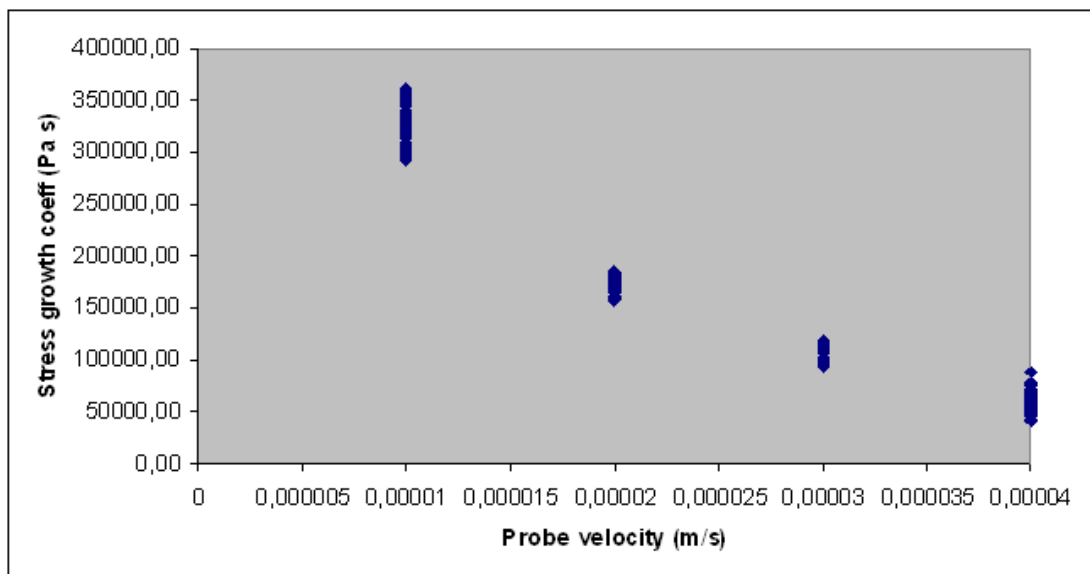
Σχήμα B11 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.775, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%.



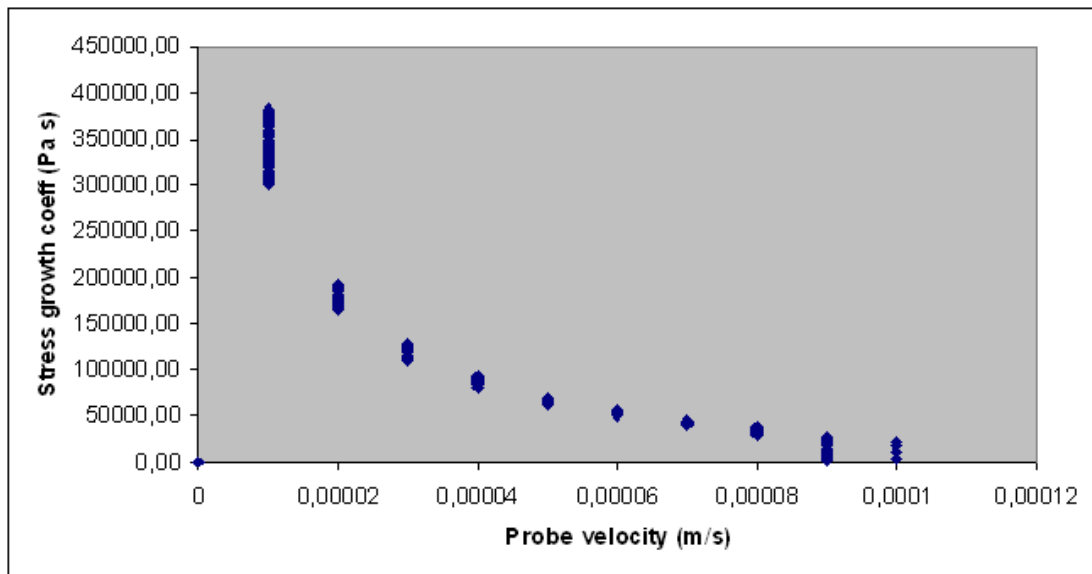
Σχήμα B12 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.775, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%.



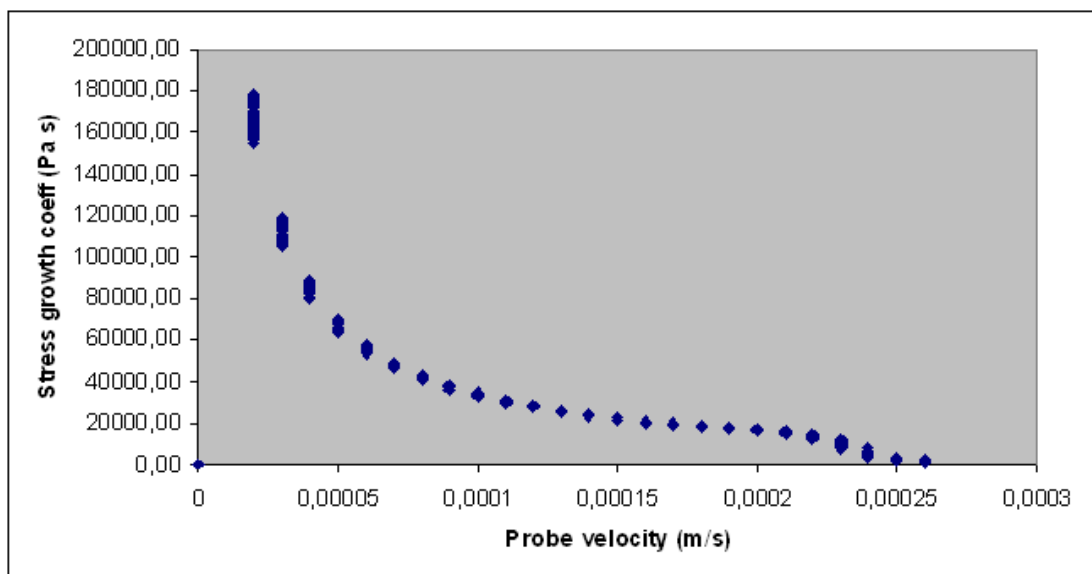
Σχήμα B13 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.775, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%.



Σχήμα B14 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.8, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 1%



Σχήμα B15 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.8, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 2%



Σχήμα B16 . Υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ανάπτυξης της διαξονικής τάσης έναντι της ταχύτητας της κεφαλής. Το διάγραμμα ανταποκρίνεται σε δείγμα μαγιονέζας με κλάσμα όγκου λιπαρής φάσης 0.8, υπό σταθερό ρυθμό τάνυσης 5%