



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

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επίδραση της συντήρησης των αβγών και της προσθήκης κρόκου και ζάχαρης στις φυσικοχημικές ιδιότητες του λευκώματος αβγού και στα χαρακτηριστικά αφρών από λεύκωμα αβγού.**

**Γκάβαλη Μαρίνα - Σελεμέκου Μαρία**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2010**

Επίδραση της συντήρησης των αβγών και της προσθήκης κρόκου και ζάχαρης στις φυσικοχημικές ιδιότητες του λευκώματος αβγού και στα χαρακτηριστικά αφρών από λεύκωμα αβγού.

ΓΚΑΒΑΛΗ ΜΑΡΙΝΑ - ΣΕΛΕΜΕΚΟΥ ΜΑΡΙΑ

Υποβολή Πτυχιακής διατριβής που αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για την απονομή του Πτυχίου του Τμήματος Τεχνολογίας Τροφίμων του ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης.

Ημερομηνία: Ιούνιος 2010

Εισηγητές: Καλογιάννη Ελένη  
Ντερλίκης Εμμανουήλ

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς τους εισηγητές της πτυχιακής μας εργασίας κα Καλογιάννη Ελένη και κο Ντερλίκη Εμμανουήλ για τη μεγάλη και συνεχή βοήθειά τους σε όλη τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και την κα Δημητρέλλη Γεωργία για την βοήθειά της κατά την διάρκεια των μετρήσεων του φαινομενικού ιξώδους.

Επίδραση της συντήρησης των αβγών και της προσθήκης κρόκου και ζάχαρης στις φυσικοχημικές ιδιότητες του λευκώματος αβγού και στα χαρακτηριστικά αφρών από λεύκωμα αβγού.

Γκάβαλη Μαρίνα – Σελεμέκου Μαρία

ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογίας Τροφίμων & Διατροφής, Τμήμα  
Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400 Θεσσαλονίκη Τ.Θ. 141

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση του χρόνου (έως 2 μήνες) και της θερμοκρασίας συντήρησης των αβγών και της προσθήκης κρόκου και ζάχαρης στα χαρακτηριστικά αφρών από λεύκωμα αβγού καθώς και σε ορισμένες φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες των υγρών που χρησιμοποιήθηκαν για το σχηματισμό αφρού. Επίσης, μελετάται η επίδραση της αντικατάστασης του νωπού λευκώματος με επανασυσταμένο λεύκωμα από σκόνη.

Προσδιορίστηκαν η αφριστική ικανότητα και η σταθερότητα των αφρών καθώς και η μεταβολή της διαμέτρου των φυσαλίδων συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης του αφρού. Παράλληλα με τις μετρήσεις στους αφρούς έγιναν και μετρήσεις στα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή τους. Έγινε μέτρηση του pH, προσδιορισμός της ρεολογικής συμπεριφοράς και μέτρηση του φαινομενικού ιξώδους και της δυναμικής διεπιφανειακής τάσης σε διεπιφάνεια υγρού/αερίου.

Τα αποτελέσματα των φυσικών-χημικών μετρήσεων έδειξαν πως το pH, η ρεολογική συμπεριφορά και το φαινομενικό ιξώδες των υγρών αφρισμού επηρεάστηκαν από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν. Αντίθετα, μόνο η προσθήκη κρόκου και ζάχαρης επηρέασε την δυναμική διεπιφανειακή τάση υγρού/αέρα.

Η μελέτη των αφρών έδειξε πως τα δείγματα νωπού λευκώματος και επανασυσταμένου λευκώματος από σκόνη παρουσίασαν μεγαλύτερη αφριστική ικανότητα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Μάλιστα, η αφριστική ικανότητα του νωπού λευκώματος αυξήθηκε με την αύξηση του χρόνου συντήρησης των αβγών. Σε ό,τι αφορά την σταθερότητα των αφρών τα αποτελέσματα των ογκομετρήσεων έδειξαν πως ο ρυθμός αποσταθεροποίησης του νωπού λευκώματος αβγού αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου συντήρησης. Το ίδιο παρατηρήθηκε και με την προσθήκη ζάχαρης και κρόκου. Οι οπτικές μετρήσεις έδειξαν μια αύξηση των διαμέτρων των φυσαλίδων συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης. Ο ρυθμός αύξησης του μεγέθους των φυσαλίδων ήταν μεγαλύτερος για τα δείγματα που περιείχαν κρόκο ενώ ακολούθησαν τα δείγματα λευκώματος και λευκώματος με την προσθήκη ζάχαρης. Τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων των αφρών αποδόθηκαν κυρίως στις μεταβολές του ιξώδους και των φαινομένων που επικρατούν στην διεπιφάνεια.

**Λέξεις κλειδιά:** λεύκωμα αβγού, σκόνη λευκώματος, ιξώδες, φαινομενικό ιξώδες, δυναμική διεπιφανειακή τάση, αφριστική ικανότητα, σταθερότητα αφρού, μέγεθος φυσαλίδων.

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>Σελίδα</b>
1. Εισαγωγή.....	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	4
2.1 Δομή και σύσταση του αβγού.....	4
2.1.1 Οι ιδιότητες του λευκώματος.....	4
2.1.2 Ιδιότητες του κρόκου.....	8
2.2 Αφυδατωμένη σκόνη λευκώματος.....	9
2.3 Φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του αβγού και επίδραση της αποθήκευσης.....	10
2.3.1 Μεταβολές των ιδιοτήτων του αβγού κατά την αποθήκευση.....	10
2.3.2 pH.....	11
2.3.3 Ρεολογικές ιδιότητες- Ιξώδες.....	11
2.3.3.1 Ορισμός.....	11
2.3.3.2 Ρεολογικές ιδιότητες αβγών.....	14
2.3.4 Επιφανειακή τάση.....	15
2.3.4.1 Ορισμός επιφανειακής και δυναμικής επιφανειακής τάσης.....	15
2.3.4.2 Επίδραση τασιενεργών ουσιών στη δυναμική επιφανειακή τάση.....	16
2.3.4.3 Επιφανειακή τάση λευκώματος αβγού.....	17
2.4 Ιδιότητες αφρών.....	19
2.4.1 Ορισμοί- Περιγραφή αφρών.....	19
2.4.2 Σχηματισμός αφρών- Δράση αφριστικών ουσιών.....	21
2.4.3 Σταθερότητα – αποσταθεροποίηση αφρών.....	24
2.4.4 Σχηματισμός αφρού λευκώματος αβγού.....	25
2.4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αφριστική ικανότητα και αφριστική σταθερότητα του λευκώματος.....	27
2.4.6 Μηχανισμός αποσταθεροποίησης του αφρού.....	32
3. Σκοπός της εργασίας.....	34
4. Πειραματικό μέρος.....	35
4.1 Υλικά και μέθοδοι.....	35
4.1.1 Υλικά.....	35
4.1.2 Συσκευές / Όργανα.....	35
4.1.3 Προκαταρκτικά πειράματα για την επιλογή κατάλληλων συνθηκών σχηματισμού αφρού.....	36

4.1.4 Σχηματισμός αφρού .....	37
4.2 Πειραματικό πλάνο .....	38
4.3 Μέθοδοι ανάλυσης .....	39
4.3.1 Μετρήσεις κατά την συντήρηση των αβγών .....	39
4.3.2 Μετρήσεις στα υγρά προς αφρισμό .....	40
4.3.2.1 Μέτρηση pH .....	40
4.3.2.2 Ρεολογικές ιδιότητες και ιξώδες .....	40
4.3.2.3 Επιφανειακή τάση .....	42
4.3.3 Μετρήσεις στους αφρούς .....	45
4.3.3.1 Ογκομετρικές μετρήσεις .....	45
4.3.3.2 Οπτικές μετρήσεις .....	46
5. Αποτελέσματα και συζήτηση.....	51
5.1 Προκαταρκτικά πειράματα .....	51
5.1.1 Επίδραση χρόνου χτυπήματος στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά του αφρού .....	51
5.1.2 Επίδραση του χρόνου χτυπήματος στην αφριστική ικανότητα .....	53
5.1.3 Επίδραση χρόνου χτυπήματος στην σταθερότητα του αφρού .....	53
5.1.4 Επίδραση του χρόνου χτυπήματος στην διάμετρο και στον όγκο των φυσαλίδων .....	55
5.2 Αποτελέσματα των φυσικοχημικών μετρήσεων των υγρών αφρισμού .....	60
5.2.1 pH .....	60
5.2.2 Ρεολογική συμπεριφορά και ιξώδες .....	61
5.2.3 Επιφανειακή τάση .....	67
5.3 Αποτελέσματα των ιδιοτήτων του αφρού.....	72
5.3.1 Αφριστική ικανότητα.....	72
5.3.2 Μεταβολή της σταθερότητα του αφρού .....	76
5.3.3 Μεταβολή του μεγέθους των φυσαλίδων .....	83
5.3.4 Μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνει ο αριθμός των φυσαλίδων .....	95
5.3.5 Μεταβολή της μέσης ακτίνας των φυσαλίδων .....	105
5.3.6 Μεταβολή της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων .....	109
6. Συμπεράσματα.....	112
7. Βιβλιογραφία.....	114
8. Παράρτημα.....	120
8.1 Διατροφικά χαρακτηριστικά ζωοτροφών.....	120

8.2 Ενδεικτικές επαναλήψεις .....	121
8.2.1 Αφριστική ικανότητα.....	121
8.2.2 Σταθερότητα αφρού .....	122
8.2.3 Μέγεθος των φυσαλίδων .....	124
8.2.4 Όγκος που καταλαμβάνει ο αριθμός των φυσαλίδων.....	126
8.2.5 Μέση αριθμητική ακτίνα των φυσαλίδων.....	128
8.2.6 Ακτίνα του μέσου όγκου των φυσαλίδων .....	129
8.3 Μεταβολή της σχετικής υγρασίας .....	130
8.4 Ασυμμετρία και κύρτωση των ακτίνων των φυσαλίδων .....	131

# 1. Εισαγωγή

Τα αβγά χρησιμοποιούνται για ανθρώπινη κατανάλωση από την αρχαιότητα. Είναι ένα από τα πλουσιότερα σε πρωτεΐνη τρόφιμα και επιπλέον έχουν και άλλα θρεπτικά συστατικά υψηλής ποιότητας. Χρησιμοποιούνται με πολλούς τρόπους τόσο στη βιομηχανία τροφίμων όσο και για οικιακή χρήση. Τα προϊόντα αβγών, σε υγρή, κατεψυγμένη ή αφυδατωμένη μορφή παρασκευάζονται από ολόκληρα αβγά, το λεύκωμα ή τον κρόκο. Χρησιμοποιούνται ως ημιέτοιμα προϊόντα στην παρασκευή προϊόντων φούρνου, ζυμαρικών, προϊόντων ζαχαροπλαστικής, πιτών, μαγιονέζας και άλλων αλοιφών, σκόνης σούπας, μαργαρίνης, προϊόντων κρέατος, παγωτών και λικέρ αβγών (Lomakina & Míkoná, 2006). Η πολυχρησιμότητα των προϊόντων αβγού έγκειται κυρίως σε τρεις ιδιότητες των αβγών. Στην πήξη με την επίδραση της θερμότητας, στην ικανότητα αφρισμού και στις γαλακτωματοποιητικές ιδιότητες (Belitz *et al.*, 2006).

Τα αβγά κατά τη συντήρησή τους παρουσιάζουν μεταβολές στη σύσταση, οι οποίες αντανakλώνται σε μεταβολές διαφόρων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων (pH, ιξώδες) (Li Chan & Nakai, 1989). Οι μεταβολές αυτές ενδεχομένως να επηρεάζουν και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των αβγών, κάτι που δεν έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Επίσης κατά την παρασκευή αφρών από λεύκωμα αβγού συνήθως προστίθεται ζάχαρη, ενώ κατά την παρασκευή ορισμένων τροφίμων παρασκευάζονται αφροί από κρόκο και λεύκωμα. Τέλος μέρος του κρόκου μπορεί να μεταφερθεί στο λεύκωμα κατά το διαχωρισμό του λευκώματος από τον κρόκο. Η ζάχαρη και τα λιπίδια του κρόκου αναμένεται να επηρεάσουν τη σταθερότητα των παραγόμενων αφρών (Li Chan & Nakai, 1989; Stevenson *et al.*, 2007).

Συχνά για την παρασκευή αφρών δεν χρησιμοποιείται νωπό λεύκωμα αβγού αλλά επανασυσταμένο λεύκωμα από σκόνη. Η σειρά διεργασιών που ακολουθούνται για την παρασκευή της σκόνης αλλάζει ορισμένες ιδιότητές της (π.χ. το pH) αλλά και τη λειτουργικότητα των πρωτεϊνών (Lechevalier *et al.*, 2007) και αναμένεται να επηρεάσει τις ιδιότητες των παραγόμενων αφρών.

Οι αφροί που παράγονται από τα αβγά είναι διφασικά συστήματα διασποράς αερίου σε υγρή συνεχή φάση. Τέτοια συστήματα προσδίδουν



σημαντικές πληροφορίες για τη δομή και τη σύσταση πολλών τροφίμων, συμπεριλαμβανομένου διαφόρων κέικ και της παρασκευής μαρέγκας. Δύο κοινά και σημαντικά χαρακτηριστικά που βρίσκονται συχνά σε αυτά τα προϊόντα είναι οι πρωτεΐνες και τα ζάχαρα (Davis & Foegeding, 2006). Η ικανότητα αφρισμού είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες των πρωτεϊνών του λευκώματος, στην κατασκευή και στην προετοιμασία πολλών τροφίμων (Κυρανάς, 2000). Επίσης, η σταθερότητα του παραγόμενου αφρού αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό για την αποδοχή του από τους καταναλωτές (Patino *et al.*, 2008).

Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την ικανότητα αφρισμού και την σταθερότητα του αφρού μελετώντας παραμέτρους που σχετίζονται με τη συντήρηση των αβγών (Hammershøj & Qvist, 2001) με τη σύσταση και τις ιδιότητες του υγρού προς αφρισμό (π.χ. την προσθήκη ζάχαρης, του pH) (Stevenson *et al.*, 2007; Lau & Dickinson, 2005; Foegeding & Davis, 2006) την προεπεξεργασία του λευκώματος (Lechevalier *et al.*, 2007; Raikos *et al.*, 2007b) και τις παραμέτρους της διεργασίας αφρισμού (Pernell *et al.*, 2002). Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των αφρών λευκώματος αβγού συχνά γίνονται ογκομετρικές μετρήσεις του αφρού και του αποστραγγιζόμενου υγρού. Οι μετρήσεις αυτές αν και δίνουν μια γενική περιγραφή των παρασκευαζόμενων αφρών δεν παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για την εσωτερική δομή τους. Τα μεγέθη των φυσαλίδων που απαρτίζουν τον αφρό αποτελούν σημαντικό χαρακτηριστικό των παρασκευαζόμενων αφρών το οποίο σχετίζεται με την ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο καταναλωτής αλλά και με τη σταθερότητα του αφρού, αλλά δεν έχει μελετηθεί συστηματικά για αφρούς που παράγονται από λεύκωμα αβγού. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι ερευνητές δεν κάνουν ογκομετρικές μετρήσεις της σταθερότητας συναρτήσει του χρόνου και έτσι σημαντική πληροφορία που αφορά την αποσταθεροποίηση των παρασκευαζόμενων αφρών χάνεται.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να ερευνηθεί η επίδραση του χρόνου συντήρησης (1<sup>η</sup> ημέρα, 1<sup>η</sup> εβδομάδα, 1<sup>ος</sup> μήνας και 2<sup>ος</sup> μήνας) και της θερμοκρασίας συντήρησης (στους 20°C και 4°C) σε ορισμένες φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες (pH, ιξώδες, δυναμική διεπιφανειακή

τάση) καθώς και σε ορισμένες ιδιότητες παραγόμενου αφρού (ικανότητα αφρισμού, μέγεθος φυσαλίδων αφρού) από λεύκωμα αβγού.

Παράλληλος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης ζάχαρης και κρόκου αβγού στις ιδιότητες του αφρού. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την χρήση νωπού λευκώματος αβγού συγκρίνονται με αυτά που λαμβάνονται με τη χρήση ανασυσταμένου λευκώματος αβγού από σκόνη και νερό. Επίσης, μελετάται η αποσταθεροποίηση των παραπάνω αφρών με μέτρηση των μεταβολών του όγκου του αφρού και του υγρού αποστράγγισης καθώς και του μεγέθους των φυσαλίδων συναρτήσει του χρόνου (5min έως 180min). Τέλος, επιχειρείται να γίνει ερμηνεία των αποτελεσμάτων των ιδιοτήτων του αφρού βάση των φυσικών, χημικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για αφρισμό.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Δομή και σύσταση του αβγού

Το αβγό της κότας, περιβάλλεται από ένα ασβεστούχο πορώδες κέλυφος πάχους 0,2-0,4 mm. Το εσωτερικό του κελύφους είναι επενδυμένο με δύο στενά συνδεδεμένες μεμβράνες (εσωτερική και εξωτερική). Οι δύο μεμβράνες διαχωρίζονται στο μεγάλο άκρο του αβγού σχηματίζοντας ένα κενό, που ονομάζεται αεροθάλαμος. Ο αεροθάλαμος έχει διάμετρο περίπου 5 mm στα φρέσκα αυγά, και αυξάνεται σε μέγεθος κατά την αποθήκευση (Belitz *et al.*, 2006).

Το λεύκωμα του αβγού είναι ένα υδατικό, υποκίτρινο, παχύρρευστο υγρό, που αποτελείται από τρία κλάσματα που διαφέρουν ως προς το ιξώδες. Το εσωτερικό μέρος του αβγού, ο κρόκος, περιβάλλεται από λεύκωμα. Ένα λεπτό αλλά πολύ συνεκτικό στρώμα λευκώματος περιβάλλει στενά τον κρόκο και διακλαδίζεται στις αντίθετες άκρες του κρόκου σε δύο χάλαζες που εκτείνονται στο παχύ (πυκνόρρευστο) λεύκωμα. Ο κρόκος αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα σκουρόχρωμου και ανοιχτόχρωμου υλικού που είναι τοποθετημένα ομόκεντρα (Belitz *et al.*, 2006).

Το μέσο βάρος ενός αβγού κότας είναι 58g. Τα κύρια συστατικά του είναι νερό (~74%) πρωτεΐνη (~12%) και λιπίδια (~11%). Σε ένα χαρακτηριστικό αβγό το λεύκωμα αποτελεί το 58% του όγκου του αβγού και περιέχει το 50% της συνολικής πρωτεΐνης του αβγού (Stevens, 1991).

#### 2.1.1 Οι ιδιότητες του λευκώματος

Το λεύκωμα του αβγού είναι μια παχύρρευστη υποκίτρινη μάζα που αποτελείται από νερό σε ποσοστό 87,9%, πρωτεΐνες, πολύ μικρές συγκεντρώσεις υδατανθράκων και τέφρας και ίχνη λίπους. Η πρωτεΐνη είναι το μεγαλύτερο συστατικό του λευκώματος. Το ποσοστό των λιπαρών ουσιών στο λεύκωμα είναι περίπου 0,03%. Οι υδαάνθρακες στο λεύκωμα είναι σε συζευγμένη (με πρωτεΐνη) και ελεύθερη μορφή. Περίπου το 98% των

ελεύθερων υδατανθράκων του λευκώματος είναι γλυκόζη (Gilbert, 1971). Η σύσταση του λευκώματος του αβγού παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σύσταση του λευκώματος.

<b>Πρωτεΐνες</b>	<b>Λιπίδια</b>	<b>Υδατάνθρακες</b>	<b>Τέφρα</b>	<b>Νερό</b>
<b>% (κ.β.)</b>	<b>% (κ.β.)</b>	<b>% (κ.β.)</b>	<b>% (κ.β.)</b>	<b>% (κ.β.)</b>
9.7-10.6	0.03	0.4-0.9	0.5-0.6	87.9-89.4

(Li Chan *et al.*, 1994)

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 οι πρωτεΐνες του λευκώματος είναι οι κύριες διαλυτές ουσίες που εμφανίζονται στο λεύκωμα. Είναι σφαιρικές πρωτεΐνες και οι περισσότερες έχουν όξινο ισοηλεκτρικό σημείο. Πολλές από τις πρωτεΐνες του λευκώματος είναι γλυκοπρωτεΐνες με περιεχόμενο υδατανθράκων που κυμαίνεται από 2 ως 58%. Αρκετές από τις πρωτεΐνες του λευκώματος έχουν βιολογική δραστηριότητα, είναι δηλαδή ένζυμα όπως η λυσοζύμη, δρουν ως αναστολείς ενζύμων (ωομεικοειδές, ωοαναστολέας, κυστατίνη και ωοστατίνη), ή σχηματίζουν σύμπλοκα με συνένζυμα (π.χ. φλαβοπρωτεΐνες, αβιδίνη). Οι βιολογικές δραστηριότητες μπορούν να συσχετιστούν με την προστασία του αβγού από μικροβιακή αλλοίωση (Stevens, 1991).

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2 οι κυριότερες ποσοτικά πρωτεΐνες του λευκώματος είναι:

**Ωοαλβουμίνη:** Αποτελεί την κυριότερη πρωτεΐνη του λευκώματος και αποτελεί το 54% των πρωτεϊνών του. Είναι μια γλυκοπρωτεΐνη με 3,2% υδατάνθρακες. Αποτελείται από μια πεπτιδική αλυσίδα με 385 αμινοξέα, και έχει μοριακό βάρος 42699. Κατά την αποθήκευση των αβγών, η πιο σταθερή στη θερμοκρασία S-ωοαλβουμίνη (θερμοκρασία πήξης 92,5°C) σχηματίζεται από τη φυσική πρωτεΐνη (θερμοκρασία πήξης 84,5°C) πιθανώς με την ανταλλαγή θειόλης-δισουλφιδίου. Η περιεκτικότητα της S-ωοαλβουμίνης αυξάνεται από 5% στα νωπά αβγά σε 81% σε αβγά που έχουν αποθηκευτεί υπό ψύξη για 6 μήνες. Η ωοαλβουμίνη μετουσιώνεται σχετικά εύκολα, για παράδειγμα με ανάμειξη ή ανατάραξη του υδατικού της διαλύματος. Αυτή είναι

μια διεπιφανειακή μετουσίωση η οποία παρατηρείται με ξεδίπλωμα των πρωτεϊνικών μορίων (Stevens, 1991).

Πίνακας 2: Ιδιότητες των πρωτεϊνών του λευκώματος του αβγού.

ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΛΙΚΗΣ ΠΡΩΤΕΪΝΗΣ (%)	pH (I.Σ)	M.B (Da)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Ωοαλβουμίνη	54	4.5-4.6	45·10 <sup>3</sup>	Φωσφογλυκοπρωτεΐνη, έχει 4 σουλφιδρύλια
Κοναλβουμίνη	12-13	6.1-6.6	77·10 <sup>3</sup>	Γλυκοπρωτεΐνη, συνθέτει σίδηρο και αλλά μεταλλικά ιόντα
Ωομυκοειδές	11	3.9-4.3	28·10 <sup>3</sup>	Γλυκοπρωτεΐνη, αναστολέας της πρωτεϊνάσης
Ωομυκίνη	3.5	4.5-5.0	21·10 <sup>4</sup> 72·10 <sup>4</sup>	Γλυκοπρωτεΐνη, ινώδης, ιξώδη, παρεμποδίζει την ιογενή αιμοσυγκόλληση
Λυσοζύμη (Ωογλοβουλίνη G <sub>1</sub> )	3.4-3.5	10.7	14·10 <sup>3</sup>	Σφαιρική πρωτεΐνη με διαλυτική δράση
Ωογλοβουλίνη G <sub>2</sub>	4	5.5	47·10 <sup>3</sup>	Καλός αφριστικός παράγοντας
Ωογλοβουλίνη G <sub>3</sub>	4	5.8	50·10 <sup>3</sup>	Καλός αφριστικός παράγοντας
Ωογλυκοπρωτεΐνη	1.0	3.9	24·10 <sup>3</sup>	Δεσμεύει την ριβοφλαβίνη
Φλαβοπρωτεΐνη	0.8	4.0-4.1	32·10 <sup>3</sup>	Καλός αφριστικός παράγοντας
Ωομακρογλοβουλίνη	0.5	4.5-4.7	78·10 <sup>3</sup>	Γλυκοπρωτεΐνη
Αβιδίνη	0.05	9.5	55·10 <sup>3</sup>	Δεσμεύει βιοτίνη
Ωοαναστολέας	0.1	5.1	45·10 <sup>3</sup>	Αναστέλλει τις πρωτεϊνάσες
Κυστατίνη	0.05	5.1	13·10 <sup>3</sup>	Αναστέλλει πεπτιδάσες κυστεΐνης

(Stevens, 1991)

*Κοναλβουμίνη (ωοτρανσφερίνη):* Η κοναλβουμίνη και η τρανσφερίνη του ορού είναι πανομοιότυπες. Αυτή η πρωτεΐνη, αντίθετα με την ωοαλβουμίνη, δεν μετουσιώνεται στη διεπιφάνεια αλλά πήζει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αποτελείται από μια πεπτιδική αλυσίδα και περιέχει έναν ολιγοσακχαρίτη που αποτελείται από τέσσερις μαννόζες και οχτώ μονάδες N-ακετυλογλυκοζαμίνης. Η δέσμευση των μεταλλικών ιόντων σε pH=6 ή παραπάνω είναι χαρακτηριστική ιδιότητά της. Ο περιστασιακός κόκκινος χρωματισμός, κατά την επεξεργασία, των προϊόντων αβγών προέρχεται από ένα σύμπλοκο κοναλβουμίνης-σιδήρου. Η κοναλβουμίνη έχει την ικανότητα να καθυστερεί την ανάπτυξη των μικροοργανισμών (Mine, 1995).

*Ωομυκοειδές:* Εμφανίζεται στο λεύκωμα σε ποσοστό 11% επί των πρωτεϊνών του. Το ωομυκοειδές είναι μια θερμοάντοχη πρωτεΐνη, που δρα ως αναστολέας των πρωτεολυτικών ενζύμων (πρωτεάσες) του λευκώματος. Η πρωτεΐνη αυτή περιέχει στο μόριό της 9 δισουλφιδικούς δεσμούς και επομένως παρουσιάζει σταθερότητα έναντι της πήξης κατά τη θέρμανση (Stevens, 1991).

*Λυσοζύμη:* Είναι ευρέως διαδεδομένη και βρίσκεται όχι μόνο στο λεύκωμα του αβγού αλλά και σε πολλούς ζωικούς ιστούς και εκκρίσεις, στον γαλακτώδη οπό που εκκρίνουν ορισμένα φυτά και σε μερικούς μύκητες. Είναι ένζυμο N-ακετυλομουραμιδάση και αποτελείται από μια πεπτιδική αλυσίδα με 129 μονάδες αμινοξέων και τέσσερις δισουλφιδικούς δεσμούς (Stevens, 1991).

*Ωομυκίνη:* Σε ποσοστό 5% επί των πρωτεϊνών του, σχηματίζει ινώδεις δομές και επομένως συνεισφέρει στην αύξηση του ιξώδους του λευκώματος, ιδιαίτερα του πυκνόρρευστου λευκώματος όπου απαντάται σε τετραπλάσια συγκέντρωση από ότι στο λεπτόρρευστο τμήμα του. Είναι σταθερή στη θερμοκρασία και σχηματίζει μέσα στο νερό ένα διαλυτό σύμπλοκο με τη λυσοζύμη. Η διάσταση του συμπλόκου εξαρτάται από το pH. Πιθανώς να συσχετίζεται με την μείωση του ιξώδους του λευκώματος κατά την αποθήκευση των αβγών (Κυρανάς, 2000).

### 2.1.2 Ιδιότητες του κρόκου

Ο κρόκος είναι ένα γαλάκτωμα λίπους σε νερό με περίπου 50% περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία η οποία αποτελείται από πρωτεΐνες (1/3) και λιπίδια (2/3). Η μεταφορά νερού από το λεύκωμα του αβγού μειώνει την περιεκτικότητα σε στερεά κατά 2-4% κατά την αποθήκευση για 1-2 εβδομάδες (Belitz *et al.*, 2006). Επίσης μέρος των λιπιδίων του κρόκου μεταφέρεται στο λεύκωμα κατά την αποθήκευση. Ο κρόκος περιέχει σε σχέση με το λεύκωμα, λιγότερο νερό, περισσότερες πρωτεΐνες και όλο σχεδόν το λίπος του αβγού (Belitz *et al.*, 2006).

Η ποσοτική αναλογία των πρωτεϊνών του παραμένει σταθερή, ενώ μεταβλητή είναι η αναλογία του λίπους του, που κυμαίνεται μεταξύ 32 και 35%, ανάλογα με το γένος της κότας και όχι ανάλογα με τη διατροφή της (Κυρανάς, 2000).

Ο κρόκος έχει τη μορφή μικρών σωματιδίων, που είναι κατανεμημένα μέσα σε ένα πρωτεϊνικό διάλυμα. Το πρωτεϊνικό διάλυμα συντίθεται κυρίως από την υδατοδιαλυτή πρωτεΐνη λιβετίνη και από λιποπρωτεΐνες χαμηλής πυκνότητας. Το κοκκώδες ίζημα αποτελείται κατά 16% από την πρωτεΐνη φωσφοβιτίνη κατά 17% από της υψηλής πυκνότητας λιποπρωτεΐνες λιποβιτελίνες, και κατά 12% από λιποπρωτεΐνες χαμηλής πυκνότητας, με κύρια λιπίδια στις λιποπρωτεΐνες, τα φωσφολιπίδια (Κυρανάς, 2000).

Η υψηλή σύσταση του κρόκου σε φωσφολιπίδια τον κάνει να έχει μεγάλη τεχνολογική σπουδαιότητα, γιατί του προσδίδουν ιδιότητες γαλακτοματοποιητή. Τα φωσφολιπίδια αντιπροσωπεύονται από τη λεκιθίνη (16% των λιπιδίων του κρόκου) την κεφαλίνη (6,5%) και την σφυγκομελίνη (0,65%) (Belitz *et al.*, 2006).

Το χρώμα του κρόκου οφείλεται κυρίως στις φυτικές φυσικές χρωστικές λουτεΐνη και ζεαξανθίνη, που ανήκουν στα καροτινοειδή. Ο οργανισμός της κότας δεν μπορεί να συνθέσει τις χρωστικές του κρόκου. Εισάγονται στον οργανισμό της με την τροφή και μέσω του εντέρου οδηγούνται και εναποθέτονται στα λιπίδια του κρόκου, γιατί τα καροτινοειδή είναι λιποδιαλυτές χρωστικές (Κυρανάς, 2000).

Ο κρόκος του αβγού είναι ένα ψευδοπλαστικό μη-νευτώνειο υγρό με ιξώδες που εξαρτάται από τη διαμητική τάση που εφαρμόζεται. Η

επιφανειακή του τάση είναι  $0,44\text{Nm}^{-1}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ενώ το pH του είναι 6,0 και αντίθετα με το λεύκωμα του αβγού, αυξάνεται μόνο ελαφρώς (σε 6,4-6,9) ακόμα και μετά από παρατεταμένη αποθήκευση (Belitz *et al.*, 2006).

## 2.2 Αφυδατωμένη σκόνη λευκώματος

Η αφυδατωμένη σκόνη λευκώματος χρησιμοποιείται ευρέως, σε διάφορα μίγματα, στην τεχνολογία βιομηχανικής παρασκευής αρκετών τροφίμων. Η απομάκρυνση από το αβγό, κατά την αφυδάτωση, του μεγαλύτερου μέρους του νερού, μειώνει την ενεργότητα ( $a_w$ ) του εναπομένου, με αποτέλεσμα να επιβραδύνονται οι χημικές αντιδράσεις υποβάθμισης της ποιότητας των αβγών και να αναστέλλεται η ανάπτυξη των μικροοργανισμών (Κυρανάς, 2000).

Η περιεκτικότητα των αφυδατωμένων προϊόντων σε νερό δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%, γιατί διαφορετικά ευνοείται η αντίδραση Maillard, η υποβάθμιση της οσμής- γεύσης και η ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Τιμές υγρασίας όμως κάτω από 4% οδηγούν στη μετουσίωση των πρωτεϊνών του αβγού, με πολύ αρνητικά αποτελέσματα στις λειτουργικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Το αποξηραμένο λεύκωμα είναι σταθερό κατά την συντήρηση (Κυρανάς, 2000). Σοβαρό τεχνολογικό πρόβλημα αποτελεί η παρουσία, ιδιαίτερα στο λεύκωμα, της γλυκόζης. Αυτό γιατί η γλυκόζη στο ξηρό προϊόν έχει τη δυνατότητα να αντιδρά με τα φωσφατίδια του κρόκου με αποτέλεσμα τη δημιουργία αποκλίσεων στην οσμή-γεύση και με τις αμινοενώσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία προϊόντων μη ενζυμικού μαυρίσματος (μελανοϊδίνες) (Κυρανάς, 2000). Για αυτό το λόγο κατά την παραγωγή σκόνης λευκώματος τα σάκχαρα απομακρύνονται (Lechevalier *et al.*, 2007).

Η αφριστική ικανότητα του αφυδατωμένου λευκώματος είναι μειωμένη (Κυρανάς, 2000). Ο βαθμός της μείωσης εξαρτάται από την θερμοκρασία και το χρόνο παστερίωσης, από τη μέθοδο και τη θερμοκρασία της ξήρανσης και από την τυχόν προσθήκη αφριστικών ουσιών στη ωμάζα. Με την αφυδάτωση μειώνεται η αφριστική ικανότητα των κρόκων και των ολόκληρων αβγών. Η απώλεια αυτή δεν μπορεί να αντισταθμιστεί με την προσθήκη



αφριστικών ουσιών, αλλά μόνο μερικώς με την προσθήκη υδατανθράκων (ζάχαρη, αμυλοσιρόπι καλαμποκιού). Η προσθήκη υδατανθράκων έχει ευνοϊκή επίδραση και στην γαλακτοματοποιητική ικανότητα του κρόκου και των ολόκληρων αβγών (Κυρανάς, 2000).

## **2.3 Φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του αβγού και επίδραση της αποθήκευσης**

### **2.3.1 Μεταβολές των ιδιοτήτων του αβγού κατά την αποθήκευση**

Η αποθήκευση και οι μέθοδοι συντηρήσεως του αβγού έχουν μεγάλη σπουδαιότητα γιατί το αβγό με το που γεννηθεί εκτίθεται στη μόλυνση και υφίσταται διάφορες φυσικοχημικές μεταβολές που με την πάροδο του χρόνου γίνονται εντονότερες σε σημείο ώστε το αβγό να είναι ακατάλληλο για βρώση (Li Chan *et al.*, 1994).

Κατά την συντήρηση των αβγών και με τη πάροδο του χρόνου παρατηρείται απώλεια βάρους, που οφείλεται στην αφυδάτωση τους (McDonnell, 1995).

Μία σειρά αλλαγών λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της αποθήκευσης. Η διάχυση του CO<sub>2</sub> εν μέσω του κελύφους του αβγού, αρχίζει αμέσως μετά την γέννησή του, προκαλώντας μία απότομη αύξηση του pH, ειδικά στο λεύκωμα του αβγού. Η βαθμιαία εξάτμιση του νερού εν μέσω του κελύφους του αβγού προκαλεί αύξηση της πυκνότητας (αρχικά κατά προσέγγιση 1.086 g/cm<sup>3</sup>, η καθημερινή μείωση της πυκνότητας του αβγού είναι 0.0017 g/cm<sup>3</sup>) και ο αεροθάλαμος του μεγαλώνει. Το ιξώδες του λευκώματος του αβγού πέφτει (McDonnell, 1995).

Κατά την αποθήκευση αρκετές ιδιότητες αλλάζουν όπως, η συμπεριφορά του κατά το χτύπημα και η σταθερότητα του αφρού. Επιπλέον αναπτύσσεται η «μπαγιατική» γεύση (Belitz *et al.*, 2006).

Η μείωση της θερμοκρασίας αποθήκευσης, η μείωση της απώλειας CO<sub>2</sub> και νερού, αυξάνουν την ποιότητα των αβγών. Επομένως, η αποθήκευση στο ψυγείο είναι πολύ σημαντική για την συντήρηση των αβγών (Hardy, 1985).

### 2.3.2 pH

Το pH του λευκώματος είναι ελαφρώς αλκαλικό την πρώτη ημέρα (7,6) μπορεί όμως να ανέλθει μέσα σε μία βδομάδα σε 9,7. Η άνοδος αυτή οφείλεται στην απώλεια του CO<sub>2</sub> (Donovan, 1975).

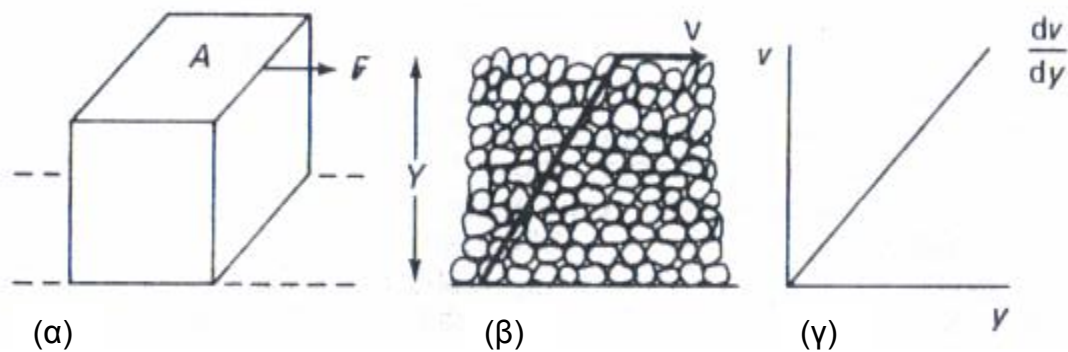
Το pH του κρόκου κυμαίνεται μεταξύ 5 και 6. Με την πάροδο του χρόνου μπορεί να ανέλθει σε 6,8 (Donovan, 1975).

### 2.3.3 Ρεολογικές ιδιότητες- ιξώδες

#### 2.3.3.1 Ορισμός

Ρεολογία είναι ο κλάδος της επιστήμης που μελετά τη ροή και την παραμόρφωση της ύλης. Η ποιό σημαντική ρεολογική ιδιότητα των υγρών τροφίμων είναι το ιξώδες. Το ιξώδες αποτελεί ένα μέτρο της εσωτερικής τριβής ενός ρευστού κατά την ροή του (Καλογιάννη, 2008).

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η έννοια του ιξώδους είναι χρήσιμο να ξεκινήσει κανείς από το Σχήμα 1. Αν θεωρήσουμε μία ποσότητα ρευστού όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 1(α) και εφαρμόσουμε μία δύναμη F στην επιφάνεια A αυτού, τότε τα μόρια του ρευστού που βρίσκονται στην ανώτερη στοιβάδα του ρευστού θα κινηθούν. Λόγω της εσωτερικής τριβής του ρευστού και οι κατώτερες στοιβάδες του ρευστού θα κινηθούν αλλά με μικρότερη ταχύτητα σχετικά με την ανώτερη στοιβάδα. Το προφίλ της ταχύτητας (v) που θα προκύψει για τις διάφορες στοιβάδες του ρευστού φαίνεται στο Σχήμα 1(β) και η γραφική παράσταση της μεταβολής της ταχύτητας συναρτήσει του ύψους της στοιβάδας (y) στο Σχήμα 1(γ). Ο λόγος της δύναμης F προς την επιφάνεια A ονομάζεται διατμητική τάση (τ).



Σχήμα 1: (α) Εφαρμογή διατμητικής τάσης ( $\tau=F/A$ ), (β) στοιβάδες ρευστού και (β, γ) μεταβολή της ταχύτητας τους ( $v$ ) συναρτήσει του ύψους ( $y$ ).

Η μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού συναρτήσει του ύψους της στοιβάδας ταχύτητα διάτμησης ( $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$ ). Το ιξώδες ορίζεται ως ο λόγος της διατμητικής τάσης προς την ταχύτητα διάτμησης:

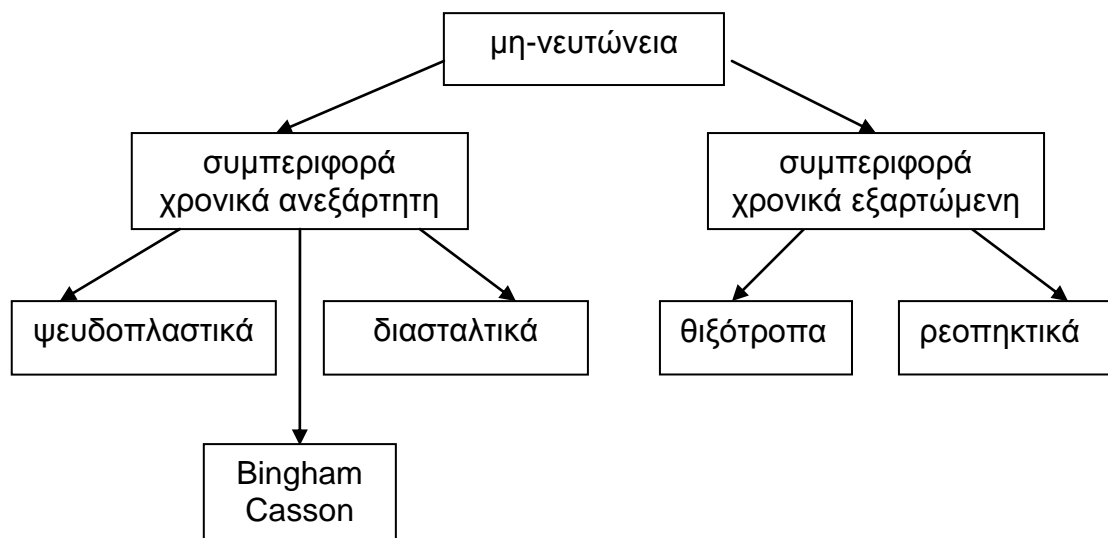
$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Τα ρευστά τρόφιμα διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την συμπεριφορά τους κατά την εφαρμογή μιας διατμητικής τάσης (παρουσιάζουν δηλαδή διαφορετική ρεολογική συμπεριφορά). Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες ρευστών ως προς τη ρεολογική τους συμπεριφορά, τα νευτώνεια και τα μη νευτώνεια. Στα νευτώνεια ρευστά η τιμή του ιξώδους είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας διάτμησης και του χρόνου (της «ιστορίας» του δείγματος). Σε κάθε άλλη περίπτωση ένα ρευστό είναι μη νευτώνειο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα νευτώνειων τροφίμων είναι τα ζαχαροδιαλύματα και τα λάδια ενώ πολλά τρόφιμα παρουσιάζουν μη νευτώνεια συμπεριφορά (διαλύματα πολυσακχαριτών, τοματοπολτός, γαλακτώματα κ.α.). Η τιμή του ιξώδους των μη νευτώνειων υγρών εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη μέτρηση (ταχύτητα διάτμησης ή και χρόνος που πέρασε από την έναρξη της διάτμησης) και το ιξώδες σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται ως φαινομενικό (Καλογιάννη, 2008).

Η ρεολογική συμπεριφορά των μη νευτώνειων ρευστών μπορεί να διακριθεί σε χρονικά ανεξάρτητη και χρονικά εξαρτώμενη (Σχήμα 2). Όταν ένα

ρευστό έχει χρονικά ανεξάρτητη ρεολογική συμπεριφορά, το ιξώδες του είναι ανεξάρτητο από το χρόνο διάρκειας της διάτμησης. Το αντίθετο ισχύει για τα ρευστά με χρονικά εξαρτώμενη ρεολογική συμπεριφορά.

Στα μη νευτώνεια ρευστά με χρονικά ανεξάρτητη ρεολογική συμπεριφορά διακρίνουμε τα ψευδοπλαστικά, διασταλτικά ρευστά καθώς και τα ρευστά τύπου Bingham και Casson. Τα ψευδοπλαστικά ρευστά παρουσιάζουν μείωση του ιξώδους συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης και είναι τα ποιά συνηθισμένα της κατηγορίας αυτής (π.χ. πουρές φρούτων).

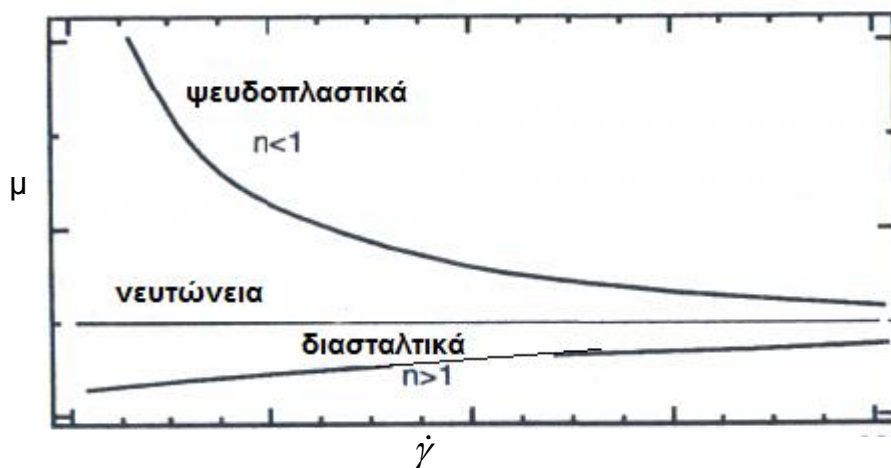


Σχήμα 2: Διάκριση των μη νευτώνειων ρευστών σύμφωνα με τη ρεολογική τους συμπεριφορά.

Αντίθετα με τα ψευδοπλαστικά τα διασταλτικά παρουσιάζουν αύξηση του ιξώδους συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης (Σχήμα 3). Για τα ρευστά αυτά η μεταβολή της διατμητικής τάσης συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$\tau = \kappa \dot{\gamma}^n . \quad (2)$$

Όπου  $n$  ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς και  $\kappa$  ο συντελεστής συνεκτικότητας (Καλογιάννη, 2008).



Σχήμα 3: Μεταβολή του ιξώδους ( $\mu$ ) συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης ( $\dot{\gamma}$ ) για νευτώνεια, διασταλτικά και ψευδοπλαστικά ρευστά (Καλογιάννη, 2008).

### 2.3.3.2 Ρεολογικές ιδιότητες αβγών

Το ιξώδες του ρευστού λευκώματος παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τις ιδιότητες ροής του ρευστού αλλά και για την κατανόηση των μακρομοριακών αλλαγών στο λεύκωμα (Patino *et al.*, 2008).

Το λεύκωμα είναι ένα ψευδοπλαστικό ρευστό. Το ιξώδες του εξαρτάται από την διατμητική τάση (Panta, 1995).

Ο κρόκος του αβγού είναι ψευδοπλαστικό υγρό και το ιξώδες τους είναι συνάρτηση της διατμητικής τάσης (Belitz *et al.*, 2006).

Η ωομυκίνη που βρίσκεται στο λεύκωμα, συμβάλλει στην αύξηση του ιξώδους του λευκώματος και συγκεκριμένα του πυκνού λευκώματος στο οποίο η περιεκτικότητα της είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από ότι στο αραιό (Zdzistaw, 2001).

Πιθανώς η ωομυκίνη να συνδέεται και με την μετατροπή του λευκώματος του αβγού σε λεπτόρρευστο, φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης (Belitz *et al.*, 2006).

Το σύμπλοκο λυσοζύμη-ωοαλβουμίνης συμβάλλει στην ιξώδη φύση του λευκώματος και σε πιο υψηλά επίπεδα pH, το σύμπλοκο χωρίζεται, προκαλώντας την μείωση του ιξώδους του λευκώματος (Belitz *et al.*, 2006).

## 2.3.4 Επιφανειακή τάση

### 2.3.4.1 Ορισμός επιφανειακής και δυναμικής επιφανειακής τάσης

Μεταξύ των μορίων του ρευστού αναπτύσσονται ισχυρές διαμοριακές ελκτικές δυνάμεις. Όταν αυτές οι δυνάμεις αναπτύσσονται μεταξύ ίδιων μορίων, τότε καλούνται δυνάμεις συνοχής. Αν υπάρχουν ελκτικές δυνάμεις μεταξύ δύο διαφορετικών μορίων, τότε αυτές καλούνται δυνάμεις συνάφειας. Μέσα στη μάζα του ρευστού οι δυνάμεις συνοχής που αναπτύσσονται μεταξύ δυο μορίων εξισορροπούνται από τις δυνάμεις συνοχής που ασκούν τα γειτονικά μόρια στο σύστημα. Παρόλα αυτά οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ ισχυρότερες μεταξύ γειτονικών μορίων που βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, αφού από τη μεριά του αερίου δεν υπάρχουν μόρια υγρού για να ασκήσουν ελκτικές δυνάμεις στο σύστημα. Αυτή η ισχυροποίηση των διαμοριακών ελκτικών δυνάμεων στα μόρια που σχηματίζουν την ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού, ονομάζεται επιφανειακή τάση και ορίζεται ως δύναμη ανά μονάδα μήκους με συνήθεις μονάδες μέτρησης  $mN/m$ ,  $dyn/cm$  και  $J/m^2$  (S.I.) (Anon, 1998). Η διεπιφανειακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι ένας όρος που ισοδυναμεί με την επιφανειακή τάση (Kalogianni, 2007). Σε αυτό το κείμενο θα χρησιμοποιηθεί ο όρος επιφανειακή τάση όπως αυτό είναι σύνηθες στη βιβλιογραφία.

Όταν μια διεπιφάνεια βρίσκεται σε ισορροπία (δηλαδή, δεν υπάρχει καμία μεταφορά μάζας στη διεπιφάνεια ή διαμέσω αυτής) τότε η διεπιφανειακή τάση ονομάζεται επιφανειακή τάση ισορροπίας. Σε κάθε άλλη περίπτωση αναφερόμαστε σε δυναμική επιφανειακή τάση (Kalogianni, 2007).

Επιφανειοδραστικές ουσίες είναι ουσίες που προσροφώνται σε μια διεπιφάνεια και επηρεάζουν την διεπιφανειακή τάση. Η παρουσία των επιφανειοδραστικών ουσιών σε ένα σύστημα (π.χ. πρωτεΐνες, μονογλυκερίδια) συνήθως ενεργούν μειώνοντας την επιφανειακή τάση. Επιπλέον, η παρουσία των επιφανειοδραστικών ουσιών σε ένα σύστημα προκαλεί εξάρτηση από το χρόνο της επιφανειακής τάσης (δυναμική επιφανειακή τάση) σε μια νεοσχηματισμένη διεπιφάνεια (Kalogianni, 2007).

Όταν οι διεπιφανειακές ιδιότητες χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό και την κατανόηση μιας συγκεκριμένης διεργασίας, ένα

σημαντικό ερώτημα που τίθεται είναι το κατά πόσο θα πρέπει να μετρούνται οι ιδιότητες ισορροπίας ή οι δυναμικές ιδιότητες της διεπιφάνειας. Όταν το ενδιαφέρον εντοπίζεται σε βιομηχανικές διεργασίες (π.χ. γαλακτωματοποίηση, τηγάνισμα) τότε η μέτρηση της δυναμικής επιφανειακής τάσης είναι πιο κατάλληλη. Αυτό οφείλεται στο ότι στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές ο χαρακτηριστικός χρόνος της υπό μελέτη εργασίας (π.χ. στο σχηματισμό μιας φυσαλίδας σε έναν αφρό) είναι πολύ μικρότερος από το χρόνο που απαιτείται για να επέλθει ισορροπία. Ως αποτέλεσμα, οι ιδιότητες που επηρεάζουν τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις ιδιότητες της διεπιφάνειας δεν είναι οι ιδιότητες ισορροπίας, αλλά εκείνες που αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα της προσρόφησης των τασιενεργών. Το ίδιο ισχύει και κατά τον σχηματισμό και αποσταθεροποίηση των αφρών όπου τα συστήματα δεν βρίσκονται σε ισορροπία (Kalogianni, 2007).

#### **2.3.4.2 Επίδραση τασιενεργών ουσιών στη δυναμική επιφανειακή τάση**

Η δυναμική επιφανειακή τάση είναι στην πραγματικότητα το αποτέλεσμα της δυναμικής της προσρόφησης/εκρόφησης των επιφανειοδραστικών ουσιών στην διεπιφάνεια. Ας θεωρήσουμε μια διεπιφάνεια αρχικά σε ισορροπία, δηλαδή όπου η συγκέντρωση των επιφανειοδραστικών ουσιών στη διεπιφάνεια βρίσκεται στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, και δεν υπάρχουν διαδικασίες χαλάρωσης (relaxation processes). Αν η διεπιφάνεια διαταραχθεί (για παράδειγμα αναπυχθεί, συμπιεστεί ή ανανεωθεί) το σύστημα θα προσπαθήσει να αποκαταστήσει την ισορροπία. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο διαδοχικά στάδια (Kalogianni, 2007):

1. Διάχυση των μορίων της επιφανειοδραστικής ουσίας στην υποστοιβάδα της διεπιφάνειας (ή αντίστροφα).
2. Μεταφορά των μορίων της επιφανειοδραστικής ουσίας από την υποστοιβάδα της διεπιφάνειας στην διεπιφάνεια (ή αντίστροφα).

Τέλος, υπάρχει και ένα ακόμη στάδιο για την επίτευξη της ισορροπίας. Κατά το στάδιο αυτό το μόριο της επιφανειοδραστικής ουσίας ανακατανέμεται ή/και αναδιατάσσεται στη διεπιφάνεια (Kalogianni, 2007). Ο συνολικός ρυθμός

προσρόφησης (ομοίως και για την εκρόφηση) της επιφανειοδραστικής ουσίας ελέγχεται από το πιο αργό στάδιο το οποίο μπορεί να αλλάξει κατά την διάρκεια της προσρόφησης (Kalogianni, 2007).

Η κατάσταση γίνεται πιο περίπλοκη σε περιπτώσεις όπου διαφορετικές επιφανειοδραστικές ουσίες υπάρχουν σε ένα σύστημα, εκ των οποίων η κάθε μια έχει διαφορετική δυναμική προσρόφηση στην διεπιφάνεια, και οι οποίες στη συνέχεια αλληλεπιδρούν και ανταγωνίζονται για να λάβουν θέση σε μια κοινή διεπιφάνεια (Kalogianni, 2007).

#### **2.3.4.3 Επιφανειακή τάση λευκώματος αβγού**

Η επιφανειακή τάση ισορροπίας των πρωτεϊνικών διαλυμάτων υψηλής συγκέντρωσης είναι συχνά περίπου 45 mN/m (Foegeding *et al.*, 2006).

Σύμφωνα με τους Yang & Foegeding (2010), οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση προσθήκης ζάχαρης σε σκόνη λευκώματος αβγού ως προς την αφριστική ικανότητα και την αποσταθεροποίηση των αφρών, με μετρήσεις της δυναμικής επιφανειακής τάσης με τη μέθοδο της κρεμάμενης σταγόνας δεν παρατήρησαν αξιοσημείωτες μεταβολές με μεταβολή του ποσοστού ζάχαρης στο διάλυμα για συγκεντρώσεις έως 44,3 g/ml και για χρόνους έως 5 min.

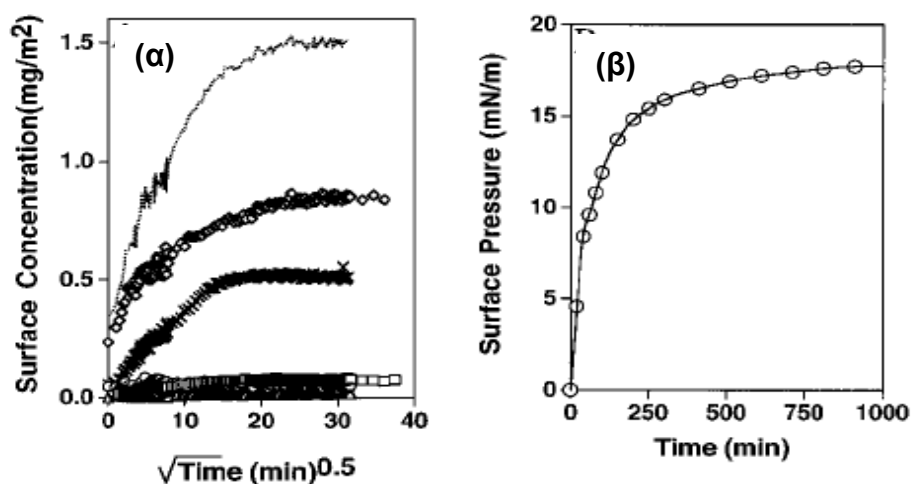
Οι Damodaran *et al.* (1998), μελέτησαν την συμπεριφορά στην προσρόφηση των πέντε σημαντικότερων πρωτεϊνών που βρίσκονται στο λεύκωμα. Οι συγκεντρώσεις που χρησιμοποίησαν ήταν 5.4, 1.2, 1.1, 0.8, και 0.35 μg/ml για τις πρωτεΐνες οβαλβουμίνη, οωτρανσφερίνη, οωμυκίνη, οωγλοβουλίνη, και λυσοζύμη αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το ποσοστό αλλαγής της συγκέντρωσης στην διεπιφάνεια των πέντε αυτών πρωτεϊνών συγκρινόμενο με την αύξηση της επιφανειακής πίεσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4(α) μόνο η οβαλβουμίνη και η οωγλοβουλίνη προσροφήθηκαν στη διεπιφάνεια, ενώ η οωτρανσφερίνη, η οωμυκίνη και η λυσοζύμη αποκλείστηκαν ουσιαστικά από τη διεπιφάνεια. Ο αποκλεισμός των πρωτεϊνών αυτών, στη μελέτη του πολυπρωτεϊνικού συστήματος, οφείλεται στον διαφορετικό ρυθμό άφιξής τους στη διεπιφάνεια, και στο ότι η περιοχή της διεπιφάνειας είχε καταληφθεί από τις δύο πρωτεΐνες που έφτασαν γρηγορότερα. Στο πολυπρωτεϊνικό αυτό σύστημα, οι πρωτεΐνες



λυσοζύμη, οωμυκίνη και οωτρανσφερίνη, παρουσίασαν μεγάλους χρόνους καθυστέρησης (lag time) στην προσρόφηση, σε αντίθεση με την οωαλβουμίνη και οωγλοβουλίνη που προσροφήθηκαν εύκολα και παρουσίασαν χρόνο καθυστέρησης μόνο 7 min (Damodaran *et al.*, 1998).

Ως προς την μεταβολή της επιφανειακής πίεσης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4(β), κατά τη διάρκεια προσρόφησης των πρωτεϊνών, το ποσοστό αύξησης της επιφανειακής πίεσης ήταν γρηγορότερο από αυτό για οποιαδήποτε πρωτεΐνη που μελετήθηκε χωριστά, αν και η επιφανειακή συγκέντρωση σε κατάσταση ισορροπίας στο πολυπρωτεϊνικό σύστημα ήταν παρόμοια με αυτή της οωαλβουμίνης στο μεμονωμένο σύστημα πρωτεϊνών. Αυτό πιθανότατα αποδίδεται στο ότι οι πρωτεϊνικές αλληλεπιδράσεις κυρίως μεταξύ της οωαλβουμίνης και της οωγλοβουλίνης αναμιγνυόμενες στο πρωτεϊνικό φιλμ, μειώνουν την ελεύθερη ενέργεια του συστήματος περισσότερο απ' το να δρουν μεμονωμένα (Damodaran *et al.*, 1998).

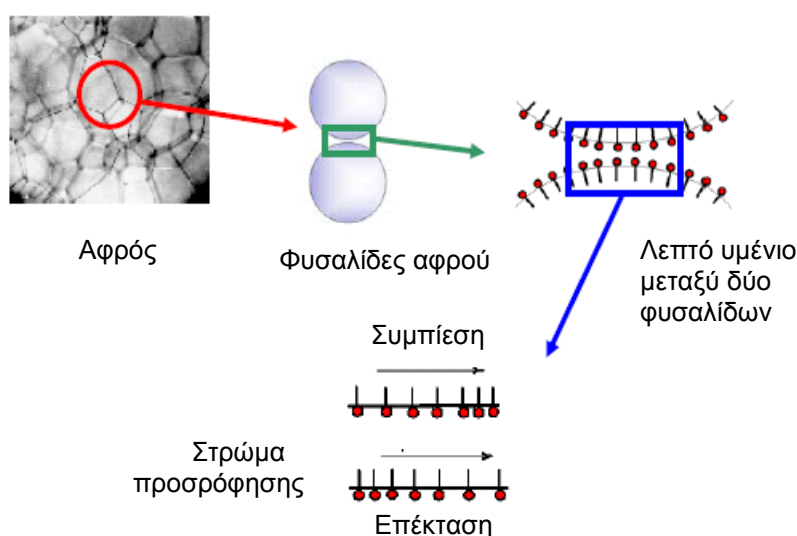


Σχήμα 4: Αύξηση της επιφανειακής συγκέντρωσης (α) και της επιφανειακής πίεσης (β) συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια απορρόφησης των πρωτεϊνών του αβγού, στη διεπιφάνεια αέρα-νερού. Μελετήθηκε το σύστημα των πέντε πρωτεϊνών σε μείγμα (πολυπρωτεϊνικό σύστημα) στους 25°C σε pH 7.0 και ιοντική ισχύ=0,1. Οι πρωτεΐνες είναι οι εξής: οωαλβουμίνη (◇), οωτρανσφερίνη (□), οωμυκίνη(○), οωφλοβουλίνη (X) και λυσοζύμη (Δ). Η γραμμή στο Σχήμα (α) πάνω από τις πρωτεΐνες αντιπροσωπεύει το συνολικό άθροισμα όλων των καμπυλών. (Damodaran *et al.*, 1998).

## 2.4 Ιδιότητες αφρών

### 2.4.1 Ορισμοί- Περιγραφή αφρών

Οι αφροί είναι διφασικά συστήματα διασποράς αερίου σε υγρή συνεχή φάση. Κατά κανόνα στους αφρούς, ο όγκος της διασπαρμένης αέριας φάσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τον όγκο της συνεχούς φάσης. Αφρός παράγεται όταν αέρας εμβολιάζεται μέσα σε υγρό και εκχέεται σε αυτό με μορφή φυσαλίδων (Παναγιώτου, 1998). Έτσι αφροί προκύπτουν σχετικά εύκολα όταν αέριο εκτονώνεται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια μέσα στην κύρια μάζα του υγρού ή απλά όταν αέριο και υγρό αναδεύονται μαζί. Ο αέρας ή κάποιο άλλο αέριο εισέρχονται κάτω από την επιφάνεια του υγρού, που εκτείνεται για να περιβάλλει το αέριο με ένα υγρό υμένιο, που ονομάζεται λαμέλα (Baniel *et al.*, 1997) (Σχήμα 5).

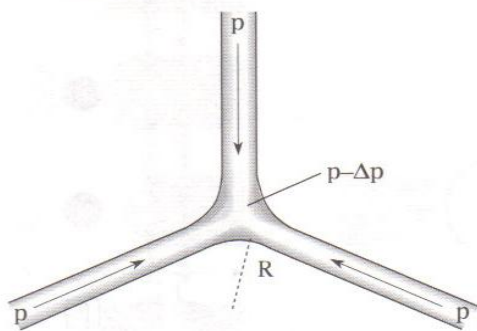


Σχήμα 5: Δημιουργία υμενίου μεταξύ των φυσαλίδων (Miller & Makievski, 2009).

Ο αφρός μπορεί επίσης να περιγραφεί και ως μια σταθερή διάταξη από πολλές φυσαλίδες μαζί. Οι φυσαλίδες έχουν διπλοτοιχώματα από λεπτά υγρά υμένια κολλοειδών διαστάσεων με σχεδόν παράλληλες πλευρές. Οι φυσαλίδες είναι συνήθως μεγαλύτερες των κολλοειδών διαστάσεων και ανάλογα με το κλάσμα της υγρής φάσης είτε έχουν σφαιρικό σχήμα (υγρός

αφρός) είτε συναντώνται σε μια πυκνή δομή (ξηρός αφρός). Στους ξηρούς αφρούς η διαφορά πίεσης εκατέρωθεν των υμενίων είναι ασήμαντη, οπότε οι χωριστές «κυψελίδες» του αφρού έχουν τη μορφή πολυέδρων με επίπεδες πλευρές. Όταν τρεις ή περισσότερες φυσαλίδες πλησιάζουν, τα διπλοτοιχώματα καμπυλώνονται με την κοιλότητα από την πλευρά του αερίου και σχηματίζουν τα λεγόμενα τρίγωνα του Gibbs ή σύνορα-διαύλους Plateau (Σχήμα 6) (Παναγιώτου, 1998). Είναι δηλαδή η περιοχή των ακμών των πολυέδρων, όπου συναντώνται κατά κανόνα τρία υμένια (Παναγιώτου, 1998).

Τα λεπτά αυτά υμένια συναντιούνται μεταξύ τους σε γωνία  $120^\circ$  (Hammershøj *et al*, 1999).



Σχήμα 6: Ο διάυλος Plateau στην τομή τριών υμενίων. Λόγω της έντονης καμπυλότητας (μικρή  $R$ ) δημιουργείται υποπίεση ( $p$ ) στον διάυλο, οπότε το υγρό μετακινείται όπως δείχνουν τα βέλη (Παναγιώτου, 1998).

Σύμφωνα με τους Lau & Dickinson (2005) οι οποίοι μελέτησαν ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού επανασυσταμένο από σκόνη παρουσία και απουσία ζάχαρης, παρατήρησαν μακροσκοπικά και με την βοήθεια συνεστιακής μικροσκοπίας (CLSM) ότι κατά τη δημιουργία αφρού εμφανίζονται τρία διαφορετικά στρώματα. Το ανώτερο στρώμα, το οποίο είναι ένας χαρακτηριστικός αφρός που αποτελείται από μεγάλες κυψελίδες αέρα. Το μέσο στρώμα, το οποίο αποτελείται από ημιδιαφανή υδατικό ορό που περιέχει διεσπαρμένη μια μεγάλη συγκέντρωση μικρών σχετικά φυσαλίδων, και το κατώτερο στρώμα είναι διαφανές και περιέχει μικρές φυσαλίδες που καταλαμβάνουν μικρό κλάσμα όγκου του στρώματος. Το κατώτερο αυτό στρώμα πλησιάζει τον όγκο της υγρής φάσης του αφρού.

## 2.4.2 Σχηματισμός αφρών- Δράση αφριστικών ουσιών

Το σύστημα διασποράς ενός αερίου σε υγρό είναι θερμοδυναμικά ασταθές και γι' αυτό το λόγο απαιτούνται κάποια τασιενεργά μόρια, ουσίες ώστε να προσροφηθούν πάνω στην διεπιφάνεια αέρα/νερού για να σταθεροποιήσουν τον αφρό. Η βέλτιστη χρήση των ουσιών αυτών εξαρτάται από τη γνώση των δυναμικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους, το ποσοστό προσρόφησής τους, τη δομή, το πάχος, τη δυνατότητα να εκροφώνται, την πλευρική κινητικότητα, τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προσροφημένων μορίων, τη δυνατότητα να αλλάζουν τη διαμόρφωσή τους, και τις δυναμικές ρεολογικές τους ιδιότητες (Patino *et al.*, 2008).

Κατά το σχηματισμό ενός αφρού απαιτείται μεγάλη ποσότητα μηχανικής ενέργειας ώστε να αυξηθεί το εμβαδό της διεπιφάνειας. Αυτή η ενέργεια είναι ανάλογη της επιφανειακής τάσης. Οι αφροί είναι θερμοδυναμικά ασταθείς. Από πρακτική άποψη είναι δυνατόν να σχηματιστούν αφροί που είναι κινητικά σταθεροί (ή μετασταθείς) για κάποιο χρονικό διάστημα όταν περιέχουν αφριστικές ουσίες (Patino *et al.*, 2008).

Στα τρόφιμα χρησιμοποιούνται δύο τύποι αφριστικών ουσιών: οι χαμηλού μοριακού βάρους αφριστικές ουσίες (λιπίδια, φωσφολιπίδια, επιφανιοδραστικά) και μακρομόρια (πρωτεΐνες και κάποιοι πολυσακχαρίτες). Από θερμοδυναμικής άποψης αυτές οι αφριστικές ουσίες μειώνουν την επιφανειακή τάση, επομένως και την ελεύθερη ενέργεια του συστήματος και προσδίδουν την επιθυμητή κινητική σταθερότητα στις διασπορές (γαλακτώματα ή αφρούς) (Patino *et al.*, 2008)

Το μόριο όλων των τασιενεργών ουσιών εμφανίζει ένα κοινό δομικό χαρακτηριστικό: κάποια τμήματά του έχουν πολικό χαρακτήρα, ενώ κάποια άλλα είναι άπολα. Το πολικό τμήμα έλκεται από τα μόρια άλλων πολικών ενώσεων (π.χ. νερού), δηλαδή είναι υδρόφιλο, ενώ το άπολο δέχεται απωστικές δυνάμεις από τις πολικές ενώσεις, δηλαδή είναι υδρόφοβο.

Μια νέα διεπιφάνεια δημιουργείται στα όρια κάθε φυσαλίδας αέρα, που ενσωματώνεται στη μάζα του νερού ή του υδατικού διαλύματος. Ακολουθεί η προσρόφηση των επιφανιοδραστικών μορίων στη διεπιφάνεια αέρα/νερού και παράλληλα ο επαναπροσανατολισμός τους. Δηλαδή το άπολο, υδρόφοβο, τμήμα στρέφεται προς το εσωτερικό της φυσαλίδας, για να αποφύγει την

επαφή του με το νερό, το πολικό (υδρόφιλο) τμήμα στρέφεται προς το νερό και συνδέεται με τα μόρια της επιφανειακής του στοιβάδας, είτε με πολικούς δεσμούς, είτε με δεσμούς υδρογόνου (Lomakina & Μίκονά, 2006).

Η δημιουργία αυτών των δεσμών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της επιφανειακής τάσης (και της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος) του νερού και την ευκολότερη ενσωμάτωση των φυσαλίδων του αέρα στη μάζα του. Οι ουσίες που έχουν αυτή την δυνατότητα ονομάζονται «αφριστικές», μεταξύ δε αυτών συγκαταλέγονται και οι υδατοδιαλυτές πρωτεΐνες (Murray, 2007).

Τα πρωτεϊνικά μόρια δρουν ως υδρόφιλα και υδρόφοβα συστήματα. Σύμφωνα με αυτή την διάταξη οι περισσότερες υδρόφιλες ομάδες κατευθύνονται στην εξωτερική επιφάνεια του μορίου, ενώ αντίθετα οι υδρόφοβες ομάδες της πρωτεΐνης, για να αποφύγουν το νερό στρέφονται προς το εσωτερικό του μορίου (Murray, 2007).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο πρωτεϊνών ενισχύει τη συνεκτικότητα του φιλμ προκαλώντας σταθερότητα κι ελαστικότητα στη μεμβράνη που περιβάλλει τη φυσαλίδα. Αυτή η επίδραση φαίνεται να εξαρτάται από την παρουσία μεγάλου αριθμού πολικών και μη πολικών ομάδων στην πεπτιδική αλυσίδα της πρωτεΐνης (Johnson & Zabik, 1981).

Οι αφριστικές ουσίες μπορούν να διακριθούν σε τασιενεργές ουσίες που είναι χαμηλού σχετικά μοριακού βάρους και σε βιοπολυμερή (κυρίως πρωτεΐνες αλλά και ορισμένοι πολυσακχαρίτες που διαθέτουν πολικές και μη πολικές ομάδες). Σημαντικές κατηγορίες αφριστικών ουσιών είναι οι σάπωνες των λιπαρών οξέων, ορισμένα υδατοδιαλυτά πολυμερή και τα συνθετικά τασιενεργά που σχηματίζουν συμπαγή μονομοριακά στρώματα στη διεπιφάνεια αέρα/νερού. Άλλη σημαντική κατηγορία τασιενεργών, όπως προαναφέρθηκε, με διαφορετικό τρόπο δράσης, είναι ορισμένες διαλυτές πρωτεΐνες που με την ανάδευση και την προσρόφησή τους στη διεπιφάνεια πιθανώς μετουσιώνονται, καθίστανται αδιάλυτες και σχηματίζουν πολυμοριακά ανθεκτικά επιφανειακά στρώματα που οδηγούν σε σταθερούς αφρούς (Παναγιώτου, 1998).

Οι χαμηλού μοριακού βάρους αφριστικοί παράγοντες, όπως τα μονο και διγλυκερίδια επηρεάζουν την αφριστική ικανότητα, με την αύξηση της συγκέντρωσής τους στο διάλυμα. Μελέτες έδειξαν ότι σε διαλύματα εστέρων διγλυκερόλης σε συγκέντρωση χαμηλότερη από την κρίσιμη συγκέντρωση

μικκυλίου, δεν σχημάτισαν αφρό καλής ποιότητας. Κατά συνέπεια η αφριστική ικανότητα διαλυμάτων που περιέχουν εστέρες την δυγλυκερόλης απαιτούν κορεσμό της διεπιφάνειας αέρα-νερού από τα λιπίδια (Patino *et al.*, 2008).

Οι αφριστικές ιδιότητες των πρωτεϊνικών διαλυμάτων επηρεάζονται από τη δομική κατάσταση των πρωτεϊνών, από την τιμή του pH, η οποία επηρεάζει το συνολικό φορτίο της πρωτεΐνης, από τη συγκέντρωση της πρωτεΐνης, την ιονική ισχύ, την ύπαρξη πολυσακχαριτών καθώς και το μοριακό βάρος των πρωτεϊνών (Sanchez *et al.*, 2007).

Ο σχηματισμός αφρού επηρεάζεται από την ικανότητα προσρόφησης του αφριστικού παράγοντα στη διεπιφάνεια αέρα-νερού, και τη δυνατότητα του να μειώνει την επιφανειακή τάση του συστήματος (Patino *et al.*, 2008).

Βασική προϋπόθεση καλής αφριστικής ικανότητας σε ένα πρωτεϊνικό σύστημα αποτελεί η γρήγορη προσρόφηση της πρωτεΐνης στη διεπιφάνεια αέρα-νερού κατά τη διάρκεια του αφρισμού, και οι γρήγορες μεταβολές στη διαμόρφωσή της, καθώς και η επαναδιάταξη της στην διεπιφάνεια. Συνεπώς μια πρωτεΐνη εμφανίζει καλή αφριστική ικανότητα όταν ξεδιπλώνεται εύκολα με σκοπό την προσρόφησή της στη διεπιφάνεια και από την άλλη όταν διατηρεί ακέραιη την δευτεροταγή και τριτοταγή δομή της (Sanchez *et al.*, 2007).

Οι πολυσακχαρίτες που διαθέτουν πολικές και μη πολικές ομάδες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που παρατηρήθηκε στις πρωτεΐνες, αναφορικά στην αφριστική ικανότητα (Patino *et al.*, 2008).

Η ικανότητα αφρισμού εξαρτάται επίσης από το βαθμό υδρόλυσης των πρωτεϊνών. Χαμηλό ποσοστό υδρόλυσης βελτιώνει την ικανότητα αφρισμού ειδικά σε τιμές pH κοντά στο ισοηλεκτρικό σημείο της πρωτεΐνης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πρωτεΐνη είναι δυσκολότερο να προσροφηθεί σε μια ρευστή διεπιφάνεια. Συνεπώς η δυναμική της προσρόφησης και επακόλουθα η αφριστική σταθερότητα των πρωτεϊνικών συστημάτων εξαρτάται από τη χημική σύσταση των μορίων και την σύνθεση του συστήματος (Patino *et al.*, 2008).

### 2.4.3 Σταθερότητα – αποσταθεροποίηση αφρών

Αφότου γίνεται ένας αφρός (με οποιαδήποτε διαδικασία), υπάρχει μια περίοδος ανάπαυσης κατά τη διάρκεια της οποίας δεν υπάρχει καμία εμφανής αλλαγή προτού να γίνει μακροσκοπικά αντιληπτή η αρχή της διαδικασίας αποσταθεροποίησης με μεταβολή του όγκου, κατάρρευση φυσαλίδων, ή αλλαγή στο μέγεθος φυσαλίδων και της γενικής όψης του αφρού. Η έννοια της σταθερότητας αναφέρεται γενικά στο φαινόμενο κατά το οποίο ο όγκος ή η όψη του αφρού, αλλάζει αργά καθώς ο χρόνος παρέρχεται. Όσο γρηγορότερη η αλλαγή, λιγότερο σταθερός ο αφρός. Ένα καλό κριτήριο σταθερότητας αποτελεί το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να εμφανιστεί κάποια μεταβολή (για παράδειγμα, μισή ή συνολική κατάρρευση), ή το ποσοστό αλλαγής (για παράδειγμα, ύψος αφρού) μετά από έναν συγκεκριμένο χρόνο. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι μια τέτοια προσέγγιση ισχύει μόνο για τα συστήματα με ομαλή αποσταθεροποίηση, αποκλείοντας ειδικές περιπτώσεις όπως για παράδειγμα η καταστροφική κατάρρευση του αφρού (Iglesias *et al.*, 1995).

Η αποσταθεροποίηση του αφρού βασίζεται σε τρεις κυρίως μηχανισμούς (Hammershøj *et al.*, 1999):

- α) Την αποστράγγιση του υγρού,
- β) Τη συνένωση των φυσαλίδων και
- γ) Το δυσανάλογο καταμερισμό των φυσαλίδων.

Οι μηχανισμοί αυτοί περιγράφονται αναλυτικότερα στην Παράγραφο 2.4.6.

Ο σχηματισμός των αφρών, που χαρακτηρίζεται από υδροδυναμικές και επιφανειακές μεταβολές στηρίζεται στην προσθήκη ενέργειας στην διεπιφάνεια αέρα/νερού. Σημαντικοί παράγοντες, που καθορίζουν τη σταθερότητα των φυσαλίδων, είναι η σύνθεση των σχηματιζόμενων μεμβρανών (φιλμ), καθώς και η κατανομή του μεγέθους των φυσαλίδων (Παναγιώτου, 1998).

Το μοριακό βάρος της τασιενεργού ένωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην ταχύτητα προσρόφησης της ένωσης στη διεπιφάνεια, αλλά και στην απομάκρυνση της (εκρόφησης) από αυτή. Οι πρωτεΐνες που είναι ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους, προσροφώνται με διαφορετικό ρυθμό στη διεπιφάνεια. Τα πρωτεϊνικά μόρια εκροφώνται με τη δύναμη της σχετική

βαρύτητας από τη διεπιφάνεια αέρα/νερού. Αυτή η εκρόφηση είναι ταχύτερη όταν αυξάνει η επιφανειακή πίεση, όταν προκαλείται συσσωμάτωση των φυσαλίδων και όταν οι πρωτεΐνες που λειτουργούν ως τασιενεργές ουσίες έχουν μικρά μοριακά βάρη (Κυρανάς, 2000).

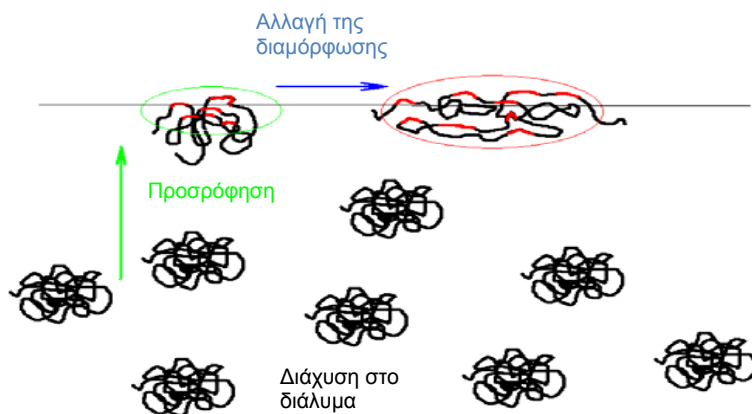
Η σταθερότητα ενός πρωτεϊνικού αφρού επηρεάζεται από το ιξώδες του υδατικού του διαλύματος. Η προσθήκη σακχαρόζης στο λεύκωμα αβγού ενισχύει τη σταθερότητα του αφρού και καθυστερεί την αποστράγγιση. Η παρουσία σακχαρόζης δημιουργεί λιγότερο ευνοϊκό θερμοδυναμικό περιβάλλον για την πρωτεΐνη, και έτσι μπορεί να περιορίσει το ξεδίπλωμα της πεπτιδικής αλυσίδας, και τις πρωτεϊνικές αλληλεπιδράσεις (Raikos *et al.*, 2007b).

#### **2.4.4 Σχηματισμός αφρού λευκώματος αβγού**

Οι πρωτεΐνες του αβγού, και ιδιαίτερα η αλβουμίνη, παρουσιάζουν άριστες αφριστικές ιδιότητες. Οι αφριστικές ιδιότητες της αλβουμίνης προσδιορίζονται από την ικανότητα της να προσροφάται άμεσα στη διεπιφάνεια αέρα/υγρού κατά τον αφρισμό, και εξαιτίας αυτής της ικανότητας δημιουργείται ένα συνεκτικό ιξωδοελαστικό φιλμ που περιβάλλει τη φυσαλίδα (Damodaran *et al.*, 1998).

Κατά την ισχυρή ανάδευση ενός διαλύματος πρωτεϊνών ο αέρας εισέρχεται διαμέσω του διαλύματος στο εσωτερικό των φυσαλίδων, διευκολύνοντας το ξεδίπλωμα της πεπτιδικής αλυσίδας και την εμφάνιση στο εξωτερικό τους αρκετές υδρόφοβες ομάδες. Αυτή η αλλαγή στη μοριακή διαμόρφωση της πρωτεΐνης (ξεδίπλωμα) έχει ως αποτέλεσμα τα μόρια να προσροφώνται στη διεπιφάνεια αέρα-υγρού με ταυτόχρονο εποναπροσανατολισμό τους (Σχήμα 7). Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη μερική μετουσίωση των πρωτεϊνικών μορίων λόγω την διάσπασης πολλών δεσμών υδρογόνου που σταθεροποιούν την τριτοταγή δομή της πρωτεΐνης (Lomakina & Μίκονά, 2006). Επίσης η μετουσίωση κάνει ως ένα βαθμό το μόριο της αλβουμίνης αδιάλυτο, λόγω μείωσης του αριθμού των ελεύθερων σουλφυδρυλομάδων του και παράλληλης αύξησης των δισουλφιδικών δεσμών του (Κυρανάς, 2000).





Σχήμα 7: Διάχυση, προσρόφηση και αλλαγή της διαμόρφωσης των πρωτεϊνών στη διεπιφάνεια (Miller & Makievski, 2009).

Η μείωση της επιφανειακής τάσης που ακολουθεί, διευκολύνει το σχηματισμό καινούριων διεπιφανειών και περισσότερων φυσαλίδων (Damodaran *et al.*, 1998).

Τα πρωτεϊνικά μόρια αλληλεπιδρούν και σχηματίζουν συνεχές πρωτεϊνικό φιλμ που περιβάλλει την αέρια φυσαλίδα και συμβάλει στην σταθερότητα του αφρού (Κυρανάς, 2000).

Η δομή της αλβουμίνης, της επιτρέπει να προσαρμόζεται τέλεια στο μόριο της φυσαλίδας κατά τον αφρισμό γιατί κάθε τμήμα της έχει διαφορετική δράση. Η μελέτη των πρωτεϊνικών κλασμάτων του λευκώματος έδειξε ότι εκτός από την ωαλβουμίνη περιέχει τις γλοβουλίνες, την ωοτρανσφερίνη, τη λυσοζύμη, το ωομυκοειδές και την ωομυκίνη. Μεταξύ των προαναφερομένων πρωτεϊνών υπάρχουν αλληλεπιδράσεις, που επηρεάζουν θετικά ή αρνητικά τον όγκο και τη σταθερότητα του αφρού, καθώς και την ικανότητα αφρισμού. Για παράδειγμα, η παρουσία της ωομυκίνης αυξάνει το ιξώδες των αφρών, αλλά μειώνει τον όγκο τους. Η λυσοζύμη και η ωομυκίνη, επειδή αλληλεπιδρούν, μειώνουν την ικανότητα αφρισμού, ενώ αντίθετα την αυξάνουν οι γλοβουλίνες (Damodaran *et al.*, 1998).

Εξαιτίας της μεγάλης αύξησης της επιφάνειας στην διεπιφάνεια υγρού/αέρα, μετουσιώνονται οι πρωτεΐνες και συσσωματώνονται κατά την ανατάραξη. Ιδιαίτερα η ωομυκίνη σχηματίζει ένα υμένιο αδιάλυτου υλικού μεταξύ της υγρής λαμέλα και της φυσαλίδας του αέρα, σταθεροποιώντας τον αφρό. Σε αυτήν της επίδραση συνεισφέρουν επίσης και οι γλοβουλίνες του αβγού, αυξάνοντας το ιξώδες του υγρού και μειώνοντας την επιφανειακή

τάση, δύο φαινόμενα που είναι σημαντικά στο αρχικό στάδιο ανατάραξης (Kato *et al.*, 1990).

Επίσης κατά τον αφρισμό επιδρά η λυσοζύμη στην αύξηση του όγκου του αφρού. Οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις συμβάλλουν στις άριστες αφριστικές ιδιότητες του λευκώματος και στην σταθερότητα τους. Η βασική πρωτεΐνη, λυσοζύμη, φορτίζεται θετικά και μπορεί να αλληλεπιδράσει με αρνητικά φορτισμένες πρωτεΐνες. Μειώνει έτσι αποτελεσματικά τις ηλεκτροστατικές αποκρουστικές αλληλεπιδράσεις στο πρωτεϊνικό φιλμ (υμένιο) και σταθεροποιεί τον αφρό (Damodaran *et al.*, 1998).

#### **2.4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αφριστική ικανότητα και αφριστική σταθερότητα του λευκώματος**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα αφρισμού, τον όγκο του αφρού και τη σταθερότητά του είναι:

1) *Ηλικία της κότας*. Με τη χρησιμοποίηση αβγών που συλλέχτηκαν από οχτώ κότες ηλικίας από 24-71 εβδομάδων παρατηρήθηκε ότι η αφριστική ικανότητα του λεπτόρρευστου λευκώματος μειώθηκε σημαντικά στις μεγαλύτερης ηλικίας κότες (Hammershøj & Qvist, 2001). Ενώ η αφριστική ικανότητα της παχύρρευστης αλβουμίνης δεν εξαρτάται σημαντικά από την ηλικία της κότας. Παρ' όλα αυτά, τα δύο αλβουμινικά κλάσματα μαζί παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα, όταν προέρχονται από ηλικιωμένες κότες, γιατί ενσωματώνονται καλύτερα και διατηρούν τις λειτουργικές ιδιότητες του λευκώματος (Hammershøj & Qvist, 2001).

2) *Χρόνος αποθήκευσης*. Παρατηρείται αύξηση του pH κατά την αποθήκευση των αβγών, και σαν συνέπεια, μέρος της πρωτεΐνης του λευκώματος, η n-αλβουμίνη μετατρέπεται στην s-αλβουμίνη που είναι λιγότερο υδρόφοβη από την n-αλβουμίνη. Αυτό επιδρά στο σχηματισμό του υμενίου στη διεπιφάνεια αέρα-υδατικής φάσης προκαλώντας μείωση στη σταθερότητα του αφρού. Ως αποτέλεσμα η αύξηση της συγκέντρωσης της s-αλβουμίνης συσχετίζεται θετικά με τον όγκο του υγρού αποστράγγισης (Alleoni & Antunes, 2004). Σύμφωνα με τους Hammershøj & Qvist (2001) οι μεταβολές που παρατηρούνται στη σταθερότητα του αφρού οφείλονται

κυρίως στο λεπτόρρευστο λεύκωμα. Αντίθετα οι Hatta *et al.* (1997) απέδωσαν τις μεταβολές αυτές στη μεταβολή του παχύρρευστου λευκώματος σε λεπτόρρευστο κατά την αποθήκευση.

Ο χρόνος αποθήκευσης έχει αρνητική επίδραση στον όγκο του λευκώματος αλλά επιδρά θετικά στην μεταβολή του pH και μετρίως θετικά στον όγκο του αφρού. Η αποθήκευση των αβγών στους 4°C δεν παρουσιάζει σημαντική επίδραση στην ικανότητα αφρισμού (Lomakina & Μίκονά, 2006).

3) *Η θερμοκρασία αποθήκευσης.* Οι αλλαγές στις πρωτεΐνες του λευκώματος κατά την διάρκεια της αποθήκευσης επηρεάζονται περισσότερο από την θερμοκρασία απ' ό,τι από την διάρκεια αποθήκευσης. Κατά την διάρκεια αποθήκευσης υπό συνθήκες ψύξης, οι χημικές μεταβολές του λευκώματος είναι ελάχιστες. Μετά από μία εβδομάδα εμφανίστηκαν σημαντικές αλλαγές και κυρίως στην ωοαλβουμίνη (Schafer *et al.*, 1999).

4) *Χρόνος χτυπήματος.* Καθώς αυξάνει ο χρόνος χτυπήματος, αρχικά αυξάνουν ο όγκος και η σταθερότητα των αφρών και στη συνέχεια μειώνονται. Ο απαιτούμενος χρόνος χτυπήματος εξαρτάται από τον όγκο του λευκώματος, τη χρήση για την οποία προορίζεται, καθώς και από τον τύπο και την ταχύτητα του αναδευτήρα. Η μέγιστη σταθερότητα των αφρών αναπτύσσεται λίγο πριν επιτευχθεί ο μέγιστος όγκος τους. Με παράταση του χρόνου χτυπήματος οι φυσαλίδες γίνονται μικρότερες και ασταθέστερες, ενώ σπάζουν κατά την παραμονή τους, σχηματίζοντας τραχύ και ξηρό αφρό (Κυρανάς, 2000).

5) *Η θερμοκρασία χτυπήματος.* Το λεύκωμα όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C) μπορεί να χτυπηθεί πιο εύκολα και παράγει αφρό με καλύτερο όγκο σε σχέση με αβγά που βρίσκονται σε θερμοκρασίες ψύξης (Κυρανάς, 2000). Αυτό οφείλεται στην αύξηση της επιφανειακής τάσης με τη μείωση της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά μεταβολές της θερμοκρασίας χτυπήματος μεταξύ 20°C και 34°C επηρέασαν λίγο τη σταθερότητα του αφρού (Yang & Baldwin, 1994).

6) *Χαρακτηριστικά του λευκώματος.* Όταν διαχωρίζουμε το πυκνόρρευστο από το εξωτερικό λεπτόρρευστο λεύκωμα, το λεπτόρρευστο μπορεί να χτυπηθεί ευκολότερα. Αντίθετα το πυκνόρρευστο λεύκωμα δίνει μεγαλύτερο όγκο και σταθερότερο αφρό.

Όταν η συγκέντρωση της λυσοζύμης στο λεύκωμα είναι αυξημένη, δημιουργείται μικρότερος όγκος αφρού. Αυτή η αρνητική συσχέτιση παρατηρείται και σε αβγά συντηρημένα πάνω από τέσσερις εβδομάδες και ίσως οφείλεται στη βαθμιαία συμπλοκοποίηση λυσοζύμης και ωομυκίνης ή στον ανεπαρκή χρόνο χτυπήματος του πυκνόρρευστου τμήματος του λευκώματος. Επειδή το πυκνόρρευστο τμήμα γίνεται πιο λεπτόρρευστο κατά την συντήρηση των αβγών, το λεύκωμα από συντηρημένα αβγά έχει μεγαλύτερη ικανότητα αφρισμού από τα φρέσκα (Κυρανάς, 2000).

Υπερβολική ποσότητα της ωομυκίνης μειώνει την ελαστικότητα του υμενίου και επομένως μειώνει την διόγκωση των φυσαλίδων του αέρα στον αφρό (Damodaran *et al.*, 1998).

Όταν η συγκέντρωσή της λυσοζύμης, στο λεύκωμα είναι αυξημένη, δημιουργείται μικρότερος όγκος αφρού. Αυτή η αρνητική συσχέτιση ίσως να οφείλεται στην βαθμιαία συμπλοκοποίησή της με την ωομυκίνη ή στον ανεπαρκή χρόνο χτυπήματος του πυκνόρρευστου τμήματος του λευκώματος. (Zdzistaw, 2001; Damodaran *et al.*, 1998).

7) Το νερό. Η προσθήκη νερού στο λεύκωμα σε ποσοστά μεγαλύτερα του 40% v/v, αυξάνει τον όγκο του αφρού αλλά μειώνει τη σταθερότητά του (Lomakina & Μίκονά, 2006). Το νερό βοηθά στο ταχύτερο και καλύτερο ξεδίπλωμα των πρωτεϊνικών μορίων και την ταχύτερη προσρόφηση τους, αλλά μειώνει το ιξώδες της συνεχούς φάσης (Κυρανάς, 2000). Η προσθήκη νερού σε αυξημένο ποσοστό επιταχύνει ακόμη περισσότερο το διαχωρισμό της υγρής φάσης από τον αφρό (Lomakina & Μίκονά, 2006).

8) Η Ζάχαρη. Η ανάμιξη ζάχαρης στο λεύκωμα αβγού για την παραγωγή αφρού, καθυστερεί την ενσωμάτωση κατά το χτύπημα για τη δημιουργία αφρού, και μειώνει το βαθμό μετουσίωσης των πρωτεϊνών. Προσθήκη ζάχαρης σε ποσοστά μεγαλύτερα του 50% w/w διπλασιάζει τον απαιτούμενο χρόνο χτυπήματος για τη δημιουργία καθορισμένου όγκου αφρού, ενώ οι παραγόμενοι αφροί είναι σταθερότεροι, λιγότερο τραχείς και περισσότερο πλαστικοί. Αν η προσθήκη της ζάχαρης πραγματοποιηθεί μετά την έναρξη του χτυπήματος, στο στάδιο του αραιού αφρού, τότε προκύπτουν μαλακές μαρέγκες καλύτερες ποιοτικά (Κυρανάς, 2000). Ανασταλτική δράση στο σχηματισμό αφρού με χτύπημα προκαλούν εκτός από τη ζαχαρόζη, η λακτόζη, η δεξτρόζη, και η μαλτόζη (Yang & Baldwin, 1994).

Η προσθήκη ζάχαρης σε λεύκωμα αβγού τείνει να ενισχύσει τη σταθερότητα του αφρού με την αύξηση του ιξώδους των υμενίων και έτσι καθυστερεί η αποστράγγιση (Pernell *et al.*, 2002). Επίσης, η σταθερότητα του αφρού μπορεί να επηρεαστεί από την επίδραση της σακχαρόζης, ενυδάτωση των πρωτεϊνών του διαλύματος. Μπορούμε απλά να πούμε πως η παρουσία ζάχαρης δημιουργεί ένα λιγότερο ευνοϊκό θερμοδυναμικά περιβάλλον για την πρωτεΐνη με αποτέλεσμα να περιορίζει το ξεδίπλωμά της και την ανάπτυξη πρωτεϊνικών αλληλεπιδράσεων. Ακόμη, η μειωμένη δυνατότητα της πρωτεΐνης στο να ξεδιπλώνει το μόριό της παρουσία της ζάχαρης, ενδέχεται να επιτρέπει σε περισσότερες πρωτεΐνες να περιληφθούν στο σχηματισμό και συνεπώς στη σταθεροποίηση της φυσαλίδας (Lau & Dickinson, 2005).

9) Ο Κρόκος. Η επιρροή της λεκιθίνης του κρόκου στις αφριστικές ιδιότητες του λευκώματος είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα επειδή είναι σχεδόν αδύνατο να παραχθεί το απολύτως καθαρό από λέκιθο λεύκωμα σε εμπορική βάση. Η παρουσία ακόμη και μικρών ποσοτήτων λέκιθου μειώνει τη δυνατότητα αφρισμού του λευκώματος. Μια σταγόνα κρόκου προκάλεσε μείωση από 135ml σε 40ml του όγκου του αφρού του λευκώματος. Το κλάσμα των τριγλυκεριδίων του κρόκου είναι περισσότερο επιβλαβές στον άνθρωπο από ότι η χοληστερόλη και φωσφολιπίδια (Belitz *et al.*, 2006).

Τα προϊόντα υδρόλυσης των τριγλυκεριδίων του κρόκου, γλυκερίνη, λιπαρά οξέα που χρησιμοποιούνται είτε ανεξάρτητα είτε ως μείγματα επιδρούν αρνητικά στο λεύκωμα με το σχηματισμό συμπλόκου της λεκίθου με την ωομυκίνη του λευκώματος (Lomakina & Μίκονά, 2006). Η θερμική επεξεργασία, βοηθά στο διαχωρισμό αυτού του συμπλόκου, και βελτιώνει τις αφριστικές ιδιότητες του λευκώματος που περιέχει τον κρόκο. Γενικά η παρουσία του κρόκου στο λεύκωμα προς παρασκευή αφρού μειώνει την ικανότητα αφρισμού. Αυτό οφείλεται στη δέσμευση των πρωτεϊνών από τις λιποπρωτεΐνες του κρόκου (Rizvi *et al.*, 1995).

Για αυτό το λόγο σε βιομηχανική κλίμακα είθισται η προσθήκη σκόνης λευκώματος, για να αντικαταστήσει την απώλεια των πρωτεϊνών και να ενισχύσει την αφριστική ικανότητα (Rizvi *et al.*, 1995).

10) Το pH. Οι Van der Plancken *et al.* (2007), μελέτησαν τις ιδιότητες του αφρού λευκώματος αβγού που ετοιμάστηκε από λεύκωμα με pH 7,6 και pH 8,8 και παρατήρησαν ότι η σταθερότητα του αφρού που σχηματίστηκε με

pH 8,8 ήταν πολύ μικρότερη από ότι στον αφρό με pH 7,6, και αυτό γιατί στο σύστημα με το μεγαλύτερο pH, το ποσοστό του υγρού που διατηρήθηκε στη φάση του αφρού μετά από μια ώρα παρατήρησης ήταν 26% ενώ στο δείγμα με pH 7,6 ήταν 28,8%. Επομένως, η μείωση του pH μεταβάλλει την συγκέντρωση των πρωτεϊνών στην διεπιφάνεια αέρα/νερού και καθιστά τον αφρό σταθερότερο.

Σύμφωνα με την μελέτη των Hammershøj *et al.* (1999), οι οποίοι διερεύνησαν τις διεπιφανειακές ιδιότητες του αφρού από λεύκωμα αβγού σε διαφορετικά επίπεδα pH παρατήρησαν ότι η σταθερότητα του αφρού εμφανίστηκε μειωμένη σε συντηρημένα αβγά (pH=9,2) σε σύγκριση με φρέσκα (pH=7).

11) *Ανάμειξη.* Η ανάμειξη βοηθά στην αύξηση το ποσοστού χτυπήματος και του όγκου των σχηματιζόμενων προϊόντων ως συνέπεια της μείωσης στο μήκος του μορίου της οωμυκίνης (Lomakina & Μίκονά, 2006).

12) *Ομογενοποίηση.* Αυτή η επεξεργασία μειώνει το χρόνο χτυπήματος. Η ομογενοποίηση επηρεάζει επίσης την φυσική κατάσταση της οωμυκίνης μειώνοντας ελαφρώς το μήκος της πρωτεϊνικής της αλυσίδας (Lomakina & Μίκονά, 2006).

13) *Φυγοκέντρωση.* Κατά τη φυγοκέντρωση μειώνεται εμφανώς το ποσοστό της οωμυκίνης και αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση του ποσοστού χτυπήματος. Η μείωση της ποιότητας του χτυπήματος οφείλεται σε δυνάμεις διάτμησης που ασκούνται στο λεύκωμα κατά τη φυγοκέντρωση (Lomakina & Μίκονά, 2006).

14) *Παστερίωση.* Η παστερίωση του λευκώματος μειώνει τη δυνατότητα αφρισμού και οδηγεί στη μείωση της ποιότητας και του όγκου των προϊόντων αβγού. Αυτό οφείλεται στην αλλοίωση της οωτρανσφερίνης κατά την παστερίωση στους 53°C. Για την αύξηση της θερμοκρασίας αλλοίωσής της, και τη βελτίωση των αφριστικών ιδιοτήτων του λευκώματος μετά από την παστερίωση, απαραίτητη είναι η προσθήκη των μεταλλικών ιόντων, και αλάτων των φωσφορικών και κιτρικών οξέων (Hatta *et al.*, 1997).

Το παστεριωμένο λεύκωμα απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο χτυπήματος για να επιτευχθεί όγκος αφρού όμοιος με αυτό που προέρχεται από μη παστεριωμένο λεύκωμα. Αυτό οφείλεται στην μετουσίωση της οωμυκίνης και της λυσοζύμης (Yang & Baldwin, 1994).

15) *Σκόνη λευκώματος*. Η παραγωγή αφρού από σκόνη λευκώματος μειώνει τη σταθερότητα του αφρού, δηλαδή η αποστράγγιση και το ποσοστό μείωσης του όγκου του αφρού αυξάνονται (Hammershøj *et al.*, 2004).

16) *Ξηρή θέρμανση*. Η ξηρή θερμική κατεργασία του λευκώματος στους 55-65°C συνήθως χρησιμοποιείται για τη μείωση του μικροβιακού φορίου (Mine, 1995). Οι Kato *et al.* (1994) επεξεργάστηκαν το λεύκωμα σε ξηρή μορφή (7,5% υγρασία) στους 80°C για 10 μέρες και διαπίστωσαν ότι η αφριστική ικανότητα και η σταθερότητα του αφρού αυξήθηκε, σχεδόν τετραπλασιάστηκε χωρίς να μειωθεί η διαλυτότητά του. Παρατήρησαν ότι η θέρμανση του λευκώματος σε ξηρή κατάσταση οδήγησε σε σημαντική αύξηση της ευελιξίας του μορίου των πρωτεϊνών και της επιφάνειας των υδροφοβικών μορίων, τα οποία διαμόρφωσαν ταχύτερα πιο συνεκτικά φιλμ γύρω από τη φυσαλίδα.

17) *Λάδι*. Η παρουσία λαδιού προκαλεί παρόμοια καταστρεπτική δράση στις αφριστικές ιδιότητες του λευκώματος όπως ο κρόκος. Η σταθερότητα του αφρού δεν επηρεάζεται αν το ποσοστό του λαδιού δεν υπερβαίνει το 0.5% (Yang & Baldwin, 1994).

18) *Χημικές τροποποιήσεις*: Η ικανότητα αφρισμού και η σταθερότητα του αφρού μειώνονται σημαντικά από την ακετυλίωση, ενώ βελτιώνονται ελαφρώς από την καρβοξυλική τροποποίηση (Ball *et al.*, 1982).

#### **2.4.6 Μηχανισμός αποσταθεροποίησης του αφρού**

Οι αφροί αποσταθεροποιούνται όταν το υγρό αποστραγγίζει υπό την επίδραση της βαρύτητας μέσω των διαύλων Plateau προς το κάτω μέρος του αφρού. Μετά το πέρασμα του χρόνου αποστράγγισης στην κορυφή του δείγματος το μεγαλύτερο μέρος του υγρού έχει απομακρυνθεί, δημιουργώντας έναν ξηρό αφρό. Στο κατώτερο επίπεδό του ο αφρός είναι υγρός και συνίσταται από περισσότερες σφαιρικές φυσαλίδες. Οι περισσότεροι υγροί αφροί έχουν μικρό χρόνο ζωής και αυτό οφείλεται στο στράγγισμα του υγρού ανάμεσα από τις φυσαλίδες και συγκεκριμένα από τους διαύλους Plateau υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας μειώνοντας έτσι το πάχος των υμενίων που περιβάλλουν τη φυσαλίδα. Επίσης η πρωτεϊνική

συγκέντρωση στο διάλυμα μπορεί να είναι ανεπαρκής για την κάλυψη των υμενίων (Παναγιώτου, 1998; Patino *et al.*, 2008). Συνεπώς σε αυτόν τον πρώτο μηχανισμό αποσταθεροποίησης επιδρά η δύναμη της βαρύτητας στο υγρό που βρίσκεται στο λεπτό φιλμ που περιβάλλει την φυσαλίδα (Berry, 2008).

Έναν δεύτερο μηχανισμό αποσταθεροποίησης αποτελεί ο δυσανάλογος καταμερισμός των φυσαλίδων (*disproportionation*). Σύμφωνα με αυτόν τον μηχανισμό, το μέγεθος των μεγάλων φυσαλίδων αυξάνει συνεχώς σε βάρος των μικρών, με κινητήρια δύναμη τη διαφορά πίεσης και τη διάχυση αέρα μέσω του υμενίου από τις μικρές φυσαλίδες στις οποίες η εσωτερική πίεση είναι μεγάλη προς τις μεγάλες στις οποίες η εσωτερική πίεση είναι μικρότερη (Dagleish, 1994). Η διαφορά πίεσης μεταξύ δύο φυσαλίδων στηρίζεται στην εξίσωση Laplace από την οποία προκύπτει ότι οι μικρότερες φυσαλίδες έχουν μεγαλύτερη πίεση από τις μεγάλες φυσαλίδες. Δεδομένου ότι η διαλυτότητα του αέρα είναι ανάλογη της πίεσης, ο αέρας είναι περισσότερο διαλυτός στις μικρότερες φυσαλίδες. Επομένως, δυσανάλογος καταμερισμός παρουσιάζεται όταν αέρας μετακινείται από μικρές φυσαλίδες διαμέσου της υδατικής φάσης μέσα στις μεγάλες με αποτέλεσμα οι μικρές φυσαλίδες να συρρικνώνονται και οι μεγάλες να αναπτύσσονται περισσότερο. Ιδιότητες όπως το υψηλό ιξώδες του διαλύματος μπορούν να εμποδίσουν μηχανικά ή να καθυστερήσουν σημαντικά την δράση αυτού του μηχανισμού (Berry, 2008).

Ένας τρίτος μηχανισμός παρατηρείται όταν το φιλμ μεταξύ δύο φυσαλίδων λεπταίνει καθώς το υγρό αρχίζει να αποστραγγίζει, και τελικά επέρχεται η ρήξη του. Αυτό οδηγεί σε συνένωση των δύο φυσαλίδων σε μία (Berry, 2008).



### 3. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθούν οι ιδιότητες αφρών από λεύκωμα αβγού και πιο συγκεκριμένα η αφριστική ικανότητα και η αφριστική σταθερότητα αφρών που σχηματίζονται με ανάδευση (χτύπημα). Επιμέρους στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση του χρόνου και της θερμοκρασίας συντήρησης των αβγών καθώς και η προσθήκη ζάχαρης και κρόκου στις ιδιότητες του αφρού. Τέλος μελετάται η επίδραση της αντικατάστασης του λευκώματος νωπού αβγού με λεύκωμα επανασυσταμένο από σκόνη.

Οι ιδιότητες των αφρών μελετώνται τόσο ογκομετρικά όσο και με οπτική καταγραφή των φυσαλίδων του αφρού. Εκτός από τις ιδιότητες του αφρού εξετάζονται και ορισμένες ιδιότητες των υγρών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των αφρών. Συγκεκριμένα γίνονται μετρήσεις δυναμικής διεπιφανειακής τάσης, εξετάζεται η ρεολογική συμπεριφορά του λευκώματος αβγού και μετράται το φαινομενικό ιξώδες σε διάφορες ταχύτητες και τέλος μετράται το pH. Σκοπός των τελευταίων αυτών μετρήσεων είναι να βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που παρατηρούνται στους αφρούς.

## 4. Πειραματικό μέρος

### 4.1 Υλικά και μέθοδοι

#### 4.1.1 Υλικά

Στο πειραματικό μέρος που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν αβγά από μια συγκεκριμένη μέρα παραγωγής, που παραχωρήθηκαν από το πτηνοτροφείο του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, από την κατεύθυνση για αβγοπαραγωγή. Οι κόττες εκτρέφονταν σε κλοβοστοιχίες και τα διατροφικά χαρακτηριστικά των ζωοτροφών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο Παράρτημα 8.1.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσθετα στα δείγματα κρυσταλλική ζάχαρη του εμπορίου καθώς και αφυδατωμένη σκόνη λευκώματος («ΑΛΒΟΥΜΙΝΗ» ΣΤΕΛΙΟΣ ΚΑΝΑΚΗΣ). Η σκόνη λευκώματος ήταν προϊόν παστερίωσης και ξήρανσης με μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία 8%. Η σκόνη λευκώματος αναμίχθηκε με νερό σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή (150g σκόνης σε 1 λίτρο απεσταγμένο νερό).

#### 4.1.2 Συσκευές / Όργανα

- Mixer Type 4122, Mod.KM 32B, 22V~ /40-80Hz/400W (BRAUN AG Frankfurt/ M)
- Αναδευτήρας (Whirlmixer, Model No SP 46920-26, 230 V)
- Ρεόμετρο (TR-1)
- Υγρασιόμετρο τρίχας
- pH-μετρο (8424 Hanna Instruments)
- Αναλυτικοί ζυγοί (GA 2000, OHAUS)
- Ψηφιακή κάμερα XC-73CE, SONY συνδεδεμένη με Η/Υ
- Όργανο μέτρησης επιφανειακής τάσης με τη μέθοδο της κρεμάμενης σταγόνας (Cam 200 Optical Contact Angle and Surface Tension Meter, KSV Instruments, LTD)
- Κυψελίδα δοκιμών (Hanna Instruments)

- Ηλεκτρονικός υπολογιστής καταγραφής αποτελεσμάτων επιφανειακής τάσης και καταχώρησης εικόνων
- Σύρμα πάχους 0,16mm (μέγεθος αναφοράς οπτικών μετρήσεων)
- Παχύμετρο
- Παραφίλμ
- Ογκομετρικοί κύλινδροι των 200ml και 500ml
- Ποτήρια ζέσεως των 200ml και 500ml
- θάλαμο συντήρησης με θέρμανση και ψύξη ελεγχόμενης θερμοκρασίας από 0-30°C
- Πλαστική σπάτουλα
- Πλαστικό χωνί (διάμετρος εξόδου 2,5cm)

#### **4.1.3 Προκαταρκτικά πειράματα για την επιλογή κατάλληλων συνθηκών σχηματισμού αφρού**

Ο χρόνος και η ταχύτητα χτυπήματος για το σχηματισμό αφρού καθορίστηκαν με τη βοήθεια προκαταρκτικών πειραμάτων. Για την επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας δοκιμάστηκαν οι τρεις ταχύτητες χτυπήματος του μίξερ. Μόνο η μεγαλύτερη (ταχύτητα 3) έδινε ικανοποιητικούς αφρούς για χρόνους χτυπήματος 1 έως και 2 λεπτά.

Για την επιλογή του κατάλληλου χρόνου χτυπήματος δοκιμάσαμε 3 διαφορετικούς χρόνους: 1min, 1,5min και 2min ώστε να καταλήξουμε στον βέλτιστο χρόνο διεξαγωγής των κυρίως πειραμάτων.

Κατά την προετοιμασία των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν 104ml δείγματος λευκώματος αβγού που προέκυψε από ανάμιξη τριών αβγών και ακολούθησε η δημιουργία αφρού, καταγραφή του όγκου του αφρού και του αποστραγγιζόμενου υγρού καθώς και φωτογράφιση των φυσαλίδων. Οι μέθοδοι αυτοί περιγράφονται στις Παραγράφους 4.1.4 και 4.3.3.

#### 4.1.4 Σχηματισμός αφρού

Κατά την προετοιμασία των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν 104ml δείγματος σε κάθε περίπτωση. Στα δείγματα λευκώματος χρησιμοποιήθηκε ποσότητα τριών αβγών ίδια για κάθε πείραμα. Στα δείγματα λευκώματος με κρόκο χρησιμοποιήθηκε ποσότητα δύο αβγών και στα δείγματα λευκώματος με ζάχαρη χρησιμοποιήθηκε ποσότητα τριών αβγών και η αναλογία λεύκωμα προς ζάχαρη ήταν 1:1 (w/w). Για την προετοιμασία των δειγμάτων της σκόνης έγινε αραίωση 37,5g σκόνης λευκώματος αβγού σε 250ml αποσταγμένο νερό (σύμφωνα με τις οδηγίες της συσκευασίας) (περιεκτικότητα 12,4% κ.β.). Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ποσότητα 104ml για την δημιουργία αφρού, ώστε όλα τα δείγματα να έχουν τον ίδιο αρχικό όγκο. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συντηρημένα αβγά στους 4°C μετά την έξοδό τους από το θάλαμο ψύξης αφέθηκαν για κάποιο χρόνο ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν από κάθε χρήση.

Στη συνέχεια το υγρό μείγμα μεταφέρθηκε σε δοχείο συμβατικού αναμίκτη οικιακής συσκευής (AG KM32B, BRAUN) και χτυπήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 1,5 min χρησιμοποιώντας την ταχύτητα 3.

Ο χρόνος χτυπήματος καθορίστηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών πειραμάτων (Παράγραφος 5.1).

Έπειτα ο σχηματισμένος αφρός μεταγγίστηκε άμεσα διαμέσου πλαστικού χωνιού (διαμέτρου εξόδου 2,5cm), με τη βοήθεια μιας πλαστικής σπάτουλας σε ογκομετρικό κύλινδρο των 500ml. Η μετάγγιση έγινε με ιδιαίτερη προσοχή και κρατώντας κεκλιμένο τον ογκομετρικό κύλινδρο έτσι ώστε να μην προκληθεί καταστροφή του αφρού, να μην προκληθούν κενά στον ογκομετρικό σωλήνα κατά τη μετάγγιση, αλλά ούτε και να παρέλθει μεγάλος χρόνος (χρόνος μετάγγισης < 1min) και να ξεκινήσει η αποσταθεροποίηση του αφρού. Η φιάλη που περιείχε τον αφρό σφραγίστηκε με παραφίλμ ώστε να περιοριστεί η εξάτμιση του νερού.

## 4.2 Πειραματικό πλάνο

Μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου και της θερμοκρασίας συντήρησης των αβγών σε ορισμένες φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητές τους, όπως και σε ορισμένες ιδιότητες του αφρού που παράχθηκε από τα δείγματα αυτά. Για το λόγο αυτό τα δείγματα αβγού χωρίστηκαν σε 2 κύριες ομάδες ως προς τη θερμοκρασία συντήρησής τους και συντηρήθηκαν σε θερμοστατούμενους θαλάμους. Την πρώτη ομάδα αποτέλεσαν αβγά τα οποία συντηρήθηκαν στους 20°C και την δεύτερη ομάδα αποτέλεσαν αβγά τα οποία συντηρήθηκαν στους 4°C. Μελετήθηκε η επίδραση της παρουσίας κρόκου και της προσθήκης κρυσταλλικής ζάχαρης στις δύο αυτές ομάδες δειγμάτων σε αναλογία 1:1 (w/w). Τέλος μελετήθηκαν οι ίδιες ιδιότητες χρησιμοποιώντας αφυδατωμένη σκόνη λευκώματος αβγού. Ο συνολικός χρόνος συντήρησης ήταν δύο μήνες και η εξέταση των δειγμάτων έγινε την πρώτη μέρα, την πρώτη εβδομάδα, τον πρώτο μήνα, και το δεύτερο μήνα. Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι παράμετροι που μελετήθηκαν και τα επίπεδα αυτών. Πριν από το σχηματισμό αφρού στο λεύκωμα, στο μείγμα λευκώματος και ζάχαρης ή κρόκου και στο μετά από επανασύσταση λεύκωμα από σκόνη, έγιναν οι μετρήσεις που φαίνονται στον Πίνακα 4. Μετά το σχηματισμό αφρού προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 3: Παράμετροι που εξετάστηκαν και επίπεδα αυτών.

<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</b>	<b>ΕΠΙΠΕΔΑ</b>
Χρόνος συντήρησης	1 <sup>η</sup> Μέρα 1 <sup>η</sup> Εβδομάδα 1 <sup>ος</sup> Μήνας 2 <sup>ος</sup> Μήνας
Θερμοκρασία συντήρησης	20°C 4°C
Υγρό προς αφρισμό	Λεύκωμα αβγού Λεύκωμα αβγού & κρόκος Λεύκωμα αβγού & ζάχαρη Σκόνη λευκώματος Σκόνη λευκώματος & κρόκος Σκόνη λευκώματος & ζάχαρη

Πίνακας 4: Μετρήσεις στα υγρά προς αφρισμό.

Ιδιότητες	
Χημικές	pH
Φυσικές	Ιξώδες
Φυσικοχημικές	Επιφανειακή τάση ( $\gamma$ )

Πίνακας 5: Τύπος μετρήσεων και ιδιότητες που προσδιορίστηκαν στους αφρούς.

Τύπος μέτρησης	Ιδιότητες
<b>Ογκομετρική</b>	Αφριστική ικανότητα (FS) Σταθερότητα αφρού (FC)
<b>Οπτική</b>	Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) Κατανομή του όγκου των φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) Αριθμητική μέση τιμή ακτίνας φυσαλίδων ( $r_{10}$ ) Ακτίνα του μέσου όγκου των φυσαλίδων ( $r_{30}$ )

### 4.3 Μέθοδοι ανάλυσης

#### 4.3.1 Μετρήσεις κατά την συντήρηση των αβγών

Καθ' όλη τη διάρκεια συντήρησης των αβγών παρακολουθούνταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία μέσα στους θαλάμους συντήρησης των δειγμάτων με την βοήθεια του υγρασιόμετρου (Παράρτημα 8.3). Η σχετική υγρασία δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου συντήρησης αλλά διαφέρει μεταξύ των θερμοκρασιών συντήρησης [ $65 \pm 5$  (μέσος όρος  $\pm$  τυπική απόκλιση) για τους  $20^\circ\text{C}$  και  $54 \pm 4$  για τους  $4^\circ\text{C}$ ].

## **4.3.2 Μετρήσεις στα υγρά προς αφρισμό**

### **4.3.2.1 Μέτρηση pH**

Για τον προσδιορισμό του pH χρησιμοποιήθηκαν δύο αβγά σε κάθε περίπτωση. Κατά την προετοιμασία των δειγμάτων, διαχωρίστηκε η ποσότητα λευκώματος αβγού από τον κρόκο στα δείγματα σκέτου λευκώματος, στα δείγματα με κρόκο χρησιμοποιήθηκε ολόκληρη ποσότητα δύο αβγών, και στα δείγματα με τη ζάχαρη διαχωρίστηκε το λεύκωμα δύο αβγών από τον κρόκο και προστέθηκε ποσότητα ζάχαρης σε αναλογία 1:1 (w/w) και τοποθετήθηκαν σε ποτήρι ζέσεως των 500ml. Ακλούθησε μηχανική ανάδευση σε μαγνητικό αναδευτήρα (Whirlmixer) για την ανάμιξη του δείγματος. Μετά το τέλος της ανάμιξης το υγρό ήταν μακροσκοπικά ομοιογενές και διαυγές. Η ταχύτητα ανάδευσης ήταν τέτοια ώστε να μην δημιουργείται αφρισμός στο δείγμα. Ο χρόνος ανάδευσης διέφερε ανάλογα με τον τύπο του δείγματος (σκέτο λεύκωμα ή λεύκωμα και κρόκος ή λεύκωμα και ζάχαρη ή σκόνη λευκώματος και νερό). Η ανάδευση τελείωνε όταν το δείγμα γινόταν μακροσκοπικά ομοιόμορφο και διαυγές (εκτός από την περίπτωση παρουσίας κρόκου όπου το δείγμα δεν ήταν διαυγές). Σε κάθε περίπτωση οι μετρήσεις γίνονταν αμέσως μετά την ανάμιξη ώστε να αποφευχθεί ο διαχωρισμός (π.χ. κρόκου-λευκώματος) του δείγματος.

Η μέτρηση του pH έγινε με pH-μετρο (8424, Hanna Instruments). Το pH-μετρο στανταρίστηκε με τη βοήθεια ρυθμιστικών διαλυμάτων με pH 4 και pH 7.

### **4.3.2.2 Ρεολογικές ιδιότητες και ιξώδες**

Για κάθε επανάληψη χρησιμοποιήθηκαν δύο αβγά: α) λεύκωμα, β) λεύκωμα και κρόκος, γ) λεύκωμα και ζάχαρη (σε αναλογία 1:1 w/w), δ) σκόνη λευκώματος, στην ανάλογη θερμοκρασία συντήρησης. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ποτήρι ζέσεως, από το οποίο είχε αφαιρεθεί η υγρασία του με την βοήθεια ενός φυσητήρα. Τα δείγματα διηθήθηκαν σε χωνί Bouchner (με μέγεθος των πόρων 1mm), που με την σειρά του ήταν απαλλαγμένο από

υγρασία (με εμφύσηση ξηρού αέρος). Το κάτω άκρο του χωνιού συνδέονταν με λαστιχένιο σωλήνα, ο οποίος με την σειρά του συνδέονταν σε τζιφάρι μέσα στο οποίο έτρεχε με πίεση νερό (συσκευή διήθησης υπό κενό).

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε όργανο που επινοήθηκε και κατασκευάστηκε στο τμήμα τεχνολογίας τροφίμων του Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης (Χυ & Raphailidis, 1998) (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Φωτογραφική απεικόνιση του ρεόμετρου TR-1.

Πρόκειται για ένα ρεόμετρο πνευματικού σωλήνα πολλαπλών σκοπών που αποτελείται από ένα θάλαμο, στον οποίο είναι δυνατό να εφαρμοστεί πίεση με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια. Το υπό εξέταση δείγμα λευκώματος αβγού που βρίσκεται σε έναν μεταλλικό περιέκτη, που έχει υποστεί αφύγρανση με έναν φυσητήρα, ρέει με την εφαρμογή πίεσης μέσω του τριχοειδούς σωλήνα μέτρησης. Το ιζώδες του λευκώματος του υγρού και των υπόλοιπων δειγμάτων υπολογίζεται μέσω της εφαρμοζόμενης δύναμης και του ρυθμού ροής (Χυ & Raphailidis, 1998). Έτσι με μία σειρά μετρήσεων με την χρήση διαφορετικών πιέσεων είναι δυνατό να κατασκευαστεί μία καμπύλη ροής. Ένας ρυθμιστής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται έτσι ώστε να γίνονται μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θέρμανση του θαλάμου του ιζωδομέτρου γίνεται με την βοήθεια ηλεκτρικών αντιστάσεων, που είναι τοποθετημένες στα τοιχώματά του (Χυ & Raphailidis, 1998). Η θερμοκρασία του ρεομέτρου στην οποία έγιναν οι μετρήσεις μας ήταν  $20^{\circ}\text{C}$  και το εύρος των πιέσεων ήταν 0.7-0.1 bar.



Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το λογισμικό πρόγραμμα Kaleida graph (version 3.5b5, Synergy Software).

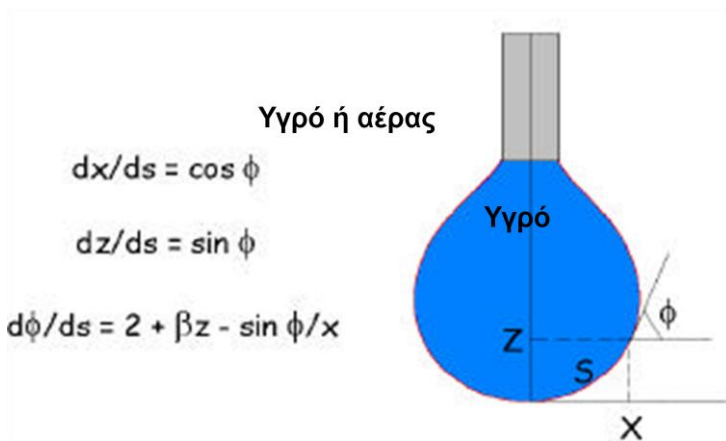
#### 4.3.2.3 Επιφανειακή τάση

##### Αρχή μεθόδου

Για την μέτρηση της δυναμικής επιφανειακής τάσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κρεμάμενης σταγόνας. Οι μετρήσεις με αυτή τη μέθοδο βασίζονται στην ανάλυση του προφίλ της σταγόνας και μπορούν να πραγματοποιηθούν για διεπιφάνειες υγρού/αέρα ή υγρού/υγρού. Η μέτρηση στηρίζεται στο σχηματισμό μιας σταγόνας στο άκρο ενώ τριχοειδούς σωλήνα (η οποία τοποθετείται μέσα σε περιβάλλον αέρα) και την καταγραφή του σχήματος της σταγόνας συναρτήσει του χρόνου με τη βοήθεια μιας κάμερας. Το σχήμα της σταγόνας καθορίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται στη σταγόνα και περιλαμβάνουν και την επιφανειακή τάση. Η επιφανειακή τάση στην υγρή διεπιφάνεια σχετίζεται με το σχήμα της σταγόνας από την ακόλουθη σχέση:

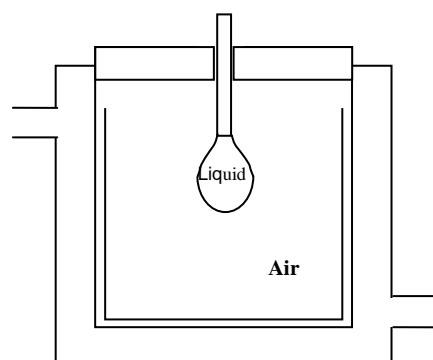
$$\gamma = \frac{\Delta\rho g R_0^2}{\beta} \quad (3)$$

Όπου  $\Delta\rho$  είναι η διαφορά της πυκνότητας μεταξύ των υγρών της διεπιφάνειας,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $R_0$  είναι η ακτίνα της σχηματιζόμενης σταγόνας και  $\beta$  ο συντελεστής σχήματος, που εκφράζεται από τρεις αδιάστατες εξισώσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή  $\beta$  (Anon, 1998).

Μια τυπική διάταξη του συστήματος μέτρησης της δυναμικής επιφανειακής τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Διάταξη μέτρησης επιφανειακής τάσης (Kalogianni, 2007)

### Προετοιμασία δειγμάτων

Η προετοιμασία των δειγμάτων ήταν η ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για την μέτρηση του pH.

Οι μετρήσεις της σταγόνας και η ανάλυση του προφίλ της για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της επιφανειακής τάσης έγιναν με το όργανο Cam 200 Optical Contact Angle Meter, (KSV Instruments LTD) (Σχήμα 11).



Σχήμα 11: Φωτογραφική απεικόνιση της συσκευής Cam 200 Optical Contact Angle and surface tension Meter, KSV instruments LTD.

Έγιναν μετρήσεις δυναμικής επιφανειακής τάσης για χρόνους από 1-2s μετά το σχηματισμό της σταγόνας έως περίπου μια ώρα. Ο χρόνος τέλους της μέτρησης ορίστηκε όχι ως ο χρόνος σταθεροποίησης της επιφανειακής τάσης αλλά ως ο χρόνος κατά τον οποίο ο όγκος της σταγόνας δεν είχε μειωθεί πάνω από 7% λόγω εξάτμισης. Σημειώνεται πως το όργανο που χρησιμοποιήθηκε δεν έχει την δυνατότητα επαναπροσαρμογής του όγκου (ή σωστότερα της επιφάνειας) στην αρχική του τιμή οπότε ο ρυθμός εξάτμισης του δείγματος μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα.

Οι μετρήσεις της κρεμάμενης σταγόνας πραγματοποιήθηκαν σε τετράγωνη κυψελίδα (Hanna Instruments) κατάλληλων οπτικών ιδιοτήτων για τις μετρήσεις αυτές. Στο επάνω μέρος της κυψελίδας υπήρχε καπάκι από συνθετικό υλικό που μπορεί αφαιρεθεί για την τοποθέτηση ή την απομάκρυνση του δείγματος παρατήρησης. Το καπάκι προστατεύει από την εξάτμιση της σταγόνας. Η κυψελίδα δεν παρουσίασε οπτική παραμόρφωση στον κατακόρυφο ή οριζόντιο άξονα παρατήρησης της σταγόνας. Η κυψελίδα παρείχε περιβάλλον προστατευμένο για να αποφευχθεί η επαφή του δείγματος με ρεύματα αέρα ώστε να μην επηρεάζεται το σχήμα της σταγόνας. Επίσης είναι σημαντικό η σταγόνα να προστατεύεται από εξωγενείς επιμολύνσεις (σκόνη κτλ.). Τέλος για την ανάλυση με ακρίβεια του προφίλ της σταγόνας από το λογισμικό του οργάνου είναι απαραίτητη η αποφυγή

οποιασδήποτε αντανάκλασης φωτός στην επιφάνεια της, εκτός από την πηγή φωτισμού του οργάνου. Η κυψελίδα τοποθετήθηκε στην υποδοχή του οργάνου η οποία προστατεύει από τον εξωτερικό φωτισμό ενώ το σύνολο των αντανάκλασεων αποφεύχθηκε με τη χρήση ιδιοκατασκευής από χαρτόνι. Από οπή που υπάρχει στο κέντρο του καλύμματος, περνά κατακόρυφα η μικροσύριγγα στήριξης του δείγματος. Το κελί με την βοήθεια κατάλληλης πλατφόρμας υποδοχής τοποθετείται εντός του οπτικού πεδίου του φακού λήψης, του οποίου η βαθμονόμηση έγινε με σφαίρα γνωστής διαμέτρου (μέγεθος αναφοράς).

### **4.3.3 Μετρήσεις στους αφρούς**

#### **4.3.3.1 Ογκομετρικές μετρήσεις**

Αμέσως μετά τη μετάγγιση του αφρού στον ογκομετρικό κύλινδρο έγινε καταγραφή του όγκου του αφρού και του αποστραγγιζόμενου υγρού (χρόνος 0min) και στην συνέχεια ανά 5min μέχρι την πρώτη ώρα και ανά 10min για τις επόμενες 2 ώρες μέχρι και το τέλος της χρονικής πορείας του πειράματος καταγράφοντας τον όγκο ( $\pm 1\text{ml}$ ) του αφρού και του υγρού στον ογκομετρικό κύλινδρο.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την διάρκεια του πειράματος γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία  $25\pm 2^\circ\text{C}$ .

### **Προσδιορισμός Αφριστικής ικανότητας**

Η αφριστική ικανότητα (FC) βάση ογκομετρικών μετρήσεων ορίζεται ως ο λόγος του αρχικού όγκου του αφρού κατά τη στιγμή παρασκευής του ( $V_{F0}$ ) προς τον όγκο του υγρού διαλύματος ( $V_W$ ) από το οποίο παρασκευάστηκε ο αφρός (Lomakina & Μίκονά, 2006) :

$$FC (\%) = (V_{F0} / V_W) * 100 \quad (4)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η αφριστική ικανότητα αφορά την συμπεριφορά του αφρού πριν αυτός αρχίσει να αποστραγγίζει.

## Προσδιορισμός Σταθερότητας αφρού

Ο προσδιορισμός της σταθερότητας του αφρού (FS) μέσω μετρήσεων με την ογκομετρική τεχνική καθορίζεται από μετρήσεις του ρυθμού ελάττωσης του όγκου του αφρού με το πέρασμα του χρόνου και την παράλληλη αύξηση του όγκου του υγρού αποστράγγισης, και εκφράζεται από τις σχέσεις (5) και (6) (Lomakina & Μίκονά, 2006):

$$FS_F (\%) = [(V_{FL} - V_L) / V_W] * 100 \quad (5)$$

Όπου  $V_{FL}$  ο στιγμιαίος όγκος του αφρού και του αποστραγγιζόμενου υγρού (ml)  $V_L$  ο στιγμιαίος όγκος του υγρού αποστράγγισης (ml) και  $V_W$  ο όγκος του υγρού από το οποίο παρασκευάστηκε ο αφρός. Ο παραπάνω προσδιορισμός έγινε για χρόνους  $t$  από  $t=0$  min έως  $t=180$  min.

Επίσης μέσω των μετρήσεων της ογκομετρικής τεχνικής είναι δυνατός και ο προσδιορισμός της μεταβολής του όγκου αποστραγγιζόμενου υγρού από τη μεταβολή του πηλίκου του στιγμιαίου όγκου του υγρού αποστράγγισης ( $V_L$ ) προς τον αρχικό όγκο του υγρού ( $V_W$ ) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή αφρού, και χρησιμοποιήθηκε η σχέση (Lomakina & Μίκονά, 2006):

$$FS_L (\%) = (V_L / V_W) * 100 \quad (6)$$

### 4.3.3.2 Οπτικές μετρήσεις

Το να μπορεί κανείς να παρακολουθήσει την αποστράγγιση του υγρού από τον αφρό, από μετρήσεις των φυσαλίδων σε καθορισμένα ύψη στο εσωτερικό του αφρού, και όχι μέσω του ήδη αποστραγγισμένου υγρού αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα, αφού έτσι εξάγονται πληροφορίες για τις τοπικές ιδιότητες και την εσωτερική δομή του αφρού, κάτι που δεν μπορεί να φανεί από συνολικές μεταβολές του όγκου του (Phianmongkhol & Varley, 1999).

Ιδανικά ένα σύστημα που μετρά το μέγεθος φυσαλίδων δίνει πληροφορίες για την κατανομή μεγεθών σε συγκεκριμένο σημείο μέσα στον όγκο του αφρού. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στην

φωτογράφιση της μεταβολής του μεγέθους φυσαλίδων συναρτήσει του χρόνου (Calvert & Nezhati, 1987).

Για την οπτική καταγραφή των χαρακτηριστικών του αφρού χρησιμοποιήθηκε το ίδιο όργανο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της επιφανειακής τάσης. Αξιοποιήθηκε η κάμερα (XC-73CE, SONY συνδεδεμένη με H/Y), ο φακός και το λογισμικό καταγραφής εικόνας. Το κελί μέτρησης επιφανειακής τάσης αντικαταστάθηκε από τον ογκομετρικό κύλινδρο με τον αφρό.

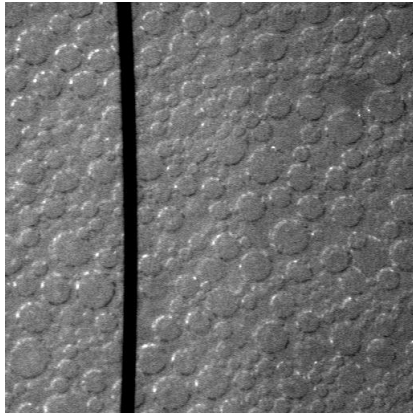
Η έναρξη της φωτογράφισης έγινε σε χρόνο 5min από το σχηματισμό αφρού. Αυτό το διάστημα ήταν απαραίτητο για να γίνουν οι κατάλληλες οπτικές ρυθμίσεις. Στην συνέχεια πάρθηκαν εικόνες ανά 5min μέχρι την πρώτη ώρα και ανά 10min για τις επόμενες 2 ώρες. Μετά το πέρας των τριών ωρών ο ρυθμός αποσταθεροποίησης του αφρού ήταν πολύ μικρός. Σε κάθε χρονικό διάστημα πάρθηκαν εικόνες από 3 διαφορετικά σημεία του αφρού σε ύψος 25-30cm του ογκομετρικού σωλήνα. Το ύψος αυτό αντιστοιχούσε στο μέσο στρώμα του αφρού.

Ως μέγεθος αναφοράς για τον υπολογισμό του μεγέθους των φυσαλίδων χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό σύρμα πάχους 0,16mm το οποίο φωτογραφιζόταν πριν την έναρξη της κάθε δοκιμής και αφού ολοκληρώνονταν οι οπτικές μετρήσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο δείγμα λευκώματος με προσθήκη κρόκου συντηρημένο για 1 εβδομάδα στους 4°C είχαμε οπτικά αποτελέσματα μέχρι τα 60min του πειράματος λόγω τεχνικών προβλημάτων.

Η επεξεργασία των εικόνων έγινε με την χρήση του λογισμικού Corel Draw 10 (Corel Corporation). Η μέτρηση των φυσαλίδων έγινε με σύγκριση τους με το μέγεθος αναφοράς. Η επεξεργασία όλων των δεδομένων έγινε με το λογισμικό Microsoft Excel 2007 (Microsoft).

Μια χαρακτηριστική φωτογραφία που περιλαμβάνει το μέγεθος αναφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 12. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, υπάρχουν μερικές μεγάλες φυσαλίδες και αρκετές μικρότερων διαστάσεων. Μια τυπική εκτύπωση περιέχει περίπου 170 ευδιάκριτες φυσαλίδες. Προφανώς αυτό το σύνολο ποικίλλει σύμφωνα με το μέσο μέγεθος φυσαλίδων (στη παρούσα εργασία κυμαίνεται από 0,1mm ως 4mm).



Σχήμα 12: Φωτογραφική απεικόνιση αφρού σχηματισμένου από λεύκωμα αβγού το οποίο ήταν συντηρημένο για μία εβδομάδα στον θάλαμο αποθήκευσης στους 4°C και μετά από δύο λεπτά παραμονής του αφρού. Η μαύρη μπάρα είναι το μέγεθος αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε και έχει πάχος 160μm.

Η ανάλυση της κάθε φωτογραφίας όπως προαναφέρθηκε έγινε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Corel Draw 10. Αρχικά εφαρμόστηκε μεγέθυνση της εικόνας 200% για καλύτερη ευκρίνεια και ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η μέτρηση της διαμέτρου των φυσαλίδων έγινε χειρονακτικά με τη χρήση της εφαρμογής dimension tool, και η κάθε διάσταση σε (mm) αναγραφόταν αυτόματα σε μια μπάρα του προγράμματος.

Για κάθε φωτογραφία μετρήθηκαν οι διαστάσεις 60 φυσαλίδων από το κέντρο της φωτογραφίας ενώ πάρθηκαν φωτογραφίες από τρία διαφορετικά σημεία στο ίδιο ύψος του αφρού για τον κάθε χρόνο. Επίσης μετρήθηκε η διάσταση του μεγέθους αναφοράς στο τέλος κάθε πειράματος ώστε να γίνουν οι ανάλογες μετατροπές σε φυσικές μονάδες με ακρίβεια. Η διάσταση του μεγέθους αναφοράς ήταν διαφορετική σε κάθε πείραμα, ανάλογα με την εστίαση του φακού φωτογράφισης.

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή των διαστάσεων των φυσαλίδων σε φυσικές μονάδες δίνεται από το πηλίκο της αρχικής διάστασης  $N_0$  της κάθε φυσαλίδας επί το φυσικό πάχος του μεγέθους αναφοράς (0,16mm) προς το μετρήσιμο μέγεθος αναφοράς (M.A.).

$$N=(N_0 * 0,16)/M.A \quad (7)$$

Έπειτα υπολογίστηκε η συχνότητα του μεγέθους των φυσαλίδων που εντάσσονται σε κάθε εύρος μεγέθους(d) και ορίζεται ως N. Για το σκοπό αυτό

τα μεγέθη των φυσαλίδων ομαδοποιήθηκαν (0.1 έως 0.2mm, 0.21 έως 0.3mm, 0.31 έως 0.4mm...3.91 έως 4mm) Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία διαγραμμάτων μεταβολής του μεγέθους των φυσαλίδων, δίνεται από τη συχνότητα των διαστάσεων των φυσαλίδων (N) προς τον συνολικό αριθμό φυσαλίδων που αναλύθηκαν σε κάθε πείραμα (n), και εκφράζεται από τη σχέση:

$$N(\%) = (N/n) \cdot 100 \quad (8)$$

Αντίστοιχα η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του όγκου (V) που καταλαμβάνει ο αριθμός (N) των φυσαλίδων σε ένα σύστημα αφρού δίνεται από τη σχέση:

$$V (\%) = (V_0/\sum V_0) \cdot 100 \quad (9)$$

Όπου  $\sum V_0$  ο συνολικός όγκος των φυσαλίδων,  $V_0$  ο όγκος της σφαίρας που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$V_0 = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3 \quad (10)$$

Όπου r η ακτίνα των ομαδοποιημένων διαμέτρων των φυσαλίδων.

Αρχικά έγινε έλεγχος κανονικότητας της κατανομής των μεγεθών των φυσαλίδων. Ο έλεγχος έγινε από το στατιστικό πρόγραμμα Minitab 15, (Minitab Inc.). Επειδή στις περισσότερες των περιπτώσεων η κατανομή των μεγεθών των φυσαλίδων δεν ήταν κανονική προσδιορίστηκαν η ασυμμετρία ( $g_1$ ) και κύρτωση ( $g_2$ ) της κατανομής.

Η ασυμμετρία χαρακτηρίζει το βαθμό έλλειψης συμμετρίας μιας κατανομής, γύρω από τη μέση τιμή της. Ασυμμετρία παρατηρείται όταν η καμπύλη συχνότητας του δείγματος τείνει προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά από το κεντρικό τμήμα της καμπύλης και καλείται αντίστοιχα θετική ή αρνητική. Το μέτρο της ασυμμετρίας ή και συμμετρίας μιας καμπύλης βρίσκεται από τον συντελεστή συμμετρίας που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$g_1 = n \cdot \sum_{i=1} (r_i - \bar{r})^3 / [(n-1)(n-2) \cdot s^3] \quad (11)$$

Όπου s η τυπική απόκλιση,  $\bar{r}$  ο μέσος όρος των ακτίνων των φυσαλίδων, και  $r_i$  η τιμή της ακτίνας της κάθε φυσαλίδας. Η ασυμμετρία είναι θετική όταν  $g_1 > 0$  και αρνητική όταν  $g_1 < 0$  ενώ η καμπύλη είναι συμμετρική όταν  $g_1 = 0$ .

Με τον όρο κύρτωση νοείται το σχήμα της κορυφής μιας καμπύλης και μετρείται με τον συντελεστή κύρτωσης ως εξής:



$$g_2 = n(n+1) \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^4 - 3(n-1) \left[ \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \right]^2 / [(n-1)(n-2)(n-3) \cdot s^4] \quad (12)$$

Όταν  $g_2 > 0$  η καμπύλη λέγεται λεπτόκυρτη, όταν  $g_2 < 0$  η καμπύλη είναι πλατύκυρτη και όταν  $g_2 = 0$  είναι μεσόκυρτη (Πετρίδης, 2000).

Για δείγματα που δεν ακολουθούν κανονική κατανομή, όπως είναι και τα μεγέθη φυσαλίδων στο σύστημα που μελετάται στην παρούσα εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιες εμπειρικές σχέσεις που με βάση τη μέση ακτίνα φυσαλίδων δίνουν πληροφορίες για την κατανομή μεγεθών (Engelsen *et al.*, 2002).

Μια τέτοια σχέση είναι η αριθμητική μέση τιμή ακτίνων που ορίζεται από τη σχέση:

$$r_{10} = 1/n \sum r_i \quad (13)$$

Όπου  $n$  ο αριθμός των φυσαλίδων που μετρήθηκαν σε κάθε πείραμα και  $r_i$  η ακτίνα της κάθε φυσαλίδας.

Επίσης, μπορούμε να περιγράψουμε τη διάμετρο του μέσου όγκου φυσαλίδων ως έξης:

$$r_{30} = [1/n \sum r_i^3]^{1/3} \quad (14)$$

Η σχέση αυτή εκφράζει την ακτίνα που έχει μια φυσαλίδα της οποίας ο όγκος ισούται με τον αριθμητικό μέσο όγκο όλων των φυσαλίδων.

## 5. Αποτελέσματα και συζήτηση

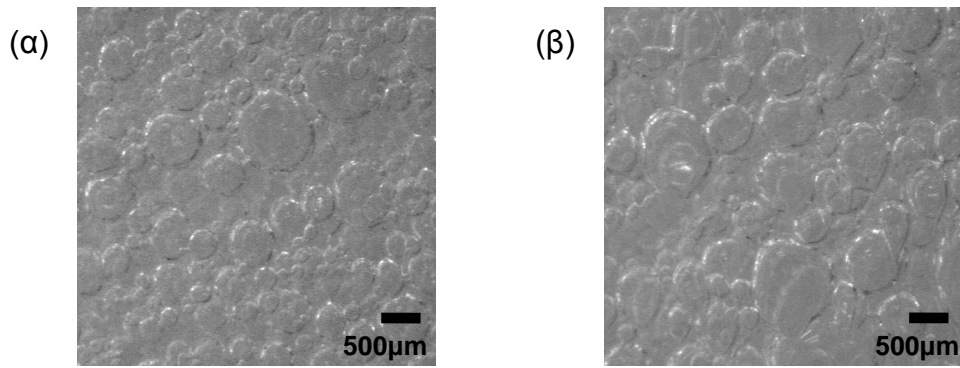
### 5.1 Προκαταρκτικά πειράματα

#### 5.1.1 Επίδραση χρόνου χτυπήματος στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά του αφρού

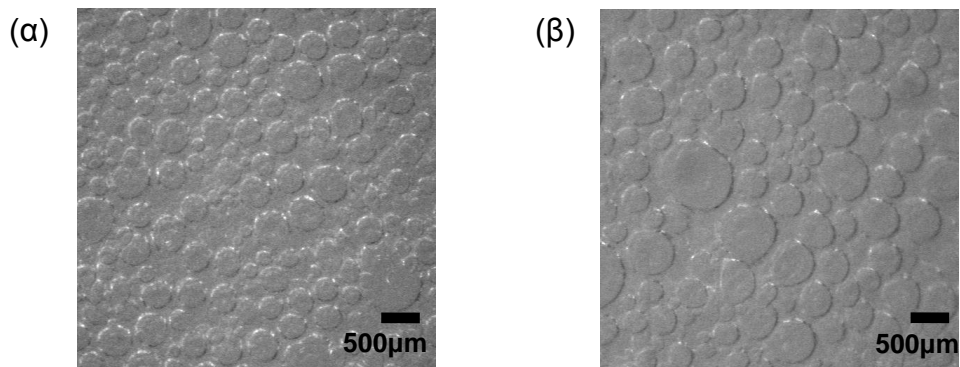
Για την επιλογή του κατάλληλου χρόνου χτυπήματος δοκιμάσαμε τρεις διαφορετικούς χρόνους: 1 min, 1,5 min και 2 min ώστε να καταλήξουμε στον βέλτιστο χρόνο χτυπήματος για την παρασκευή του αφρού. Στα Σχήματα 13, 14, και 15 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες αφρών που παράχθηκαν μετά από χτύπημα 1, 1,5 και 2 min αντίστοιχα. Κατά το χτύπημα του λευκώματος για 1min ο αφρός που σχηματίστηκε ήταν αραιός, με σχετικά μεγάλες φυσαλίδες αέρα, και εύκολα ρέων. Όταν το λεύκωμα χτυπήθηκε για 1,5 min οι φυσαλίδες που παράχθηκαν ήταν μικρότερες ενώ ο αφρός εξακολουθούσε να παρουσιάζει ροή. Η παράταση του χτυπήματος του πρωτεϊνικού διαλύματος στα 2 min, παράγει μικρότερες φυσαλίδες και σχηματίζουν δύσκαμπτο αφρό. Ο αφρός αυτός εμφάνισε μεγάλα κενά κατά την μετάγγιση του στο δοχείο παρατήρησης [π.χ. Σχήμα 15(α)] και αυτό προκαλεί ανακρίβεια στην ογκομετρική μέθοδο. Η αλλαγή της συμπεριφοράς του αφρού στα 2 min οφείλεται στη μείωση της ελαστικότητας των φυσαλίδων που προκύπτουν από την υπερβολική αδιαλυτοποίηση των πρωτεϊνών στη διεπιφάνεια αέρα-πρωτεΐνης (Lomakina & Μίκονά, 2006).

Μετά από 3 ώρες παραμονής παρατηρείται σημαντική αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων και για τους τρεις αφρούς με σημαντικότερη αυτή που παρατηρείται για χρόνο χτυπήματος 2 min. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι τα κενά που έμειναν κατά την μετάγγιση στον αφρό που παράχθηκε με χτύπημα 2 min αναμένεται να επηρέασαν την αποσταθεροποίηση του αφρού.

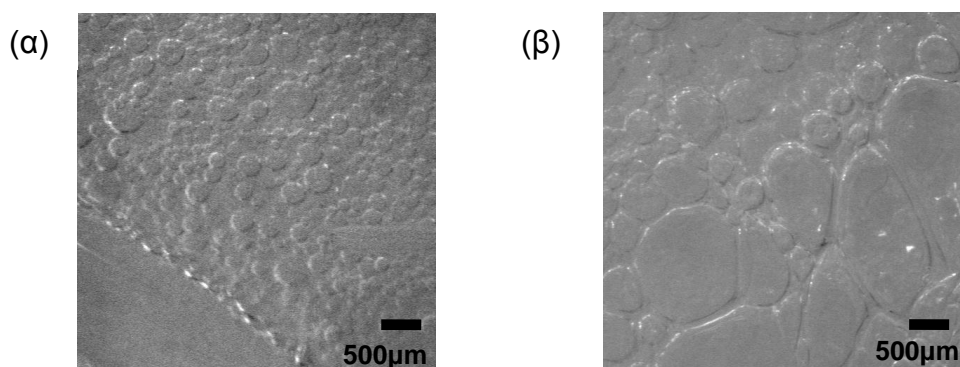
Η μακροσκοπική παρατήρηση των αφρών που παράχθηκαν με διαφορετικούς χρόνους χτυπήματος οδηγεί στον αποκλεισμό του χρόνου χτυπήματος 2 min για τα κυρίως πειράματα, λόγω της αδυναμίας σωστής μετάγγισης η οποία επηρεάζει τις ογκομετρικές μετρήσεις αλλά και την αποσταθεροποίηση του αφρού.



Σχήμα 13: Φωτογραφική απεικόνιση των φυσαλίδων του αφρού από λεύκωμα αβγού σε χρόνο χτυπήματος 1min, τα πρώτα 10 λεπτά από την δημιουργία αφρού (α) και μετά από 3 ώρες (β).



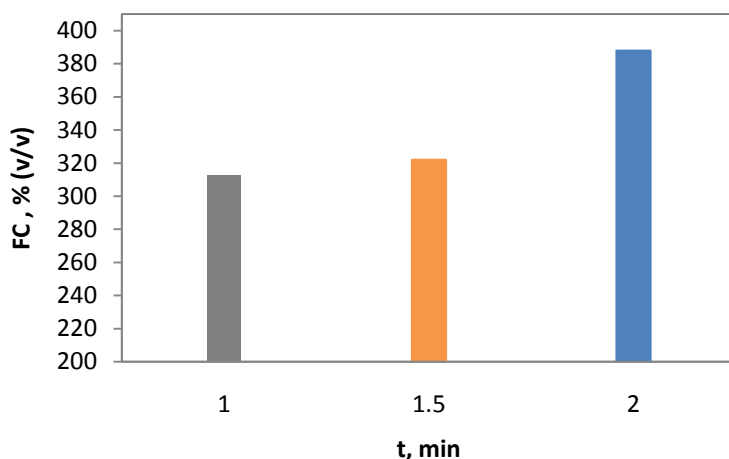
Σχήμα 14: Φωτογραφική απεικόνιση των φυσαλίδων του αφρού από λεύκωμα αβγού σε χρόνο χτυπήματος 1,5min, τα πρώτα 10 λεπτά από την δημιουργία αφρού (α) και μετά από 3 ώρες (β).



Σχήμα 15: Φωτογραφική απεικόνιση των φυσαλίδων του αφρού από λεύκωμα αβγού σε χρόνο χτυπήματος 2 min, τα πρώτα 10 λεπτά από την δημιουργία αφρού (α) και μετά από 3 ώρες (β).

### 5.1.2 Επίδραση του χρόνου χτυπήματος στην αφριστική ικανότητα

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η μεταβολή της αφριστικής ικανότητας λευκώματος νωπού (φρέσκου) αβγού συναρτήσει του χρόνου χτυπήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως αν και υπάρχουν κενά κατά τη μετάγγιση του αφρού που χτυπήθηκε για 2 min ο συνολικός όγκος των κενών αυτών ήταν μικρός συγκριτικά με τον συνολικό όγκο του αφρού. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος χτυπήματος, αυξάνεται η αφριστική ικανότητα. Το ίδιο παρατηρήθηκε από τους Dluzewski *et al.* (1994) οι οποίοι μελέτησαν τις αφριστικές ιδιότητες σε ένα σύστημα σκόνης λευκώματος αβγού, με την ογκομετρική τεχνική σε αφρούς που σχηματίστηκαν σε διαφορετικούς χρόνους χτυπήματος.



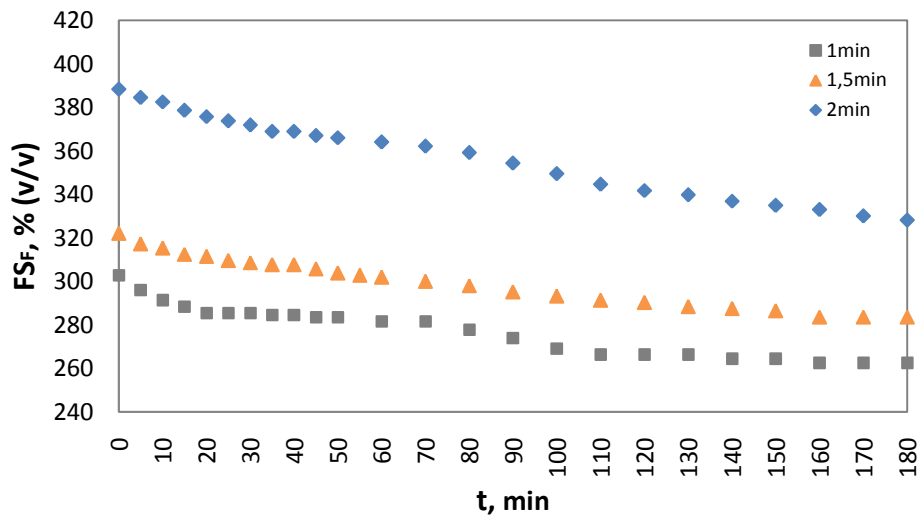
Σχήμα 16: Αφριστική ικανότητα (FC) λευκώματος αβγού 1<sup>ης</sup> ημέρας συναρτήσει του χρόνου χτυπήματος (t).

### 5.1.3 Επίδραση χρόνου χτυπήματος στην σταθερότητα του αφρού

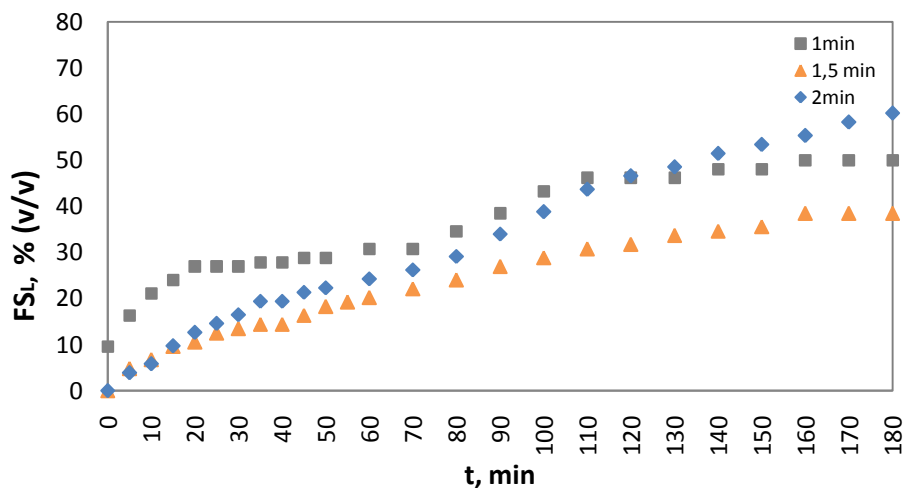
Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του αφρού συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης. Παρατηρούμε πως ο μεγαλύτερος ρυθμός αποσταθεροποίησης παρατηρείται για τον αφρό που σχηματίστηκε χρησιμοποιώντας 2 min χτυπήματος ενώ ο ρυθμός μείωσης του όγκου του αφρού στις άλλες δύο περιπτώσεις είναι συγκρίσιμος.

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του υγρού αποστράγγισης συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης. Αξίζει να

σημειωθεί πως ο χρόνος χτυπήματος 1min δεν ήταν αρκετός ώστε να σχηματιστεί αφρός από το σύνολο του όγκου του υγρού κι έτσι περίπου 10% του αρχικού υγρού δεν ενσωματώθηκε στον αφρό. Ο αφρός που χτυπήθηκε για χρόνο 2 min παρουσιάζει τον υψηλότερο ρυθμό αποστράγγισης.



Σχήμα 17: Μεταβολή του όγκου του αφρού ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_F$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από λεύκωμα αβγού με χρόνο χτυπήματος 1min 1,5 min και 2 min.



Σχήμα 18: Μεταβολή του όγκου του υγρού που αποχωρίζεται από τον αφρό ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_L$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από λεύκωμα αβγού με χρόνο χτυπήματος 1min 1,5 min και 2 min.

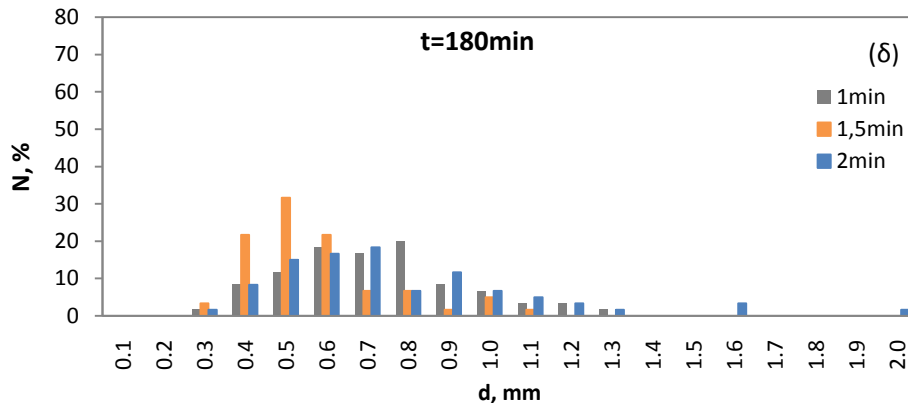
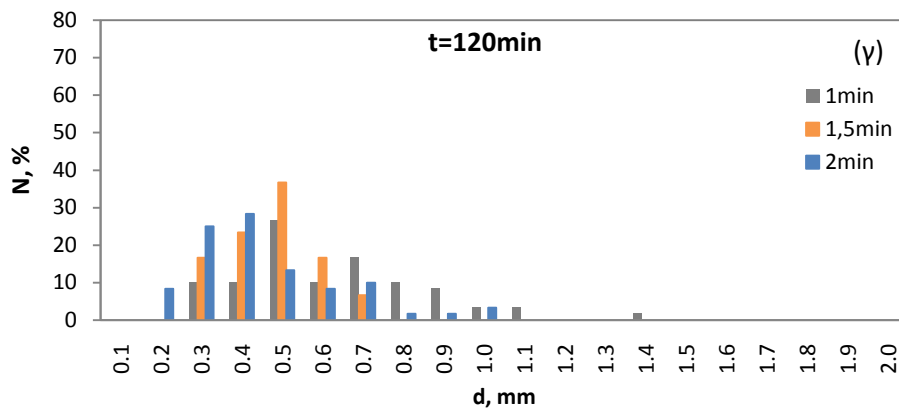
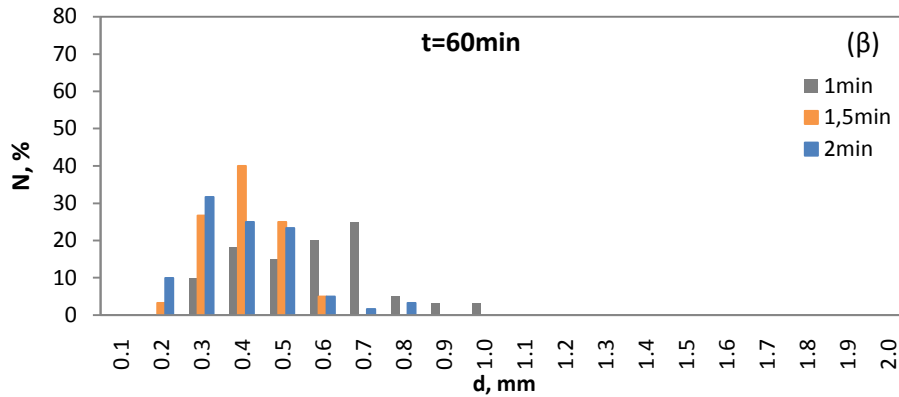
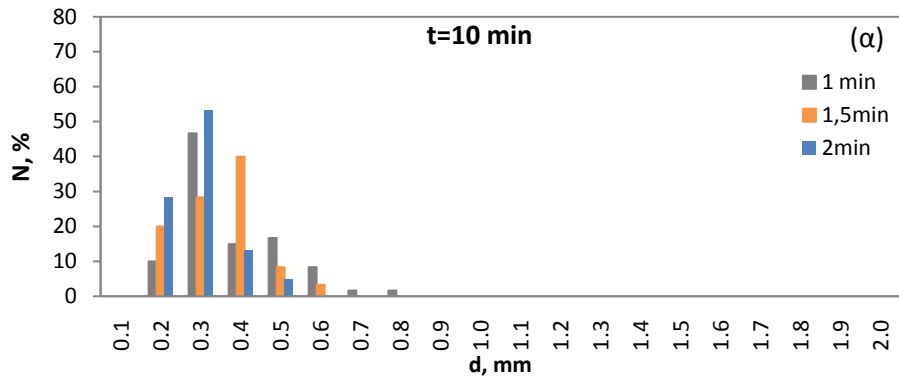
Οι Dluzewski *et al.* (1994) οι οποίοι μελέτησαν την μεταβολή του όγκου υγρού αποστράγγισης σε 12% υγρού διαλύματος από σκόνη λευκώματος σε χρόνους χτυπήματος 0,25 min, 0,5 min, 1 min και 2,5 min, διαπίστωσαν επίσης ότι ο όγκος του υγρού αποστράγγισης αμέσως μετά από την προετοιμασία του αφρού ήταν υψηλότερος για τους πιο σύντομους χρόνους χτυπήματος, πράγμα που συμφωνεί με τα αποτελέσματα του Σχήματος 18.

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 18 προκύπτει πως ο χρόνος χτυπήματος 1min είναι ανεπαρκής για το σχηματισμό αφρού και σύμφωνα και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις επιλέχθηκε ο χρόνος χτυπήματος 1,5 min.

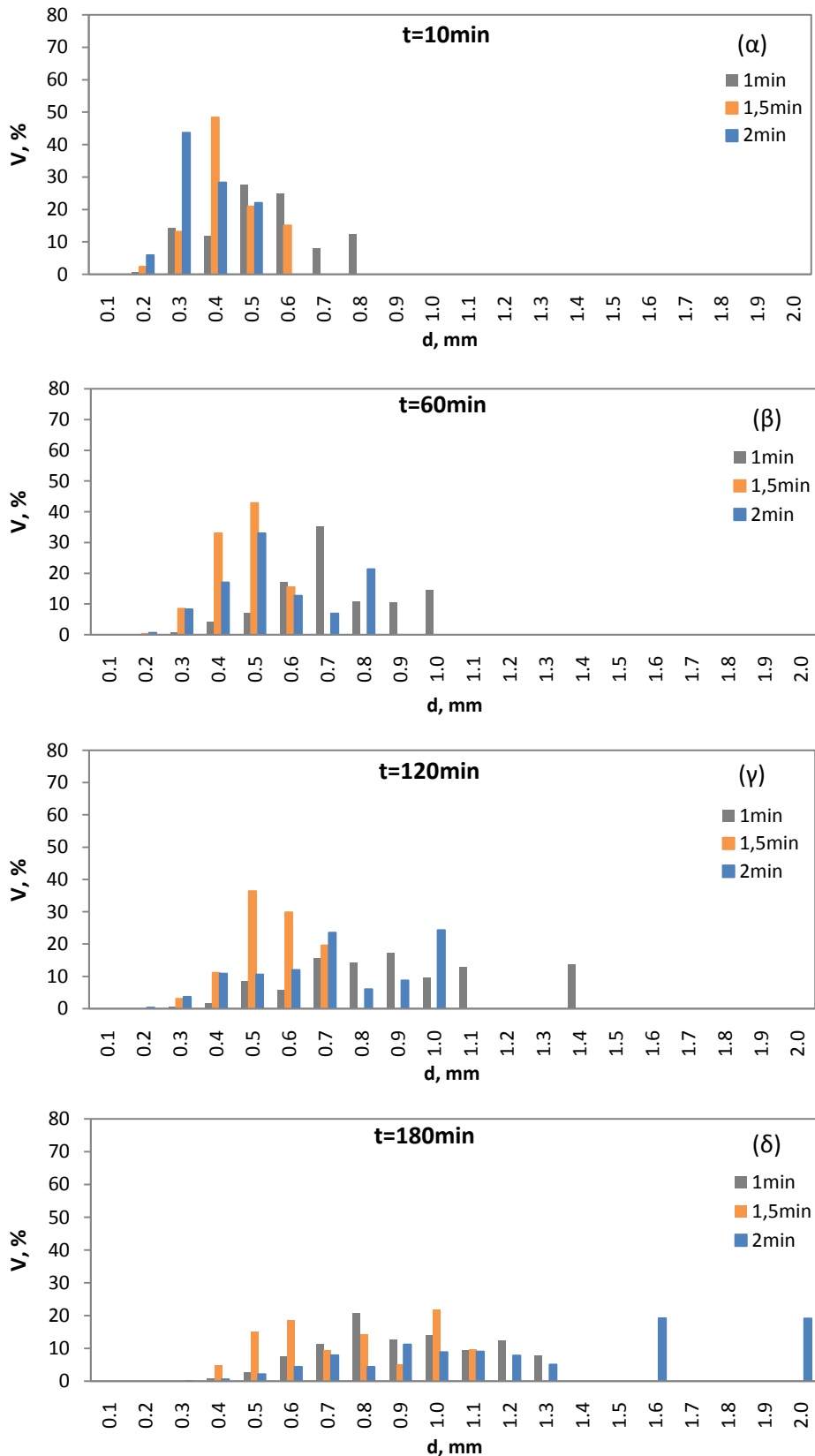
#### **5.1.4 Επίδραση του χρόνου χτυπήματος στην διάμετρο και στον όγκο των φυσαλίδων**

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται η κατανομή αριθμού των φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) στα λευκώματα αβγού με χρόνο χτυπήματος 1 min, 1,5 min και 2 min σε ένα σύστημα αφρού σε χρόνο παραμονής 10 έως 180 λεπτά. Παρατηρούμε γενικά μια αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων και του εύρους κατανομής των μεγεθών όσο περνάει ο χρόνος αποσταθεροποίησης σε όλα τα δείγματα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της αποσταθεροποίησης των αφρών με ενδεχόμενη συμμετοχή των μηχανισμών συσσωμάτωσης (coalescence) και του δυσανάλογου καταμερισμού (disproportionation). Αξίζει να σημειωθεί πως ο χρόνος χτυπήματος 1,5 min παράγει αφρούς με μικρότερη αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων σε σύγκριση με τους χρόνους χτυπήματος 1 και 2 min.

Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται ο όγκος της αέριας φάσης που καταλαμβάνουν τα διάφορα μεγέθη φυσαλίδων που μετέχουν στο σχηματισμό των αφρών. Στο Σχήμα 20 συγκρίνονται αφροί που παράχθηκαν με διαφορετικό χρόνο χτυπήματος και μελετάται ο χρόνος αποσταθεροποίησης (t) σε αυτούς. Δηλαδή η μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνει ο αριθμός των φυσαλίδων στα εξεταζόμενα δείγματα σε ένα σύστημα αφρού συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης. Συνεπώς αυτά τα αποτελέσματα συνδέονται



Σχήματα 19: Κατανομή του αριθμού των φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) σε συστήματα αφρού που προέκυψαν από λεύκωμα αβγού με χρόνο χτυπήματος 1min, 1,5 min και 2 min και για χρόνους αποσταθεροποίησης (t) 10min, 60min, 120min και 180min.



Σχήμα 20: Κατανομή του όγκου (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) στην αέρια φάση συστημάτων αφρού που προέκυψαν από λεύκωμα αβγού με χρόνο χτυπήματος 1min, 1,5min και 2min και για χρόνους αποσταθεροποίησης (t) 10min, 60min, 120min και 180min.

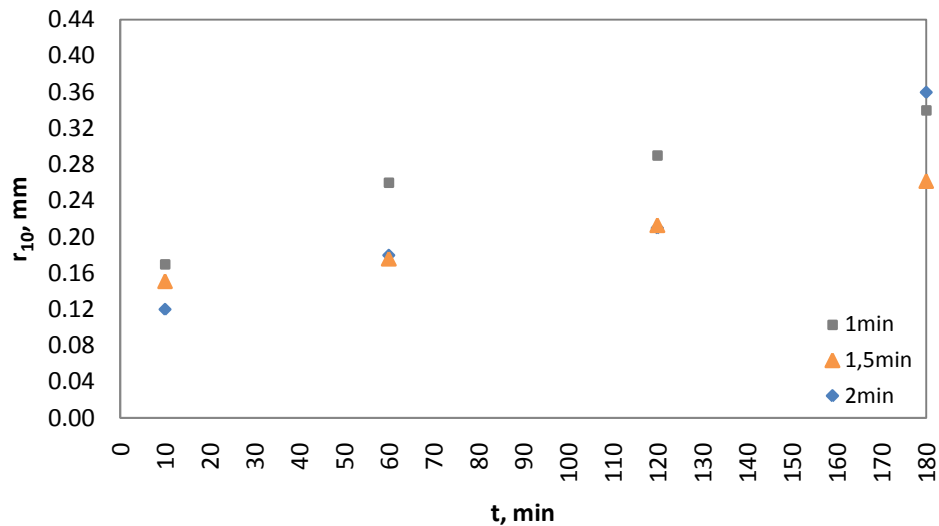


με τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν από τα μεγέθη των φυσαλίδων (N-d) (Σχήμα 19). Αξίζει να σημειωθεί όμως πως αν και στο Σχήμα 19 οι φυσαλίδες που βρίσκονται στα μεγάλα μεγέθη έχουν μικρό αριθμό, στο Σχήμα 20 είναι φανερό ότι στα ίδια μεγέθη αυτές καταλαμβάνουν σημαντικό όγκο του αέριου κλάσματος του αφρού. Στο Σχήμα 20 παρατηρούμε πως κατά την πρώτη ώρα παραμονής του αφρού [Σχήμα 20(α) και 20(β)] οι σχετικά μικρές φυσαλίδες (< 1mm) καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο ενώ προς το τέλος του κάθε πειράματος [Σχήμα 20(γ) και 20(δ)] αυξάνει ο όγκος των μεγάλων φυσαλίδων και ιδιαίτερα στο λεύκωμα που χτυπήθηκε για 2 λεπτά. Συγκεκριμένα το λεύκωμα με 1,5 λεπτά χρόνο χτυπήματος έχει μεγαλύτερο όγκο φυσαλίδων στα μικρότερα μεγέθη ενώ στα άλλα δείγματα μεγαλύτερα μεγέθη φυσαλίδων που καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο.

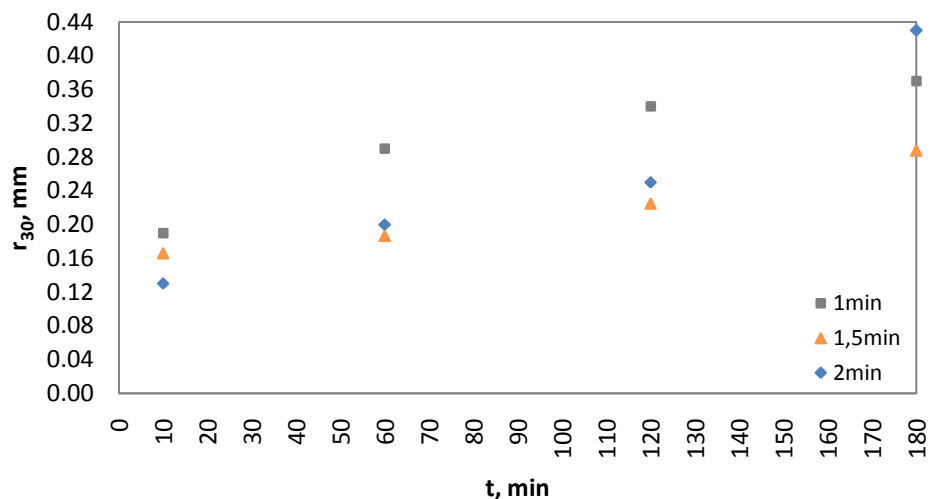
Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται ο αριθμητικός μέσος όρος των ακτίνων των φυσαλίδων ( $r_{10}$ ) που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 19. Στο Σχήμα 21 είναι φανερό ότι όσο περνάει ο χρόνος αποσταθεροποίησης, αυξάνεται η μέση ακτίνα φυσαλίδων. Πιο συγκεκριμένα το λεύκωμα με χρόνο χτυπήματος 1 λεπτό έχει μεγαλύτερη μέση ακτίνα φυσαλίδων σε σχέση με τους άλλους δύο αφρούς ακόμη και στην αρχή της αποσταθεροποίησης. Αντίθετα το λεύκωμα με χρόνο χτυπήματος 2 λεπτά αρχικά έχει την μικρότερη μέση ακτίνα και με το πέρασμα του χρόνου αποσταθεροποίησης αυξάνεται πιο έντονα μέχρι το τέλος του πειράματος (3 ώρες). Τέλος, το λεύκωμα με χρόνο χτυπήματος 1,5 λεπτά η μέση ακτίνα παρουσιάζει μια πιο μικρή αύξηση όσο περνάει ο χρόνος αποσταθεροποίησης. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αυτά του Σχήματος 19. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν βρέθηκε σχετική μελέτη που να αφορά την επίδραση του χρόνου χτυπήματος στα μεγέθη φυσαλίδων λευκώματος αβγού ώστε τα συγκριθούν τα αποτελέσματά μας.

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται η ακτίνα του μέσου όγκου ( $r_{30}$ ) των φυσαλίδων για αφρούς με διαφορετικούς χρόνους χτυπήματος και σε διαφορετικούς χρόνους αποσταθεροποίησης. Η ακτίνα του μέσου όγκου ( $r_{30}$ ) εκφράζει την ακτίνα που θα είχαν οι φυσαλίδες του αφρού αν όλες είχαν όγκο ίσο με τον μέσο όγκο των φυσαλίδων. Γενικά, παρατηρούνται οι ίδιες τάσεις με αυτές που παρατηρήθηκαν στον Σχήμα 21, μόνο που οι διαφορές μεταξύ των αφρών με διαφορετικούς χρόνους χτυπήματος είναι μεγαλύτερες για του μεγάλους χρόνους αποσταθεροποίησης στο Σχήμα 22. Αυτό οφείλεται στο ότι

μικρή ποσότητα φυσαλίδων μεγαλύτερης διαμέτρου (Σχήμα 20) επηρεάζει σημαντικά τις τιμές της ακτίνας μέσου όγκου (Σχήμα 22) και ως εκ τούτου εμφανίζει μεγαλύτερες διαφορές στο μέσο όγκο των φυσαλίδων.



Σχήμα 21: Αριθμητική μέση ακτίνα φυσαλίδων ( $r_{10}$ ) συναρτήσεως του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα λευκώματος με χρόνο χτυπήματος 1min 1,5min και 2 min.



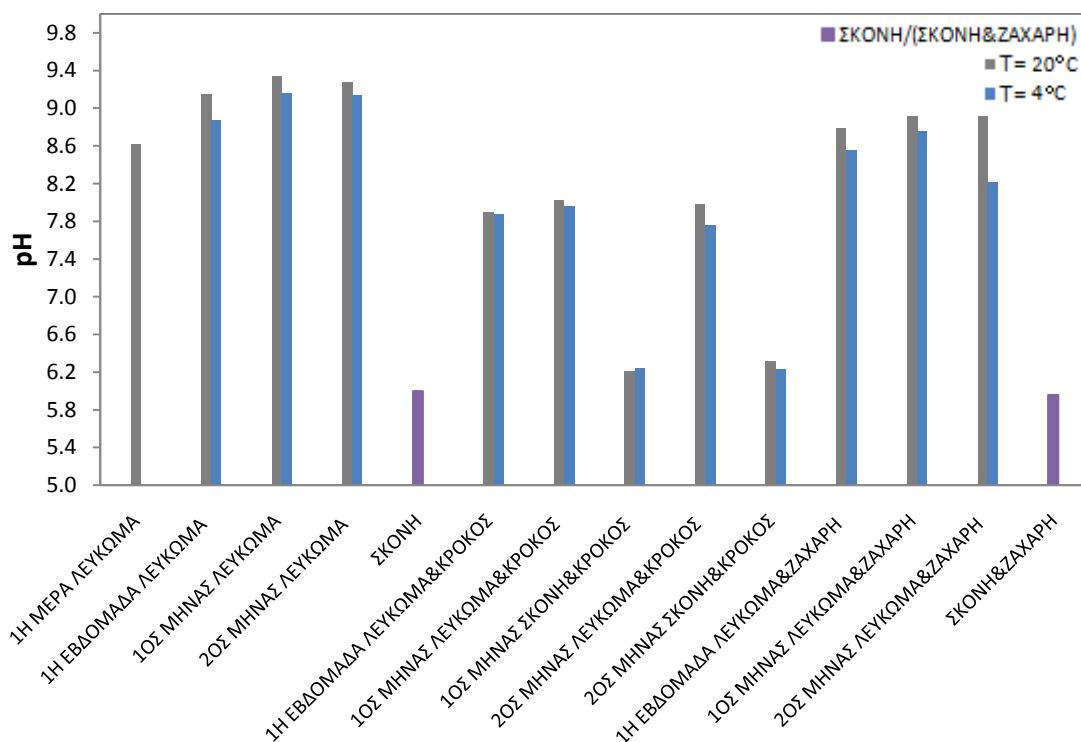
Σχήμα 22: Μέσος όγκος των ακτίνων των φυσαλίδων ( $r_{30}$ ) συναρτήσεως του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα λευκώματος με χρόνο χτυπήματος 1min 1,5min και 2 min.

## 5.2 Αποτελέσματα των φυσικοχημικών μετρήσεων των υγρών αφρισμού

### 5.2.1 pH

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται το pH συναρτήσει του χρόνου και της θερμοκρασίας συντήρησης για δείγματα νωπού λευκώματος αβγού, λευκώματος, λευκώματος με κρόκο, λευκώματος με ζάχαρη που συντηρήθηκαν στους 20°C και 4°C, καθώς και σκόνης λευκώματος η οποία αντικατέστησε το λεύκωμα αβγού. Παρατηρούμε ότι το pH του λευκώματος ήταν αλκαλικό την πρώτη ημέρα (8,62). Μετά από συντήρηση στους 20°C ανέρχεται μέσα σε μία εβδομάδα σε 9,15 και μετά από ένα μήνα φτάνει το 9,34. Η άνοδος αυτή οφείλεται στην έντονη απώλεια του CO<sub>2</sub>, το οποίο απελευθερώνεται λόγω υδρόλυσης που υφίσταται από τα ένζυμα. Η διάχυση του CO<sub>2</sub> διά μέσω του κελύφους του αβγού, αρχίζει αμέσως μετά την γέννησή του, προκαλώντας μία απότομη αύξηση του pH, ειδικά στο λεύκωμα του αβγού. Μία ώρα μετά την γέννηση του αβγού η απώλεια του CO<sub>2</sub> είναι η μέγιστη (Πολυμενίδης, 1977). Η αύξηση του pH του λευκώματος είναι λιγότερο έντονη όταν τα αβγά συντηρούνται στους 4°C. Είναι γνωστό από την βιβλιογραφία ότι με την συντήρηση των αβγών στον θάλαμο αποθήκευσης στους 20°C ο ρυθμός απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub> είναι μεγαλύτερος απ' ότι στους 4°C, με αποτέλεσμα η αύξηση του pH στους 4°C να καθυστερεί σε σύγκριση με αυτήν των δειγμάτων που συντηρήθηκαν στους 20°C (Belitz *et al.*, 2006).

Η προσθήκη κρόκου στο λεύκωμα έχει μειώσει αρκετά το pH του διαλύματος. Η αύξηση του pH με τον χρόνο συντήρησης παρουσία κρόκου είναι μικρότερη σε σύγκριση με το σκέτο λεύκωμα. Η επίδραση αυτή του κρόκου στο pH είναι αναμενόμενη γιατί ο κρόκος έχει χαμηλότερο pH (6,00) σε σύγκριση με το λεύκωμα του αβγού, και αυξάνεται μόνο ελαφρώς ακόμη και μετά από παρατεταμένη αποθήκευση (Belitz *et al.*, 2006). Η προσθήκη ζάχαρης προκαλεί μείωση του pH σε σχέση με το σκέτο λεύκωμα. Τέλος, το χαμηλό pH της σκόνης οφείλεται στα διάφορα στάδια επεξεργασίας του λευκώματος (Lechevalier *et al.*, 2007).



Σχήμα 23: Μεταβολή του pH συναρτήσει του χρόνου και της θερμοκρασίας συντήρησης (T), σε δείγματα λευκώματος αβγού, λευκώματος με κρόκο, λευκώματος με ζάχαρη, σκόνης λευκώματος, σκόνης λευκώματος με κρόκο από συντηρημένο αβγό, καθώς και σκόνης λευκώματος με ζάχαρη.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά μας με αυτά των Ζωγραφάκη & Μητολίδη, (2008) οι οποίοι μέτρησαν το pH του νωπού λευκώματος του αβγού και του συντηρημένου για δύο μήνες λεύκωμα στους 20°C και 4°C, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς την μεταβολή του pH με την παρούσα μελέτη.

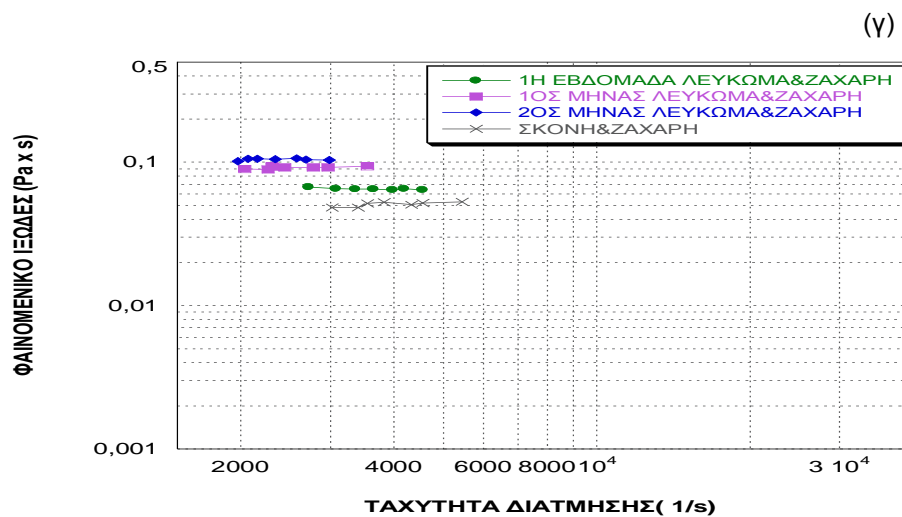
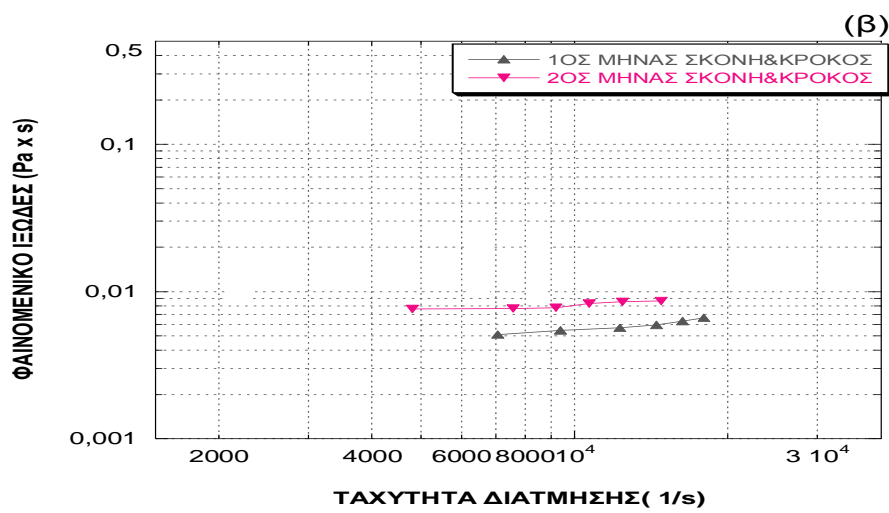
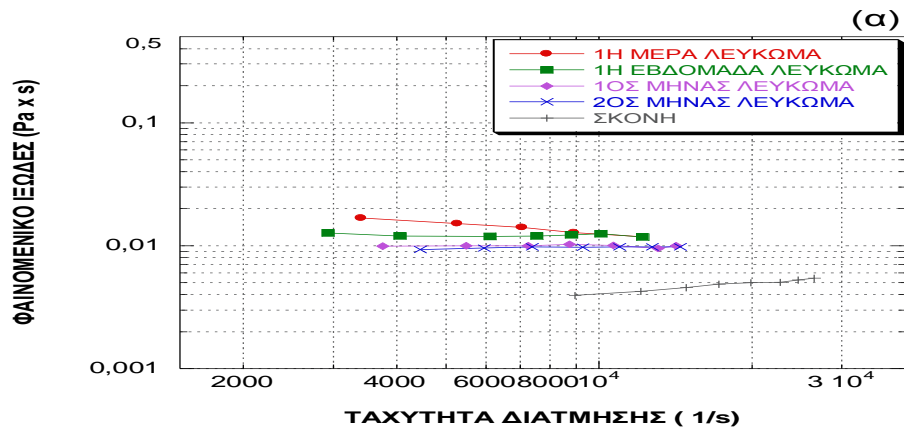
### 5.2.2 Ρεολογική συμπεριφορά και ιξώδες

Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται το φαινομενικό ιξώδες συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης για δείγματα νωπού λευκώματος που συντηρήθηκαν στους 20°C, καθώς και λευκώματος με κρόκο και ζάχαρη. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα για τα οποία το νωπό λεύκωμα έχει αντικατασταθεί με λεύκωμα επανασυσταμένο από σκόνη λευκώματος.

Στο Σχήμα 24(α) παρατηρούμε πως το φρέσκο λεύκωμα αβγού παρουσιάζει ψευδοπλαστική συμπεριφορά (μείωση του ιξώδους του λευκώματος συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης). Η ψευδοπλαστική ρεολογική συμπεριφορά του λευκώματος του αβγού είναι γνωστή στην βιβλιογραφία (Foegeding *et al.*, 2006; Panta, 1995). Η ψευδοπλαστική αυτή συμπεριφορά όμως χάνεται μετά από 1 μήνα συντήρησης και το λεύκωμα αποκτά νευτώνεια ρεολογική συμπεριφορά. Η αλλαγή αυτή της ρεολογικής συμπεριφοράς θα πρέπει να συνδέεται με μεταβολές στις πρωτεΐνες του λευκώματος (π.χ. υδρόλυση) και δεν είναι γνωστές στις συγγραφείς μελέτες που να μελετούν τη ρεολογική συμπεριφορά του λευκώματος συναρτήσει του χρόνου συντήρησης των αβγών. Αντίθετα, από το νωπό λεύκωμα, το λεύκωμα που προέκυψε από επανασύσταση παρουσίασε διασταλτική ρεολογική συμπεριφορά.

Στο Σχήμα 24(α), παρατηρείται ότι το δείγμα λευκώματος της 1<sup>ης</sup> μέρας παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ιξώδους σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα δείγματα, και με το πέρασμα του χρόνου συντήρησης παρατηρείται μείωση του ιξώδους του λευκώματος. Κατά τη συντήρηση του λευκώματος παρατηρείται διάσπαση της F-ωομυκίνης, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχηματισμό του τρισδιάστατου δικτύου της ωομυκίνης και του ιξώδους του λευκώματος (Κυρανάς, 2000). Η διάσπαση αυτή και μείωση της συγκέντρωσής της έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους του λευκώματος (Parkinson, 1966). Παράλληλα και άλλες μεταβολές στις πρωτεΐνες του λευκώματος (π.χ. υδρόλυση) συνεισφέρουν στη μείωση του ιξώδους. Επίσης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Κυρανάς, 2000), αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο λεύκωμα αυξάνει παράλληλα και η συγκέντρωση των ζαχάρων, που είναι ενωμένα με Ο-γλυκοζιτικούς δεσμούς. Η απελευθέρωση αυτών των ενώσεων οφείλεται στη διάσπαση της F-ωομυκίνης. Το δείγμα της σκόνης παρουσιάζει πολύ μικρότερες τιμές ιξώδους από όλα.

Οι μετρήσεις ιξώδους που έγιναν για μείγμα νωπού λευκώματος και κρόκου δεν έδωσαν επαναλήψιμα αποτελέσματα και οι τιμές του ιξώδους συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης παρουσίασαν μεγάλη διασπορά γι' αυτό και δεν παρουσιάζονται. Ενδεχομένως ανομοιογένεια του μείγματος κρόκου-λευκώματος να οδηγεί σε τέτοια αποτελέσματα και έτσι είναι δύσκολο κανείς



Σχήμα 24: Φαινομενικό ιξώδες συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης στους 20°C σε δείγματα λευκώματος, σκόνης λευκώματος με κρόκο, λευκώματος με ζάχαρη και σε δείγματα από επανασυσταμένο λεύκωμα αβγού.

να προσδιορίσει σωστά το ιξώδες του μίγματος με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε.

Τα δείγματα λευκώματος επανασυσταμένου από σκόνη με την προσθήκη κρόκου δεν εμφανίζουν τέτοια προβλήματα και παρουσιάζονται στο Σχήμα 24(β). Όπως και απουσία του κρόκου [Σχήμα 24(α)], τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν διασταλτική συμπεριφορά. Σε κάθε περίπτωση η προσθήκη κρόκου προκάλεσε αύξηση του ιξώδους του μίγματος σε σχέση με τα δείγματα λευκώματος. Επίσης η προσθήκη κρόκου 2 μηνών σε σχέση με τον κρόκο 1 μηνός στην σκόνη λευκώματος προκάλεσε αύξηση του ιξώδους. Κατά την αποθήκευση των αβγών η περιεκτικότητα του κρόκου σε στερεά αρχικά μειώνεται και κατόπιν αυξάνεται λόγω μεταφοράς νερού στον κρόκο από το λεύκωμα και αντίστροφα (Li Chan *et al.*, 1994) και έτσι η αύξηση του ιξώδους που παρατηρήθηκε στο Σχήμα 24(β) ενδεχομένως να οφείλεται σε αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών. Παρόλα αυτά τα συστήματα αυτά είναι πολύ περίπλοκα και άλλες μεταβολές κατά την συντήρηση ή/και ενδεχόμενη αλληλεπίδραση των συστατικών του κρόκου και του επανασυσταμένου λευκώματος θα μπορούσαν να ευθύνονται για τις παρατηρούμενες μεταβολές.

Στο Σχήμα 24(γ) η προσθήκη ζάχαρης στα συντηρημένα δείγματα στους 20°C, προσδίδει μεγάλες τιμές ιξώδους συγκριτικά με όλα τα υπόλοιπα. Τα δείγματα διατηρούν την νευτώνεια ρεολογική συμπεριφορά που είχαν απουσία ζάχαρης. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι πως ενώ στην περίπτωση του σκέτου λευκώματος η αύξηση του χρόνου συντήρησης προκαλεί μείωση του ιξώδους, όταν προστίθεται ζάχαρη, το ιξώδες αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου συντήρησης. Κατά την συντήρηση των αβγών συμβαίνουν δύο παράλληλες μεταβολές:

- α) Μεταβολές στις πρωτεΐνες του λευκώματος οι οποίες τείνουν να μειώσουν το ιξώδες όπως είδαμε στο Σχήμα 24(α).
- β) Μείωση της περιεκτικότητας του νερού (λόγω εξάτμισης) η οποία αυξάνει την συγκέντρωση των στερεών στο λεύκωμα και τείνει να αυξήσει το ιξώδες.

Έτσι η διάλυση της ίδιας ποσότητας ζάχαρης σε ίδια ποσότητα λευκώματος αυξάνει την συγκέντρωση της ζάχαρης στο διάλυμα όσο αυξάνεται ο χρόνος συντήρησης. Τέλος, η προσθήκη ζάχαρης σε ένα διάλυμα

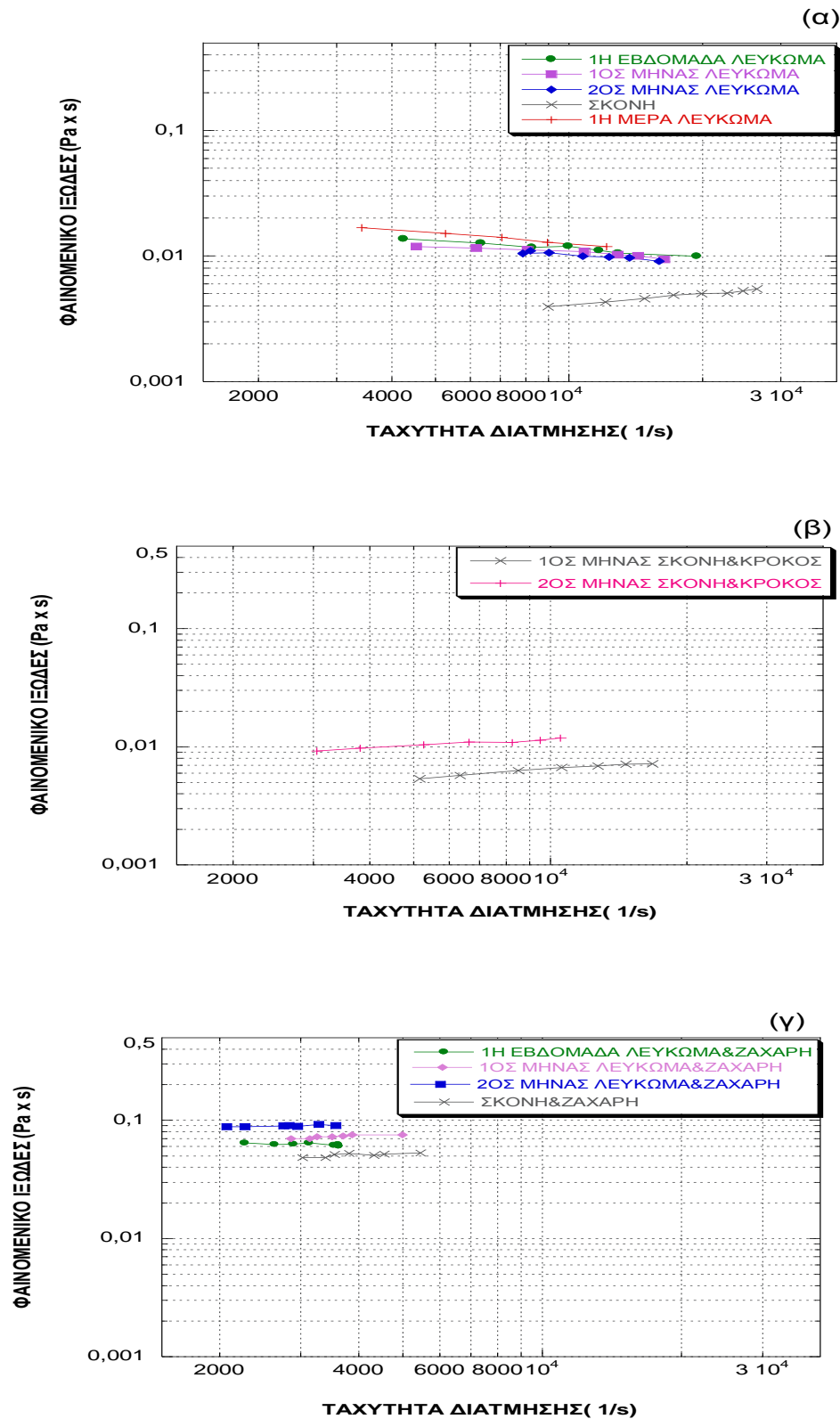
μειώνει το ξεδίπλωμα της πρωτεϊνικής αλυσίδας (Lau & Dickinson, 2005) κάτι που ενδεχομένως να επηρεάζει την τιμή του φαινομενικού ιξώδους.

Στο Σχήμα 25(α) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα λευκώματος αβγού που έχουν συντηρηθεί στους 4°C. Παρατηρήθηκε πως όλα τα δείγματα παρουσιάζουν ψευδοπλαστική ρεολογική συμπεριφορά εκτός από το δείγμα της σκόνης που όπως προαναφέρθηκε ανήκει στα διασταλτικά ρευστά. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με ότι παρατηρήθηκε στα αβγά που συντηρήθηκαν στους 20°C στα οποία διαπιστώθηκε νευτώνεια συμπεριφορά μετά από 1 μήνα συντήρησης των αβγών. Επίσης στο Σχήμα 25(α) μεγαλύτερη τιμή ιξώδους έχει το δείγμα της 1<sup>ης</sup> εβδομάδας και με το πέρασμα του χρόνου συντήρησης σταδιακά μειώνεται όπως συμβαίνει και στα αντίστοιχα δείγματα στους 20°C [Σχήμα 24(α)]. Το φρέσκο λεύκωμα έχει μεγαλύτερο ιξώδες από όλα τα συντηρημένα λευκώματα στους 4°C. Παρατηρήσαμε λιγότερο σημαντική μείωση του ιξώδους συναρτήσει του χρόνου συντήρησης των συντηρημένων λευκωμάτων στους 4°C σε σχέση με τα αντίστοιχα σε θερμοκρασία αποθήκευσης 20°C. Οι διαφορές αυτές σχετίζονται με την μείωση του ρυθμού αλλοίωσης των αβγών (επιβράδυνση των χημικών αντιδράσεων) κατά την συντήρηση στους 4°C.

Στο Σχήμα 25(β) παρουσιάζεται το ιξώδες επανασυσταμένης σκόνης λευκώματος αβγού με προσθήκη κρόκου. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά του Σχήματος 24(β).

Στο Σχήμα 25(γ) η προσθήκη ζάχαρης προσδίδει μεγαλύτερες τιμές ιξώδους σε όλα τα δείγματα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα αβγών συντηρημένα στους 4°C. Παρατηρείται όμως ότι με το πέρασμα του χρόνου συντήρησης το ιξώδες αυξάνεται, δηλαδή ο 2<sup>ος</sup> μήνας εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στο Σχήμα 24(γ). Και εδώ το δείγμα με την σκόνη εμφανίζει μικρότερα ιξώδη.



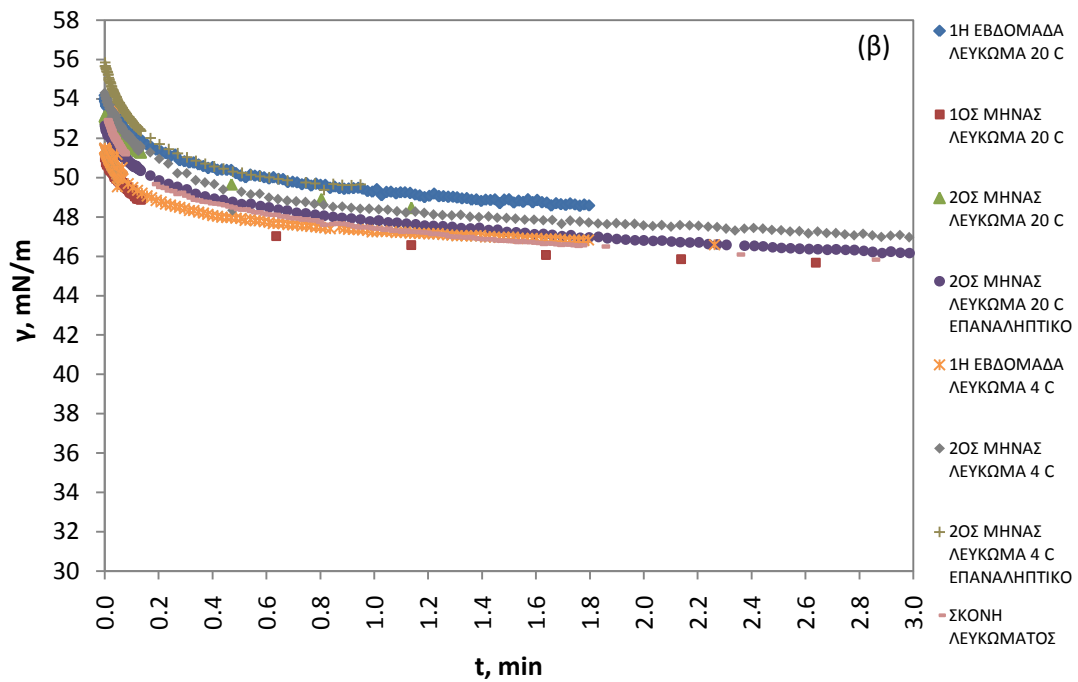
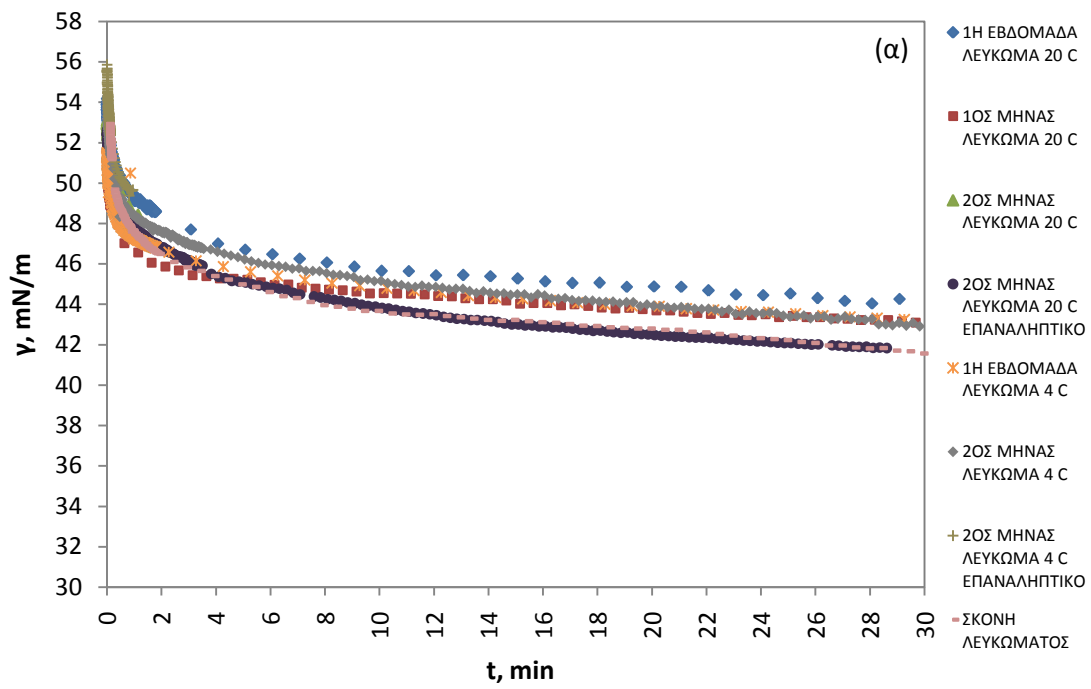


Σχήμα 25: Φαινομενικό ιξώδες συναρτήσει της ταχύτητας διάτμησης για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης στους 4°C σε δείγματα λευκώματος, λευκώματος και κρόκου, λευκώματος και ζάχαρης και σε δείγματα από επανασυσταμένο λεύκωμα αβγού.

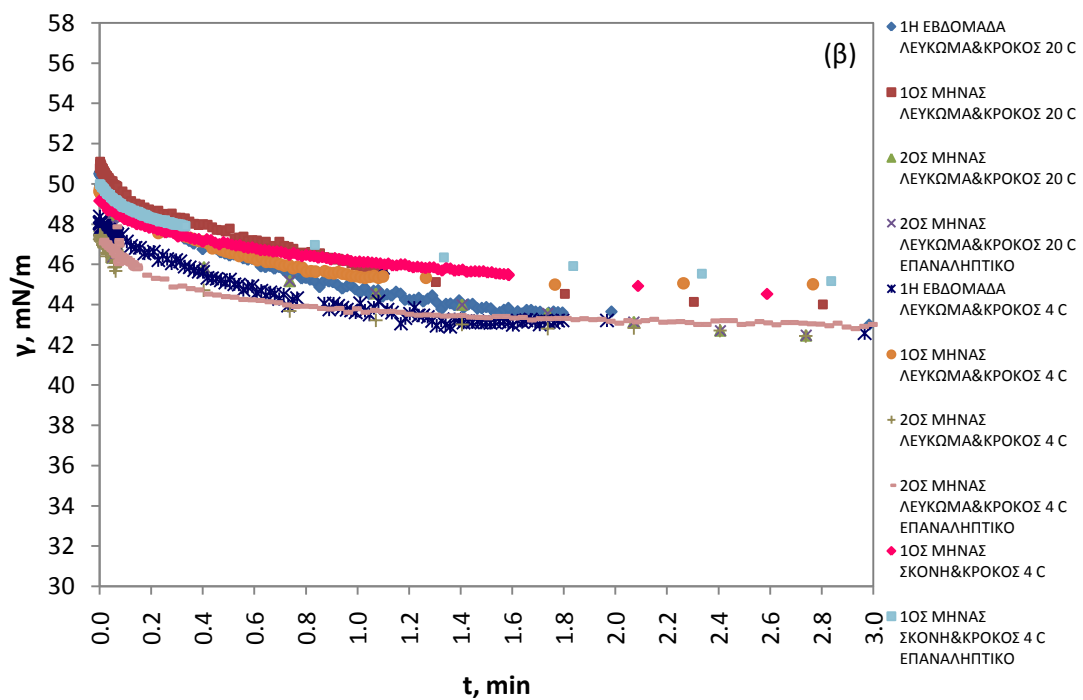
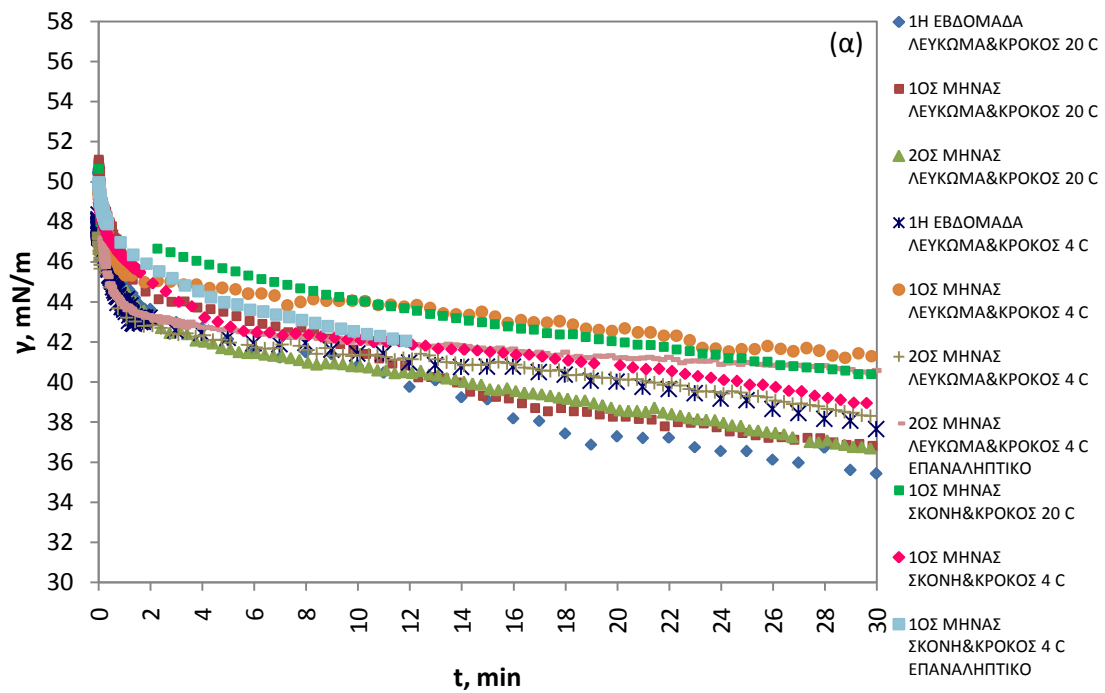
### 5.2.3 Επιφανειακή τάση

Στα Σχήματα 26, 27 και 28 παρουσιάζεται η δυναμική επιφανειακή τάση λευκώματος αβγού συναρτήσει του χρόνου. Παρουσιάζονται οι μεταβολές στην επιφανειακή τάση τα πρώτα 3 min και τα πρώτα 30 min. Σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήματα 26, 27 και 28) παρατηρούμε ότι η επιφανειακή τάση μειώνεται καθώς περνάει ο χρόνος μέτρησης ανεξάρτητα από το σύστημα που μελετάται. Η πτώση της επιφανειακής τάσης είναι πιο έντονη στα πρώτα λεπτά, ενώ προς τα τελευταία λεπτά παρατηρείται μια πτώση του ρυθμού μείωσης της επιφανειακής τάσης. Η μείωση της επιφανειακής τάσης είναι αποτέλεσμα της προσρόφησης των πρωτεϊνών στη διεπιφάνεια υγρού-αέρα όπως και των λιπιδίων στην περίπτωση των μειγμάτων που περιέχουν κρόκο. Λόγω της αργής κινητικής της προσρόφησης για χρόνους  $t > 30\text{min}$  σε συνδυασμό με την εξάτμιση του δείγματος και την αδυναμία του οργάνου να διατηρεί σταθερό το μέγεθος της σταγόνας κρίθηκε προτιμότερο να μην παρουσιαστούν αποτελέσματα για  $t > 30\text{min}$ . Πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση μέτρησης του μείγματος κρόκου - λευκώματος το δείγμα δεν είναι ένα απλό διάλυμα όπως στις υπόλοιπες περιπτώσεις αλλά ένα περίπλοκο σύστημα το οποίο περιέχει διαλυτές ουσίες (πρωτεΐνες, σάκχαρα) στην υδατική φάση αλλά και σταγονίδια λιποπρωτεϊνών (20-40 $\mu\text{m}$ ) καθώς και μικρότερα σωματίδια ( $\sim 1\mu\text{m}$ ) που προέρχονται από τον κρόκο (Belitz *et al.*, 2006). Στην περίπτωση αυτή η διεπιφάνεια υγρού-αέρα αποτελεί στην ουσία ένα τριφασικό σύστημα. Έτσι η μετρούμενη επιφανειακή τάση μπορεί να θεωρηθεί μια αποτελεσματική (effective) επιφανειακή τάση. Η αποτελεσματική επιφανειακή τάση σε αυτή την περίπτωση αφορά τις μακροσκοπικές μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας που εκφράζουν τη μηχανική ισορροπία ενός τέτοιου σύνθετου συστήματος.

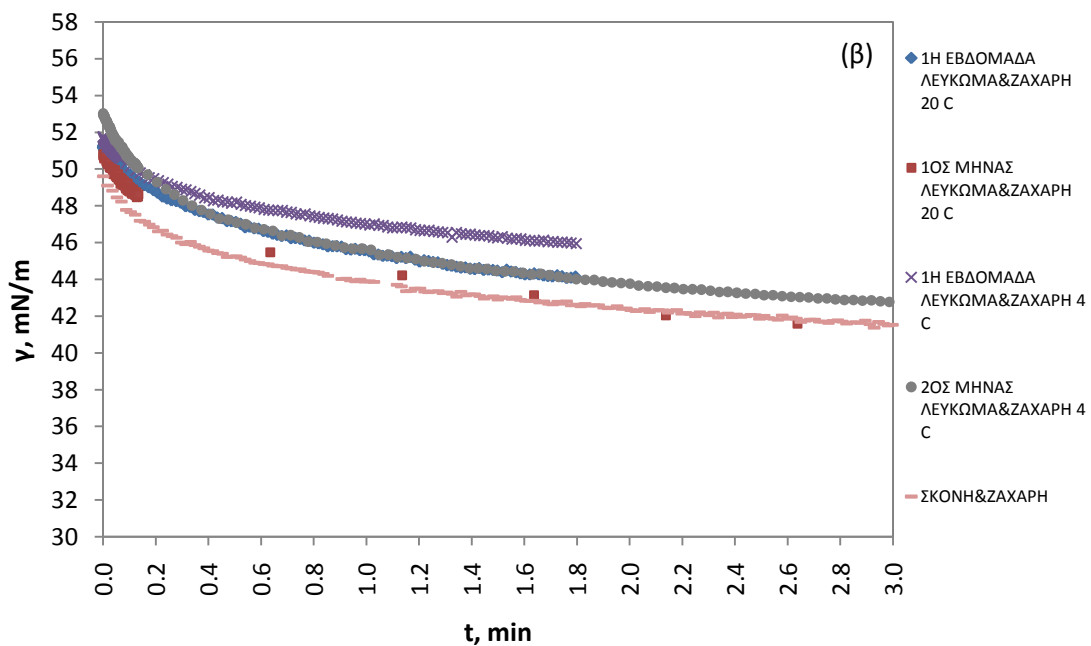
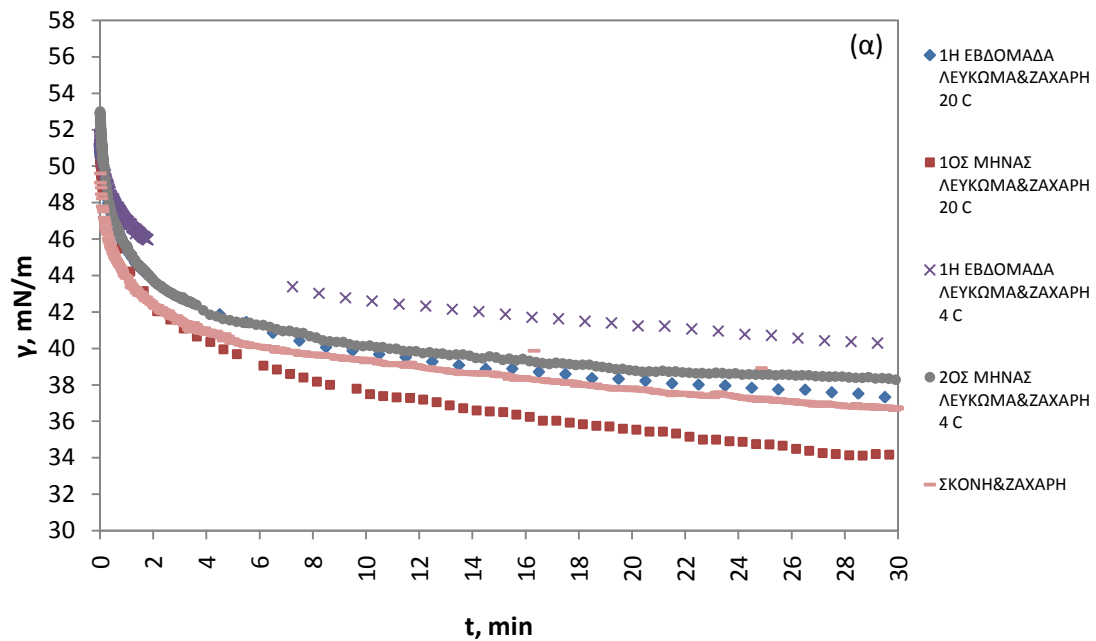
Στο Σχήμα 26 παρατηρούμε πως η επιφανειακή τάση του λευκώματος είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή του νερού (75 MN/m<sup>2</sup> στους 25°C) ακόμη και για  $t=0$  που πρακτικά αντιστοιχεί σε χρόνο ζωής της διεπιφάνειας περίπου 2s. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση των πρωτεϊνών στο δείγμα.



Σχήμα 26: Μεταβολή της επιφανειακής τάσης ( $\gamma$ ) συναρτήσει του χρόνου ( $t$ ), σε δείγματα νωπού λευκώματος, από αβγά αποθηκευμένα στους 20°C και 4°C και σε δείγματα από επανασυσταμένο λεύκωμα αβγού.



Σχήμα 27. Μεταβολή της επιφανειακής τάσης ( $\gamma$ ) συναρτήσει του χρόνου ( $t$ ), σε δείγματα νωπού λευκώματος με προσθήκη κρόκου, από αβγά αποθηκευμένα στους 20°C και 4°C και σε δείγματα από επανασυσταμένο λεύκωμα αβγού.



Σχήμα 28: Μεταβολή της επιφανειακής τάσης ( $\gamma$ ) συναρτήσει του χρόνου ( $t$ ), σε δείγματα νωπού λευκώματος με προσθήκη ζάχαρης, από αβγά αποθηκευμένα στους 20°C και 4°C και σε δείγματα από επανασυσταμένο λεύκωμα αβγού.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 26 δεν παρατηρείται επίδραση του χρόνου συντήρησης ούτε και της θερμοκρασίας συντήρησης του αβγού. Η διακύμανση που παρατηρείται μεταξύ των δειγμάτων ( $\sim \pm 2$  mN/m) είναι αναμενόμενη για τέτοιου είδους δείγματα. Μετά από χρόνο 30 min η επιφανειακή τάση του λευκώματος είναι  $44 \pm 2$  mN/m τιμή που είναι πολύ

κοντά στην τιμή ισορροπίας που δίνει η βιβλιογραφία (44 mN/m) (Vincent *et al.*, 1966). Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν πρόσφατες αναφορές μέτρησης της επιφανειακής τάσης του λευκώματος νωπού αβγού φρέσκου ή συντηρημένου (τιμές ισορροπίας) και δεν έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία αποτελέσματα δυναμικής επιφανειακής τάσης λευκώματος νωπού αβγού. Τα αποτελέσματα δυναμικής επιφανειακής τάσης της σκόνης δεν διαφέρουν από αυτά του νωπού λευκώματος.

Οι Davis & Foegeding (2007) μέτρησαν τη δυναμική διεπιφανειακή τάση λευκώματος αβγού επανασυσταμένου από σκόνη για χρόνο 0-5 min. Τα αποτελέσματά τους συμφωνούν με τα δικά μας για τους αντίστοιχους χρόνους. Οι παραπάνω ερευνητές μελέτησαν δύο τύπους σκόνης, μια που σύμφωνα με τον παρασκευαστή δεν περιείχε πρόσθετα (όπως και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία) και μια άλλη που είχε τασιενεργά μικρού μοριακού βάρους για την αύξηση της αφριστικής ικανότητας. Παρατήρησαν πως στη δεύτερη περίπτωση η μείωση της επιφανειακής τάσης συναρτήσει του χρόνου ήταν γρηγορότερη. Στην παρούσα εργασία η απουσία τέτοιων διαφορών μεταξύ σκόνης και λευκώματος αβγού αποτελεί ένδειξη απουσίας πρόσθετων τασιενεργών στη σκόνη.

Στο Σχήμα 27 η προσθήκη κρόκου μειώνει την δυναμική διεπιφανειακή τάση σε σχέση με τα άλλα δείγματα και αυτό οφείλεται στην προσρόφηση των λιπιδίων και λιποπρωτεϊνών στη διεπιφάνεια. Μάλιστα ο ρυθμός μείωσης της επιφανειακής τάσης είναι μεγαλύτερος παρουσία του κρόκου κάτι που οφείλεται στην παρουσία των λιπιδίων που προσροφώνται γρηγορότερα στη διεπιφάνεια από τις πρωτεΐνες.

Οι Davis & Foegeding (2007), που μελέτησαν την μεταβολή της επιφανειακής τάσης σε σκόνη λευκώματος αβγού (10%, w/v πρωτεΐνης, pH 7.0) με απουσία και παρουσία σακχαρόζης 25% (w/w), συμπέραναν επίσης ότι η προσθήκη της σακχαρόζης επιβράδυνε το ποσοστό πτώσης επιφανειακής τάσης.

Η προσθήκη της σακχαρόζης στο λεύκωμα (Σχήμα 28) επιβράδυνε το ρυθμό μείωσης της επιφανειακής τάσης συναρτήσει του χρόνου. Αυτό φαίνεται καλύτερα συγκρίνοντας τα Σχήματα 26(β) και 28(β) όπου παρουσιάζονται μόνο τα 3min των αποτελεσμάτων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην αύξηση του ιξώδους (Σχήμα 24 και 25) η οποία προκαλεί επιβράδυνση

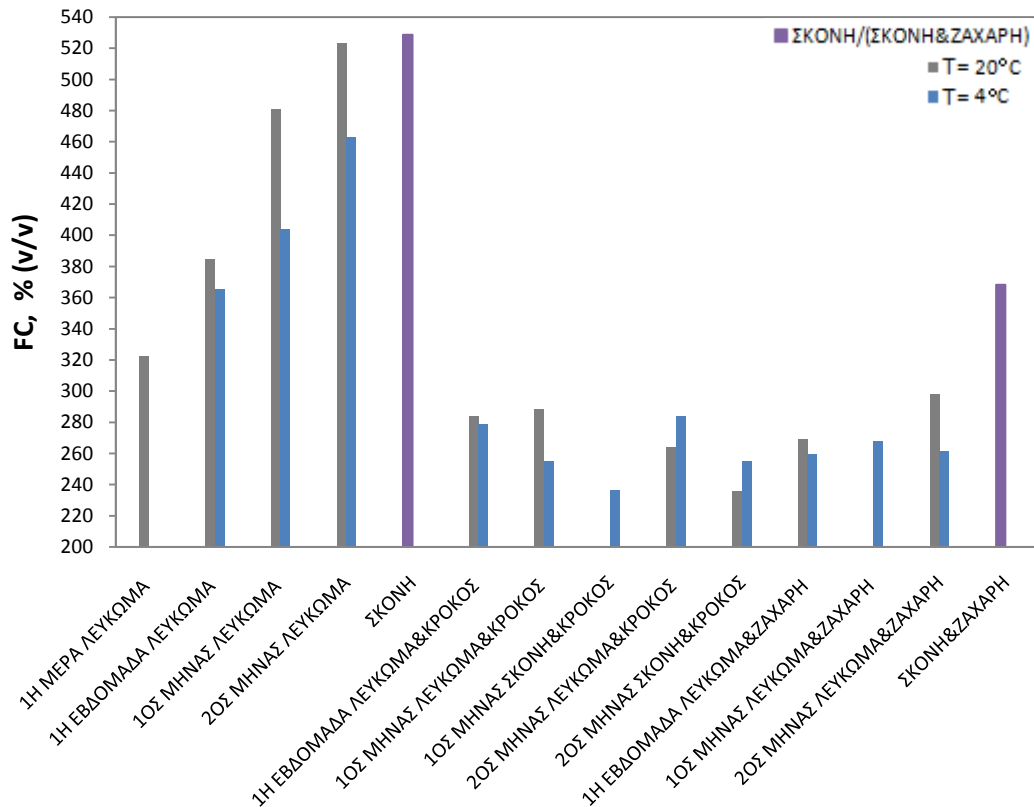
του ρυθμού διάχυσης των πρωτεϊνών στη διεπιφάνεια. Από την άλλη η παρουσία σακχαρόζης στο διάλυμα επηρεάζει την ενυδάτωση των πρωτεϊνών και αυτό μπορεί να επηρεάσει τη δράση τους στη διεπιφάνεια.

Σύμφωνα με τους Davis και Foegeding (2007), η ωοαλβουμίνη βρέθηκε να προσροφάται λιγότερο γρήγορα στη διεπιφάνεια αέρος/ύδατος παρουσία της σακχαρόζης. Ο συνδυασμός αποτελεσμάτων θερμιδομετρίας και επιφανειακής τάσης συνηγόρησαν στο ότι η ωοαλβουμίνη συμμετείχε στη σύνδεση υδρογόνου με το μόριο σακχαρόζης, μειώνοντας ενδεχομένως την υδροφοβικότητα του και ως εκ τούτου τη επιφανειοδραστικότητά του.

### **5.3 Αποτελέσματα των ιδιοτήτων του αφρού**

#### **5.3.1 Αφριστική ικανότητα**

Στο Σχήμα 29 παρουσιάζεται η αφριστική ικανότητα για δείγματα νωπού λευκώματος, σκόνης λευκώματος, καθώς και λευκώματος και σκόνης με κρόκο και ζάχαρη για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης και θερμοκρασίες αποθήκευσης. Επαναλήψεις του σχηματισμού αφρού και μέτρησης της αφριστικής ικανότητας έδειξαν πως οι τιμές αφριστικής ικανότητας μπορεί να διαφέρουν μεταξύ δύο δειγμάτων από 4 έως και 18%. Ενδεικτικές επαναλήψεις παρουσιάζονται στην Παράγραφο 8.2 (Παράρτημα) καθώς και όλα τα αποτελέσματα που αφορούν τις ιδιότητες του αφρού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 29 στα δείγματα του λευκώματος, η αφριστική ικανότητα αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου συντήρησης και στις δύο θερμοκρασίες συντήρησης. Σύμφωνα με τον Κυρανά (2000) η αύξηση της αφριστικής ικανότητας είναι εντονότερη κατά τη συντήρηση στους 20°C από ότι στους 4°C. Αυτό συμβαίνει επειδή το πυκνόρρευστο τμήμα του λευκώματος γίνεται πιο λεπτόρρευστο κατά την συντήρηση των αβγών, γι' αυτό το λόγο το λεύκωμα από συντηρημένα αβγά έχει μεγαλύτερη ικανότητα αφρισμού από τα φρέσκα (Κυρανάς, 2000). Πράγματι, παρατηρώντας τα αποτελέσματα του ιξώδους (Σχήματα 24 και 25) παρατηρούμε πως κατά την συντήρηση στους 20°C η μείωση του ιξώδους είναι εντονότερη από ότι στους 4°C και αυτό φαίνεται να συνδέεται με τη μεταβολή της αφριστικής ικανότητας (Σχήμα 29).



Σχήμα 29: Αφριστική ικανότητα (FC) σε δείγματα νωπού λευκώματος, λευκώματος με προσθήκη κρόκου, λευκώματος με προσθήκη ζάχαρης, σκόνης λευκώματος, επανασυσταμένης σκόνης λευκώματος με κρόκο από συντηρημένο αβγό, καθώς και σκόνης λευκώματος με ζάχαρη, συναρτηθεί του χρόνου συντήρησης (T) στους 20°C και 4°C.

Αντίθετα όμως με ό,τι παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία σύμφωνα με τους Hammershøj & Qvist, (2001) η αποθήκευση των αβγών σε 4°C για 4-90 ημέρες δεν είχε σημαντικές επιπτώσεις στην αφριστική ικανότητα. Αντίθετα όμως, οι Hayakawa *et al.* (1983) οι οποίοι εξέτασαν την αφριστική ικανότητα λευκώματος αβγού όπως αυτή επηρεάζεται από το χρόνο αποθήκευσης των αβγών και την ηλικία της κότας, συμπέραναν ότι η αφριστική ικανότητα του ομογενοποιημένου λευκώματος αβγών μειώνεται καθώς αυξάνεται ο χρόνος αποθήκευσης πάνω από 23 ημέρες σε θερμοκρασία 5 και 19°C. Ο λόγος για τις διαφορές αυτές δεν είναι γνωστός.

Η μείωση του ιξώδους διευκολύνει την εισαγωγή αέρα στην υγρή φάση κι έτσι για ίδιο χρόνο και λοιπές συνθήκες χτυπήματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αφριστική ικανότητα. Ο σχηματισμός φυσαλίδων κατά το χτύπημα



επηρεάζεται και από τις ιδιότητες της διεπιφάνειας υγρού/ αέρα με κυριότερη την επιφανειακή τάση. Ο χρόνος σχηματισμού μιας φυσαλίδας ή αντίστοιχα σπασίματος κάποιας ήδη υπάρχουσας σε μικρότερη, είναι της τάξης κάποιων ms και με το διαθέσιμο όργανο ήταν αδύνατη η μέτρηση σε τόσο μικρούς χρόνους. Έτσι αν και οι διαφορές της επιφανειακής τάσης για χρόνους > 1-2 s δεν επηρεάζονται από το χρόνο συντήρησης του αβγού δεν γνωρίζουμε τι συμβαίνει σε μικρότερους χρόνους. Επίσης, τέτοια πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη στη βιβλιογραφία.

Κατά την συντήρηση των αβγών αυξάνεται επίσης και το pH (Σχήμα 23). Η αύξηση του pH προκαλεί περαιτέρω απομάκρυνση του από το ισοηλεκτρικό σημείο (pI) των περισσότερων πρωτεϊνών κατά το οποίο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Dickinson, 1999) έχουμε γρηγορότερη προσρόφηση των πρωτεϊνών στη διεπιφάνεια λόγω μείωσης των ηλεκτροστατικών απώσεων. Έτσι θα περίμενε κανείς πως με την αύξηση του pH η μείωση της επιφανειακής τάσης συναρτήσει του χρόνου θα ήταν μεγαλύτερη κάτι που θα διευκόλυνε τον σχηματισμό αφρού. Αυτές οι μεταβολές στη δυναμική επιφανειακή τάση (οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν) ακόμη κι αν υπήρξαν ήταν ίσως αρκετά μικρές. Βέβαια οι μεταβολές του pH ενδέχεται να προκαλούν και μεταβολές σε άλλες ιδιότητες της διεπιφάνειας (εξωδοελαστικότητα) που δεν ήταν δυνατόν να μελετηθούν αλλά σχετίζονται με την ικανότητα αφρισμού.

Οι Van der Plancken *et al.* (2007) μελέτησαν τις αφριστικές ιδιότητες σκόνης λευκώματος (10% v/v ή 9,64 mg πρωτεΐνης / ml) σε δυο επίπεδα pH: pH 7,6 και 8,8. Παρατήρησαν μια σημαντική διαφορά στον όγκο του αφρού και συγκεκριμένα μεγαλύτερος όγκος βρέθηκε στο pH 8,8. Επιπλέον, οι Van der Plancken *et al.* (2007) παρατήρησαν ότι οι αφροί που προετοιμάστηκαν στο χαμηλότερο pH περιείχαν περισσότερο υγρό μέσα στον αφρό κατά τον σχηματισμό του ( $0.103 \pm 0.007$  και  $0.064 \pm 0.006$  L υγρό/L αφρό σε pH 7.6 και το pH 8.8, αντίστοιχα). Ακόμη, οι Hammershøj *et al.* (1999) μελέτησαν τις αφριστικές ιδιότητες σκόνης λευκώματος αβγού σε διαφορετικές τιμές pH, παρατήρησαν χαμηλότερη αφριστική ικανότητα σε pH 7.0 συγκριτικά με το pH 9.2. Σύμφωνα με τα παραπάνω η αύξηση του pH ενδεχομένως να ευθύνεται σε συνδυασμό με τη μείωση του ιξώδους για την αύξηση της αφριστικής ικανότητας του λευκώματος.

Το δείγμα της σκόνης έχει την μεγαλύτερη αφριστική ικανότητα από όλα τα δείγματα και φαίνεται να έχει παρόμοια συμπεριφορά με το συντηρημένο για 2 μήνες λεύκωμα στους 20°C. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο μικρό ιξώδες του.

Τα δείγματα στα οποία δεν έχει προστεθεί κρόκος ή ζάχαρη έχουν μεγαλύτερη αφριστική ικανότητα από αυτά που έχει προστεθεί. Σε ό,τι αφορά την προσθήκη ζάχαρης, τα αποτελέσματά μας συμφωνούν με αυτά των Raikos *et al.*, (2007a) οι οποίοι μελέτησαν την αφριστική ικανότητα λευκώματος νωπού αβγού αλλά και με προσθήκη ζάχαρης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους η προσθήκη ζάχαρης μείωσε την αφριστική ικανότητα του λευκώματος διότι ο αέρας ο οποίος μπόρεσε να ενσωματωθεί στον αφρό ήταν λιγότερος. Η προσθήκη ζάχαρης έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του ιξώδους της συνεχούς φάσης η οποία μειώνει την ενσωμάτωση αέρα στη φυσαλίδα και την ταχεία διάχυση και το ξεδίπλωμα της πρωτεΐνης στην διεπιφάνεια (Raikos *et al.*, 2007a). Επίσης οι Lau & Dickinson (2005), οι οποίοι μελέτησαν τις μεταβολές που προκύπτουν στην μικροδομή και την σταθερότητα του αφρού σε διάλυμα λευκώματος (6% w/w) που περιέχει διάφορα ποσοστά ζάχαρης (60, 70, 82% ολικά στερεά) διαπίστωσαν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα ζάχαρης στο διάλυμα, τόσο περισσότερο αυξάνεται το ιξώδες της συνεχούς φάσης με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ενσωμάτωση και η διάχυση του αέρα καθώς και το ξεδίπλωμα της πρωτεΐνης στην διεπιφάνεια.

Στα δείγματα που έχει προστεθεί κρόκος μειώνεται σημαντικά η αφριστική ικανότητα. Αυτό συμφωνεί με τη βιβλιογραφία (Belitz *et al.*, 2006). Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει αλληλοπροσρόφηση πρωτεϊνών και λιπιδίων στη διεπιφάνεια. Επίσης οι πρωτεΐνες του λευκώματος συνδέονται με το λίπος του κρόκου στα υδρόφοβα τμήματα των μορίων τους (Κυρανάς, 2000). Η παρουσία λιπιδίων στη διεπιφάνεια αν και μειώνει την επιφανειακή τάση (Σχήμα 27) επιδρά αρνητικά στις ρεολογικές ιδιότητες της διεπιφάνειας καθιστώντας τις σχηματιζόμενες φυσαλίδες ασταθέστερες. Το ίδιο έχει παρατηρηθεί και σε άλλα συστήματα πρωτεϊνών όπως αυτές του γάλακτος (Kamateh *et al.*, 2008) Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης των συντηρημένων δειγμάτων. Τα λευκώματα που προστέθηκε κρόκος δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά

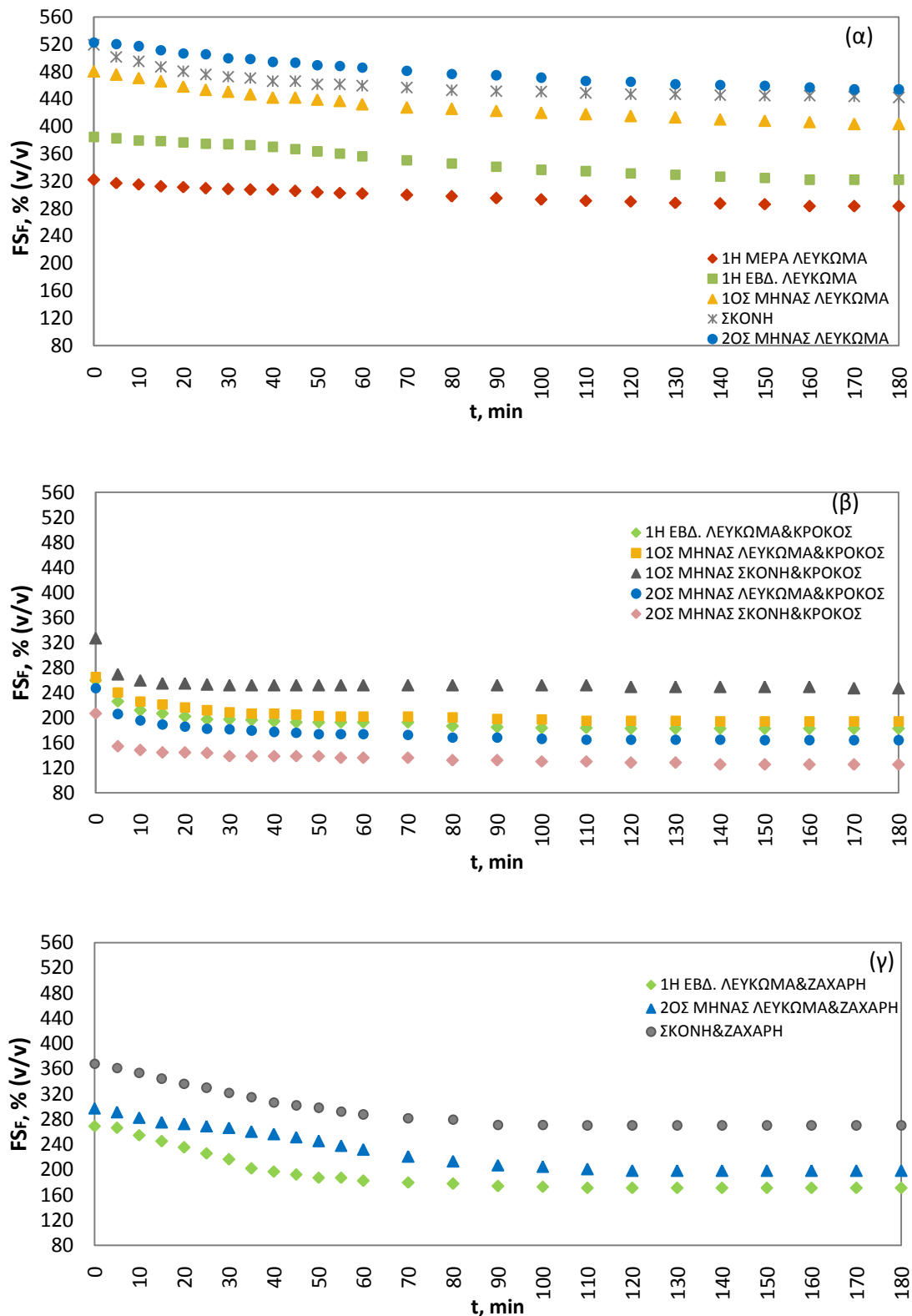
τον χρόνο συντήρησης. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται μάλλον οφείλονται στην ανομοιογένεια των δειγμάτων.

### **5.3.2 Μεταβολή της σταθερότητα του αφρού**

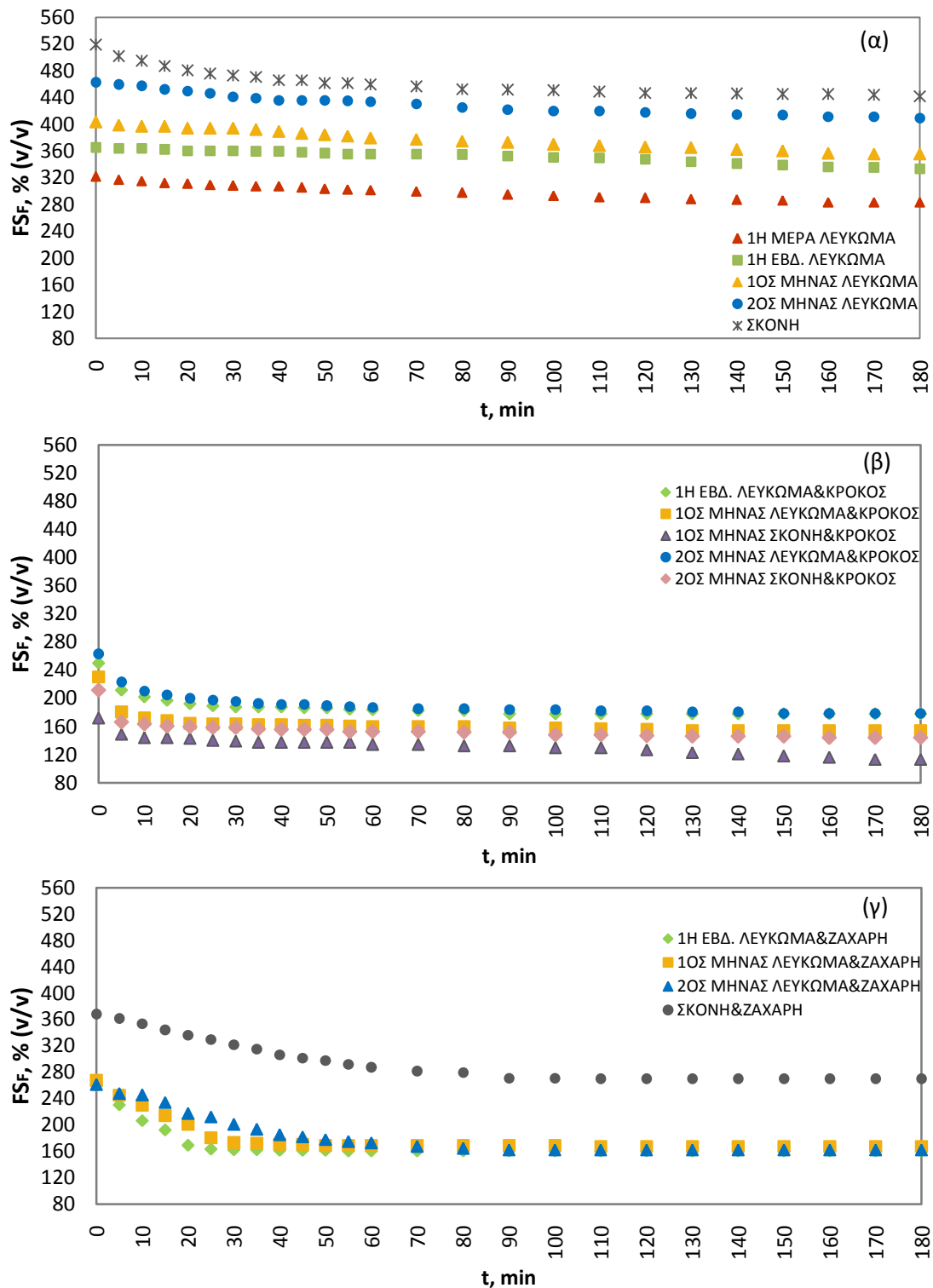
Στα Σχήματα 30 και 31 παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του αφρού ως ποσοστό του αρχικού όγκου του υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης για αφρούς που σχηματίστηκαν από λευκωμα αβγού με προσθήκη κρόκου, ζάχαρης και από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος. Αντίστοιχα στα Σχήματα 32 και 33 παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του υγρού αποστράγγισης ως ποσοστό του αρχικού όγκου του υγρού που χρησιμοποιήθηκε για τον σχηματισμό αφρού. Μελετώντας τα Σχήματα 30, 31, 32 και 33 διαπιστώνεται εύκολα ότι ο όγκος του αφρού μειώνεται ενώ ο όγκος του υγρού αποστράγγισης αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου του πειράματος (0-180min). Οι μεταβολές αυτές είναι αναμενόμενες και αποτελούν ένα μέτρο της αποσταθεροποίησης του αφρού. Σε όλα τα δείγματα προς τα τελευταία λεπτά του κάθε πειράματος παρατηρείται μια σταθεροποίηση του όγκου του αφρού αλλά και του υγρού αποστράγγισης.

Συγκρίνοντας τα συντηρημένα δείγματα του λευκώματος που αποθηκεύτηκαν στους 4°C και στους 20°C [Σχήματα 30(α) και 31(α) καθώς και Σχήματα 32(α) και 33(α)] φαίνεται ότι οι αφοί των συντηρημένων δειγμάτων στους 4°C παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα, δηλαδή ο ρυθμός μείωσης του όγκου του αφρού αυτών των δειγμάτων στους 4°C είναι μικρότερος από τα αντίστοιχα δείγματα συντηρημένων λευκωμάτων στους 20°C.

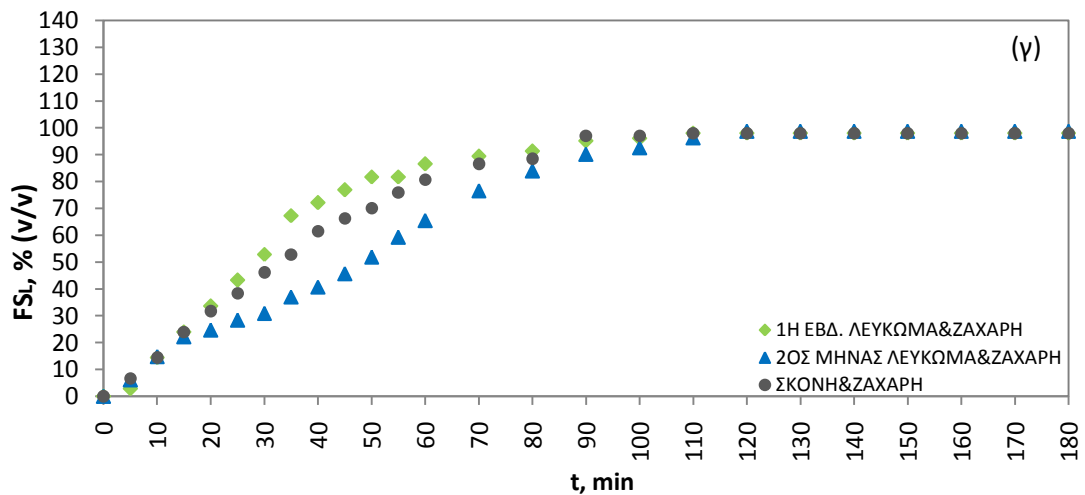
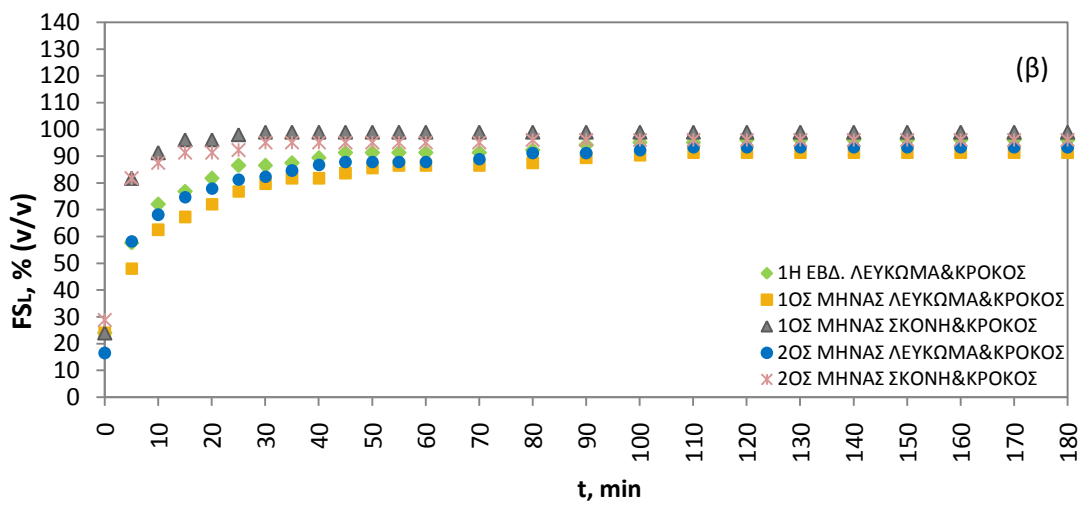
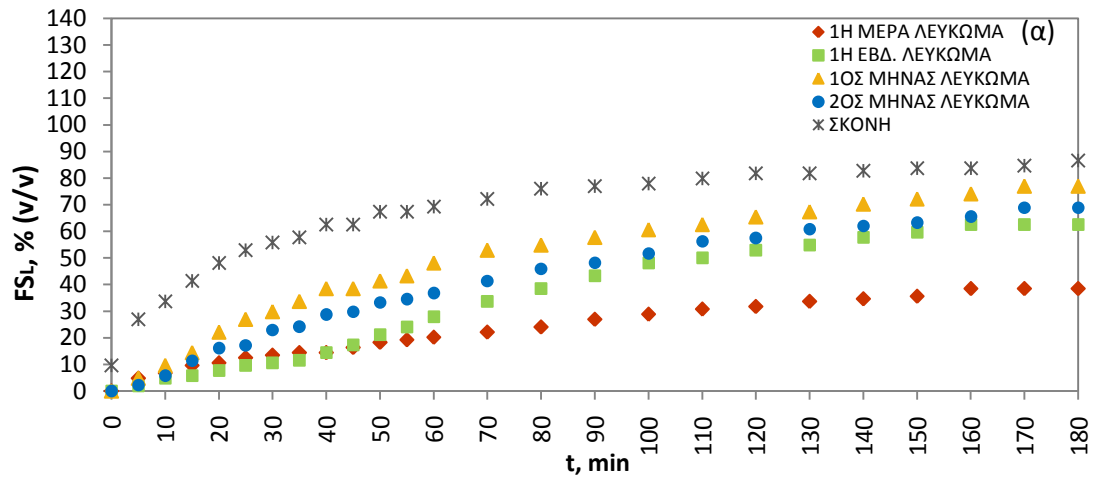
Στο Σχήμα 30(α) παρατηρούμε πως τα φρέσκα αβγά παράγουν αφρούς των οποίων ο όγκος μειώνεται με μικρότερο ρυθμό και συνολικά μειώνεται λιγότερο σε σύγκριση με τα συντηρημένα αβγά. Παράλληλα ο όγκος του αποστραγγιζόμενου υγρού αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό όσο αυξάνει ο χρόνος συντήρησης στους 20°C.



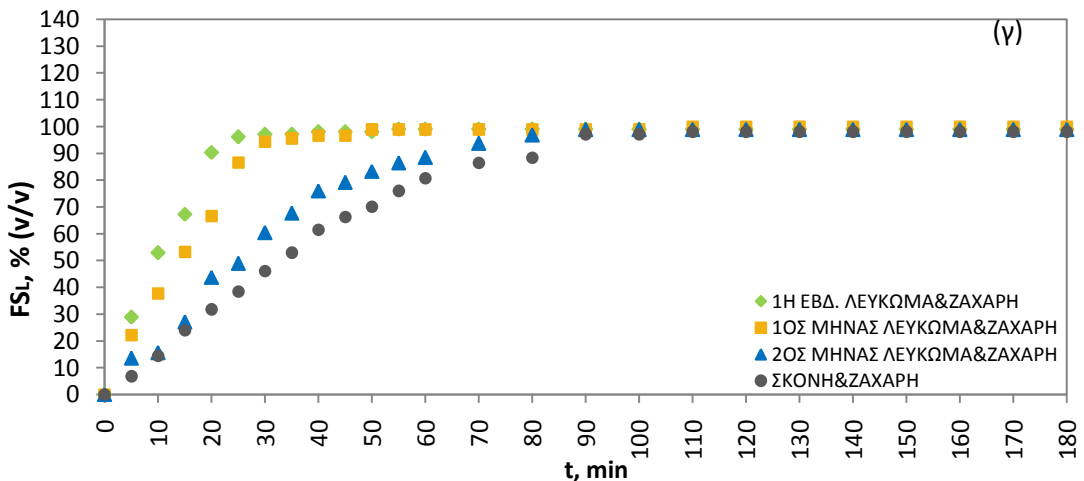
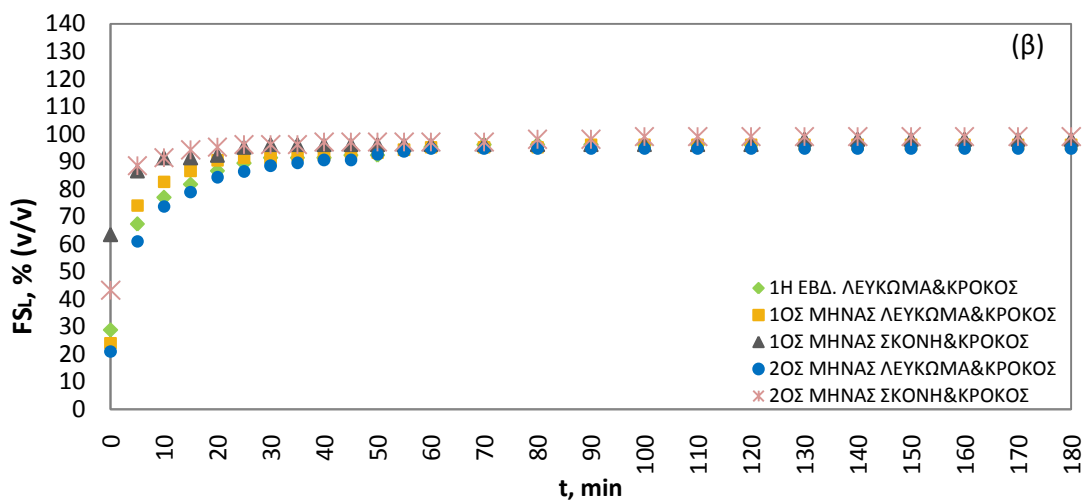
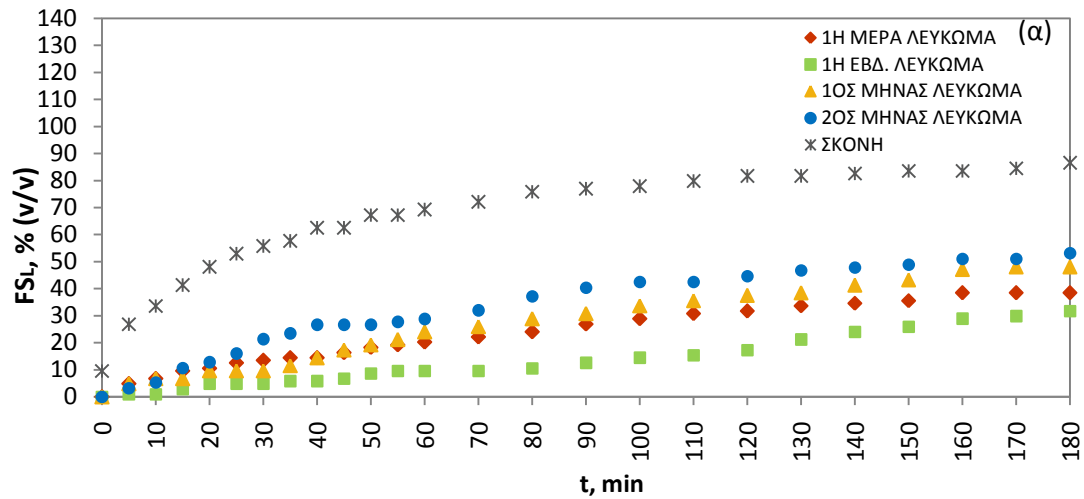
Σχήμα 30: Μεταβολή του όγκου του αφρού ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_F$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από α) λεύκωμα αβγού, β) λεύκωμα και κρόκο, γ) λεύκωμα και ζάχαρη και για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης στους  $20^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 31: Μεταβολή του όγκου του αφρού ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_F$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από α) λεύκωμα αβγού, β) λεύκωμα και κρόκο, γ) λεύκωμα και ζάχαρη και για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης στους  $4^{\circ}C$ .



Σχήμα 32: Μεταβολή του όγκου του υγρού που αποχωρίζεται από τον αφρό ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $F_{SL}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από (α) λεύκωμα αβγού, (β) λεύκωμα και κρόκο, (γ) λεύκωμα και ζάχαρη και για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης στους  $20^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 33: Μεταβολή του όγκου του υγρού που αποχωρίζεται από τον αφρό ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_L$ ) συναρτήσεως του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από δ) λεύκωμα αβγού, ε) λεύκωμα και κρόκο, στ) λεύκωμα και ζάχαρη και για διαφορετικούς χρόνους συντήρησης στους  $4^{\circ}C$ .

Δηλαδή τα φρέσκα αβγά παράγουν σταθερότερους αφρούς από αυτά που έχουν συντηρηθεί έως 2 μήνες στους 20°C. Παράλληλα όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα Σχήματα 32(α) και 33(α) ο όγκος του υγρού αποστράγγισης των συντηρημένων δειγμάτων στους 4°C είναι μικρότερος από τα αντίστοιχα δείγματα στους 20°C. Όπως είδαμε και στα Σχήματα 24(α) και 25(α) όσο αυξάνει ο χρόνος συντήρησης τόσο μειώνεται το ιξώδες του λευκώματος και αυτό διευκολύνει την αποστράγγιση. Μάλιστα μεγαλύτερη μείωση του ιξώδους παρατηρούμε κατά την συντήρηση των αβγών στους 20°C όπου έχουμε και τη μεγαλύτερη αύξηση του ρυθμού αποστράγγισης με το χρόνο συντήρησης. Παρόμοιες αλλά λιγότερο έντονες τάσεις παρατηρούνται στους αφρούς από λεύκωμα αβγών συντηρημένων στους 4°C. Οι Scholtyssek & El-Bogdady (1980) παρατήρησαν μια αύξηση στην αποστράγγιση με το χρόνο αποθήκευσης (2-30 ημέρες) κάτι που συμφωνεί με τα αποτελέσματά μας. Αντίθετα παρατήρησαν σημαντική μείωση στην αποστράγγιση στην υψηλότερη θερμοκρασία αποθήκευσης (5°C εναντίον 9°C) του ομογενοποιημένου λευκώματος αβγών.

Το δείγμα της σκόνης παρουσιάζει μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης του όγκου του υγρού καθώς και μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης του όγκου του αφρού από όλα τα συντηρημένα λευκώματα και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης. Επίσης παρατηρούμε πως ο αρχικός ρυθμός αποστράγγισης είναι πολύ γρηγορότερος σε σύγκριση με τα άλλα δείγματα αλλά ο όγκος του υγρού αποστράγγισης και του αφρού σταθεροποιείται νωρίτερα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα.

Παρατηρείται επίσης, ότι η προσθήκη κρόκου και ζάχαρης στα δείγματα μειώνει τον όγκο του αφρού αλλά αυξάνει τον όγκο του υγρού που αποχωρίζεται από τον αφρό σε σχέση με τα δείγματα του λευκώματος. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στα δείγματα του κρόκου παρατηρούμε ότι εμφανίζεται όγκος υγρού κατευθείαν μετά την παρασκευή του δείγματος ( $t=0$ ) ενώ στα υπόλοιπα δείγματα καθυστερεί η αποστράγγιση. Η παρουσία των λιπιδίων του κρόκου ασκούν αποσταθεροποιητική επίδραση στον αφρό λόγω της διάχυσης και της προσρόφησης αυτών των συστατικών στη διεπιφάνεια αέρα/νερού όπως εξηγήθηκε και στην Παράγραφο 5.3.1.

Συγκρίνοντας τα συντηρημένα δείγματα στα οποία προστέθηκε κρόκος [Σχήματα 30(β), 31(β), 32(β), 33(β)] παρατηρούμε απότομη πτώση του όγκου



του αφρού και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης και ειδικά στα δείγματα της σκόνης και ο όγκος του αφρού σταθεροποιείται πολύ σύντομα. Παράλληλα παρατηρείται απότομη αύξηση του όγκου του υγρού που στην συνέχεια σταθεροποιείται. Αυτό οφείλεται στην αλληλοπροσρόφηση πρωτεϊνών του λευκώματος και των λιπιδίων του κρόκου που έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνουν την σταθερότητα του αφρού. Στους 4°C έχουμε μικρότερο όγκο αφρών με μικρότερη μεταβολή.

Με την προσθήκη ζάχαρης στα συντηρημένα λευκώματα και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης παρατηρείται γρήγορη αύξηση του υγρού αποστράγγισης και γρήγορη μείωση του αφρού αποσταθεροποίησης σε σύγκριση με τα δείγματα απουσία ζάχαρης. Σύμφωνα με τους Lau & Dickinson (2005), σε δείγματα λευκώματος αβγού που χτυπήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους χωρίς την προσθήκη ζάχαρης και με την προσθήκη ζάχαρης 50% w/w παρατήρησαν ότι η ημιζώη του αφρού (ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αφρός να καταρρεύσει στο μισό του αρχικού όγκου του), ήταν μικρότερη για το διάλυμα που δεν περιείχε ζάχαρη συγκριτικά με εκείνο που περιείχε. Επίσης διατύπωσαν ότι η μείωση της συγκέντρωσης της ζάχαρης επιταχύνει τις διαδικασίες αποσταθεροποίησης αφρού. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με τα δικά μας. Σύμφωνα με τους Stevenson *et al.* (1995) οι οποίοι μελέτησαν το επιφανειακό ιξώδες σε λεύκωμα αβγού και σε λεύκωμα με προσθήκη ζάχαρης, διαπίστωσαν ότι η υψηλή τιμή ιξώδους που προκύπτει από την προσθήκη ζάχαρης έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνει την κινητικότητα των φυσαλίδων στον αφρό.

Ακόμη, οι Davis και Foegeding (2006) οι οποίοι μελέτησαν τις αφριστικές ιδιότητες πρωτεϊνικών διαλυμάτων (10% w/v, pH 7.0) από λεύκωμα αβγού, παρουσία και απουσία σακχαρόζης 25% (w/w), παρατήρησαν ότι η προσθήκη σακχαρόζης αύξησε σημαντικά την ημιζωή του αφρού. Η αντίθεση των αποτελεσμάτων μας με αυτά της βιβλιογραφίας ενδεχομένως να οφείλεται στην περιορισμένη ενσωμάτωση αέρα με την προσθήκη ζάχαρης υπό τις συνθήκες αφρισμού που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, αν και το ιξώδες ήταν σημαντικά μεγαλύτερο το μικρότερο κλάσμα αέρα (μεγαλύτερο κλάσμα υγρού) διευκόλυνε τελικά την αποστράγγιση του υγρού.

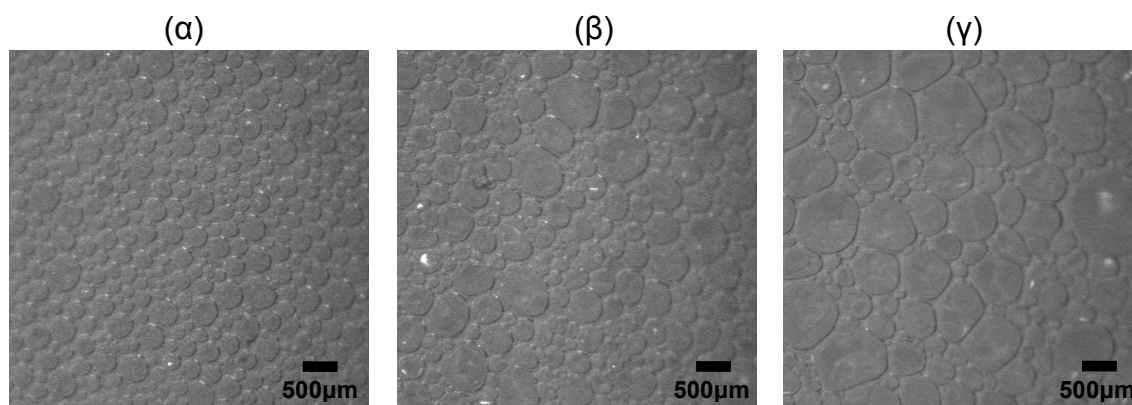
Επίσης παρατηρείται ότι η προσθήκη ζάχαρης αυξάνει τον ρυθμό αποσταθεροποίησης και μειώνει τον όγκο του υγρού όσο περνάει ο χρόνος

συντήρησης των δειγμάτων. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στις μεταβολές του ιξώδους του διαλύματος. Το δείγμα της σκόνης είναι φανερό ότι έχει τις μεγαλύτερες τιμές ρυθμού αποσταθεροποίησης από όλα τα συντηρημένα λευκώματα στα οποία έχει προστεθεί ζάχαρη και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στις μεταβολές που υπόκεινται οι πρωτεΐνες κατά την παραγωγή της σκόνης και συνδέεται με ιδιότητες της διεπιφάνειας (ιξωδοελαστικότητα). Οι πρωτεΐνες αν και σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στο επανασυσταμένο λεύκωμα συγκριτικά με το νωπό λεύκωμα δεν μπορούν να προσδώσουν την ίδια σταθερότητα.

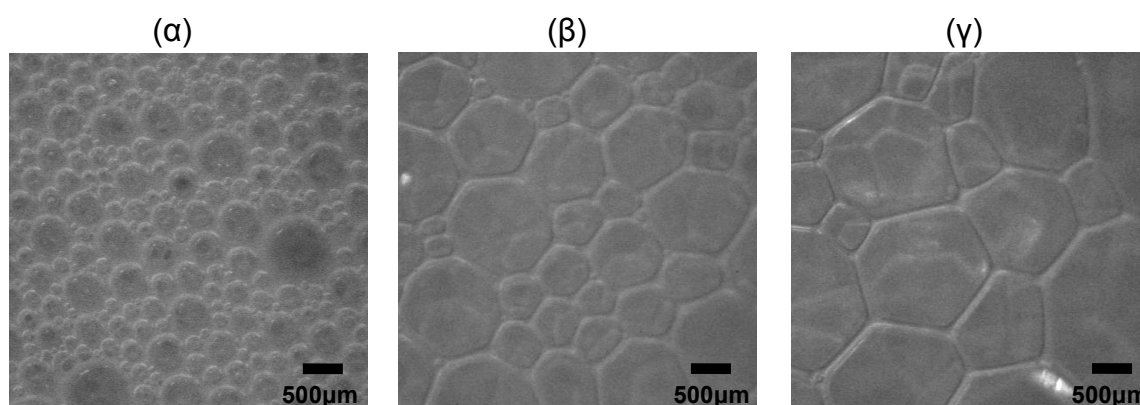
### **5.3.3 Μεταβολή του μεγέθους των φυσαλίδων**

Στα Σχήματα 34, 35 και 36 παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες χαρακτηριστικών δειγμάτων αφρών που παρήχθησαν από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος, λεύκωμα με προσθήκη κρόκου και λεύκωμα με προσθήκη ζάχαρης. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες από αφρούς νωπού λευκώματος αβγού παρατίθενται στο Σχήμα 14. Παρατηρούνται διαφορές στα μεγέθη των φυσαλίδων τόσο κατά τα 5 πρώτα λεπτά μετά τον σχηματισμό των αφρών όσο και μετά από 3 ώρες παραμονής. Μάλιστα, οι διαφορές στα μεγέθη των φυσαλίδων μεταξύ των Σχημάτων 34, 35, 36 και 14 γίνονται σημαντικότερες με την πάροδο του χρόνου αποσταθεροποίησης του αφρού. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δειγμάτων γίνονται καλύτερα αντιληπτές μετά από την μέτρηση των μεγεθών των φυσαλίδων.

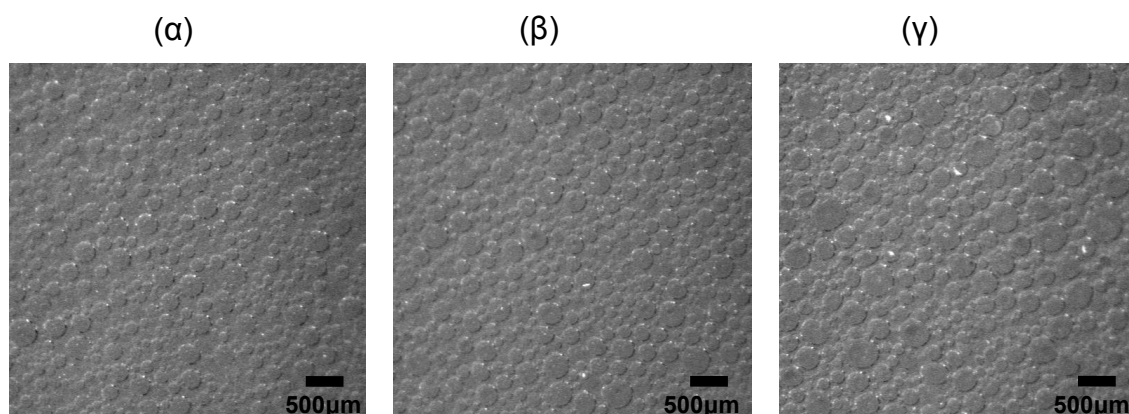
Από το Σχήμα 37 έως και το Σχήμα 44 παρουσιάζεται η κατανομή του αριθμού των φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) σε αφρούς που παράχθηκαν από λεύκωμα, λεύκωμα και ζάχαρη, λεύκωμα και κρόκο που συντηρήθηκαν στους 20°C και στους 4°C καθώς και σε αφρούς που παράχθηκαν χρησιμοποιώντας λεύκωμα αβγού με επανασύσταση από σκόνη. Τα Σχήματα παρουσιάζουν την κατανομή του μεγέθους των φυσαλίδων κατά την παραμονή τους για χρόνους από 5 min (που ήταν και σε ελάχιστο δυνατό χρόνο για την προετοιμασία της οπτικής μέτρησης) έως και 180 min.



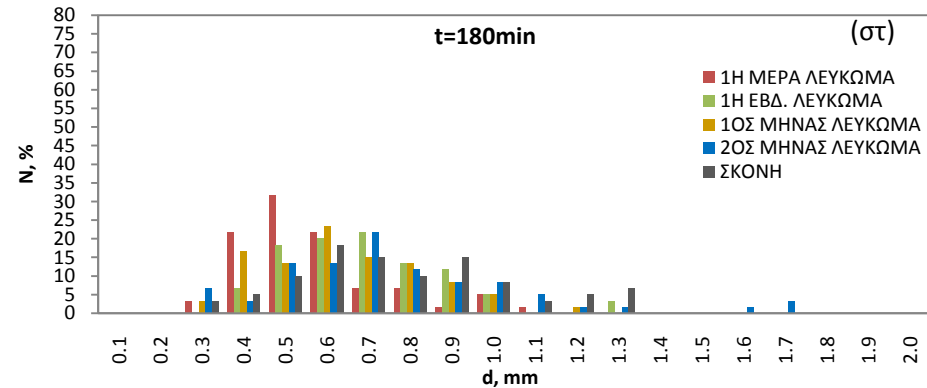
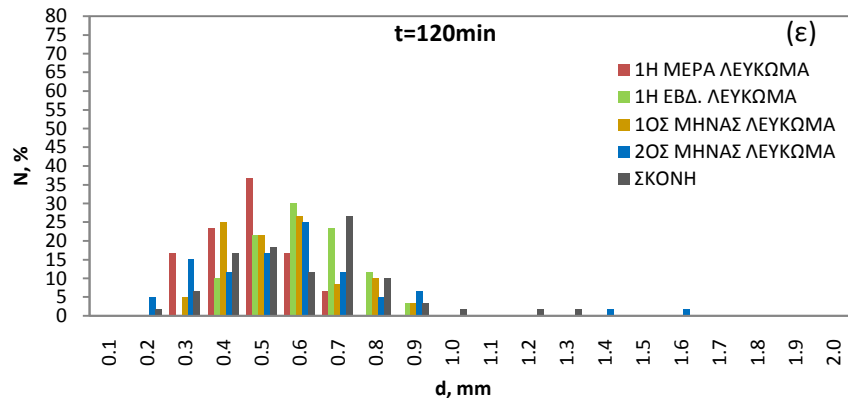
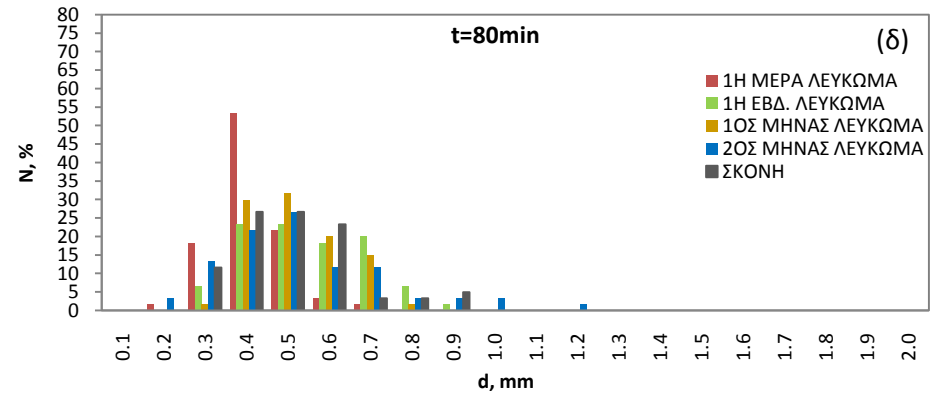
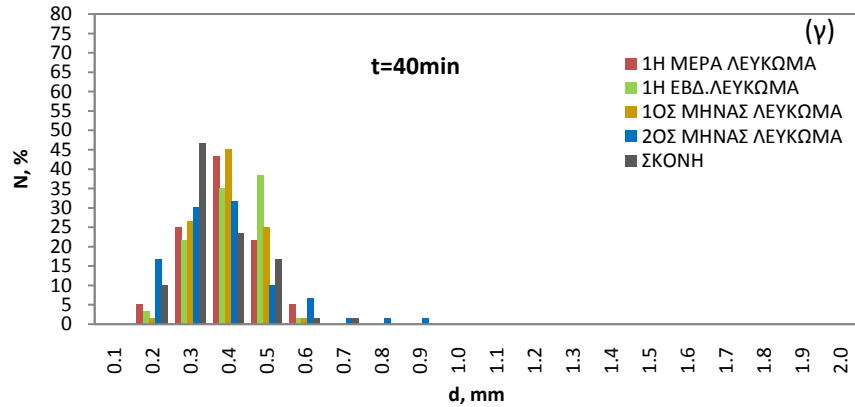
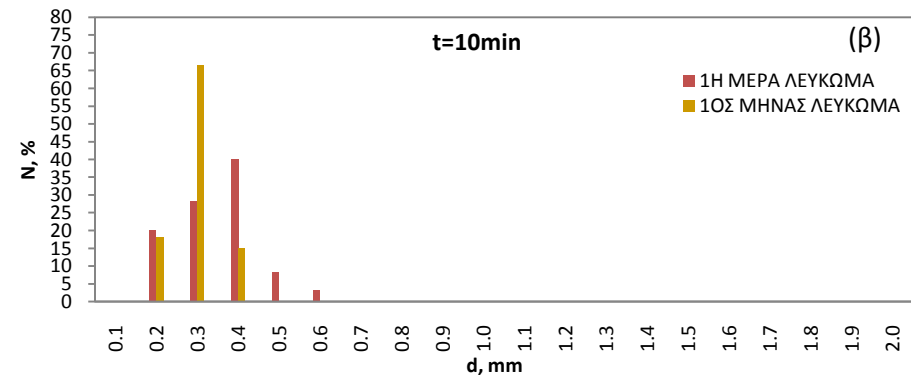
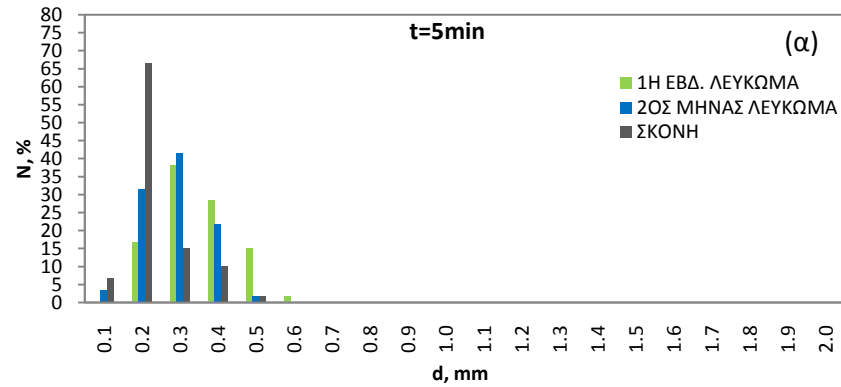
Σχήμα 34: Φωτογραφική απεικόνιση του δείγματος αφρού επανασυσταμένης σκόνης λευκώματος σε χρόνο χτυπήματος 1,5min μετά από (α) 5min, (β) 60min και (γ) 180min παραμονής.



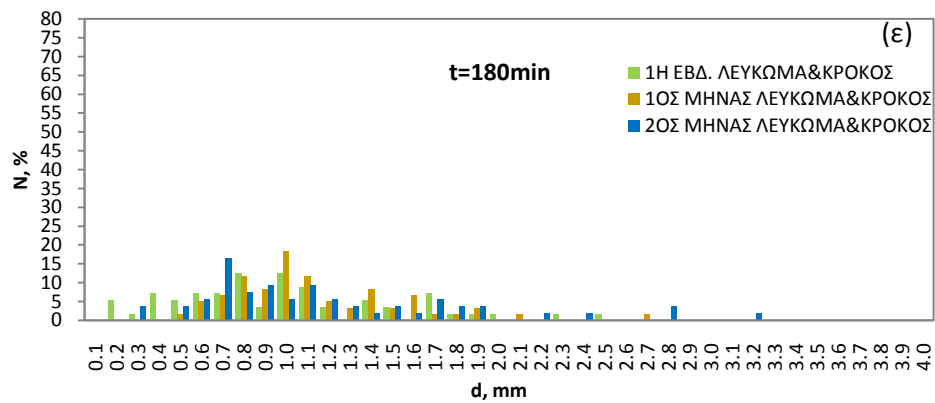
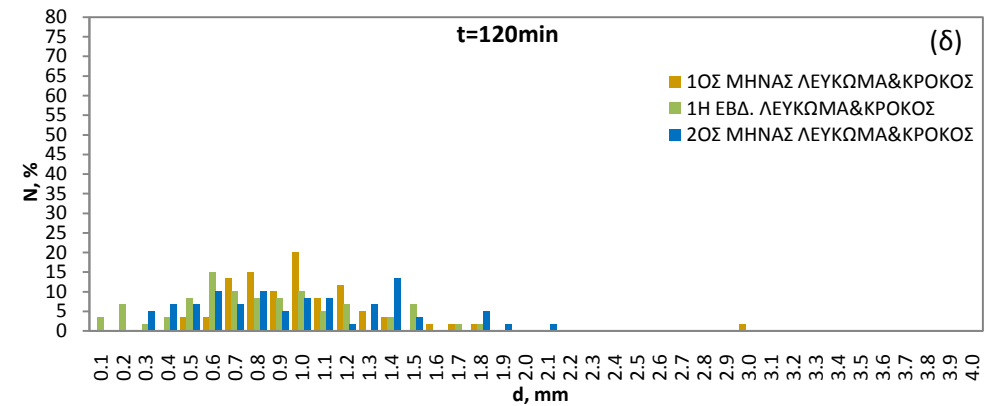
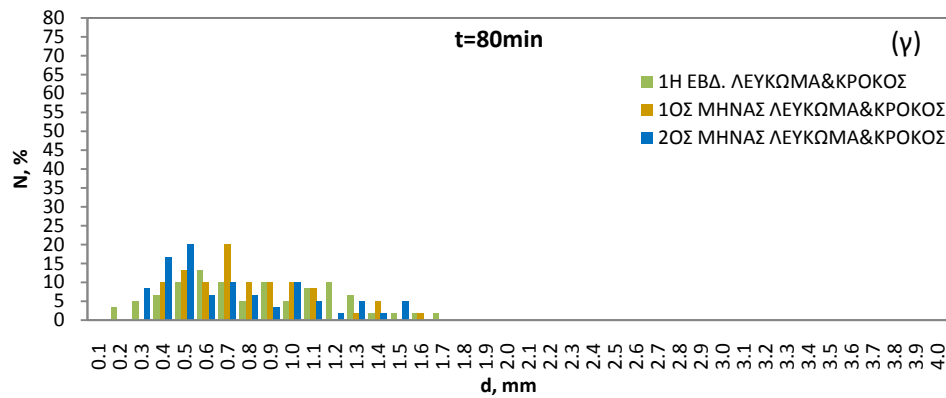
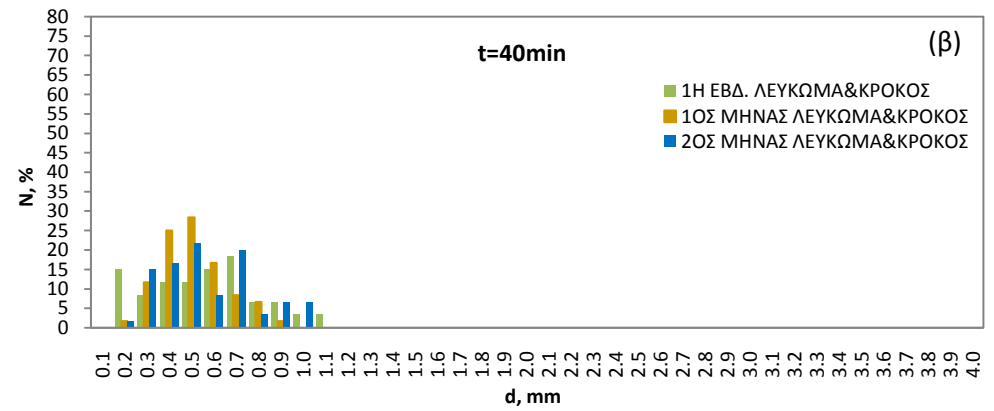
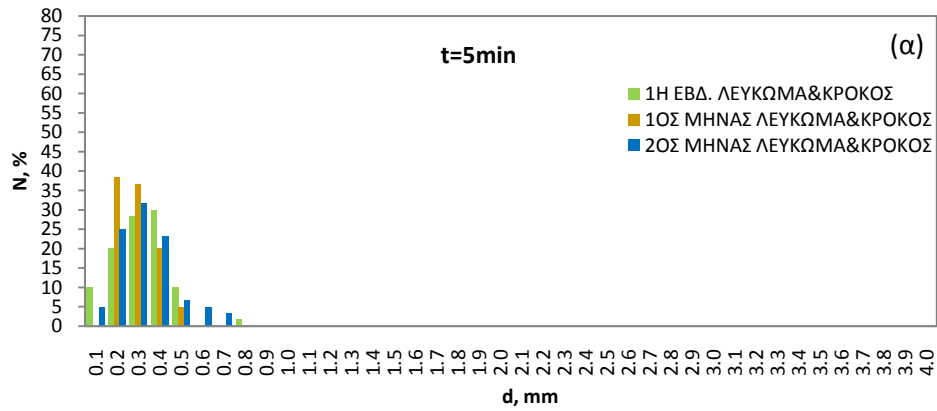
Σχήμα 35: Φωτογραφική απεικόνιση του δείγματος αφρού από λεύκωμα αβγού με προσθήκη κρόκου συντηρημένο για 1 μήνα στους 4°C σε χρόνο χτυπήματος 1,5min μετά από (α) 5min, (β) 60min και (γ) 180min παραμονής.



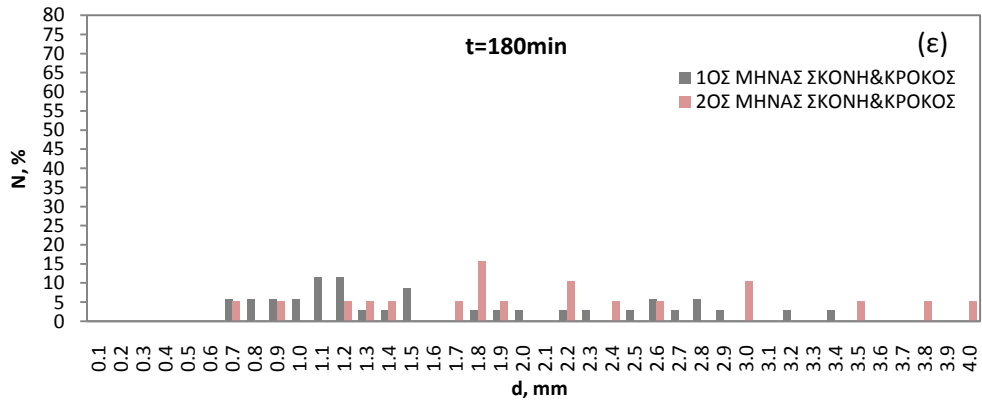
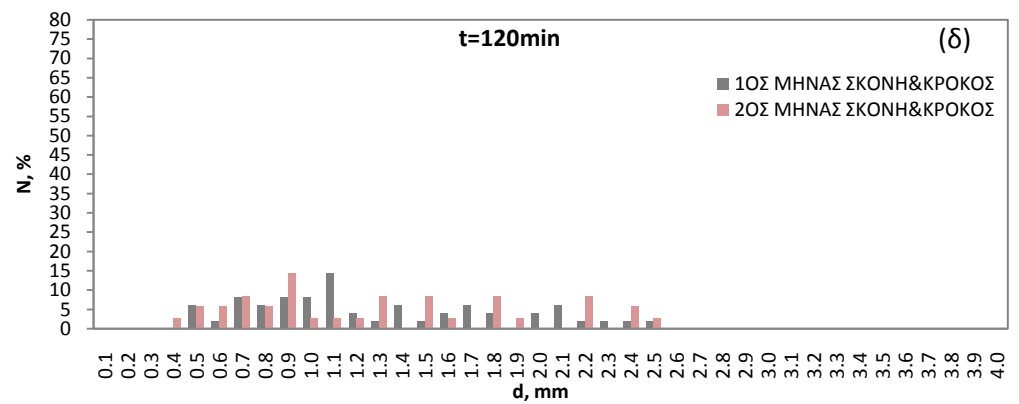
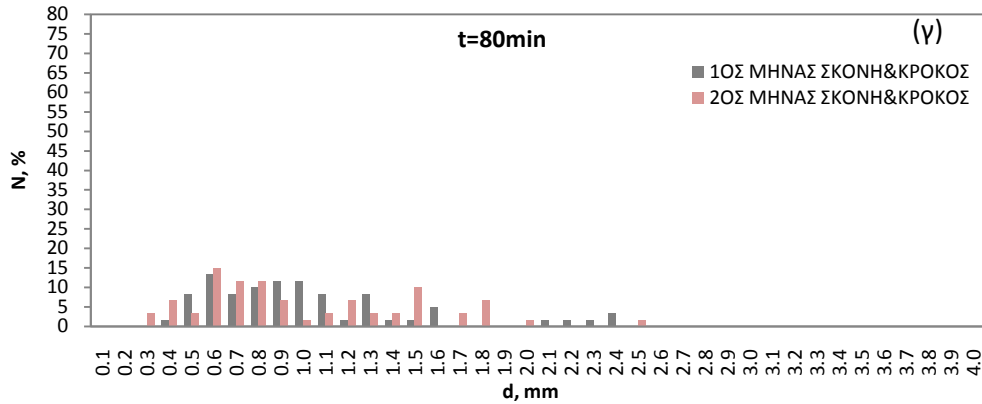
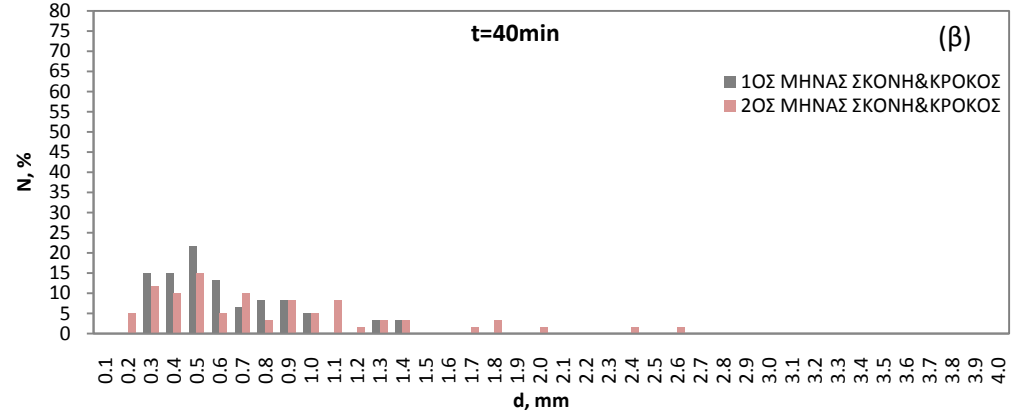
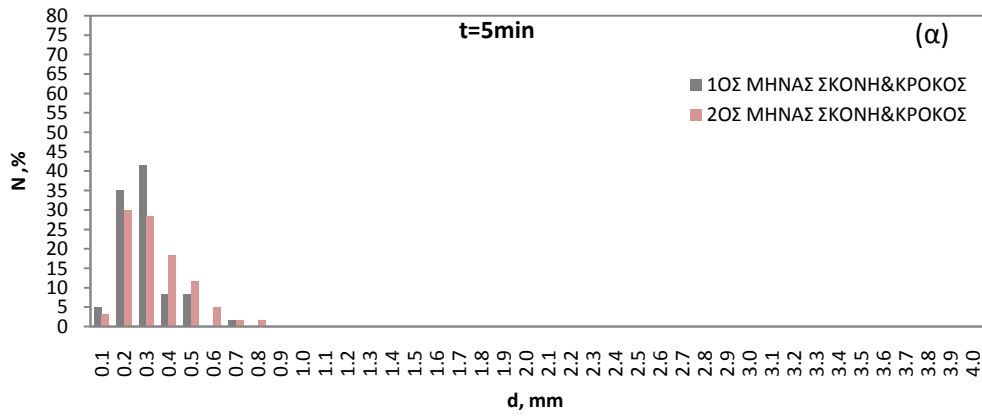
Σχήμα 36: Φωτογραφική απεικόνιση του δείγματος αφρού από λεύκωμα με προσθήκη ζάχαρης συντηρημένο για 1 μήνα στους 20°C σε χρόνο χτυπήματος 1,5min μετά από (α) 5min, (β) 60min και (γ) 180min παραμονής.



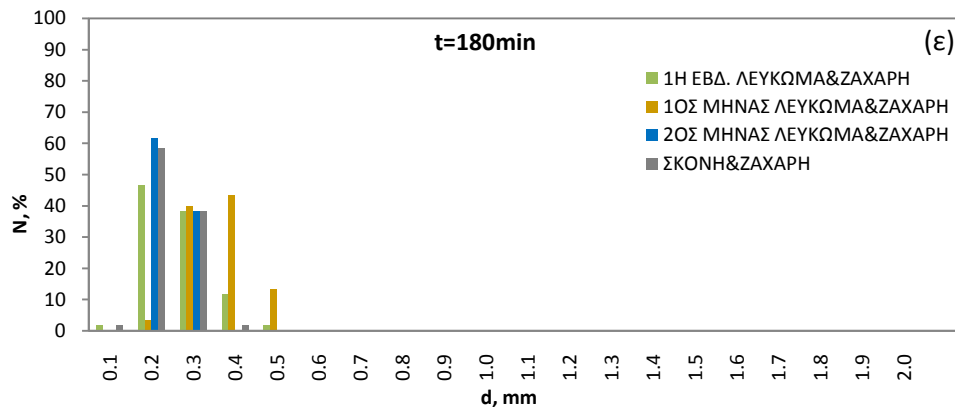
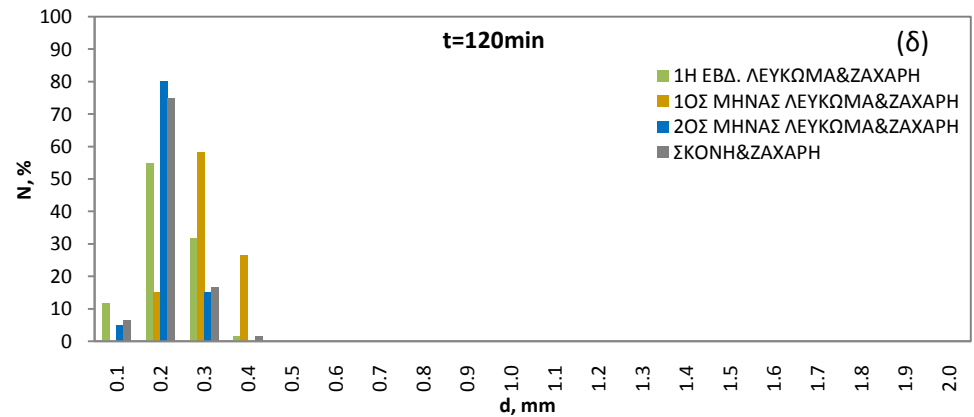
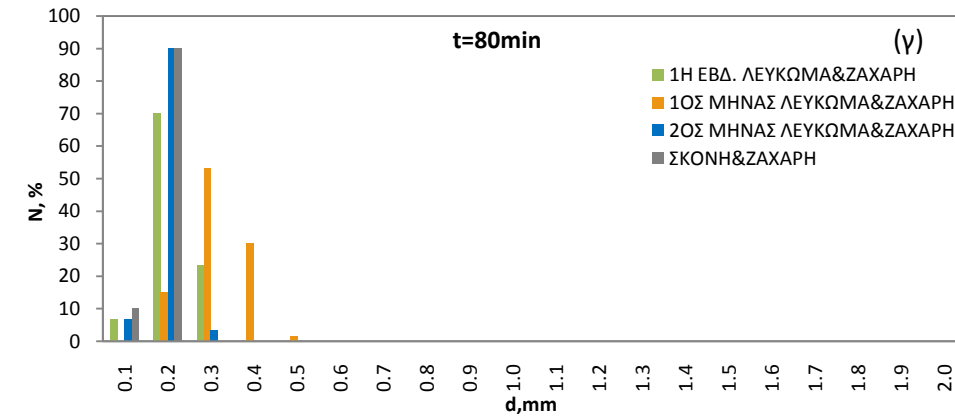
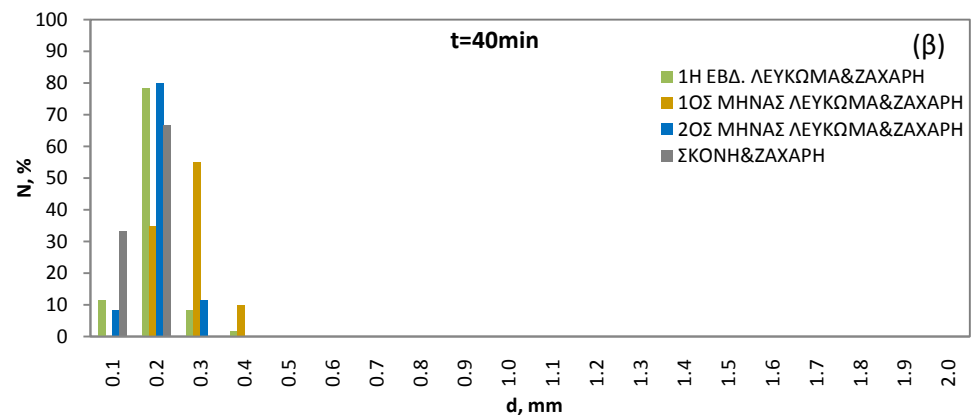
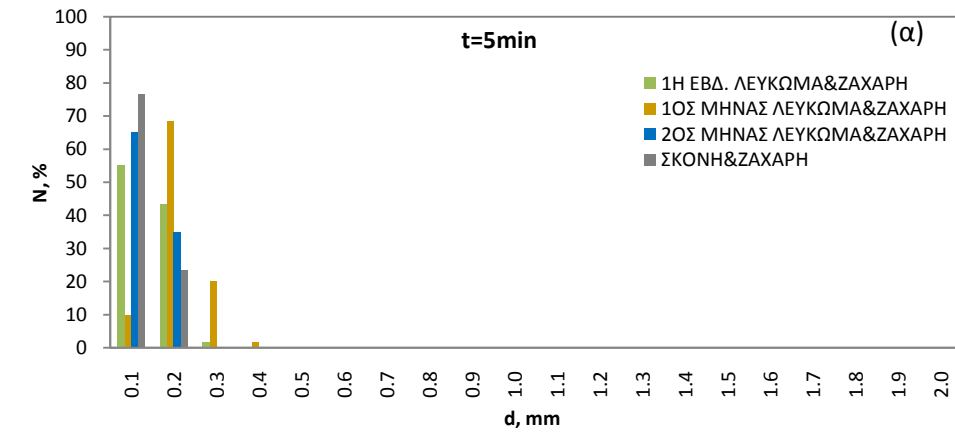
Σχήμα 37: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) στα δείγματα λευκώματος διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 20°C, καθώς και σε δείγμα που προέκυψε από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος.



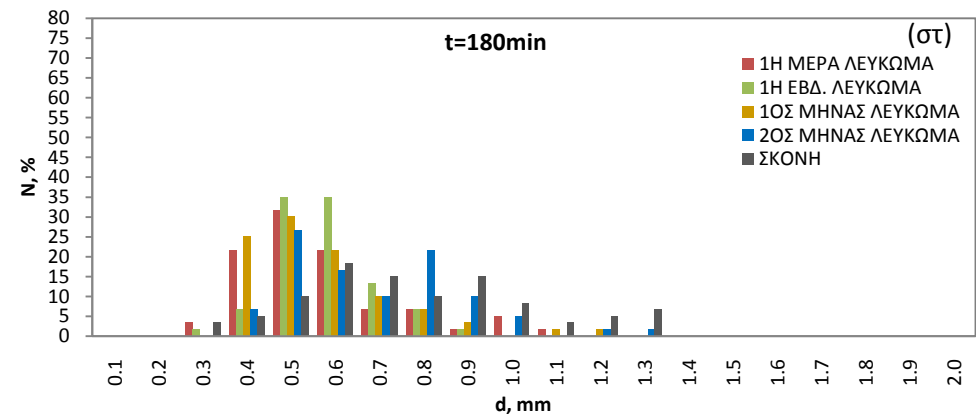
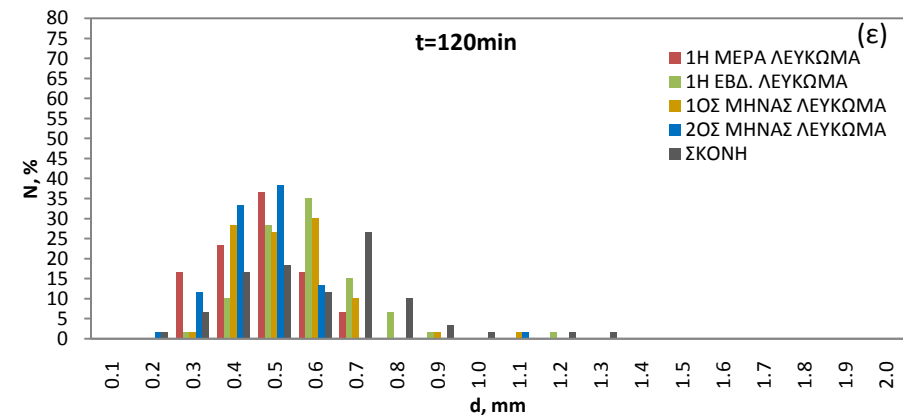
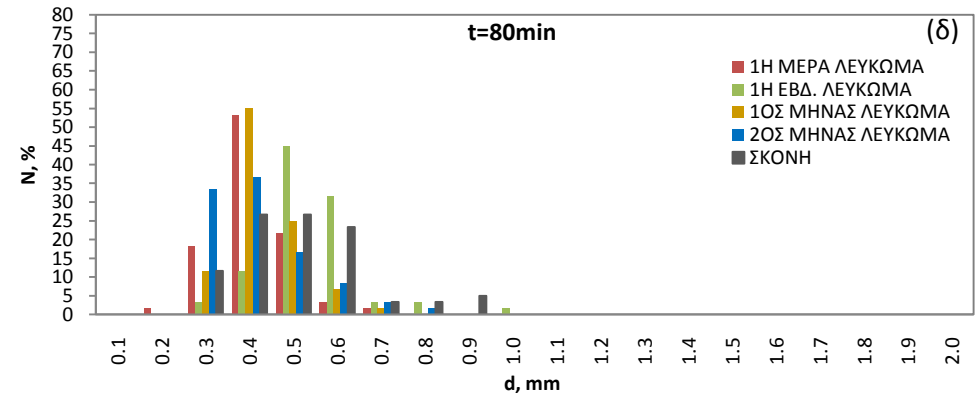
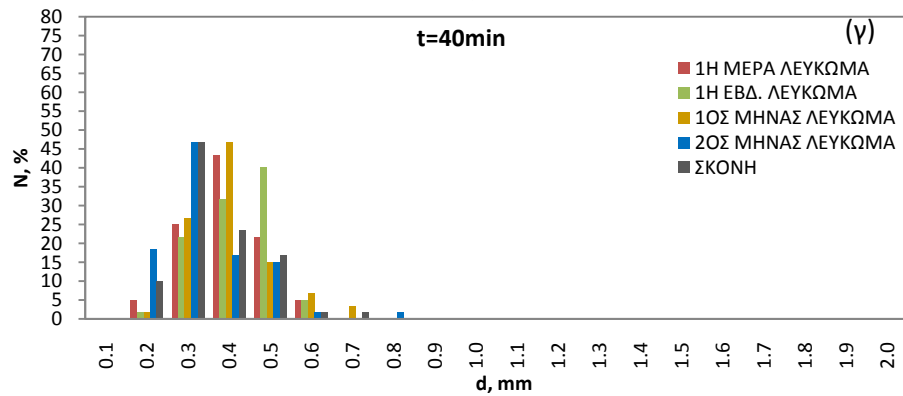
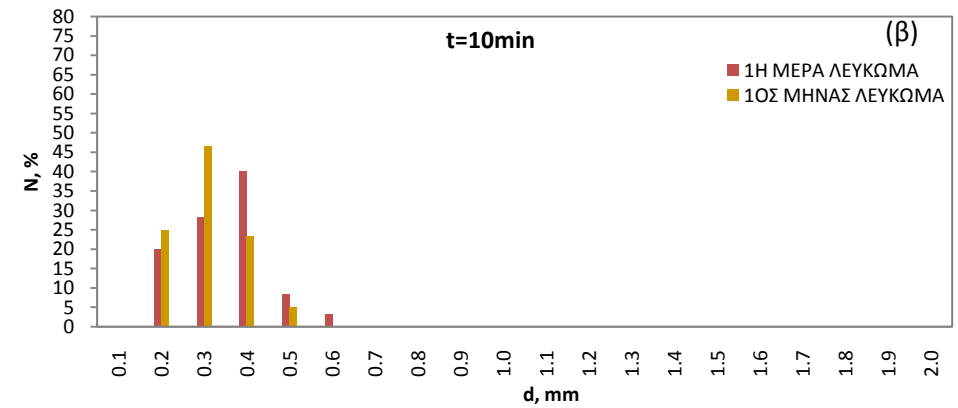
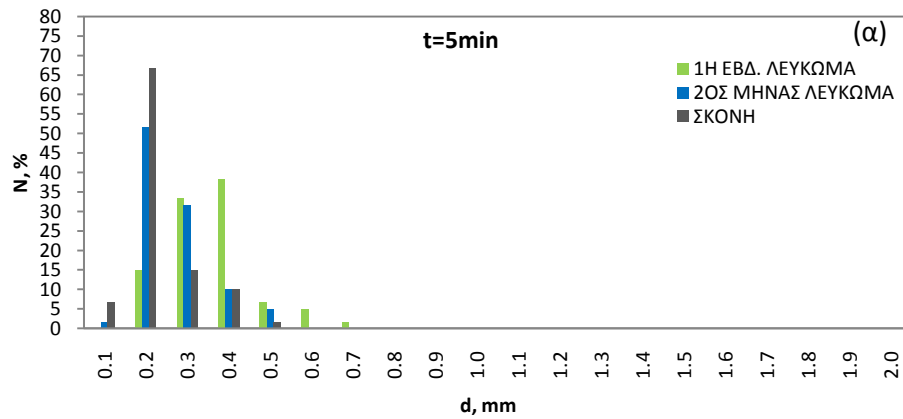
Σχήμα 38: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) σε δείγματα λευκώματος με προσθήκη κρόκου διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 20°C.



Σχήμα 39: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) σε δείγματα που προέκυψαν από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος με προσθήκη κρόκου διαφορετικού χρόνου συντήρησης, αποθηκευμένο στους 20°C.

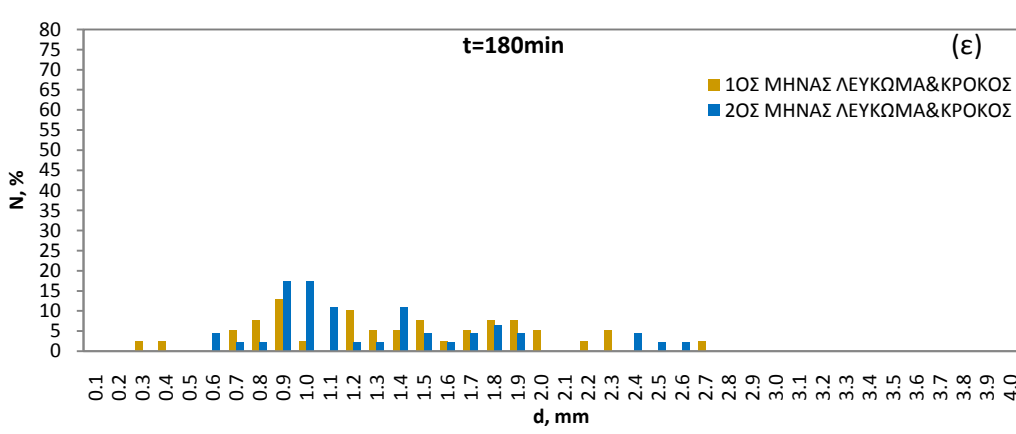
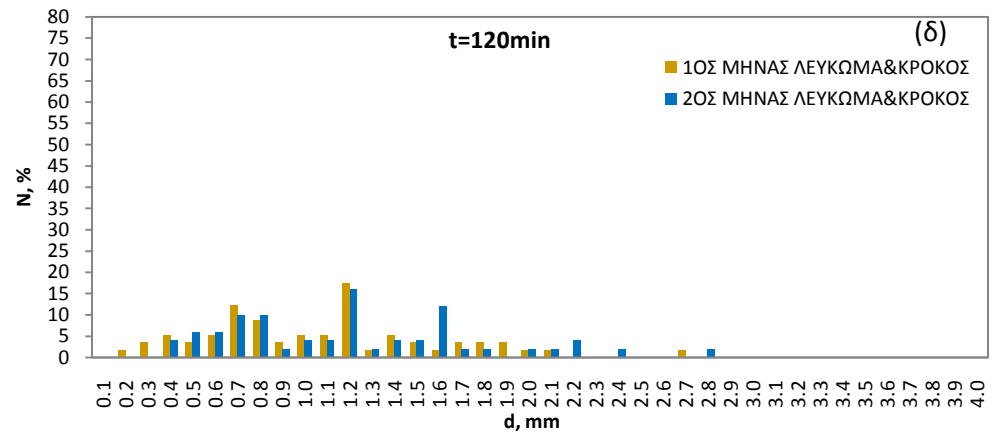
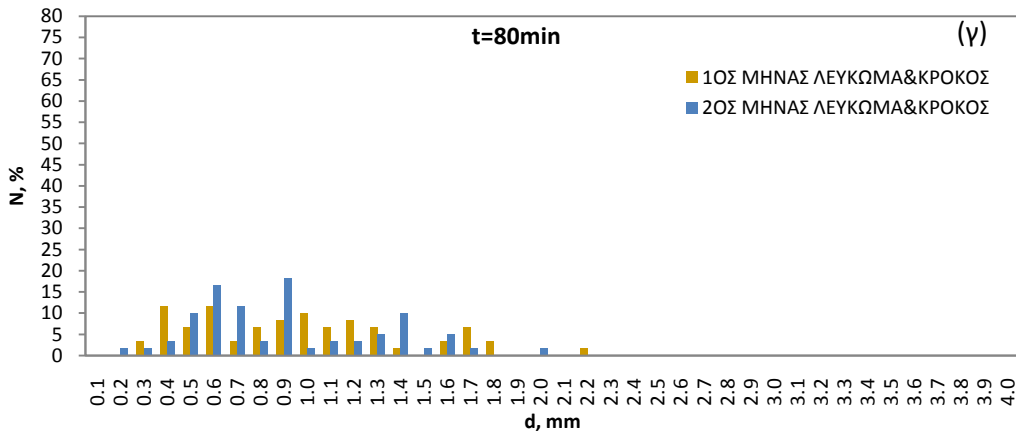
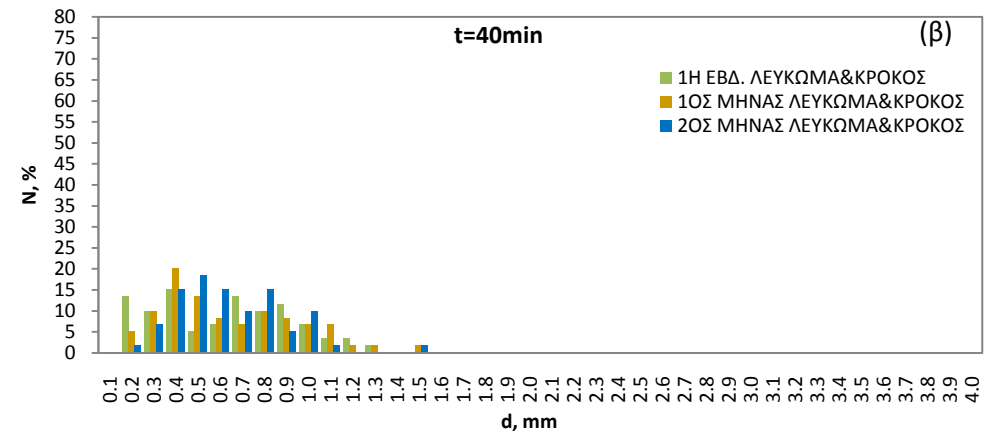
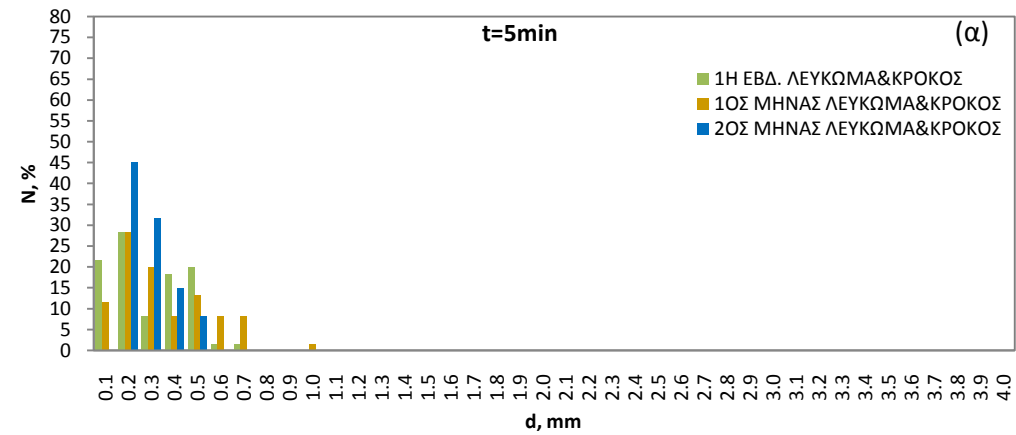


Σχήμα 40: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) στα δείγματα λευκώματος διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 20°C με προσθήκη ζάχαρης, καθώς και σε δείγμα που προέκυψε από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος.

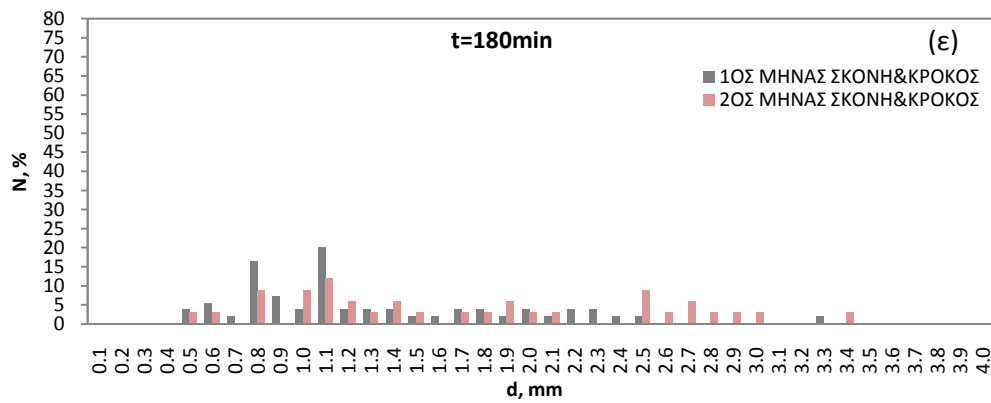
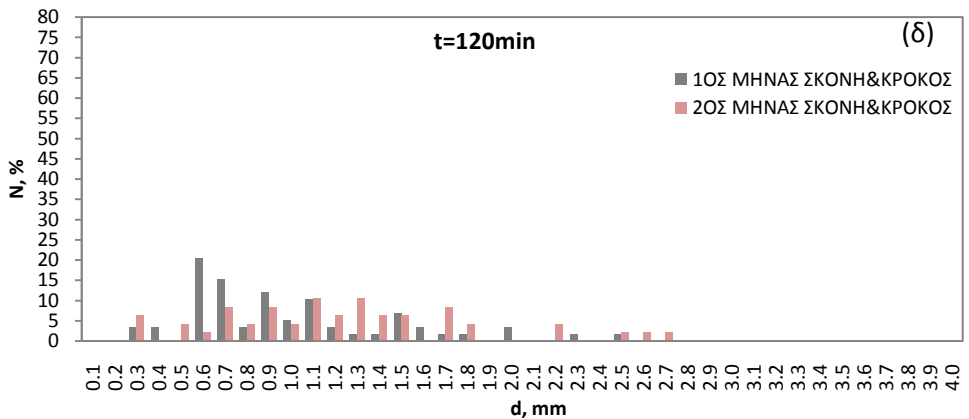
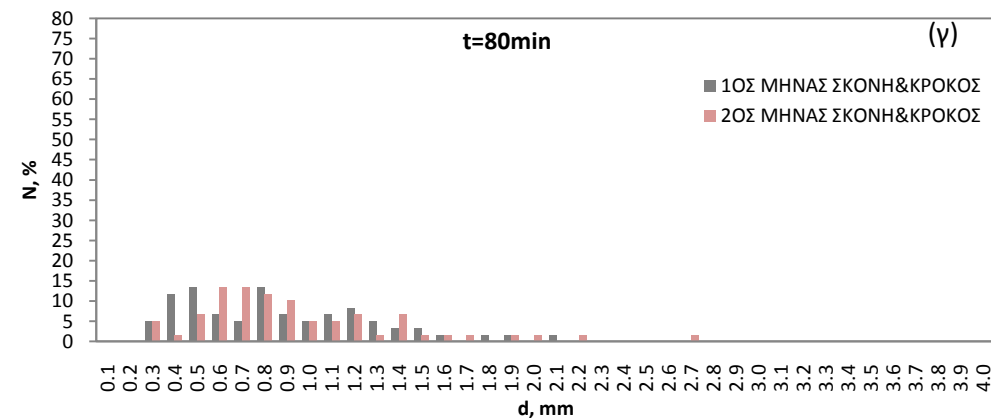
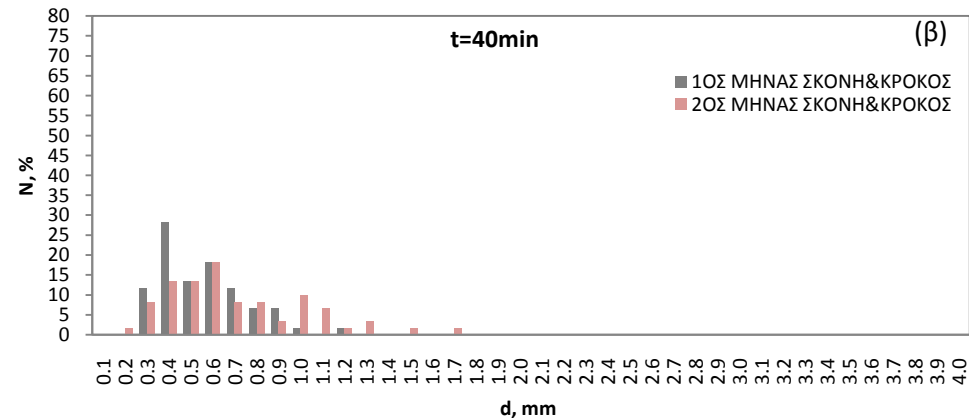
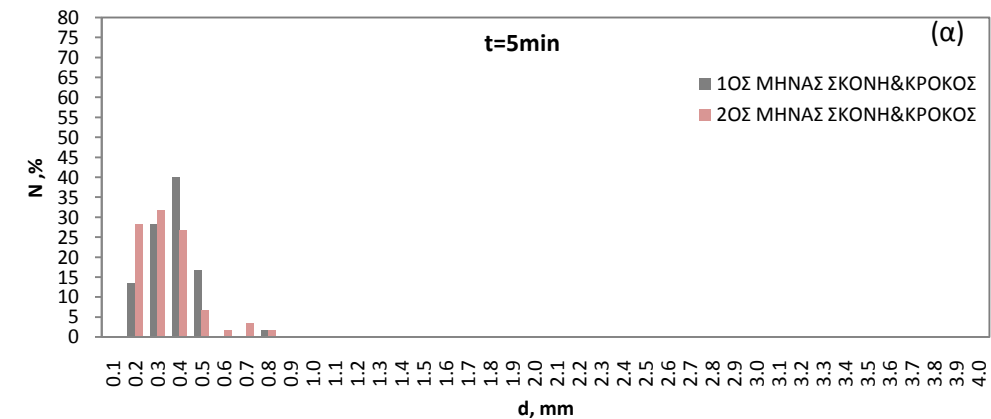


Σχήμα 41: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) στα δείγματα λευκώματος διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 4°C, καθώς και σε δείγμα που προέκυψε από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος.

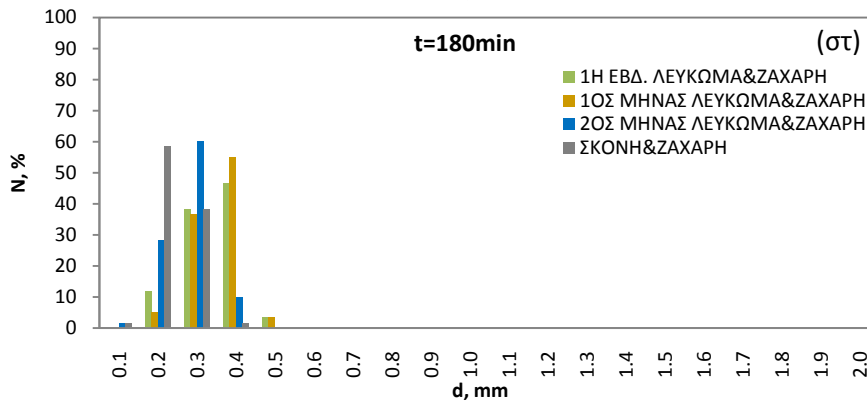
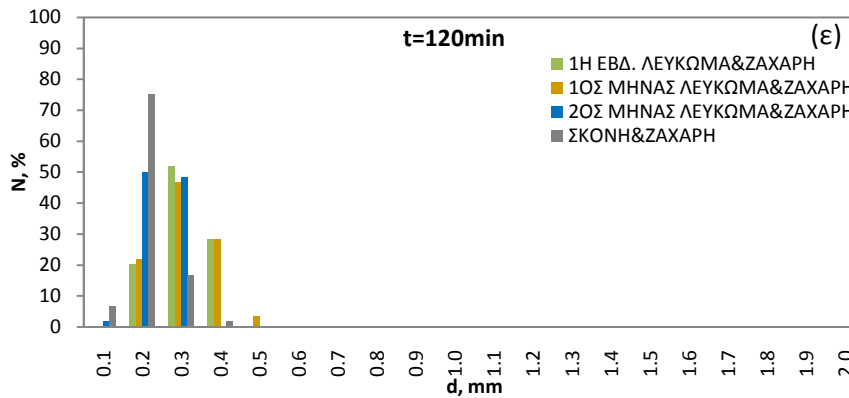
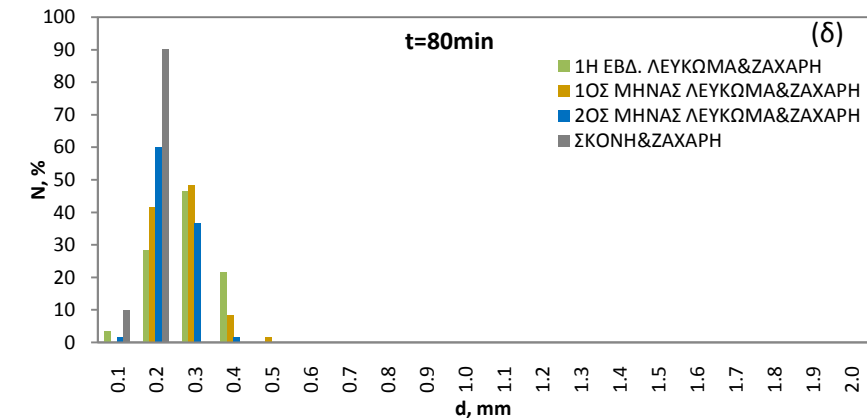
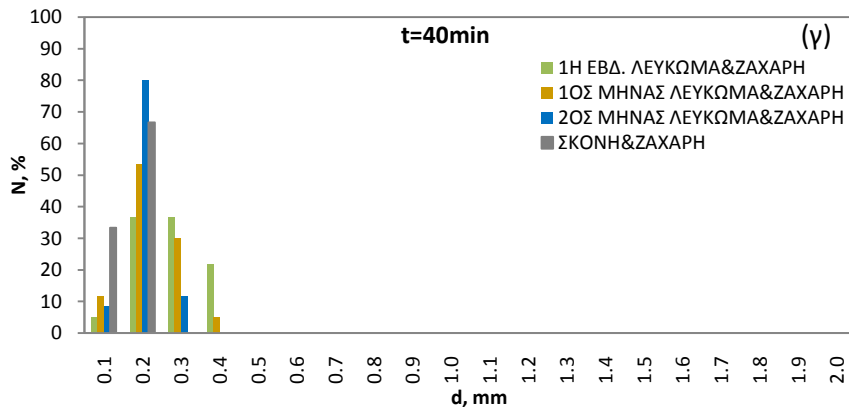
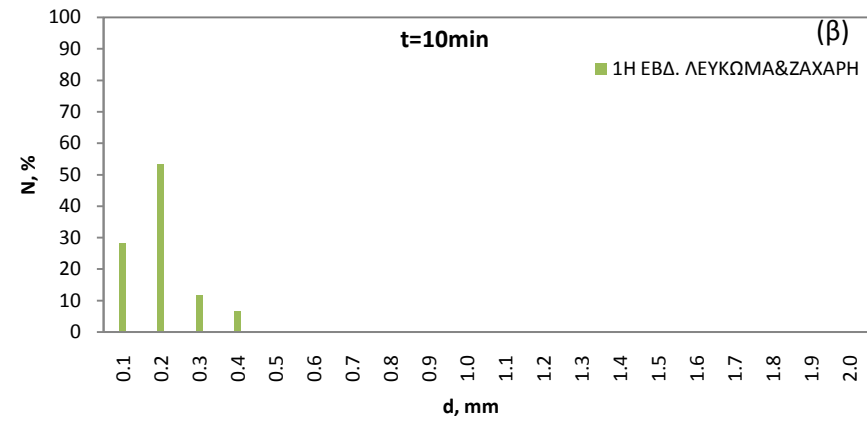
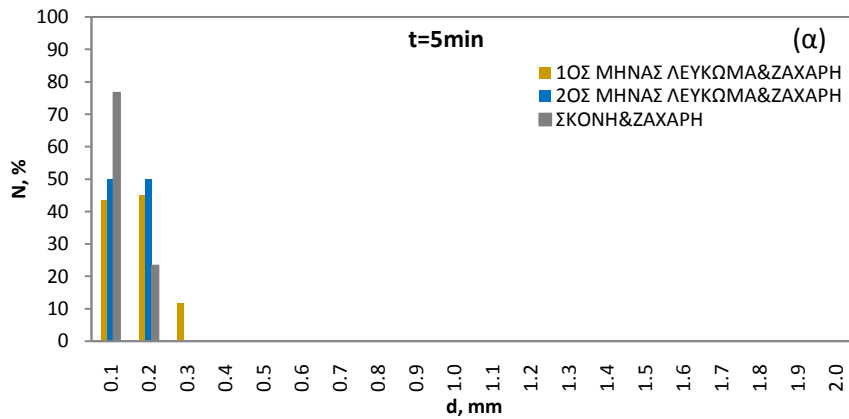




Σχήμα 42: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) στα δείγματα λευκώματος με προσθήκη κρόκου διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 4°C.



Σχήμα 43: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) σε δείγματα από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος με προσθήκη κρόκου διαφορετικού χρόνου συντήρησης, αποθηκευμένο στους 4°C.



Σχήμα 44: Κατανομή αριθμού φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) των φυσαλίδων και του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) στα δείγματα λευκώματος διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 20°C με προσθήκη ζάχαρης, καθώς και σε δείγμα που προέκυψε από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος.

Στα Σχήματα απεικονίζεται ο πληθυσμός των φυσαλίδων που ανήκουν σε κάθε εύρος μεγέθους ως προς τον χρόνο. Οι φυσαλίδες ανάλογα με την διάμετρο τους έχουν χωριστεί σε κλάσεις μεγέθους (0,1-0,2mm, 0,2-0,3mm μέχρι και 3,9-4,0mm). Επομένως το πλάτος κάθε ράβδου αντιστοιχεί σε ένα διάστημα μεγέθους της μελετώμενης μεταβλητής, ενώ το ύψος της ράβδου καθορίζεται από το πλήθος των παρατηρήσεων της μεταβλητής που εμπίπτουν στο διάστημα αυτό (Πετρίδης, 2000).

Στο Σχήμα 37 που αφορά τα συντηρημένα δείγματα λευκώματος αποθηκευμένα στους 20°C, παρατηρούμε σημαντική αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων όσο περνάει ο χρόνος αποσταθεροποίησης. Οι διαφορές μεταξύ των δειγμάτων γίνονται ιδιαίτερα εμφανείς από τα 80 min παραμονής του αφρού και μετά. Επίσης παρατηρείται ότι αυξάνεται το εύρος των μεγεθών συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης. Σε ό,τι αφορά την επίδραση του χρόνου συντήρησης στο μέγεθος των φυσαλίδων του νεοσχηματισμένου αφρού, από τα αποτελέσματά μας δεν προκύπτουν ξεκάθαρες τάσεις μεταξύ των δειγμάτων. Αντίθετα όσο περνά ο χρόνος αποσταθεροποίησης και ιδιαίτερα για το δείγμα με χρόνο συντήρησης 2 μήνες παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης του μεγέθους των φυσαλίδων. Αυτό ίσως να συνδέεται με την μείωση του ιξώδους που ενισχύει την αποστράγγιση του αφρού και φέρνει τις φυσαλίδες πιο κοντά μεταξύ τους ώστε να παρατηρηθεί συσσωμάτωση ή/και διάχυση του αέρα μεταξύ φυσαλίδων (disproportionation). Αυτό πιθανότατα να σχετίζεται με την αύξηση του pH του λευκώματος όσο περνά ο χρόνος συντήρησης (Σχήμα 23). Συγκεκριμένα οι Van der Plancken *et al.* (2007) μελέτησαν την μεταβολή του μεγέθους των φυσαλίδων σε ένα σύστημα αφρού από σκόνη λευκώματος σε pH 7,6 και 8,8 και διαπίστωσαν ότι στο υψηλότερο pH παρατηρούνται μεγαλύτερα μεγέθη φυσαλίδων.

Το δείγμα της σκόνης λευκώματος κατά τον σχηματισμό του παρουσιάζει μικρότερο μέγεθος φυσαλίδων από τα υπόλοιπα δείγματα (Σχήμα 37) αν και παρουσιάζει την μεγαλύτερη αφριστική ικανότητα (Σχήμα 29). Αυτό δείχνει την ευκολότερη και καλύτερη διασπορά του αέρα στην μάζα του υγρού κατά τον σχηματισμό αφρού και θα μπορούσε να αποδοθεί κυρίως στο χαμηλότερο ιξώδες του επανασυσταμένου λευκώματος σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα. Παρόλα αυτά με την πάροδο του χρόνου

αποσταθεροποίησης και ιδιαίτερα από τα 40 λεπτά και μετά εμφανίζει μεγάλα μεγέθη φυσαλίδων όμοια με το συντηρημένο για δύο μήνες λεύκωμα αποθηκευμένο στους 20°C. Η γρηγορότερη αυτή αποσταθεροποίηση του αφρού σχετίζεται επίσης με τη μικρότερη τιμή ιξώδους του επανασυσταμένου λευκώματος. Ακόμη στη σκόνη αβγού αναμένεται να υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό υδρολυμένης πρωτεΐνης από ότι στο νωπό αβγό και αυτό αναμένεται να επηρεάσει την ιξωδοελαστικότητα του υμενίου μεταξύ των φυσαλίδων και τους μηχανισμούς αποσταθεροποίησης του αφρού.

Σύμφωνα με το Σχήμα 38 είναι φανερό ότι η προσθήκη κρόκου έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες φυσαλίδες σε σχέση με τα δείγματα του λευκώματος (Σχήμα 37), ενώ παράλληλα παρατηρείται σημαντικά μικρότερη αφριστική ικανότητα (Σχήμα 29). Αυτό δηλώνει την χειρότερη διασπορά του αέρα στην μάζα του υγρού κατά τον σχηματισμό αφρού και θα μπορούσε να αποδοθεί κυρίως στην μεταβολή των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας που καθιστούν τις νεοσχηματισμένες διεπιφάνειες σημαντικά ασταθέστερες. Επίσης παρατηρείται σημαντική αύξηση μεγέθους των φυσαλίδων σε συνάρτηση με τον χρόνο αποσταθεροποίησης σε σχέση με τα δείγματα του λευκώματος (Σχήμα 37). Τέλος στα λευκώματα που προστέθηκε κρόκος παρατηρείται πως δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των δειγμάτων και του χρόνου συντήρησης.

Παρατηρούμε ότι η προσθήκη κρόκου στα δείγματα από σκόνη και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης (Σχήμα 39 και Σχήμα 43), αναπτύσσει πιο γρήγορα μεγάλες φυσαλίδες συγκριτικά με την προσθήκη του σε δείγματα λευκώματος ακόμα και αυτού που έχει συντηρηθεί για δύο μήνες (Σχήμα 37 και Σχήμα 41). Τα δείγματα της σκόνης έχουν παρόμοια αποτελέσματα ανεξάρτητα από τον χρόνο συντήρησης του κρόκου. Όπως συζητήθηκε και στην Παράγραφο 5.3.1 οι διαφορές που παρατηρούνται με την προσθήκη του κρόκου στα δείγματα αποδίδονται κατά μεγάλο βαθμό στην προσρόφηση των λιπιδίων στη διεπιφάνεια υγρού- αέρα.

Σε ό,τι αφορά την επίδραση της προσθήκης ζάχαρης (Σχήματα 40 και 44) παρατηρήθηκε ότι αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό πολύ μικρών φυσαλίδων, μικρότερες από το λεύκωμα χωρίς ζάχαρη και διατηρεί μέχρι το τέλος μικρό μέγεθος φυσαλίδων σε μεγάλα ποσοστά, δηλαδή μεγαλώνουν με μικρότερο ρυθμό σε σύγκριση με την περίπτωση απουσίας

ζάχαρης. Σύμφωνα με τους Raikos *et al.* (2007a) ο σχηματισμός μικρότερων φυσαλίδων με την προσθήκη ζάχαρης οφείλεται στο ότι αυξάνει το ιξώδες του διαλύματος, εμποδίζοντας τον αέρα να ενσωματωθεί στις φυσαλίδες, και καθυστερώντας τη διάχυση, και το ξεδίπλωμα της πρωτεΐνης στην διεπιφάνεια.

Το λεύκωμα με την προσθήκη ζάχαρης συντηρημένο για δύο μήνες στους 20°C μοιάζει με το δείγμα της σκόνης με την ζάχαρη αφού αναπτύσσουν παρόμοια μέγιστα ποσοστά φυσαλίδων στους ίδιους χρόνους.

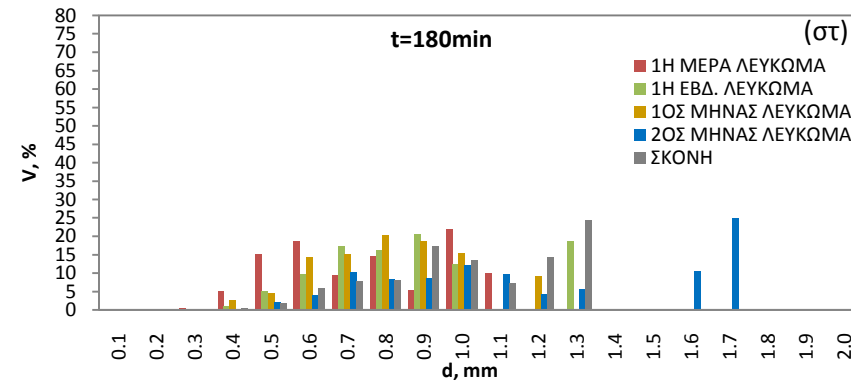
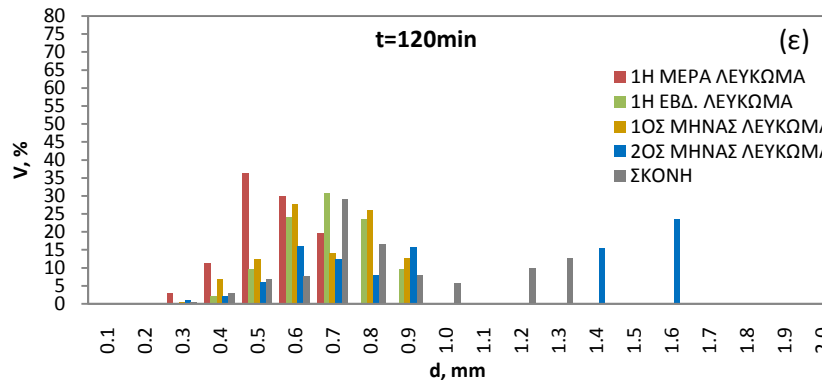
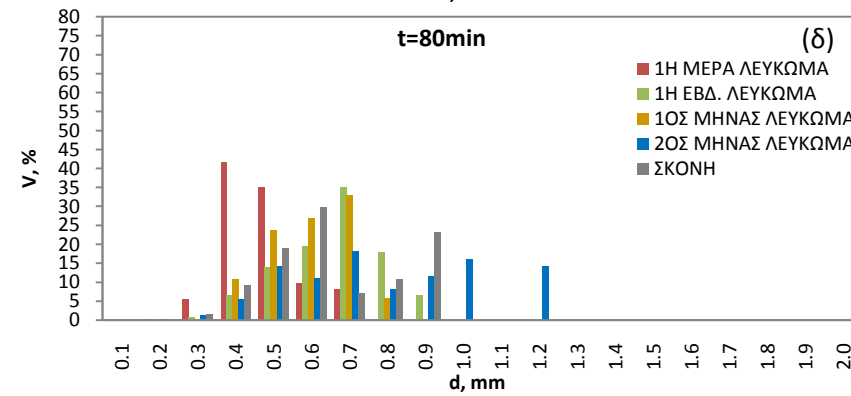
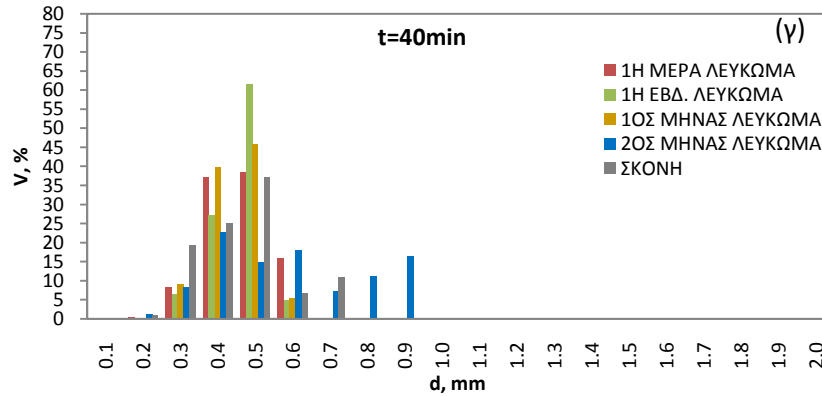
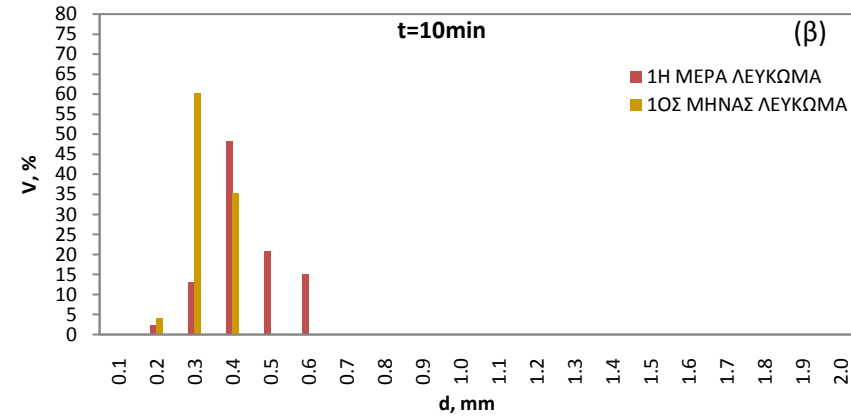
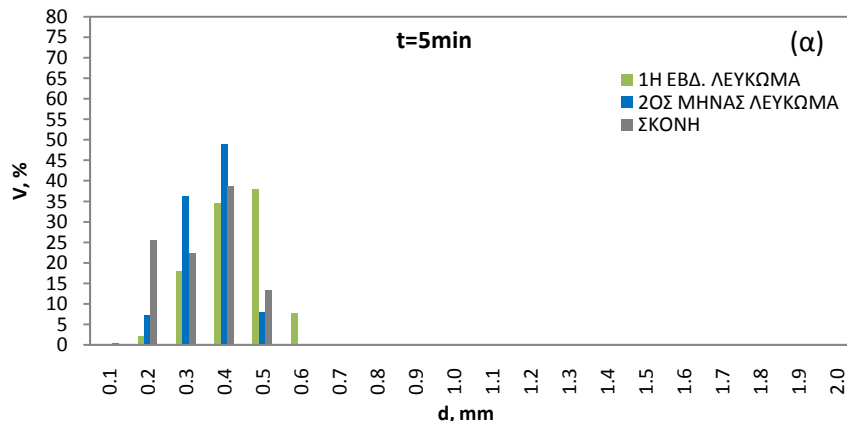
Γενικά παρατηρούμε ότι είναι πιο αργό το φαινόμενο αύξησης του μεγέθους των φυσαλίδων συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης των συντηρημένων δειγμάτων λευκώματος στους 4°C απ' ότι στους 20°C παρουσία και απουσία ζάχαρης (Σχήματα 41, 44 και Σχήματα 37, 40 αντίστοιχα).

#### **5.3.4 Μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνει ο αριθμός των φυσαλίδων**

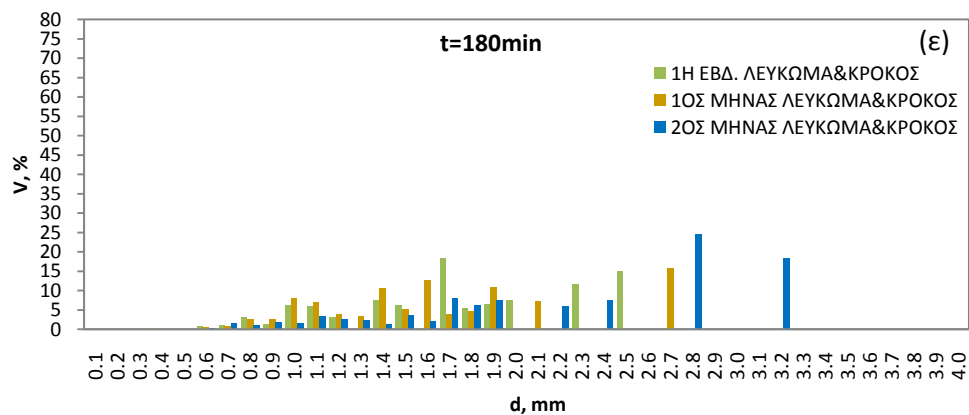
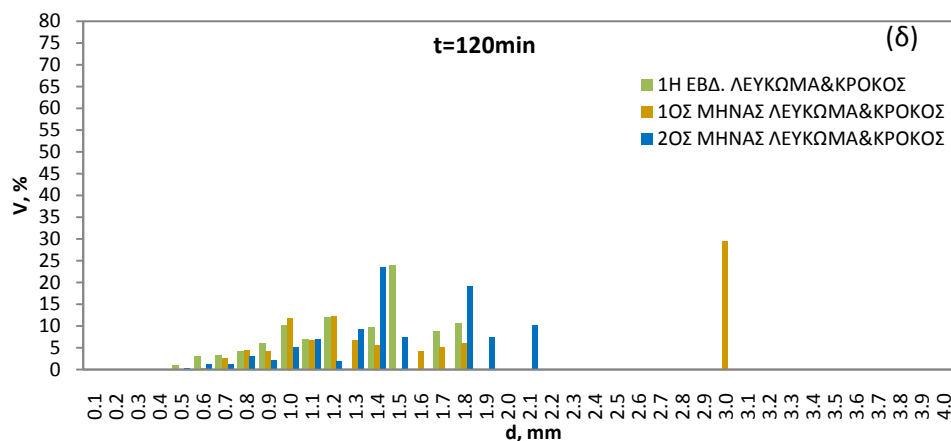
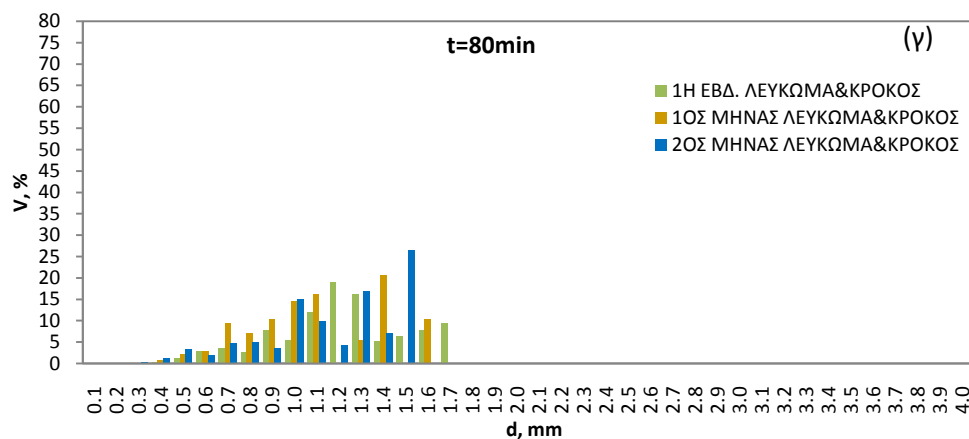
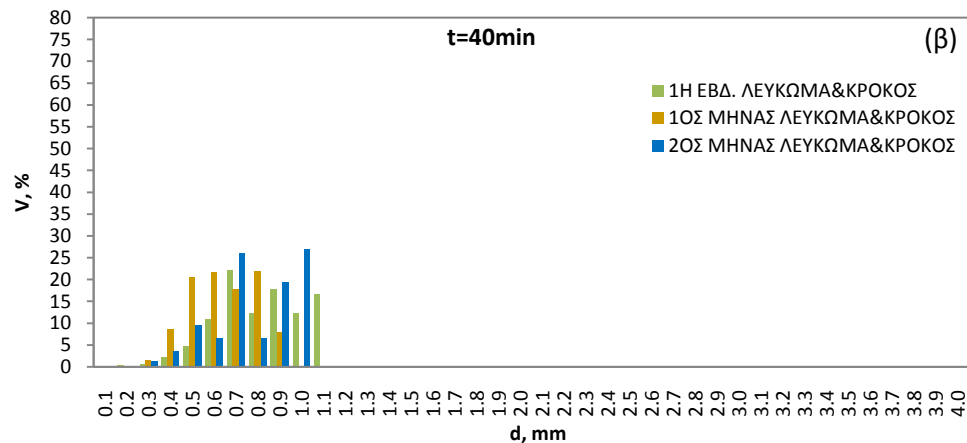
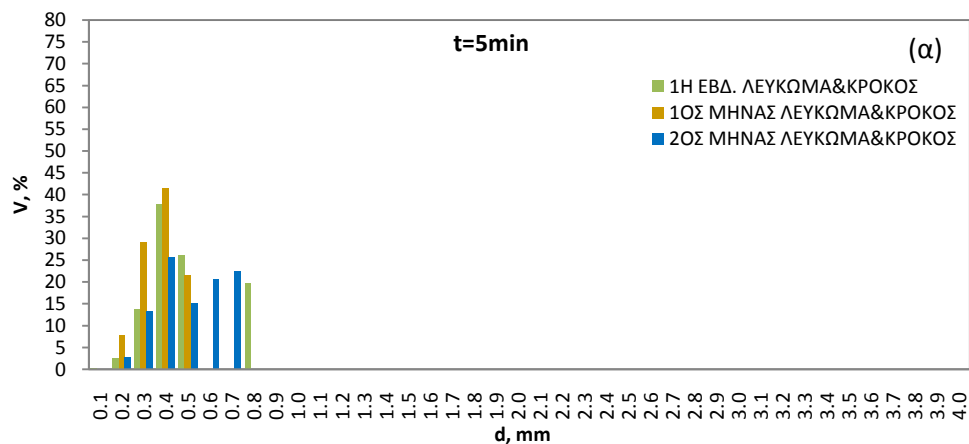
Τα Σχήματα 45 έως και 52 παρουσιάζουν τον όγκο που καταλαμβάνουν οι φυσαλίδες διαμέτρου ( $d$ ) στην αέρια φάση του αφρού για αφρούς από νωπό λεύκωμα αβγού, λεύκωμα και κρόκο, λεύκωμα και ζάχαρη και αφρούς από ανασυσταμένη σκόνη λευκώματος αβγού στους 20°C και στους 4°C σε ένα σύστημα αφρού συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης (5-180min). Τα αποτελέσματα συνεπώς συνδέονται με τα αποτελέσματα του αριθμού των φυσαλίδων ( $N-d$ ) συναρτήσει της διαμέτρου τους.

Αρχικά έχουμε μεγάλα ποσοστά μικρών φυσαλίδων που καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο ενώ προς το τέλος του κάθε πειράματος αυξάνει ο όγκος των μεγάλων φυσαλίδων.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα του αριθμού φυσαλίδων (Σχήματα 37-44) με αυτά του όγκου των φυσαλίδων (Σχήματα 45-52) φαίνεται πως σε πολλές περιπτώσεις φυσαλίδες με μεγάλη διάμετρο που βρίσκονται σε μικρό αριθμό καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο της αέριας φάσης του αφρού. Αυτό είναι πιο έντονο στους μεγάλους χρόνους αποσταθεροποίησης.

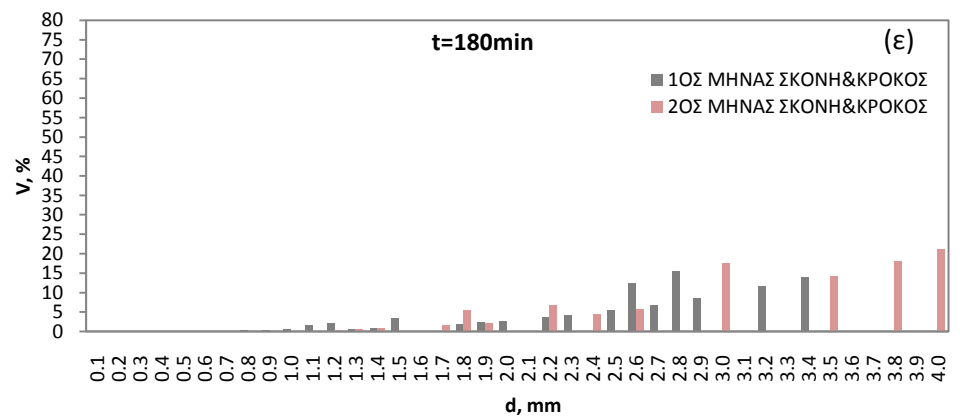
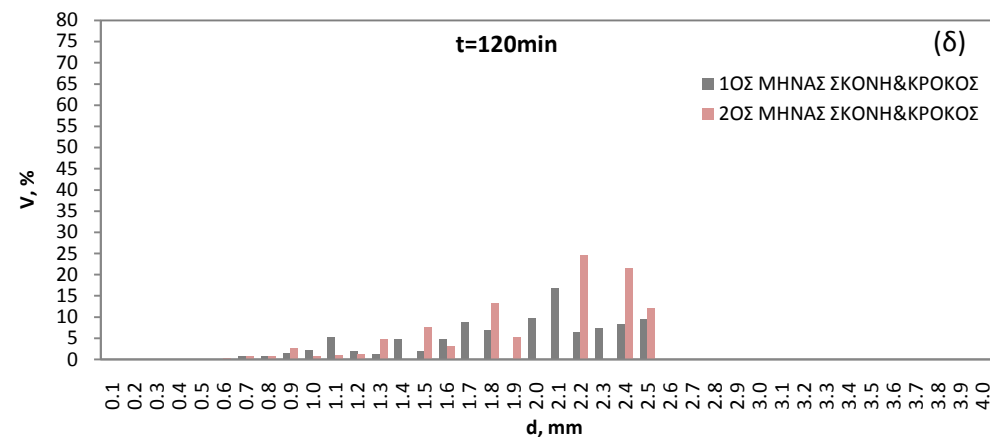
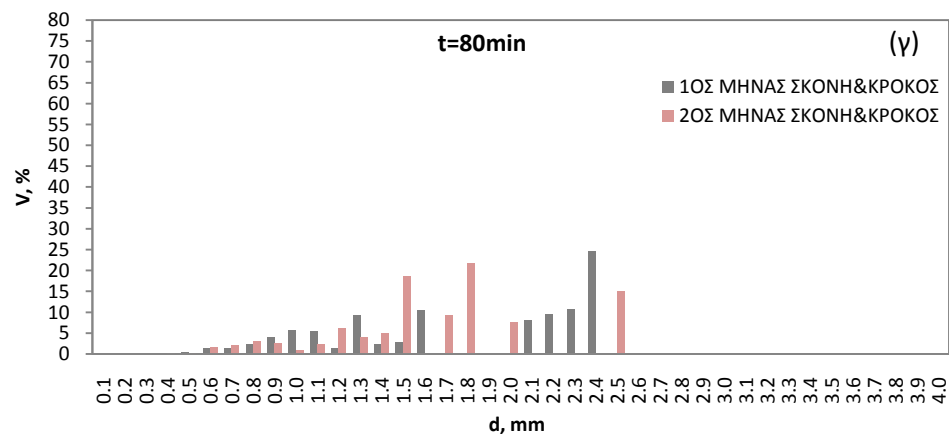
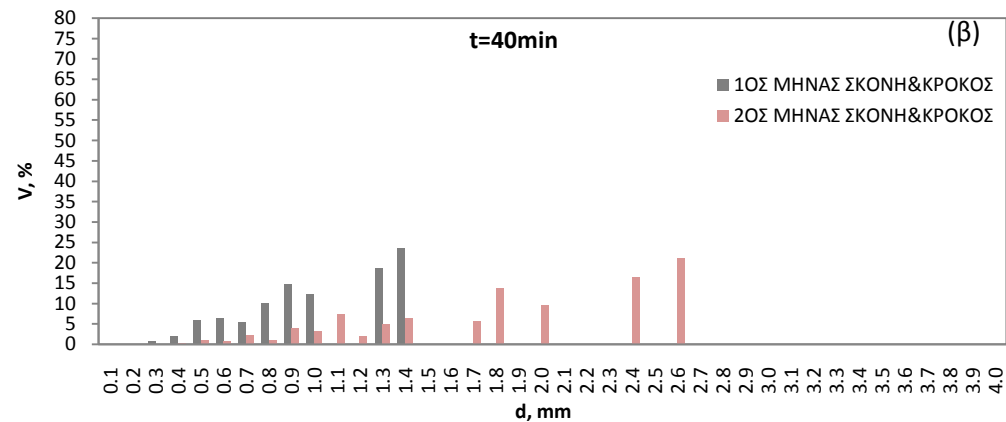
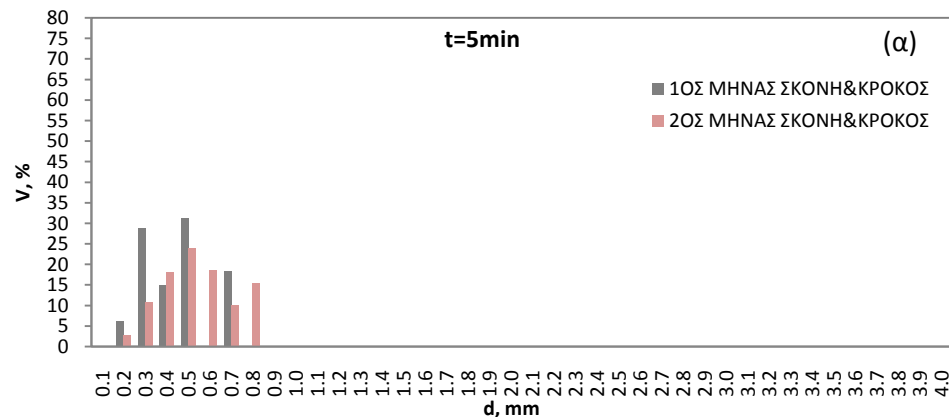


Σχήμα 45: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 20°C.

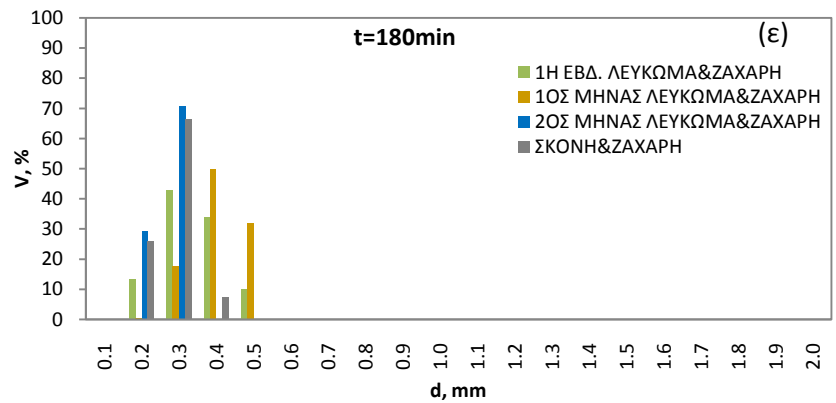
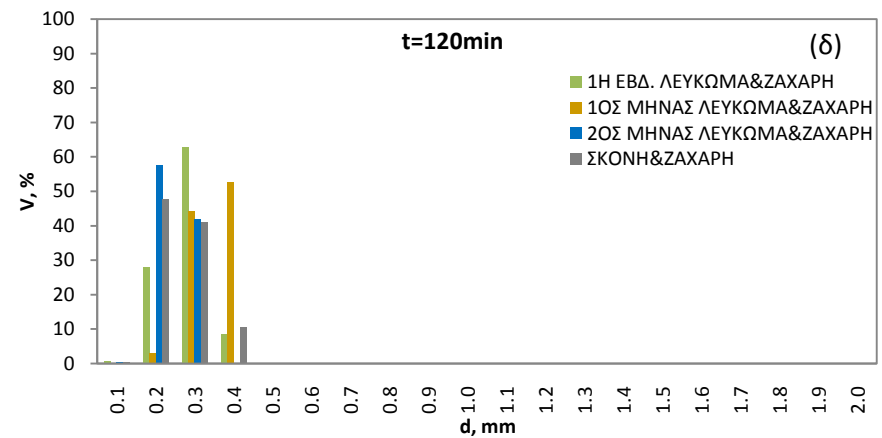
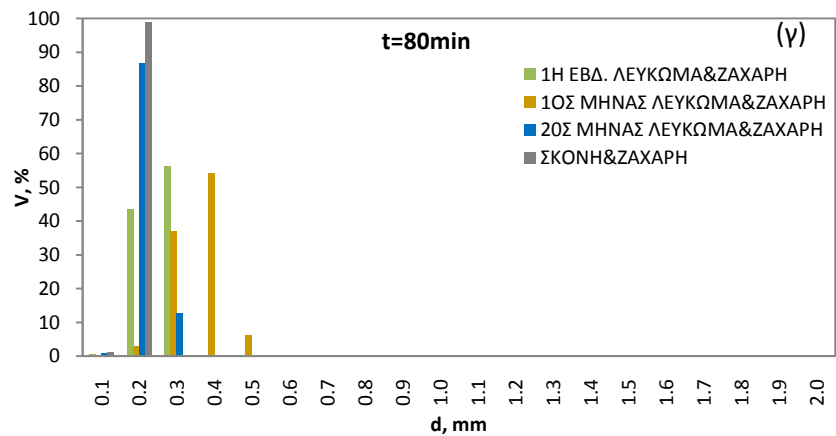
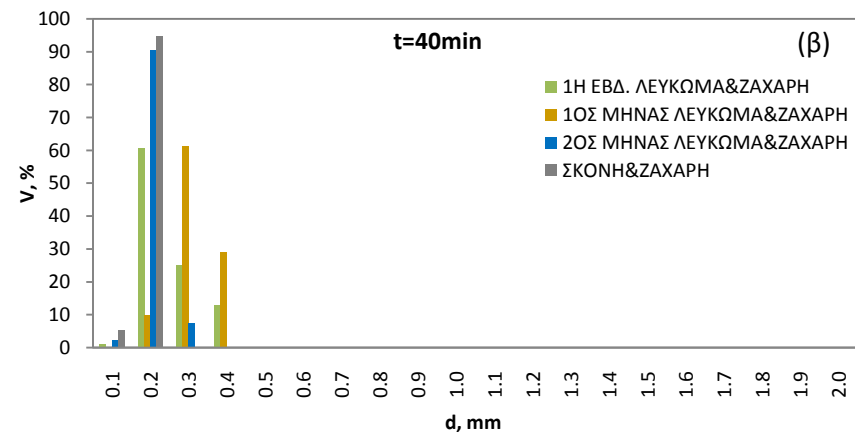
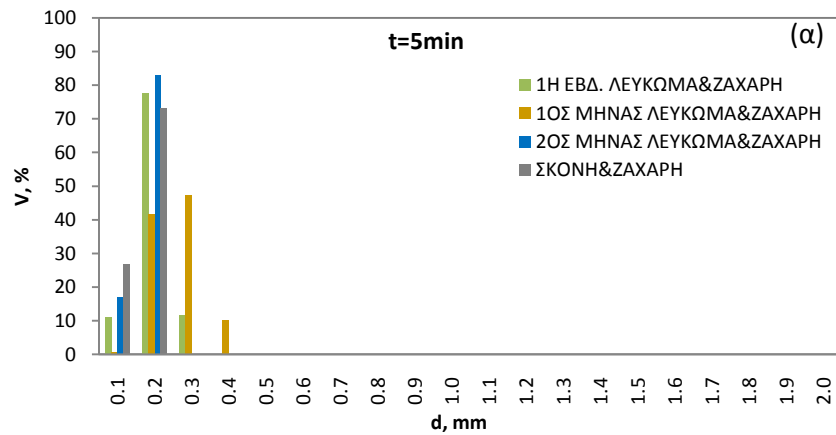


Σχήμα 46: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φουσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού με προσθήκη κρόκου συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 20°C.

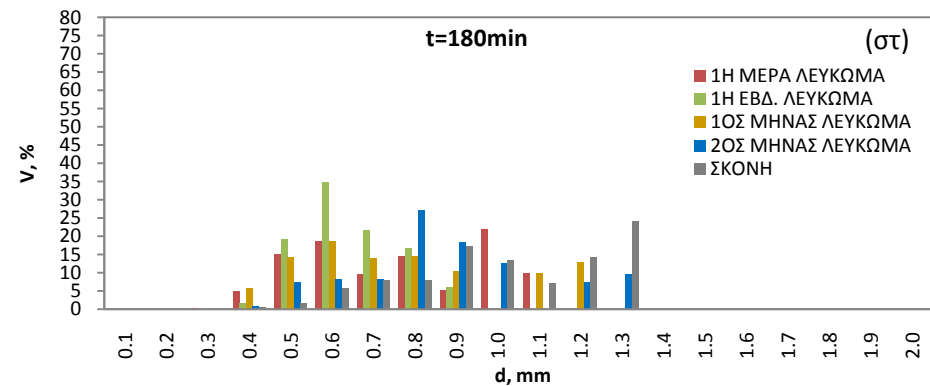
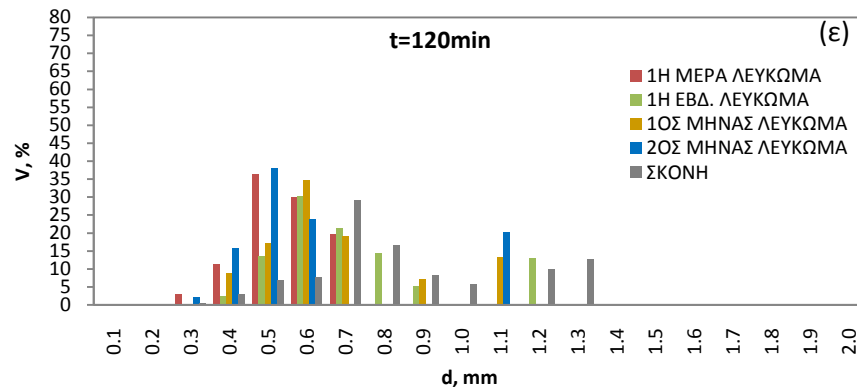
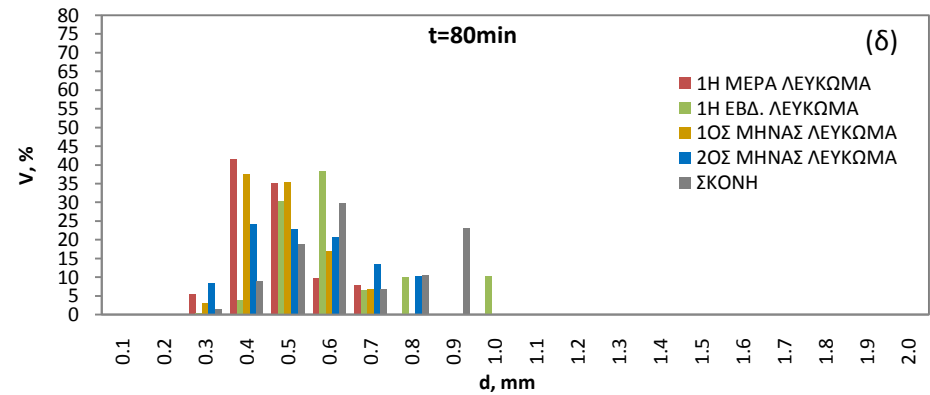
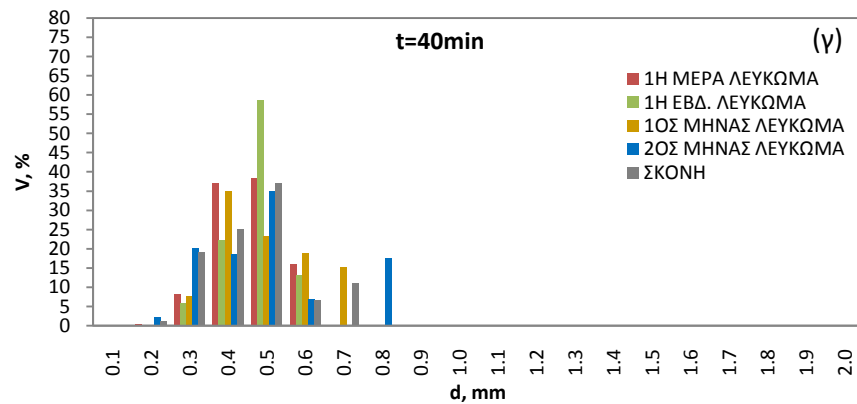
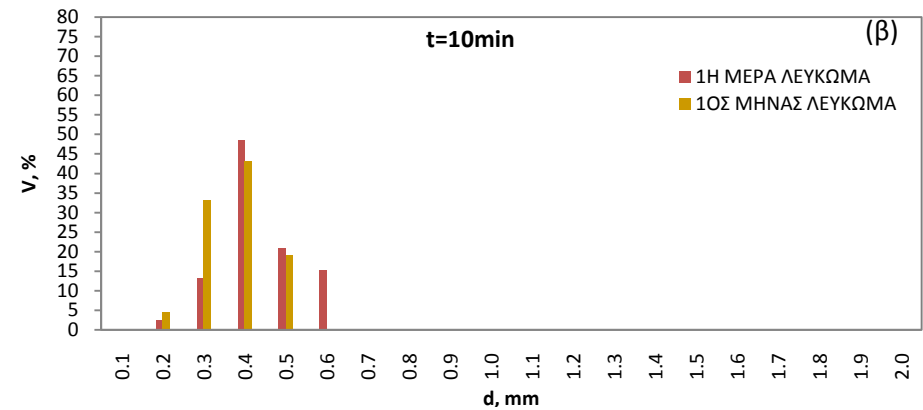
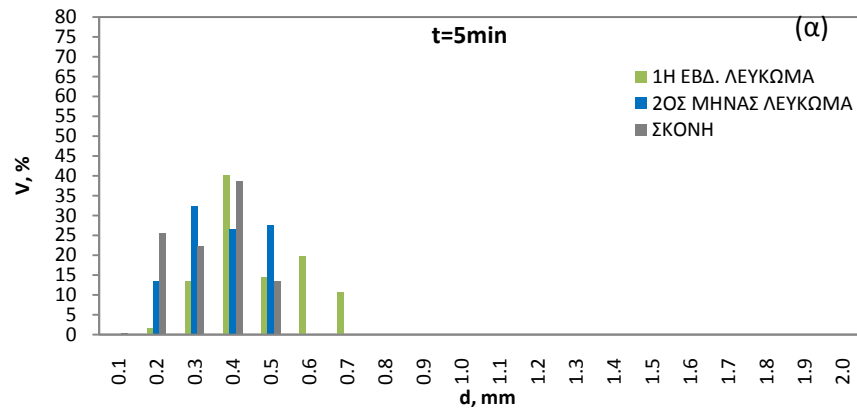




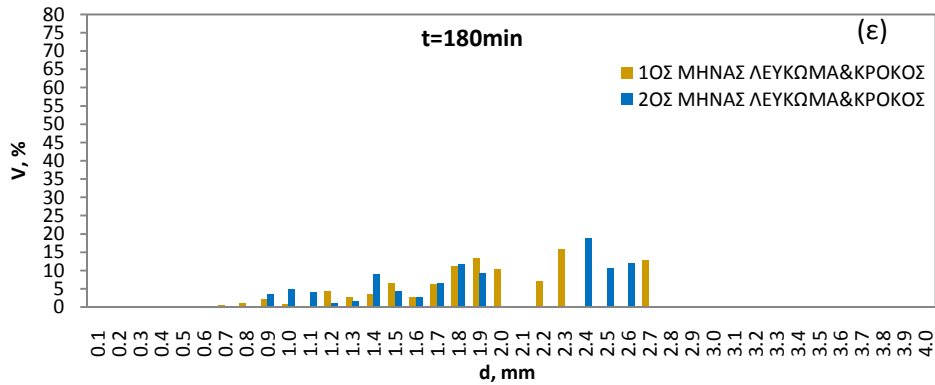
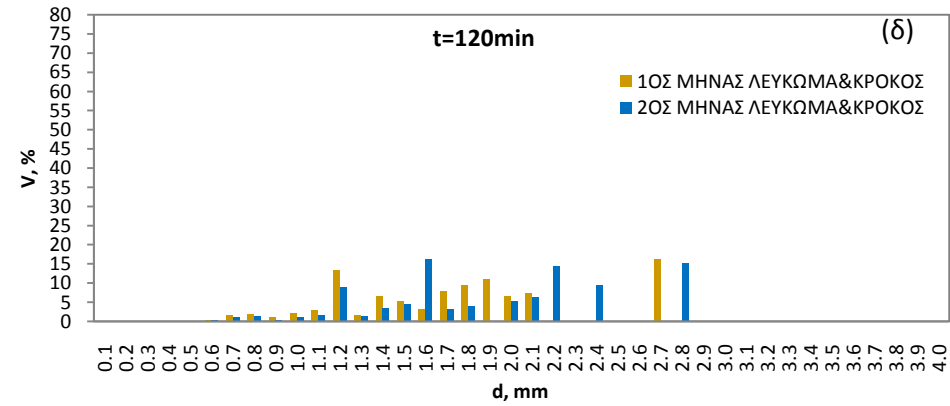
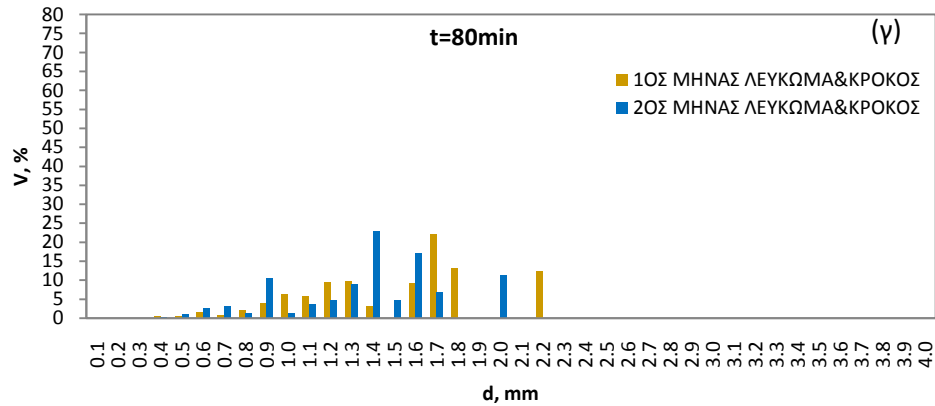
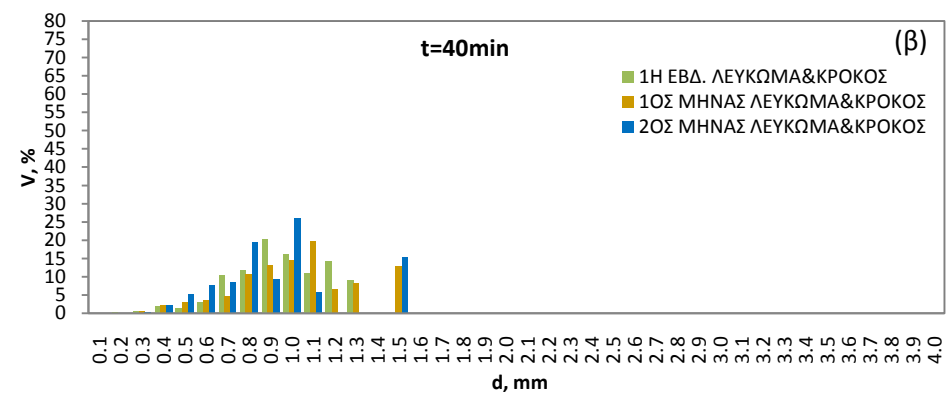
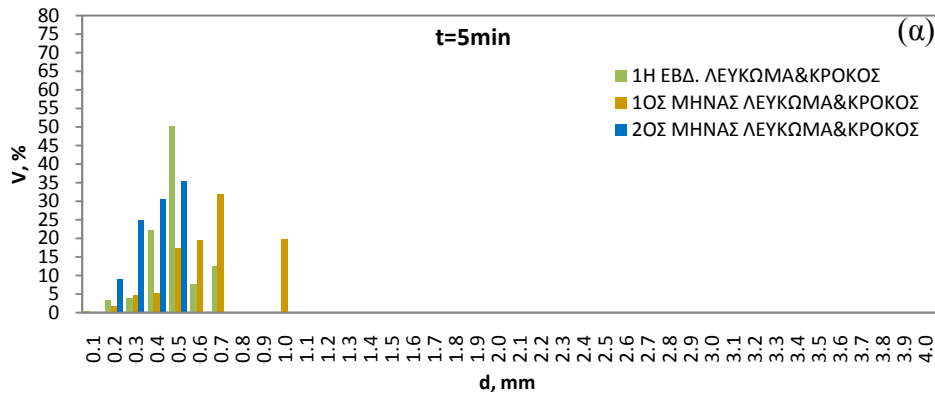
Σχήμα 47: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού επανασυσταμένου λευκώματος αβγού με προσθήκη κρόκου συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 20°C.



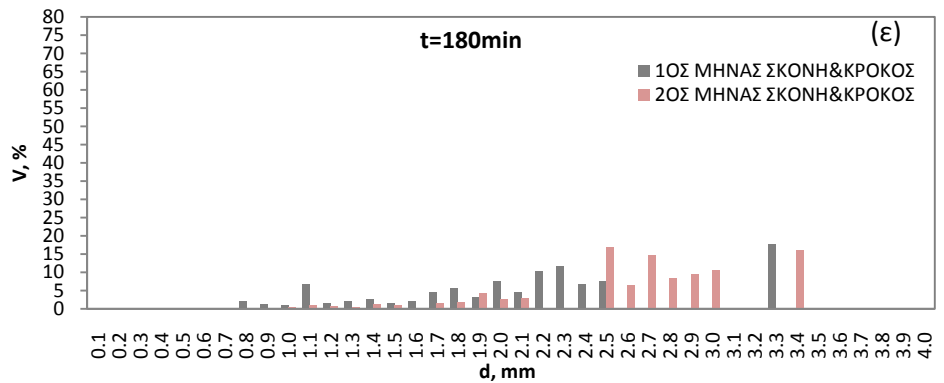
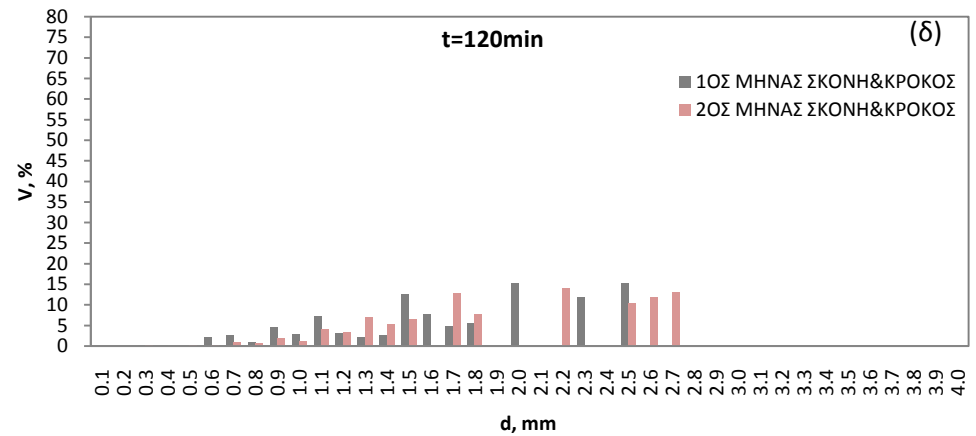
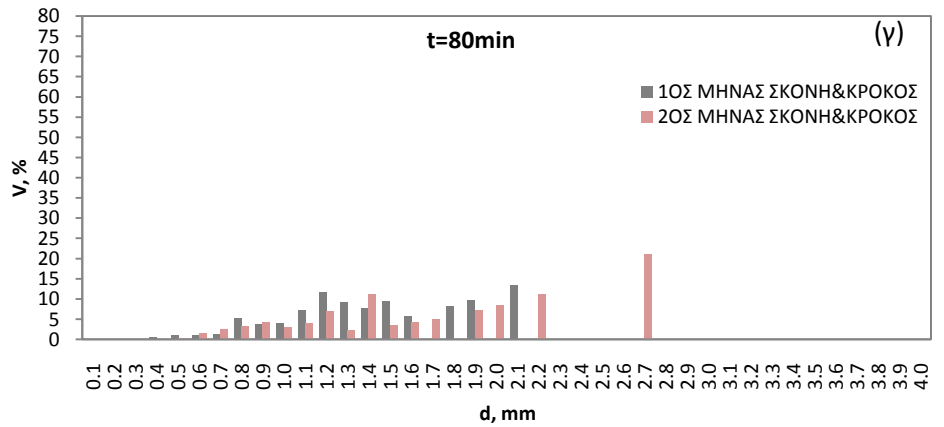
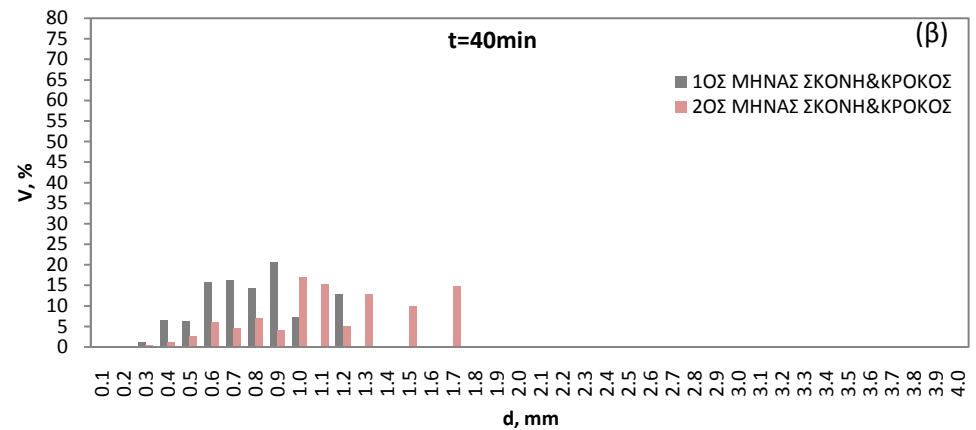
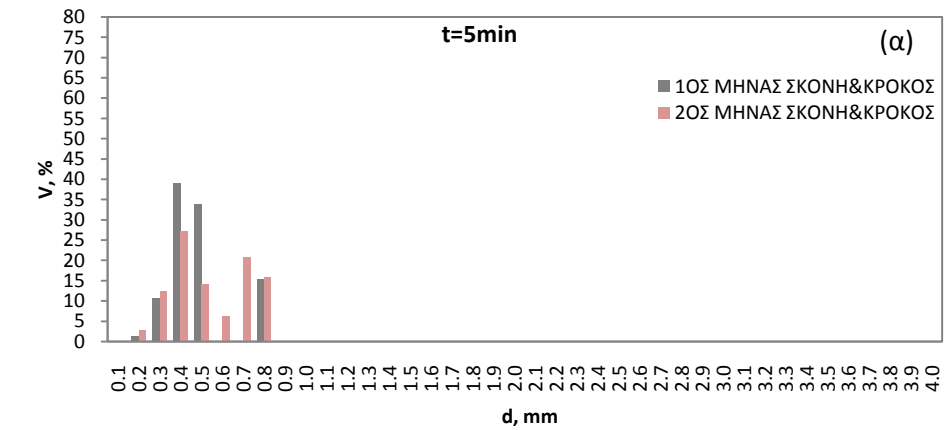
Σχήμα 48: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού με προσθήκη ζάχαρης συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 20°C.



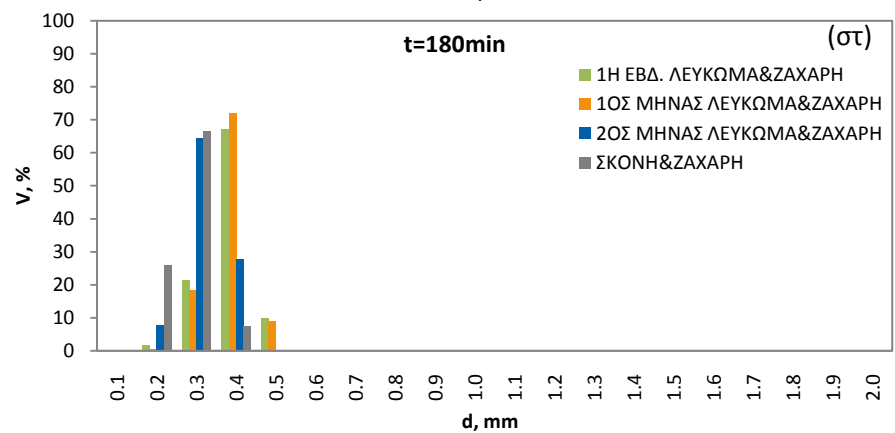
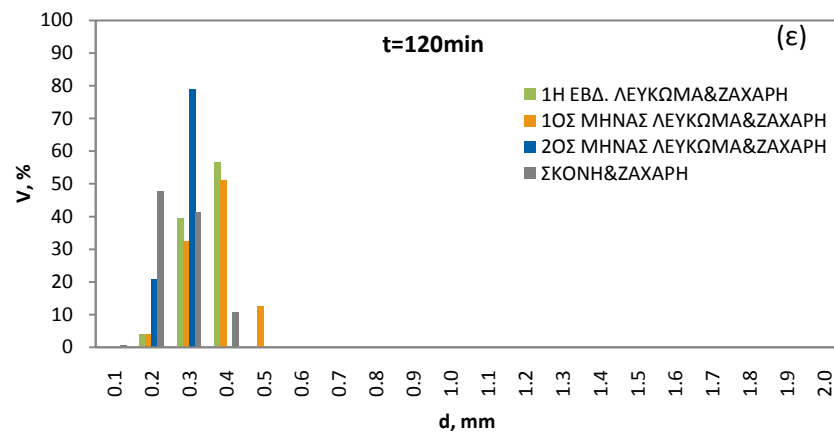
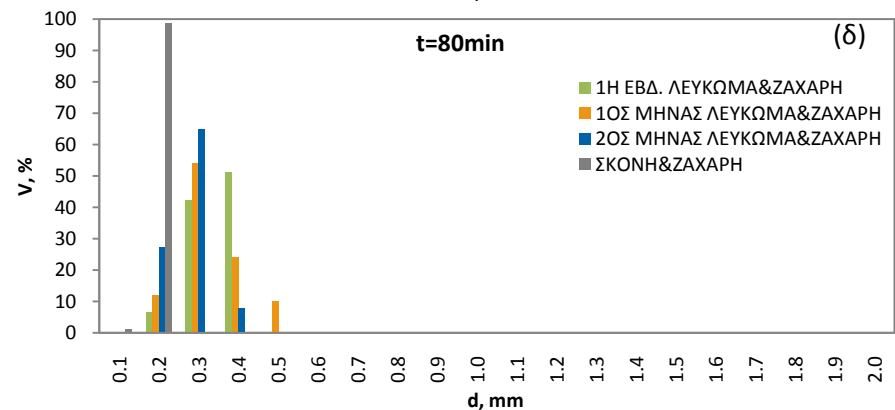
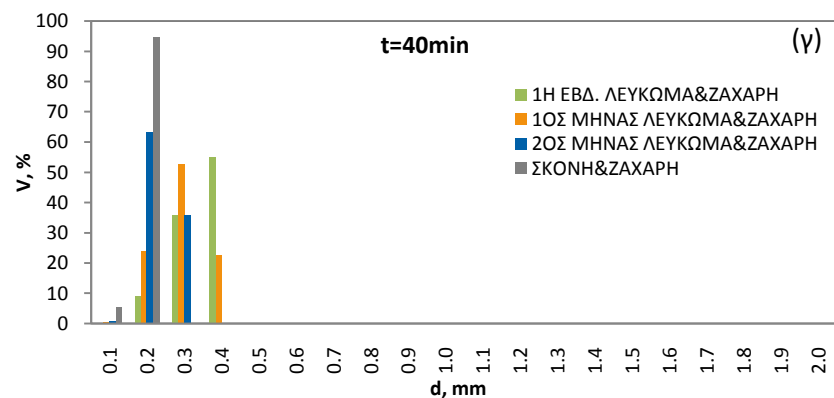
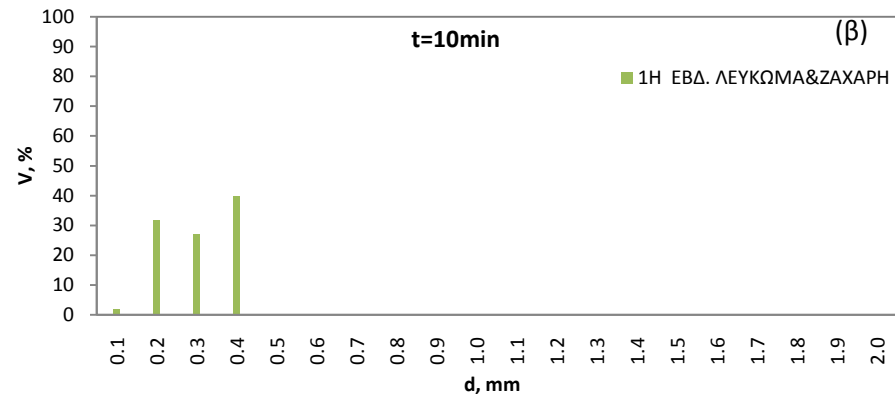
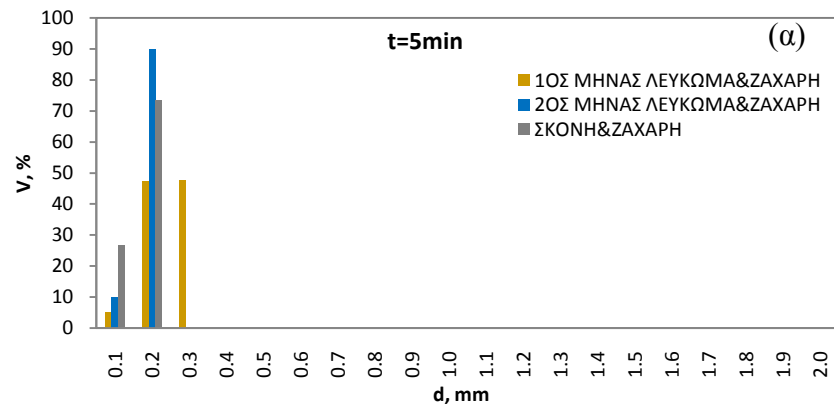
Σχήμα 49: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης (t) και του χρόνου συντήρησης στους 4°C.



Σχήμα 50: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού με προσθήκη κρόκου συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 4°C.



Σχήμα 51: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο της αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού επανασυσταμένης σκόνης λευκώματος συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 4°C.



Σχήμα 52: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο της αέριας φάσης του αφρού σε ένα σύστημα αφρού λευκώματος αβγού με προσθήκη ζάχαρης συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης και του χρόνου συντήρησης στους 4°C.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα αποτελέσματα των συντηρημένων λευκωμάτων στους 20°C και 4°C (Σχήμα 45 και 49 αντίστοιχα) τα οποία συγκρίνοντάς τα με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τον αριθμό φυσαλίδων (N%) (Σχήμα 37 και Σχήμα 41) φαίνεται πως αν και το ποσοστό των μεγάλων φυσαλίδων που σχηματίζονται είναι μικρό, ο όγκος που καταλαμβάνουν είναι μεγάλος. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα αποτελέσματα από την συντήρηση του λευκώματος για δύο μήνες στους 20°C καθώς και για την σκόνη λευκώματος. Το ίδιο επίσης συμβαίνει και στους αφρούς από λεύκωμα και κρόκο (Σχήματα 46 και 50 αντίστοιχα). Παρατηρούμε ότι όσο περνάει ο χρόνος του πειράματος αυξάνεται το ποσοστό του όγκου μεγάλων φυσαλίδων κατ' αντιστοιχία με αυτά που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 45 και 49. Αυτό φαίνεται πιο έντονα με την προσθήκη κρόκου γιατί έχουμε μεγάλο όγκο με μεγάλα μεγέθη φυσαλίδων σε σύγκριση με όλα τα υπό εξέταση δείγματα. Αντίθετα, αυτό δεν παρατηρείται τόσο έντονα στα δείγματα που έχει προστεθεί ζάχαρη λόγω του μικρού εύρους κατανομής των διαμέτρων των φυσαλίδων.

Συγκρίνοντας τα δείγματα λευκώματος που συντηρήθηκαν στους 20°C και 4°C (Σχήμα 45 και Σχήμα 49) φαίνεται ότι στα δείγματα στους 20°C αυξάνει ο όγκος των μεγάλων φυσαλίδων κυρίως τους τελευταίους μήνες ενώ στους 4°C διατηρούνται πιο σταθερές. Όπως είδαμε και στις Παραγράφους 5.3.1 και 5.3.2 η συντήρηση των δειγμάτων αυτών σε χαμηλότερη θερμοκρασία προκαλεί μικρότερες μεταβολές στα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των αβγών οι οποίες οφείλονται και για τις διαφορές στα μεγέθη των φυσαλίδων .

Επίσης για τους αφρούς που έγιναν από λεύκωμα και κρόκο παρατηρείται ότι ο ρυθμός σχηματισμού μεγάλων φυσαλίδων είναι εντονότερος για τα αυγά που συντηρήθηκαν στους 20°C (Σχήμα 46) σε σύγκριση με αυτά που συντηρήθηκαν στους 4°C (Σχήμα 50).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα του αριθμού φυσαλίδων N% (Σχήματα 38 και 42) παρατηρούμε όπως και νωρίτερα την σημαντική συμμετοχή των μεγάλων φυσαλίδων στον όγκο του αφρού. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων αφρού από σκόνη διαλυμένη σε νερό και κρόκο αβγού (Σχήμα 47 και 51).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα στα δείγματα σκόνης λευκώματος με την προσθήκη κρόκου συντηρημένα στους 20°C και 4°C (Σχήμα 47 και 51) παρατηρούμε πως τα δείγματα στους 20°C και μάλιστα ο 2<sup>ος</sup> μήνας (Σχήμα 47) με εμφανή διαφορά έχουν μεγαλύτερες φυσαλίδες και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος απ' ότι στους 4 °C (Σχήμα 51). Αυτές οι διαφορές δεν ήταν εύκολο να τις παρατηρήσει κανείς στην κατανομή του αριθμού των φυσαλίδων συναρτήσει του μεγέθους τους (Σχήματα 37- 44).

Σε όλα τα λευκώματα όπου έχει προστεθεί ζάχαρη (Σχήμα 48 και 52) είναι φανερό ότι ο κύριος όγκος των φυσαλίδων αντιπροσωπεύει μικρά μεγέθη σε σχέση με το λεύκωμα απουσία ζάχαρης ακόμη και μετά τους μεγαλύτερους χρόνους αποσταθεροποίησης. Μικρές μεταβολές παρατηρούνται με τον χρόνο συντήρησης του λευκώματος.

### **5.3.5 Μεταβολή της μέσης ακτίνας των φυσαλίδων**

Όπως φαίνεται και στις παραγράφους 5.3.3 και 5.3.4 η κατανομή του αριθμού και του όγκου των φυσαλίδων συναρτήσει της διαμέτρου τους δεν είναι κανονική στις περισσότερες των περιπτώσεων. Αυτό επιβεβαιώθηκε κάνοντας έλεγχο κανονικότητας σε όλα τα δείγματα. Τον έλεγχο κανονικότητας ακολούθησε έλεγχος ασυμετρίας και κύρτωσης της κατανομής. Τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών βρίσκονται στο Παράρτημα (Παράγραφο 8.4). Σε ό,τι αφορά την ασυμετρία τα περισσότερα δείγματα εμφανίζονται θετικά ασύμετρα με μεγαλύτερες τιμές για τα δείγματα νωπού λευκώματος. Αντίθετα τα δείγματα που έχει προστεθεί ζάχαρη παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές ασυμετρίας. Επίσης, η κατανομή των μεγεθών των φυσαλίδων είναι πλατύκυρτη σε πολλά από τα δείγματα λευκώματος ενώ αντίθετα η κύρτωση παρουσιάζει τιμές που κυμαίνονται γύρω από το μηδεν στην περίπτωση προσθήκης ζάχαρης. Σε ότι αφορά την επίδραση του χρόνου αποσταθεροποίησης δεν παρατηρούνται επίμονες τάσεις στη μεταβολή της κύρτωσης και της ασυμετρίας των δειγμάτων. Μέχρι στιγμής δεν έχει γίνει ανάλυση της κατανομής μεγεθών φυσαλίδων από αφρούς λευκώματος αβγού. Γενικά όμως είναι γνωστό για άλλους αφρούς ότι η κατανομή των μεγεθών των

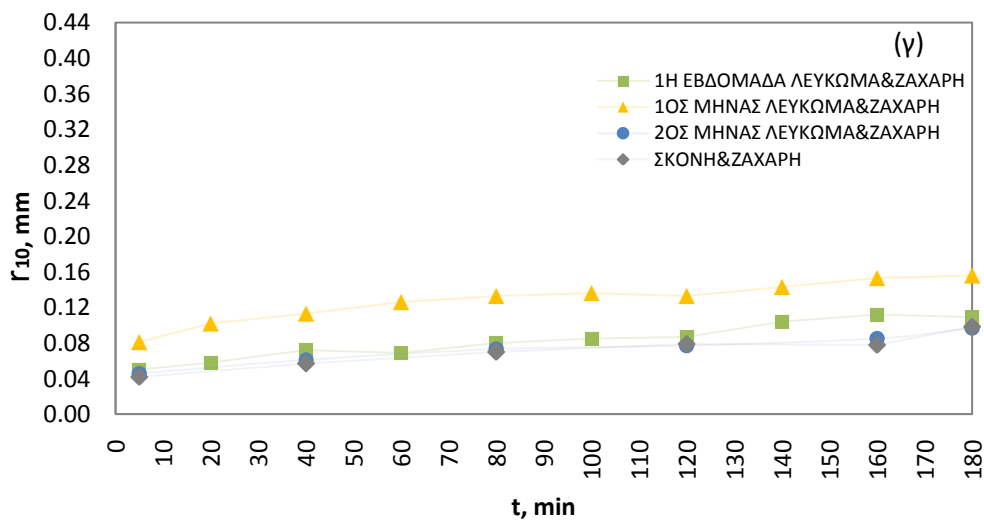
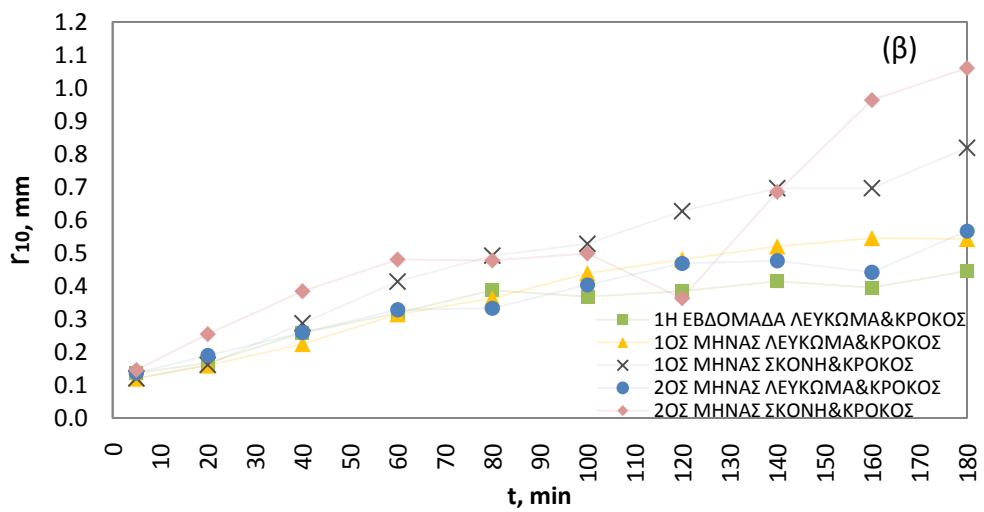
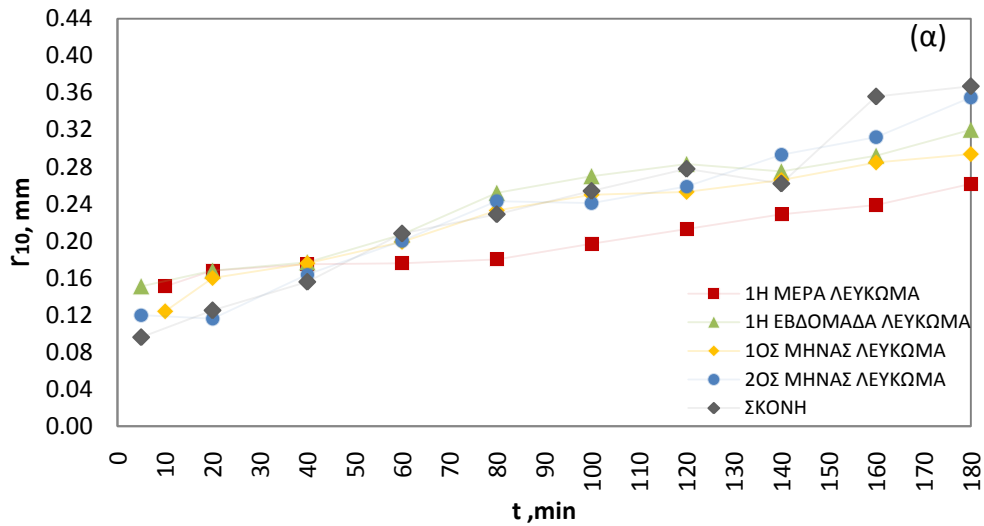


φυσαλίδων δεν είναι κανονική αλλά ασύμμετρη και αλλάζει με την πάροδο του χρόνου (Barik & Roy, 2009).

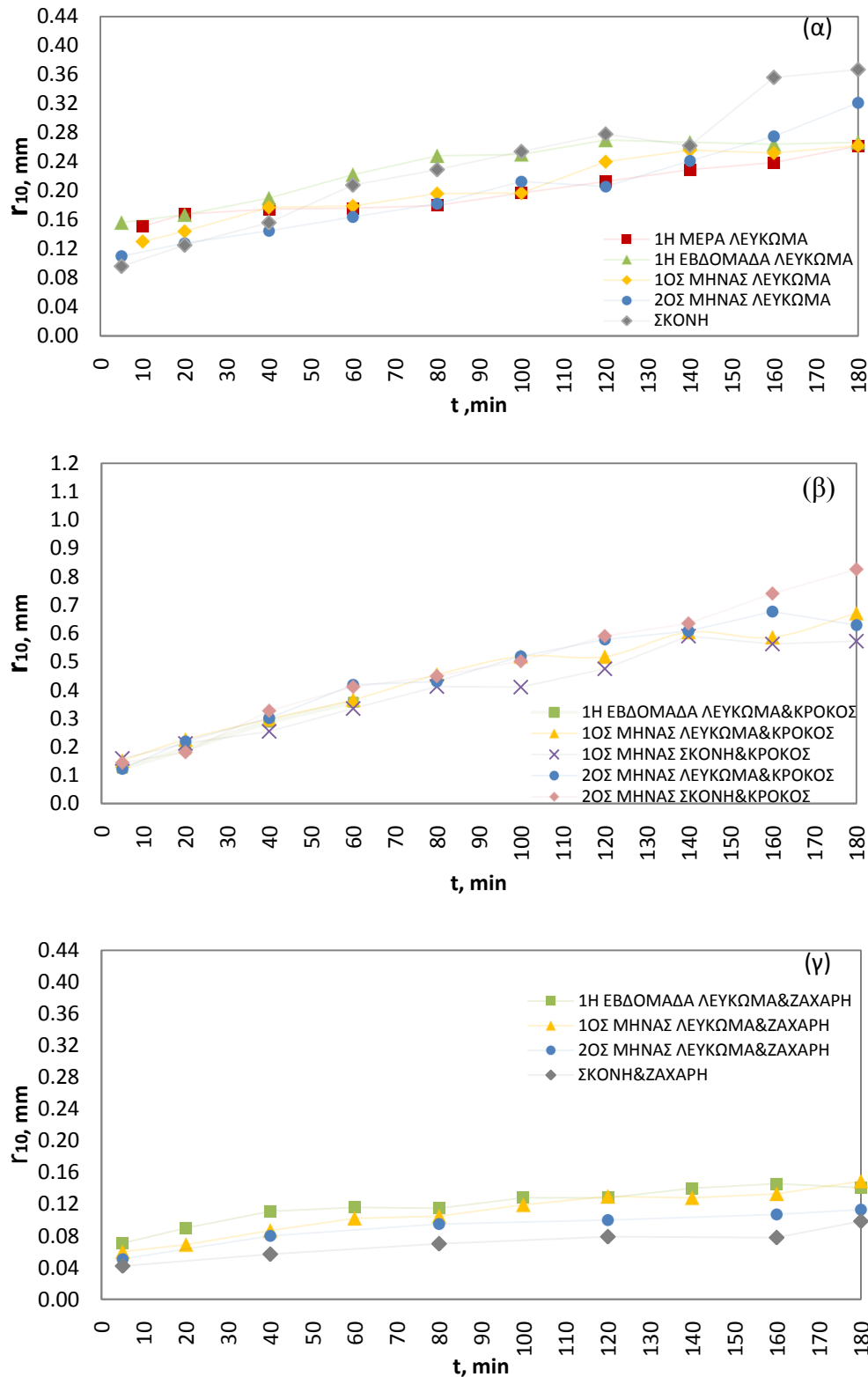
Στα Σχήματα 53 και 54 βρίσκονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής μέσης ακτίνας των φυσαλίδων των δειγμάτων ( $r_{10}$ ). Όπως είναι αναμενόμενο σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.3.3, όσο περνά ο χρόνος αποσταθεροποίησης, αυξάνεται η μέση ακτίνα των φυσαλίδων. Το λεύκωμα με την προσθήκη κρόκου παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση ακτίνας από όλα τα δείγματα [οι άξονες  $y$  είναι διαφορετικοί μεταξύ των Σχημάτων 53(α), 53(β), 53(γ) και το ίδιο ισχύει και στα Σχήματα 54]. Μάλιστα, αν και κατά το σχηματισμό του ο αφρός που περιέχει κρόκο έχει φυσαλίδες περίπου ίδιου μεγέθους με το λεύκωμα, μετά από χρόνο 3 ωρών γίνονται πολύ μεγαλύτερες. Αυτό οφείλεται στη δράση των λιπιδίων στη διεπιφάνεια όπως περιγράφηκε και στην Παράγραφο 5.3.1. Η αύξηση αυτή του μεγέθους των φυσαλίδων είναι ιδιαίτερα έντονη όταν αντί για νωπό λεύκωμα χρησιμοποιείται επανασυσταμένο λεύκωμα από σκόνη. Όπως περιγράφεται και στην Παράγραφο 5.3.3, αυτό αποδίδεται στο διαφορετικό ιξώδες και βαθμό υδρόλυσης των πρωτεϊνών της σκόνης. Αντίθετα, όπως φαίνεται και στην Παράγραφο 5.3.3 η προσθήκη ζάχαρης παρουσιάζει την μικρότερη μέση ακτίνα φυσαλίδων κατά το σχηματισμό του αφρού αλλά και μικρότερη αύξηση από όλα τα δείγματα, άρα και τα μικρότερα μεγέθη.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 53 και 54 με βάση τις θερμοκρασίες αποθήκευσης στους 20°C και 4°C δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές, απλά φαίνεται πιο αργό το φαινόμενο αύξησης της μέσης ακτίνας των φυσαλίδων με τον χρόνο αποσταθεροποίησης των συντηρημένων δειγμάτων στους 4°C απ' ό,τι στους 20°C, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Διαφορές παρατηρούνται και μεταξύ των δειγμάτων σκόνης και κρόκου όπου τα δείγματα κρόκου που συντηρήθηκαν στους 20°C για 1 και 2 μήνες εμφανίζουν μεγαλύτερες φυσαλίδες κυρίως μετά από 2 ώρες αποσταθεροποίησης σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που συντηρήθηκαν στους 4°C.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεταβολής της ακτίνας των αφρών (Σχήματα 53 και 54) με τα αποτελέσματα της μεταβολής του όγκου του αφρού και του αποστραγγιζόμενου υγρού (Σχήματα 30 έως και 33) παρατηρούμε πως η αποστράγγιση των αφρών από λεύκωμα, λεύκωμα και κρόκο και λεύκωμα και ζάχαρη έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 53: Μεταβολή της αριθμητικής μέσης ακτίνας φυσαλίδων ( $r_{10}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα (α) λευκώματος, (β) λευκώματος με προσθήκη κρόκου και (γ) λευκώματος με προσθήκη ζάχαρης, διαφορετικών χρόνων συντήρησης, στους 20°C.

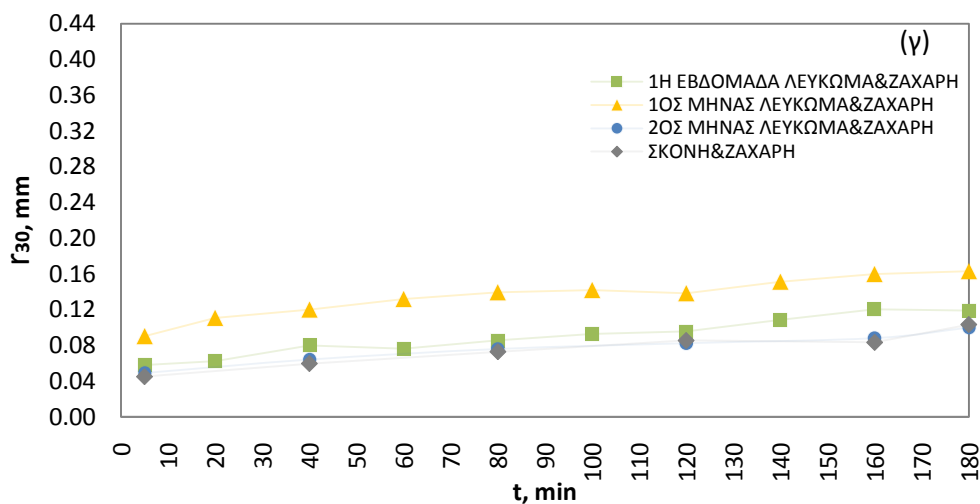
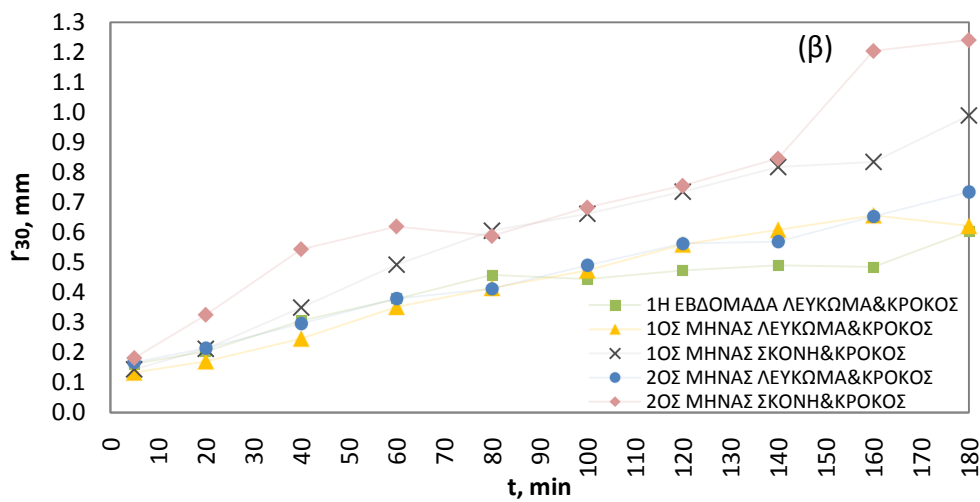
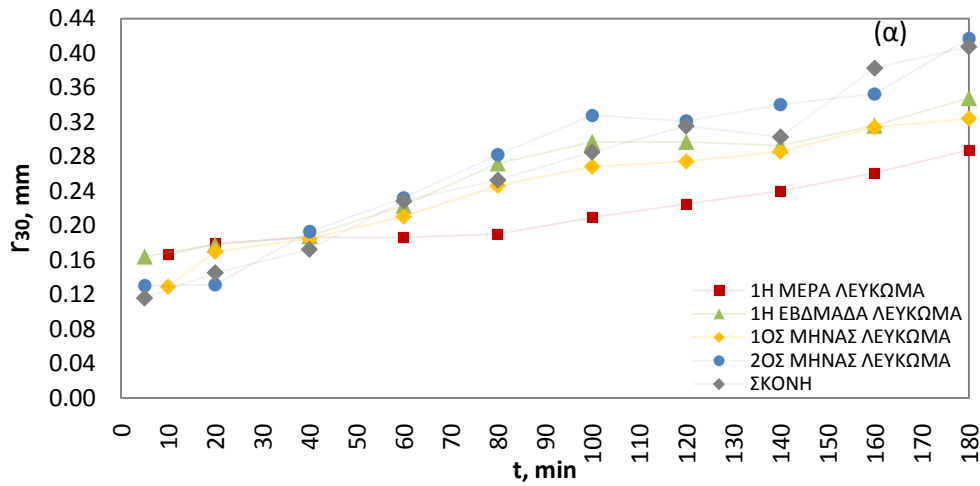


Σχήμα 54: Μεταβολή της αριθμητικής μέσης ακτίνας φυσαλίδων ( $r_{10}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα (α) λευκώματος, (β) λευκώματος με προσθήκη κρόκου και (γ) λευκώματος με προσθήκη ζάχαρης, διαφορετικών χρόνων συντήρησης, στους 4°C.

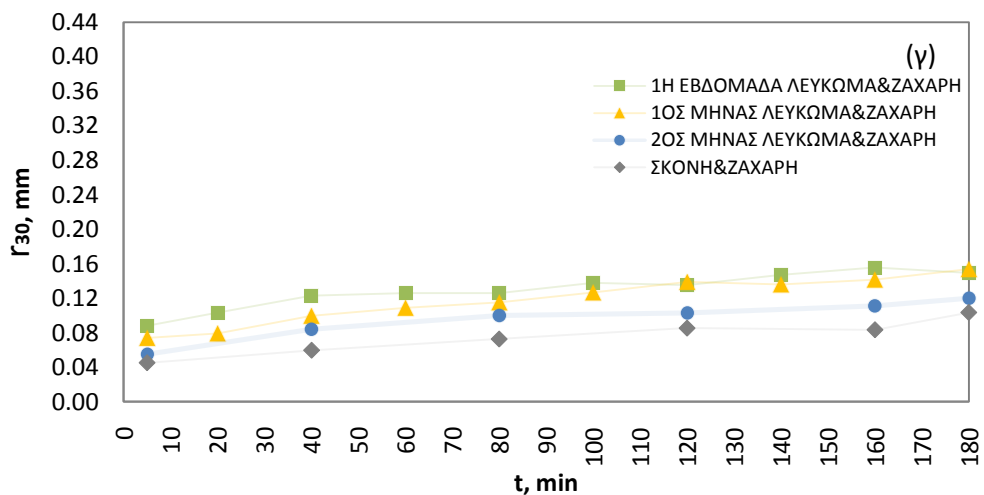
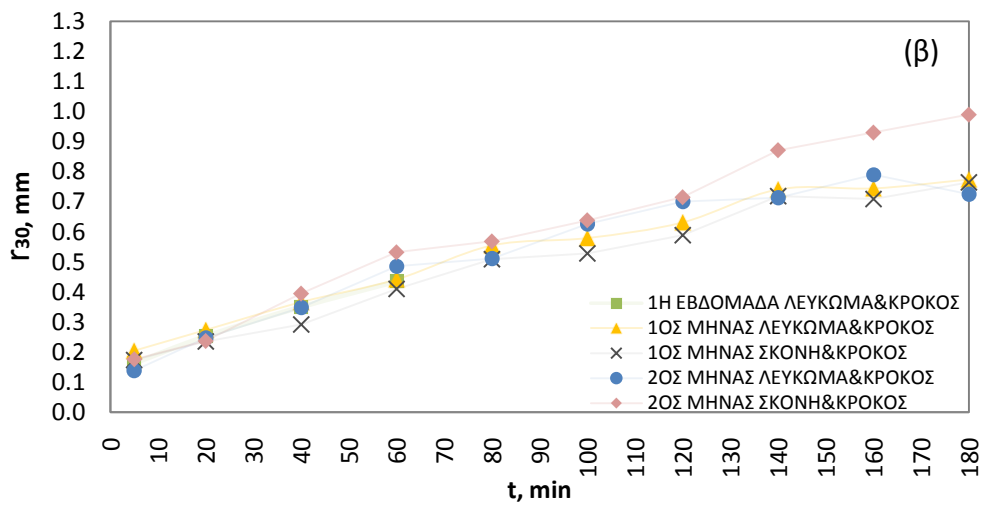
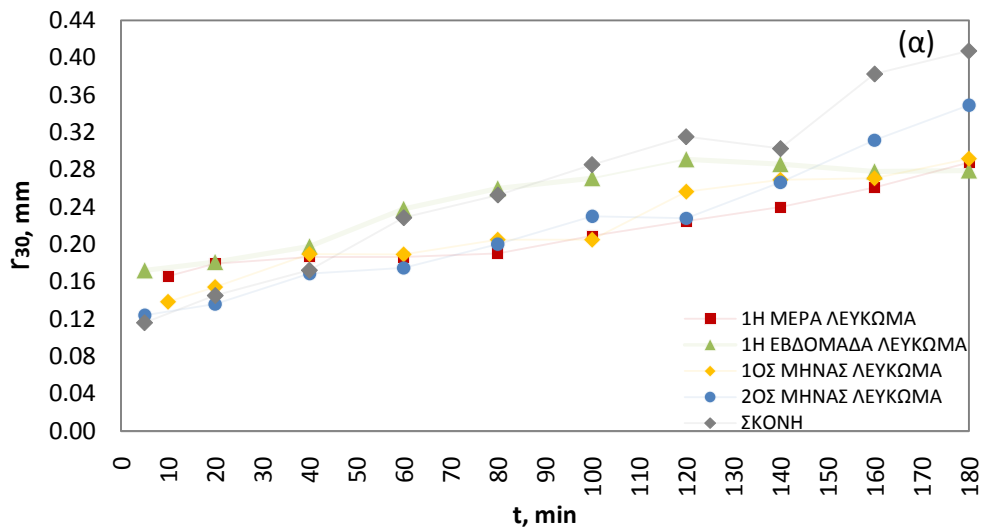
Στην περίπτωση των αφρών από λεύκωμα και από λεύκωμα και ζάχαρη παρατηρείται μείωση του όγκου του αφρού, αύξηση του όγκου του υγρού αποστάγγισης και αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων καθ' όλο τον χρόνο παρατήρησης των 3 ωρών. Αντίθετα στην περίπτωση των αφρών από λεύκωμα και κρόκο αν και πολύ σύντομα (στις περισσότερες περιπτώσεις σε χρόνο < 1 ώρα) ο όγκος του αφρού και του υγρού σταθεροποιείται τα μεγέθη των φυσαλίδων μεταβάλλονται σημαντικά.

### **5.3.6 Μεταβολή της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων**

Στα Σχήματα 55 και 56 παρουσιάζεται η μεταβολή της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης σε δείγματα αφρών λευκώματος νωπού αβγού, λευκώματος και κρόκου, λευκώματος και ζάχαρης καθώς και σε δείγματα αφρού που σχηματίστηκαν από επανασυσταμένη σκόνη λευκώματος. Όπως είναι αναμενόμενο και από τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.3.4 παρατηρείται ότι όσο περνάει ο χρόνος αποσταθεροποίησης, αυξάνεται η ακτίνα του μέσου όγκου των φυσαλίδων. Μεγαλύτερη ακτίνα μέσου όγκου λοιπόν, καταλαμβάνουν τα δείγματα στα οποία έχει προστεθεί κρόκος, ενώ τον μικρότερο εμφανίζουν τα δείγματα στα οποία έχει προστεθεί ζάχαρη. Γενικά τα αποτελέσματα της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων ακολουθούν τις τάσεις που παρατηρήθηκαν για τη μέση ακτίνα των φυσαλίδων (Παράγραφος 5.3.5).



Σχήμα 55: Μεταβολή της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων ( $r_{30}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα (α)λευκώματος, (β) λευκώματος με προσθήκη κρόκου και (γ) λευκώματος με προσθήκη ζάχαρης, διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους 20°C.



Σχήμα 56: Μεταβολή της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων ( $r_{30}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα (α) λευκώματος, (β) λευκώματος με προσθήκη κρόκου και (γ) λευκώματος με προσθήκη ζάχαρης, διαφορετικών χρόνων συντήρησης, αποθηκευμένα στους  $4^{\circ}\text{C}$ .

## 6. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν πως η θερμοκρασία και ο χρόνος συντήρησης καθώς και η προσθήκη κρόκου και ζάχαρης επηρέασαν τόσο τις φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του λευκώματος αβγού όσο και τις ιδιότητες των αφρών.

Το pH του λευκώματος αυξήθηκε κατά την συντήρηση των αβγών με μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης στη θερμοκρασία των 20°C ενώ μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη κρόκου και ζάχαρης.

Ενδιαφέροντα αποτελέσματα προέκυψαν κατά την μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς του λευκώματος του αβγού συναρτήσει του χρόνου συντήρησης που δεν έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Συγκεκριμένα η ρεολογική συμπεριφορά αν και ψευδοπλαστική στο νωπό αβγό μετατράπηκε σε νευτώνεια με την πάροδο του χρόνου συντήρησης στους 20°C. Η αλλαγή αυτή ρεολογικής συμπεριφοράς δεν παρατηρήθηκε κατά την συντήρηση στους 4°C. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση του φαινομενικού ιξώδους κατά την συντήρηση των αβγών. Ενώ η προσθήκη ζάχαρης αύξησε σημαντικά το ιξώδες.

Αντίθετα από το ιξώδες η δυναμική διεπιφανειακή τάση υγρού/ αέρα δεν επηρεάστηκε σημαντικά από το χρόνο συντήρησης. Η προσθήκη ζάχαρης μείωσε το ρυθμό μείωσης της διεπιφανειακής τάσης συναρτήσει του χρόνου λόγω της επίδρασής της στο ιξώδες του υγρού άρα και στη διάχυση των πρωτεϊνών στην μάζα του υγρού. Επίσης η προσθήκη κρόκου προκάλεσε μείωση της τιμής της διεπιφανειακής τάσης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα κάτι που αποδόθηκε στην παρουσία λιπιδίων.

Σε ό,τι αφορά τις ιδιότητες των αφρών παρατηρήθηκε αύξηση της ικανότητας αφρισμού συναρτήσει του χρόνου συντήρησης και στις δύο θερμοκρασίες αποθήκευσης κάτι που αποδόθηκε στις σημαντικές μεταβολές του φαινομενικού ιξώδους. Η προσθήκη ζάχαρης προκάλεσε μείωση της αφριστικής ικανότητας για τις ίδιες συνθήκες αφρισμού κάτι που επίσης αποδόθηκε κατά κύριο λόγο στην επίδρασή της στο ιξώδες ενώ η δράση της ζάχαρης στην δυναμική διεπιφανειακή τάση ενδεχομένως να παίζει κάποιο ρόλο.

Η προσθήκη κρόκου προκάλεσε επίσης μείωση της αφριστικής ικανότητας η οποία αποδόθηκε κυρίως στην αποσταθεροποιητική δράση των λιπιδίων στις διεπιφάνειες.

Σε ό,τι αφορά τη σταθερότητα των αφρών τα αποτελέσματα των ογκομετρικών μετρήσεων αλλά και των μετρήσεων μεγεθών των φυσαλίδων έδειξαν πως με την πάροδο του χρόνου συντήρησης των αβγών ο ρυθμός αποσταθεροποίησης των αφρών αυξάνει, κάτι που μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στην μείωση του ιξώδους η οποία αυξάνει το ρυθμό αποστράγγισης του υγρού μέσα από το σύστημα του αφρού. Παράλληλα όμως, ορισμένες μεταβολές στις πρωτεΐνες του λευκώματος (π.χ. υδρόλυση) αν και δεν προκάλεσαν σημαντικές μεταβολές στη δυναμική διεπιφανειακή τάση που συμβαίνουν κατά τη συντήρηση των αβγών, αναμένεται να επιδρούν σε ορισμένες ιδιότητες της διεπιφάνειας που δεν μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία (ρεολογικές ιδιότητες της διεπιφάνειας) και ενδεχομένως να παίζουν το ρόλο τους στη σταθερότητα των συστημάτων αυτών. Έτσι απαιτείται περισσότερη μελέτη προς την κατεύθυνση αυτή.

Η προσθήκη του κρόκου επίσης προκάλεσε μείωση της σταθερότητας των αφρών κάτι το οποίο αποδίδεται στην επίδραση των λιπιδίων του κρόκου στις ιδιότητες της διεπιφάνειας υγρού/αέρα.



## 7. Βιβλιογραφία

- Alleoni A.C.C., Antunes A.J. (2004). Albumen foam stability and s-ovalbumin contents in egg coated with whey protein concentrate. *Brazilian Journal of Poultry Science*, **6(2)**, 105-110.
- Ball H.R., Winn J.R., Winn S.E. (1982). Acylation of egg white proteins with acetic and succinic anhydride. *Poultry Science*, **61**, 1041-1046.
- Baniel A., Fains A., Popineau Y. (1997). Foaming properties of egg albumen with a bubbling apparatus compared with whipping. *Journal of Food Science*, **62(2)**, 377-381.
- Barik T.K., Roy A. (2009). Statistical distribution of bubble size in wet foam. *Chemical Engineering Science*, **64**, 2039-2043.
- Belitz H.-D., Grosch W., Schieberle P. (2006). Χημεία Τροφίμων, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Berry T.K. (2008). Unpublished data. Foaming properties, interfacial properties, and foam microstructure of egg white protein and whey protein isolate, alone and in combination. Μεταπτυχιακή Εργασία, Κρατικό Πανεπιστήμιο, North Carolina.
- Calvert J.R., Nezhati K. (1987). Bubble size effects in foams. *International Journal of Heat and fluid flow*, **8(2)**, 102-106.
- Cunningham F.E. Cotterill O.J., Funk E.M. (1960). The effect of the season and age of bird 3. On the performance of egg white in angel cake. *Poultry Science*, **39**, 1446-1450.
- Dagleish D. (1994). Food emulsions and foams. In: *Interfaces, interactions and stability*, 1<sup>st</sup> edition, (Eds Dickinson G., Patino R.J.M.), pp 240-232, Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Damodaran S., Ananed K., Razumovsky L. (1998). Competitive adsorption of egg white proteins at the air-water interface: Direct evidence for electrostatic complex formation between lysozyme and other egg proteins at the interface. *Journal of Food Science*, **46**, 872-876.

- Davis J.P., Foegeding E.A. (2007). Comparisons of the foaming and interfacial properties of whey protein isolate and egg white proteins. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **54**, 200-210.
- Dluzewski M., Dluzewska E., Kwasek L. (1994). Comparison of foaming properties by the volumetric and conductometric methods. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, **3**, 155-164.
- Donovan J.W., Mapes C.J., Davis J.G., Garibaldi J.A. (1975). A differential scanning calorimetric study of the stability of egg white to heat denaturation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **26**, 73–83.
- Engelsen C.W., Isarin J.C., Gooijer H., Warmoeskerken M.M.C.G., Wassink J.G. (2002). Bubble size distribution of foam. *AUTEX Research Journal*, **2(1)**, 14-27.
- Foegeding E.A., Luck P.J., Davis J.P. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, **20**, 284-292.
- Gilbert A. B. (1971). The egg: its physical and chemical aspects. In: *Physiology and Biochemistry of the Domestic Fowl* (Eds Bell D.J., Freeman B.M.), pp 1379-1399, Academic Press, New York.
- Hammershøj M., Peters L.V., Andersen H.J. (2004). The significance of critical processing steps on the production of dried egg albumen powder on gel textural and foaming properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **84**, 1039-1048.
- Hammershøj M., Prins A., Qvist K.B. (1999). Influence of pH on surface properties of aqueous egg albumen solutions in relation to foaming behavior. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **79**, 859-868.
- Hammershøj M., Qvist K.B. (2001). Importance of hen age and egg storage time for egg albumen foaming. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, **34**, 118-120.
- Hardy P. (1985). The protein amino acids. In: *Chemistry and Biochemistry of the Amino Acids*, (Ed Barrett G.C.), pp 6-24, Chapman Hall Ltd, Inc., London.
- Hatta H., Hagi T., Hirano K. (1997). Chemical and physicochemical properties of hen eggs and their application in foods. In: *Hen Eggs*,

(Eds Yamamoto T., Junea L.R., Hatta H., Kim M.), pp 117-134, CRC Press, Boca Raton.

- Hayakawa S., Kondo H., Nakamura R., Sato Y. (1983). Effect of b-ovomucin on the solubility of a-ovomucin and further inspection of the structure of ovomucin complex in thick egg white. *Agricultural and Biological Chemistry*, **47**, 815-820.
- Iglesias E., Anderez J., Forgariini A., Salager J.L. (1995). A new method to estimate the stability of short-life foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **98(1-2)**, 167-174.
- Johnson T.M., Zabik M.E. (1981). Gelation properties of albumen proteins, singly and in combination. *Poultry Science*, **60**, 2071-2083.
- Kalogianni E.P. (2007). Physico-chemical and chemical changes during deep-frying of potatoes. (PhD Thesis). Lincoln University, Lincoln, UK.
- Kamateh S., Walandewi A., Deeth H. (2008). Relationship between surface tension, free fatty acid concentration and foaming properties of milk. *Food research International*, **41**, 623-629.
- Kato A., Hisham R.I., Watanabe H., Honma K., Kobayashi K. (1990). Structural and gelling properties of dry heated egg white proteins. *Journal Agriculture Food Chemistry*, **38(1)**, 32-37.
- Kato A., Ibrahim H.R., Nakamura S., Kobayashi K. (1994). New methods for improving the functionality of egg white proteins. In: *Egg Uses and Processing Technologies, New Developments*, (Eds Sim J.S., Nakai S.), pp 250-267, CAB International, Wallingford.
- KSV Instruments Manual (1998). CAM 200 Optical Contact Angle and Surface Tension Meter, Instruction.
- Lau C.K. and Dickinson E. (2005). Instability and structural change in an aerated system containing egg albumen and invert sugar. *Food Hydrocolloids*, **19(1)**, 111-121.

- Lechevalier V., Jeantet R., Arhaliass A., Legrand J., Nau F. (2007). Egg white drying: Influence of industrial processing steps on protein structure and functionalities. *Journal of Food Engineering*, **83**, 404-413.
- Li Chan E.C.Y., Nakai S. (1989). Biochemical basis for the properties of egg white, CRC Critical Reviews. *Poultry Biology*, **2**, 21-58.
- Li Chan E.C.Y., Powrie W.D., Nakai S. (1994). Chemistry of eggs and egg products. In: *Egg Science and Technology*, 4<sup>th</sup> edition, (Eds Stadelman W., Cotterill O.), pp109-136, Food Products Press, New York.
- Lomakina K., Míková K. (2006). A study of the factors affecting the foaming properties of egg white – a Review. *Czech Journal of Food Sciences*, **24(3)**, 110-118.
- MacDonnell R.R., Feeney R.E., Hanson H.L., Campbell A., Sugihara T.F. (1995). The functional properties of the egg white proteins. *Food Technology*, **9**, 49-53.
- Miller R., Makievski A. (2009). Sinterface Technologies. Volmerstr. 7, D-12489 Berlin, Germany.
- Mine Y. (1995). Recent advances in the understanding of egg white protein functionality. *Trends in Food Science & Technology*, **6**, 225-232.
- Murray B.S. (2007). Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **12(4-5)**, 232-241.
- Panta P.C. (1995). *Text book on egg and poultry technology*, pp 15-23, Vikas publishing house, Berlin.
- Parkinson T.L. (1966). The chemical composition of eggs. *Journal of Science of Food and Agriculture*, **17**, 101-111.
- Patino J.M.R., Sanchez C.C., Nino M.R.R. (2008). Implications of interfacial characteristics of food foaming agents in foam formulations. *Advances in Colloid and Interface Science*, **140**, 95–113.
- Pernell C.W., Foegeding E.A., Luck P.J., Davis J.P. (2002). Properties of whey and egg white protein foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **204(1)**, 9–21.

- Phianmongkhol A., Varley J. (1999). Colloids and Surfaces B. *Biointerfaces*, **12**, 247-259.
- Raikos V., Campbell L., Euston S.R. (2007a). Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins. *Food Research International*, **40**, 347-355.
- Raikos V., Campbell L., Euston S.R. (2007b). Rheology and texture of hen's egg protein heat-set gels as affected by pH and the addition of sugar and/or salt. *Food Hydrocolloids*, **21**, 237-244.
- Rizvi S.S.H., Mulvaney S.J., Sokhey A.S. (1995). The combined application of supercritical fluid and extrusion technology. *Trends in Food Science & Technology*, **6**, 0924-2244.
- Sanchez L., Perez M.D., Lavilla M., Conesa C., Calvo M. (2007). Effect of heat treatment on hen's egg ovomucoid. An immunochemical and calorimetric study. *Food Research International*, **40**, 603–612.
- Schafer A., Drewes W., Schwagele F. (1999). Effect of storage temperature and time on egg white protein. *Nahrung*, **43**, 86-89.
- Scholtyssek S.V., El-Bogdady A. (1980). Die gualität und insbesondere das schaubildungs vermögen von eiern aus unterschiedlichen herkünften und lagerungsbedingungen. *Archiv für Geflügelkunde*, **44**, 79-87.
- Stevens L., (1991). Egg White Proteins. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, **100B (1)**, 1-9.
- Stevenson P., Mantle M.D., Hicks J.M. (2007). NMR studies of the free drainage of egg white and meringue mixture froths. *Food Hydrocolloids*, **21**, 221-229.
- Van der Plancken I., Loey A.V., Hendrickx M. (2007). Foaming properties of egg white proteins affected by heat or high pressure treatment. *Journal of Food Engineering*, **78**, 1410-1426.
- Vincent R., Powrie W.D., Fennema O. (1966). Surface activity of yolk, plasma and dispersions of yolk fractions. *Journal of Food Science*, **31**, 643-648.

- Xu Z., Raphailidis S. (1998). Flow behavior of concentrated starch dispersions using a tube rheometer of novel design. *Journal of Texture studies*, **29**, 1-13.
- Yang S.C., Baldwin R.E. (1994). Foaming. In: *Egg Science and Technology*, 4<sup>th</sup> edition, (Eds Stadelman W., Cotterill O.), pp 418-434, Food Products Press, New York.
- Yang X., Foegeding E.A. (2010). Effects of sucrose on egg white protein and whey protein isolate foams: Factors determining properties of wet and dry foams (cakes). *Food Hydrocolloids*, **24**, 227-238.
- Zdzistaw E.S. (2001). *Chemical and functional properties of food proteins*, pp 335-352, Technomic Publishing Company, Westport Connecticut.
- Ζωγραφάκης Α., Μητολίδης Χ. (2008). Μη δημοσιευμένη εργασία. Επίδραση του χρόνου συντήρησης στη μεταβολή της νωπότητας των αβγών όρνιθας, σε φυσικό περιβάλλον (20°C) και σε ψύξη (4°C), Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
- Καλογιάννη Ε. (2008). Σημειώσεις του εργαστηρίου Μηχανική Τροφίμων 1, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης.
- Κυρανάς Ε. (2000). Αρχές παρασκευής τροφίμων, pp 16-23, 57-67, Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, Θεσσαλονίκη.
- Παναγιώτου Κ. (1998). Διεπιφανειακά φαινόμενα και κολλοειδή συστήματα, Β' έκδοση, pp 359-361, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Πετρίδης Δ. (2000). Εφαρμοσμένη στατιστική με έμφαση στην επιστήμη των Τροφίμων, pp 23-24, Εκδόσεις Όμηρος, Θεσσαλονίκη.
- Πολυμενίδης Α. (1977). Τεχνολογία αβγών και πουλερικών, pp 81-117. Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, Αθήνα.

## 8. Παράρτημα

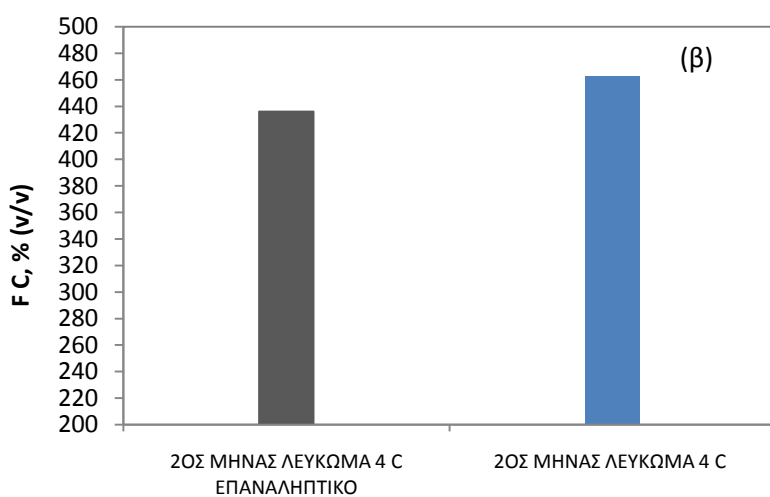
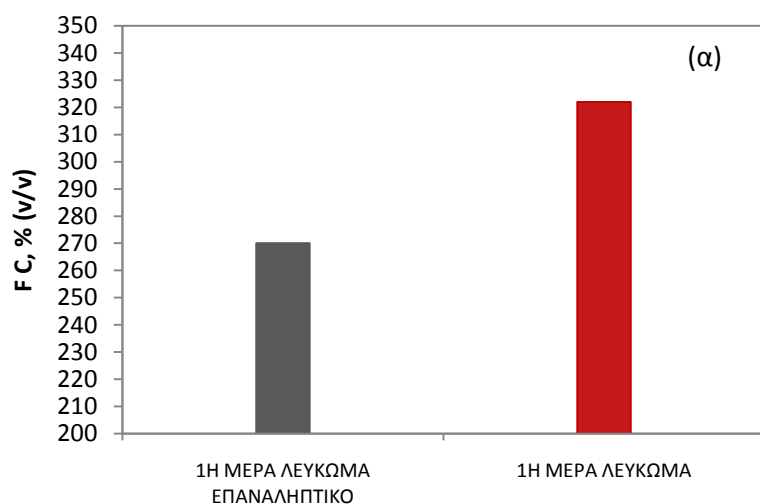
### 8.1 Διατροφικά χαρακτηριστικά ζωοτροφών.

	<b>ΩΟΤΟΚΙΑΣ ΕΓΚΛΟΒΙΣΜΟΥ</b>
<b>ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ</b>	<b>% Κ.Β.</b>
<b>ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ 8,5%</b>	36,0000
<b>ΣΙΤΑΡΙ ΣΚΛΗΡΑ ΕΝΖΥΜΑ</b>	20,0000
<b>ΠΙΤΥΡΑ</b>	8,8376
<b>ΦΥΤΙΚΟ ΛΙΠΟΣ ΥΓΡΟ</b>	2,0000
<b>ΣΟΓΙΑΛΕΥΡΟ 48%</b>	22,0000
<b>ΛΥΣΙΝΗ ΗC1</b>	0,0400
<b>D1-ΜΕΘΕΙΟΝΙΝΗ</b>	0,1200
<b>ΕΝΖΥΜΟ ΣΙΤΟΥ</b>	0,0050
<b>ΑΝΤΙΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟ ΣΚΟΝΗ</b>	0,0080
<b>ΑΛΑΤΙ</b>	0,3300
<b>ΚΑΡΟΦΥΛΛΗ ΚΟΚ.</b>	0,0040
<b>ΦΩΣΦΟΡΙΚΟ ΜΟΝΟΑΣΒΕΣΤΙΟ 22</b>	0,8000
<b>ΦΥΤΑΣΗ ΜΙΚ/ΚΗ ΝΑΤΥΡΗΟΣ</b>	0,0180
<b>ΜΑΡΜΑΡΟΣΚΟΝΗ</b>	9,2000
<b>ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗΣ</b>	0,5000
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Α/Δ3 1000/200</b>	0,0013
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Ε 50</b>	0,0060
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Κ3 50%</b>	0,0006
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Β1</b>	0,0002
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Β2 80%</b>	
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Β6</b>	0,0004
<b>ΒΙΤΑΜΙΝΗ Β12 1%</b>	0,0002
<b>ΝΙΑΣΙΝΗ</b>	0,0028
<b>ΒΙΟΤΙΝΗ 2%</b>	0,0002
<b>ΠΑΝΤΟΘΕΝΙΚΟ ΑΣΒΕΣΤΙΟ 90%</b>	0,0012
<b>ΦΟΛΙΚΟ ΟΞΥ 99%</b>	0,0001
<b>ΧΟΛΙΝΗ 60%</b>	0,0830
<b>ΟΞΕΙΔΙΟ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ 62%</b>	0,0200
<b>ΟΞΕΙΔΙΟ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ 78%</b>	0,0060
<b>ΘΕΙΪΚΟΣ ΧΑΛΚΟΣ 25%</b>	0,0016
<b>ΘΕΙΪΚΟ ΚΟΒΑΛΤΙΟ 20%</b>	0,0002
<b>ΙΩΔΙΟΥΧΟ ΚΑΛΙΟ/ΑΣΒΕΣΤΙΟ</b>	0,0003
<b>ΑΛΑΣ ΣΕΛΗΝΙΟΥ 1%</b>	0,0013
<b>ΘΕΙΪΚΟΣ ΣΙΔΗΡΟΣ 30%</b>	0,0120
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	100,0000

## 8.2 Ενδεικτικές επαναλήψεις

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικές επαναλήψεις για δείγματα νωπού λευκώματος της πρώτης ημέρας (α) και δύο μηνών συντήρησης στους 4°C (β).

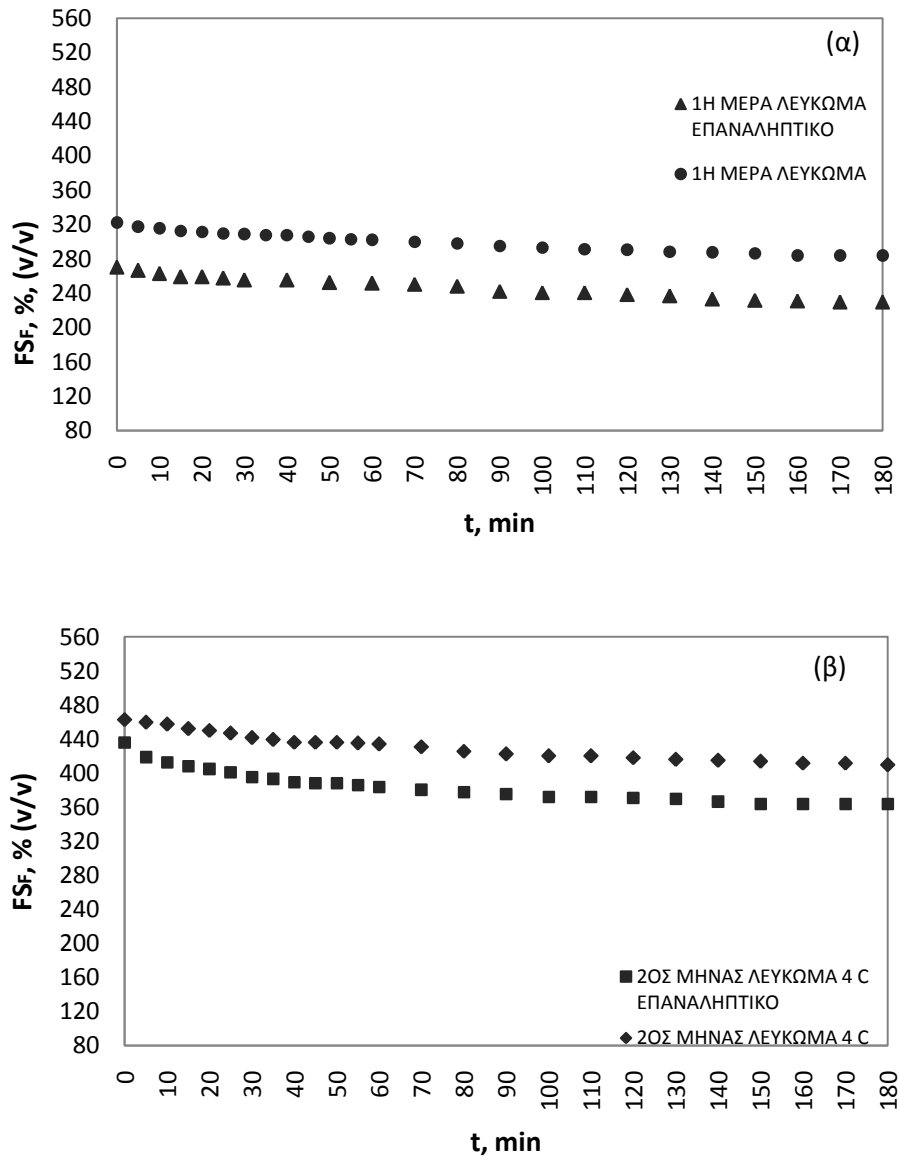
### 8.2.1 Αφριστική ικανότητα



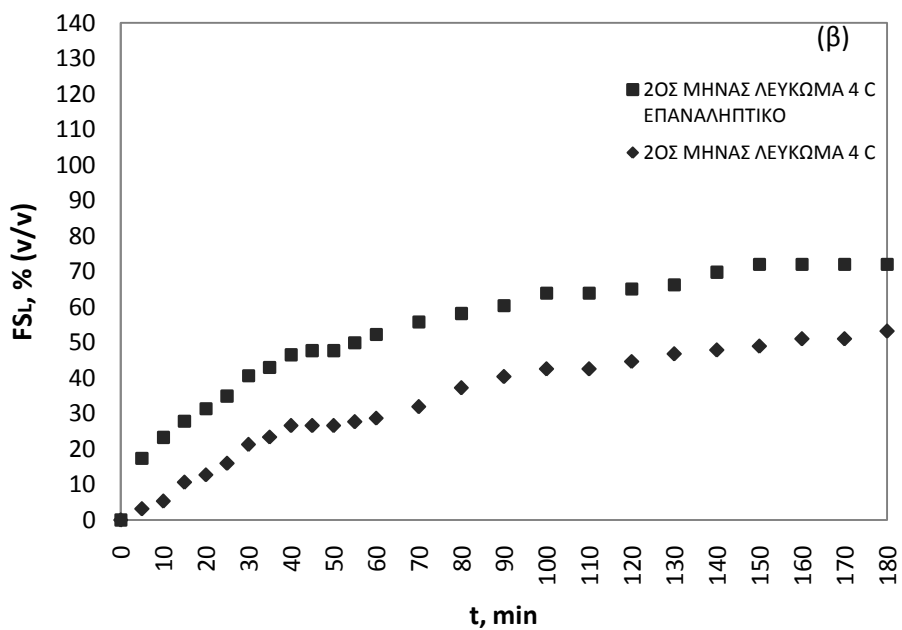
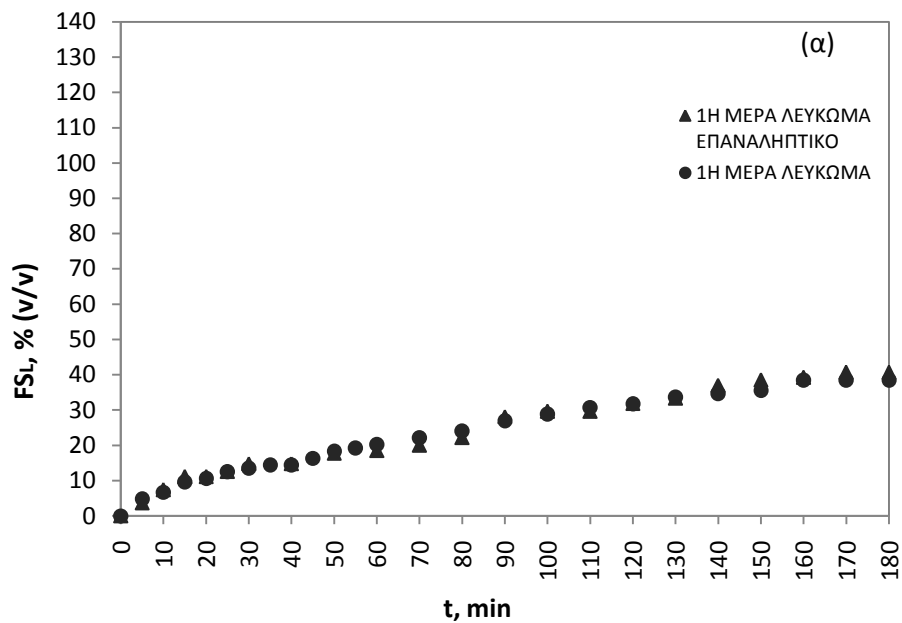
Σχήμα 1: Αφριστική ικανότητα (FC) συναρτήσεως του χρόνου συντήρησης σε δείγματα λευκώματος συντηρημένα (α) την πρώτη μέρα και (β) τον δεύτερο μήνα στους 4°C.



### 8.2.2 Σταθερότητα αφρού

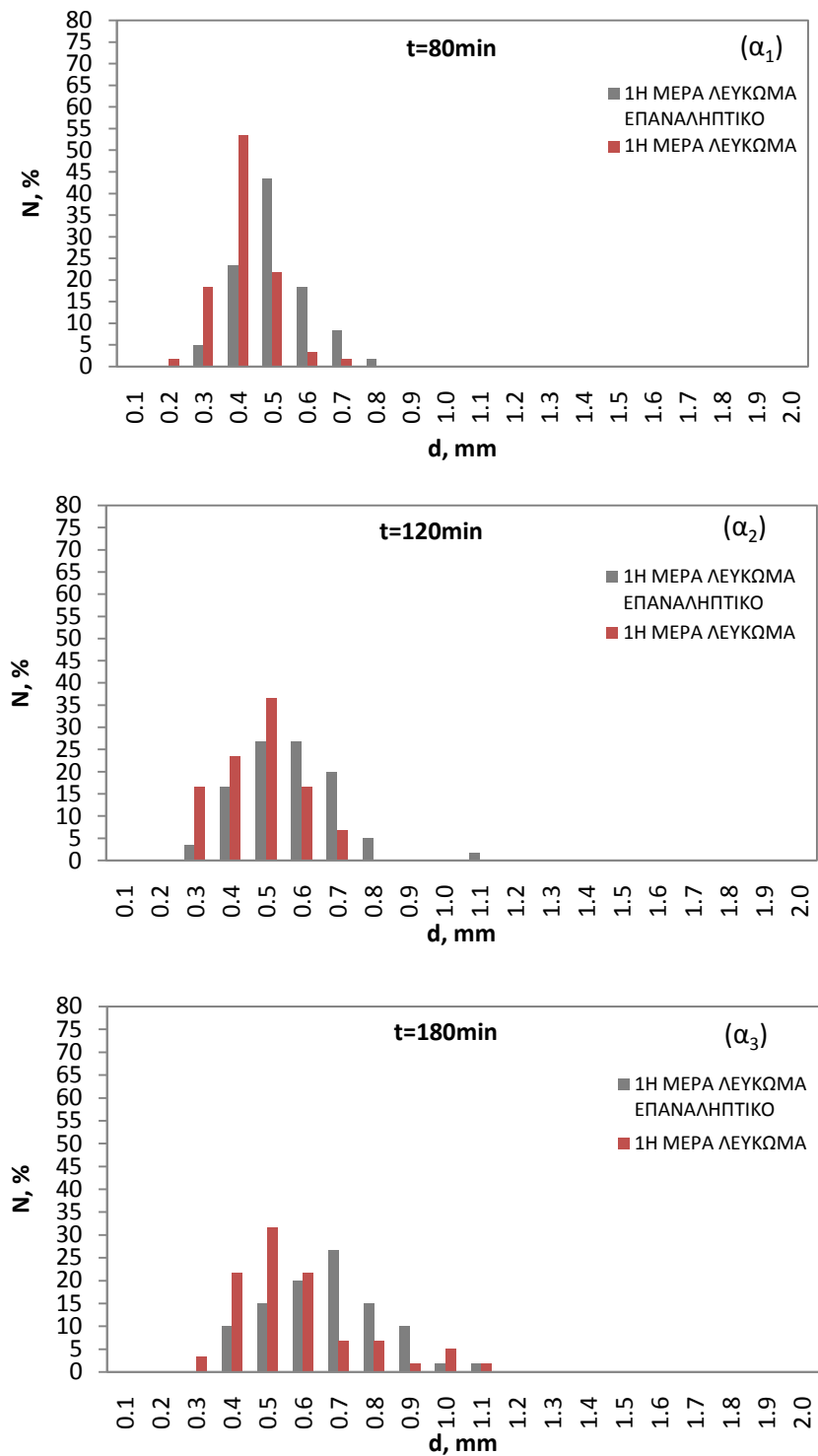


Σχήμα 2: Όγκος αφρού ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_F$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από λεύκωμα αβγού (α) την πρώτη μέρα και (β) τον δεύτερο μήνα στους  $4^{\circ}C$ .

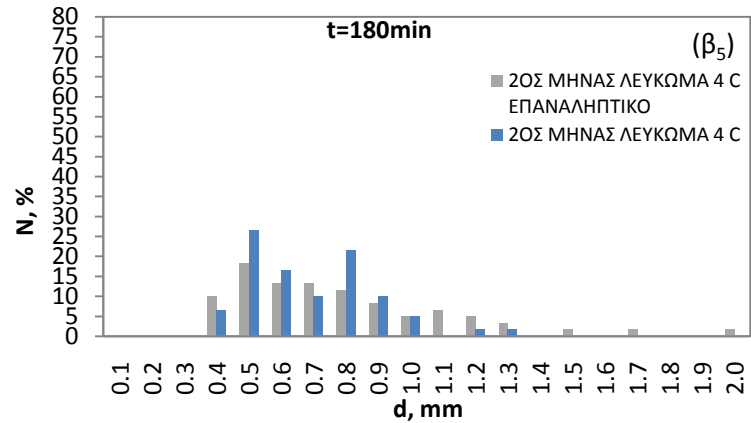
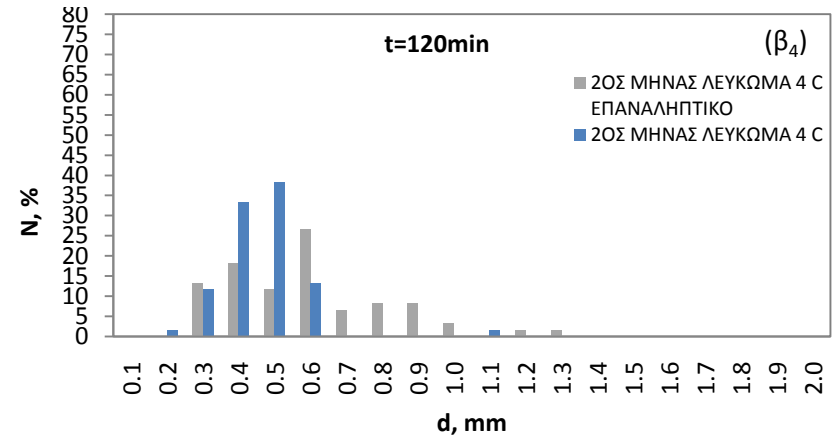
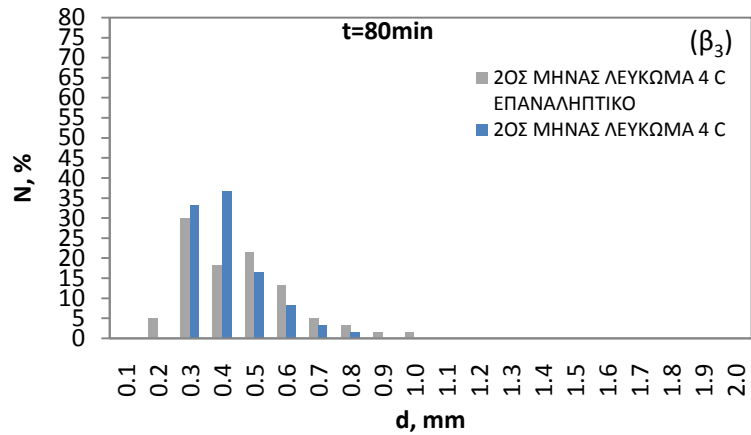
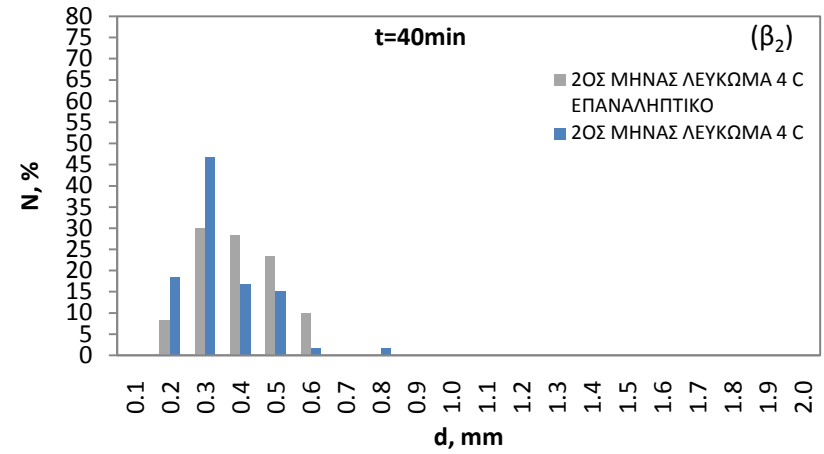
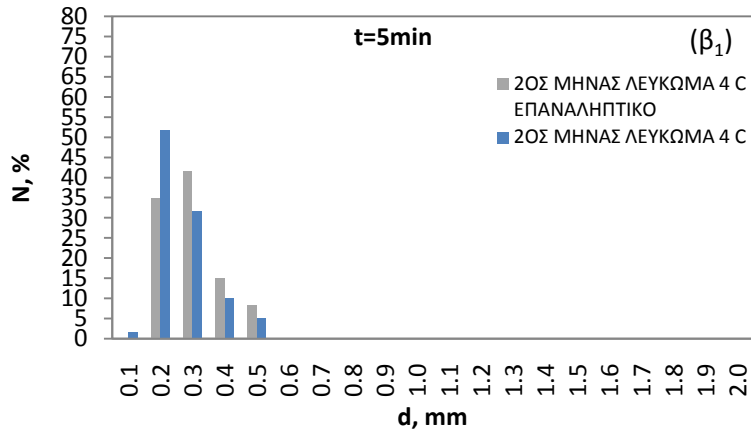


Σχήμα 3: Ο όγκος του υγρού που αποχωρίζεται από τον αφρό ως ποσοστό του αρχικού υγρού που χρησιμοποιήθηκε για αφρισμό ( $FS_L$ ) συναρτήσεως του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) για αφρούς που σχηματίστηκαν από λεύκωμα αβγού (α) την πρώτη μέρα και (β) τον δεύτερο μήνα στους  $4^{\circ}C$ .

### 8.2.3 Μέγεθος των φυσαλίδων

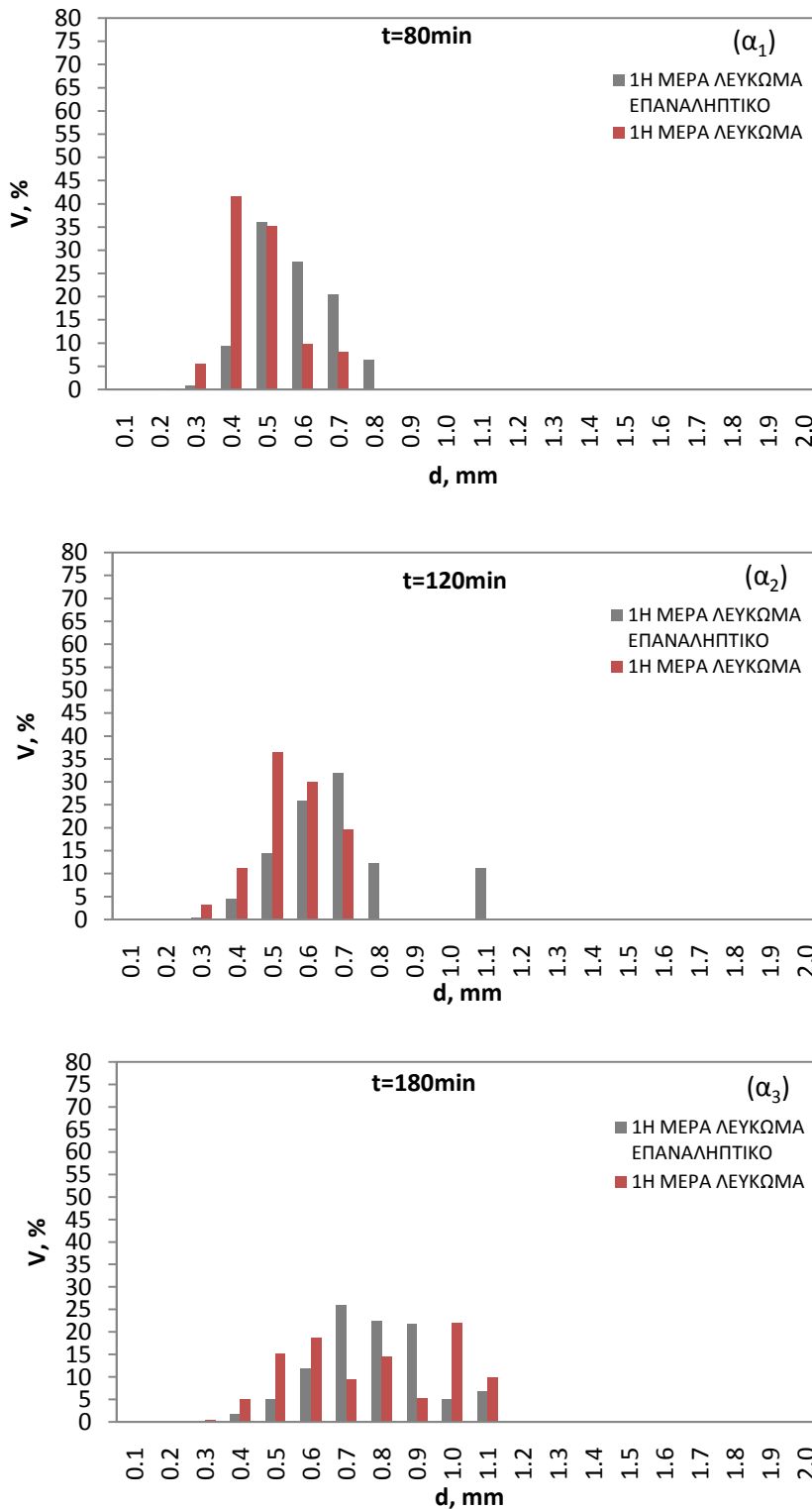


Σχήμα 4: Κατανομή αριθμού των φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) σε συστήματα αφρού που προέκυψαν από λεύκωμα αβγού και για χρόνους αποσταθεροποίησης (α<sub>1</sub>) 80min, (α<sub>2</sub>) 120min, (α<sub>3</sub>) 180min.

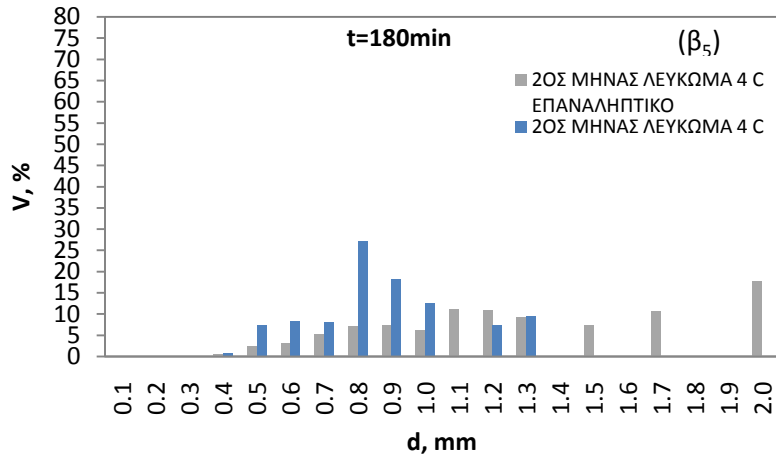
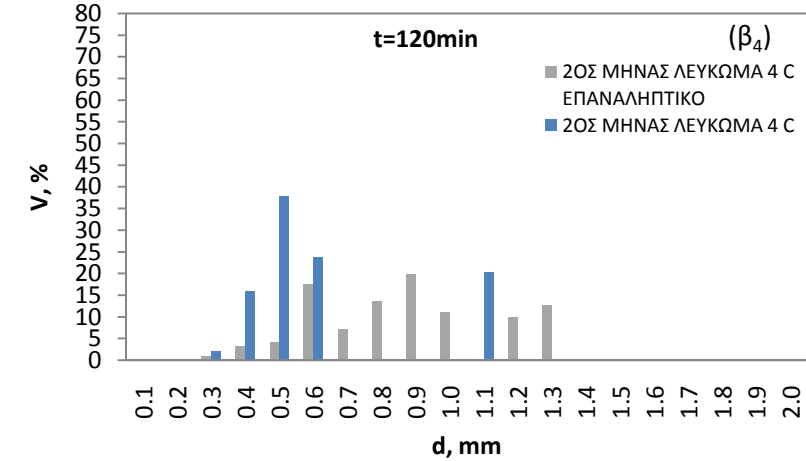
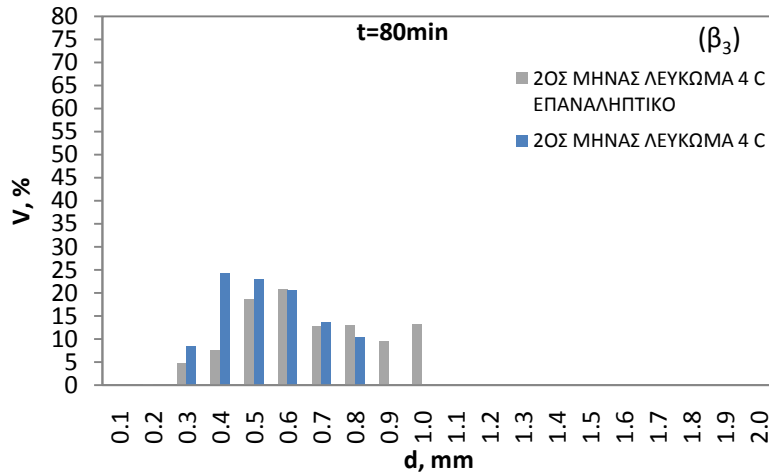
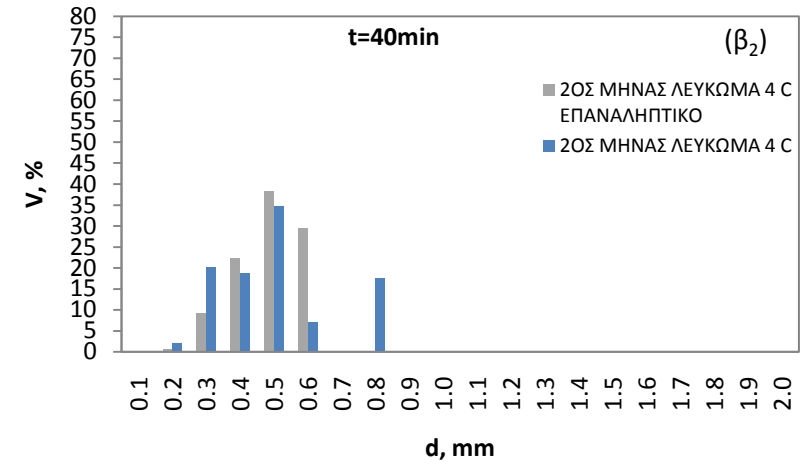
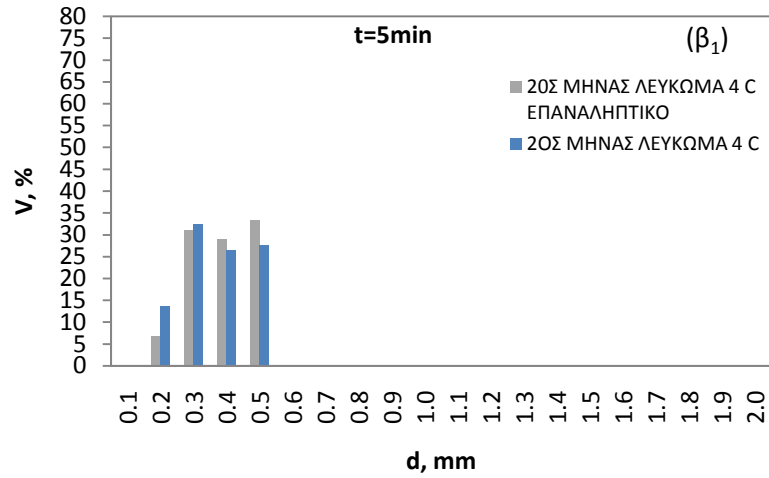


Σχήμα 5: Κατανομή αριθμού των φυσαλίδων (N) συναρτήσει της διαμέτρου τους (d) σε συστήματα αφρού που προέκυψαν από λεύκωμα αβγού και για χρόνους αποσταθεροποίησης (β<sub>1</sub>) 5min, (β<sub>2</sub>) 40min, (β<sub>3</sub>) 80min, (β<sub>4</sub>) 120min και (β<sub>5</sub>) 180min.

### 8.2.4 Όγκος που καταλαμβάνει ο αριθμός των φυσαλίδων

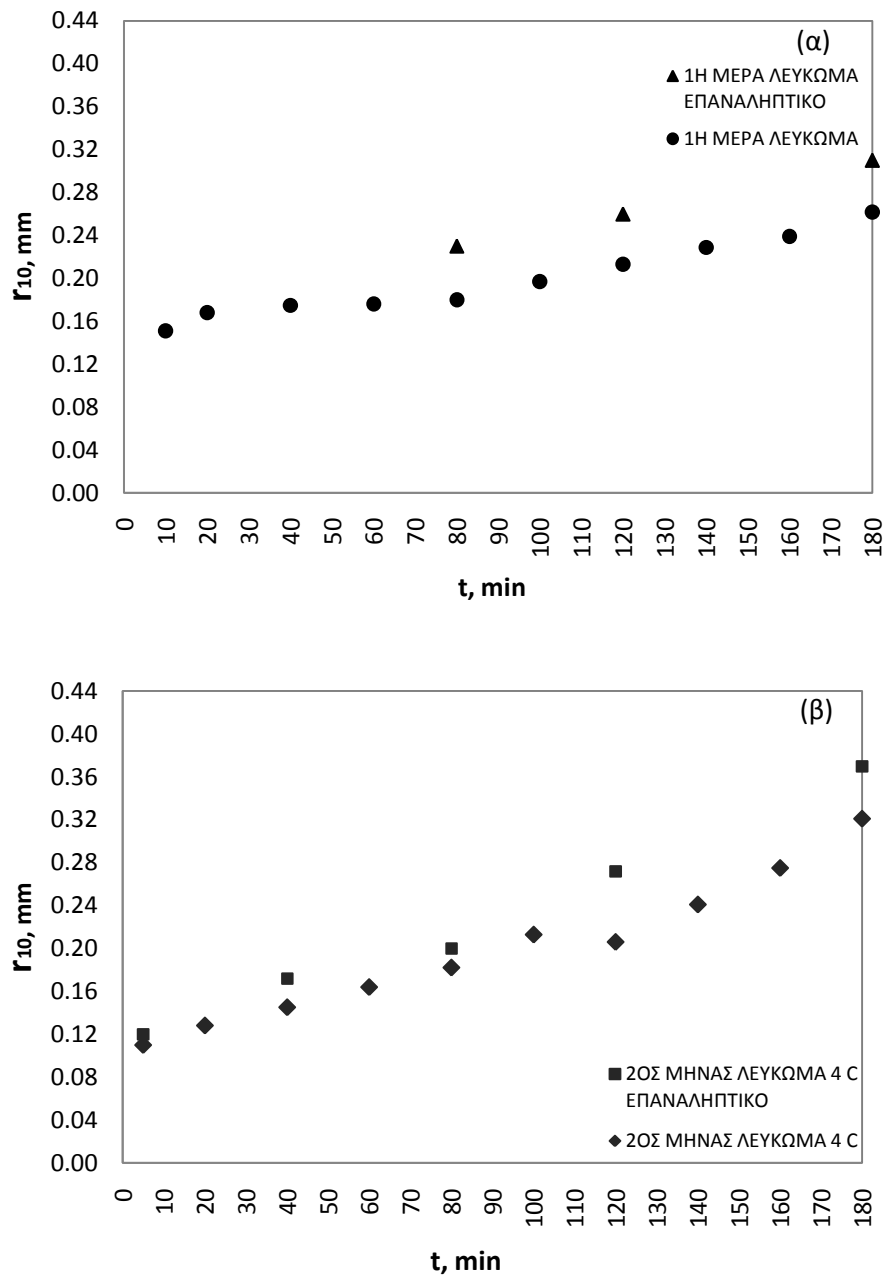


Σχήμα 6: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο της αέριας φάσης του αφρού σε σύστημα αφρού λευκώματος αβγού για χρόνους αποσταθεροποίησης ( $\alpha_1$ ) 80min, ( $\alpha_2$ ) 120min, ( $\alpha_3$ ) 180min.



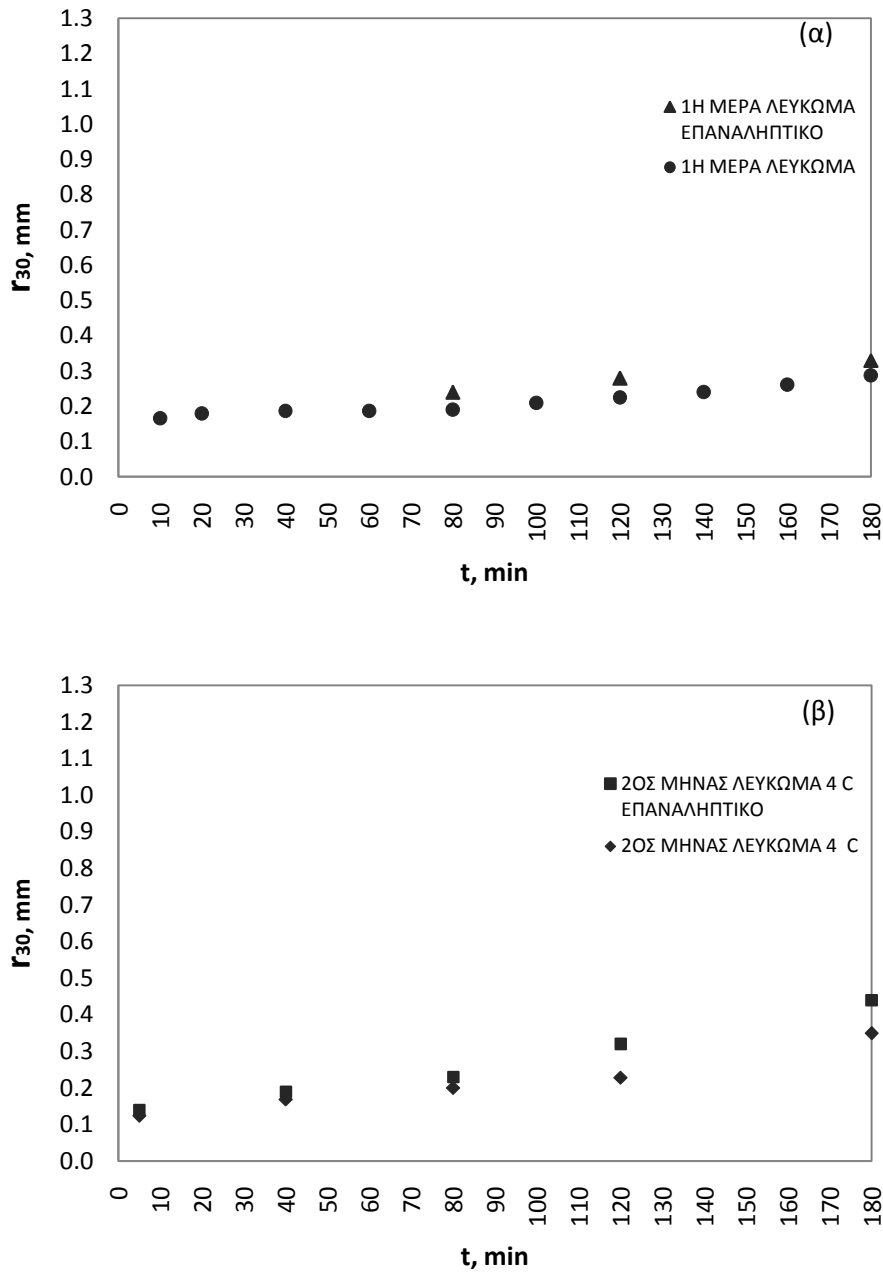
Σχήμα 7: Όγκος (V) που καταλαμβάνουν φυσαλίδες διαμέτρου (d) ως προς τον συνολικό όγκο της αέριας φάσης του αφρού σε σύστημα αφρού λευκώματος αβγού συντηρημένο για δύο μήνες στους 4°C για χρόνους αποσταθεροποίησης (β<sub>1</sub>) 80min, (β<sub>2</sub>) 120min, (β<sub>3</sub>) 180min.

### 8.2.5 Μέση αριθμητική ακτίνα των φυσαλίδων



Σχήμα 8: Μεταβολή της μέσης αριθμητικής ακτίνας φυσαλίδων ( $r_{10}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα λευκώματος, (α) της πρώτης μέρας και (β) συντηρημένα για 2 μήνες στους 4°C.

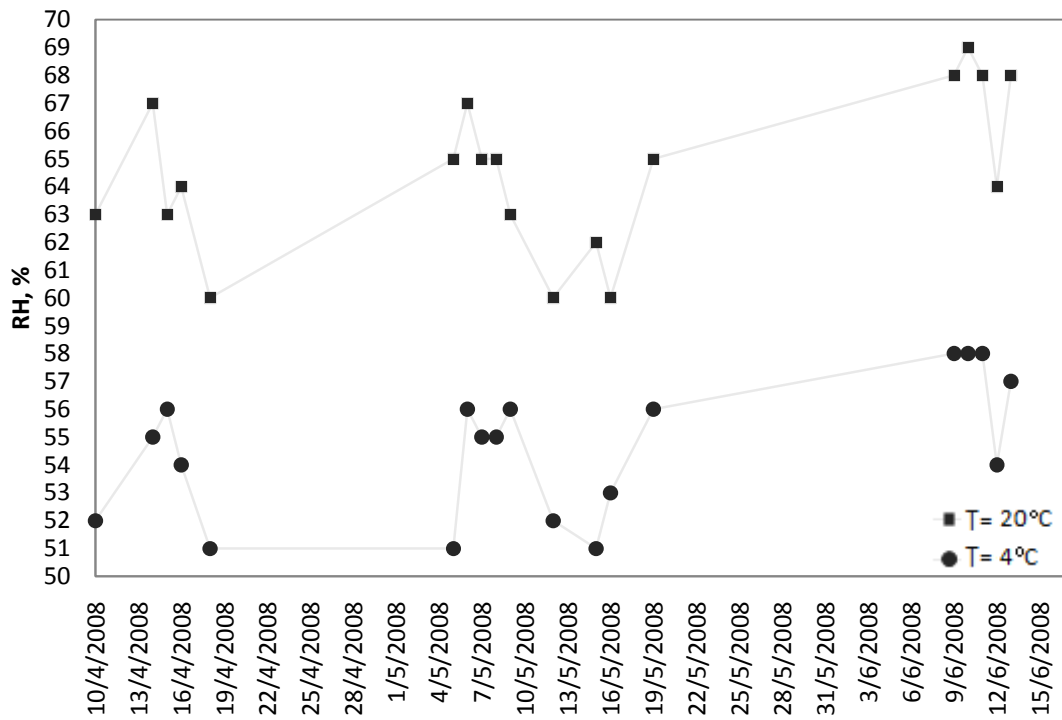
### 8.2.6 Ακτίνα του μέσου όγκου των φυσαλίδων



Σχήμα 9: Μεταβολή της ακτίνας του μέσου όγκου των φυσαλίδων ( $r_{30}$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα δείγματα λευκώματος, (α) της πρώτης μέρας και (β) συντηρημένα για 2 μήνες στους 4°C.

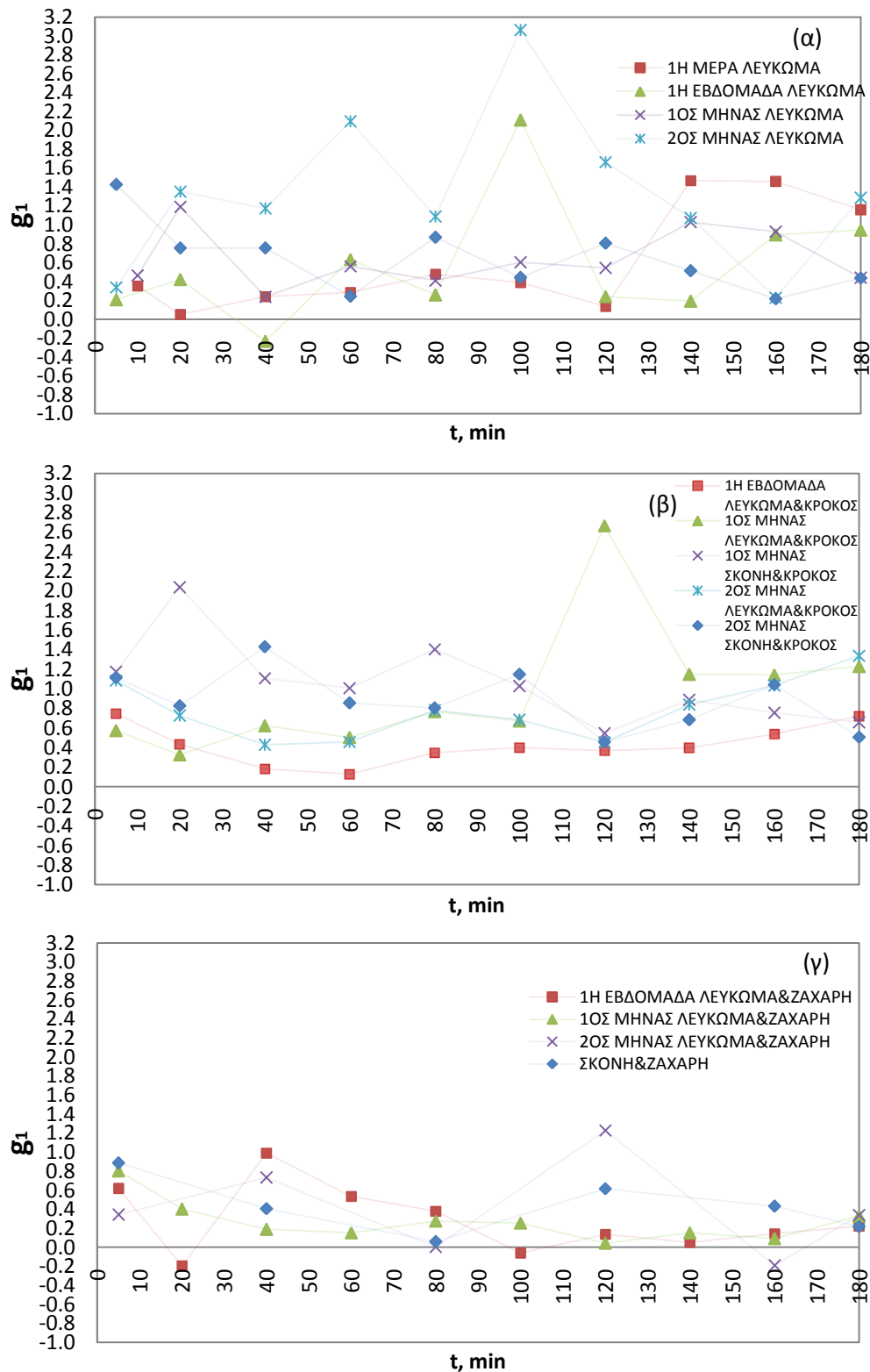


### 8.3 Μεταβολή της σχετικής υγρασίας

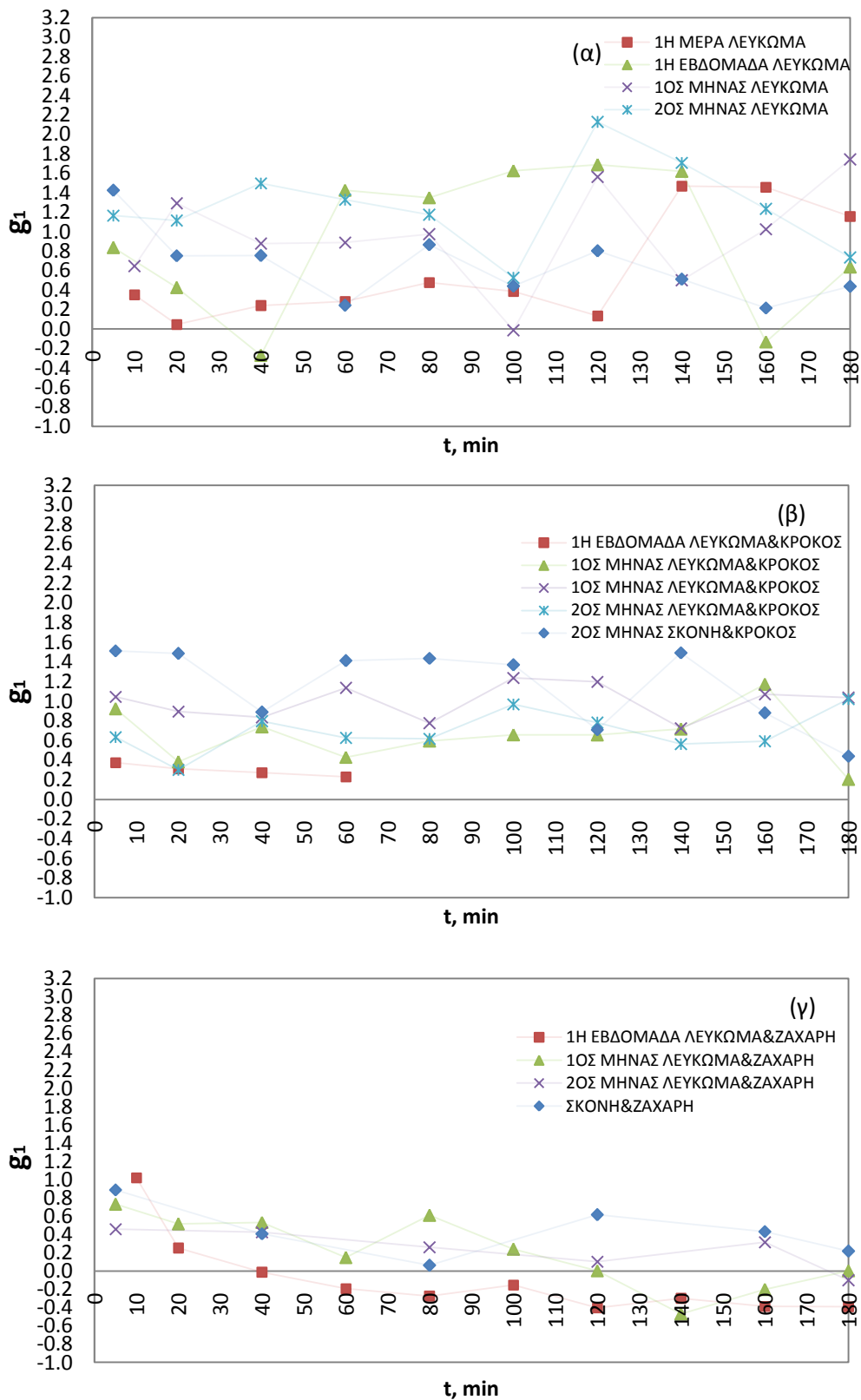


Σχήμα 10: Μεταβολή της σχετικής υγρασίας (RH) συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης (T) των δειγμάτων στους δύο θαλάμους συντήρησης των δειγμάτων στους 20°C και 4°C αντίστοιχα.

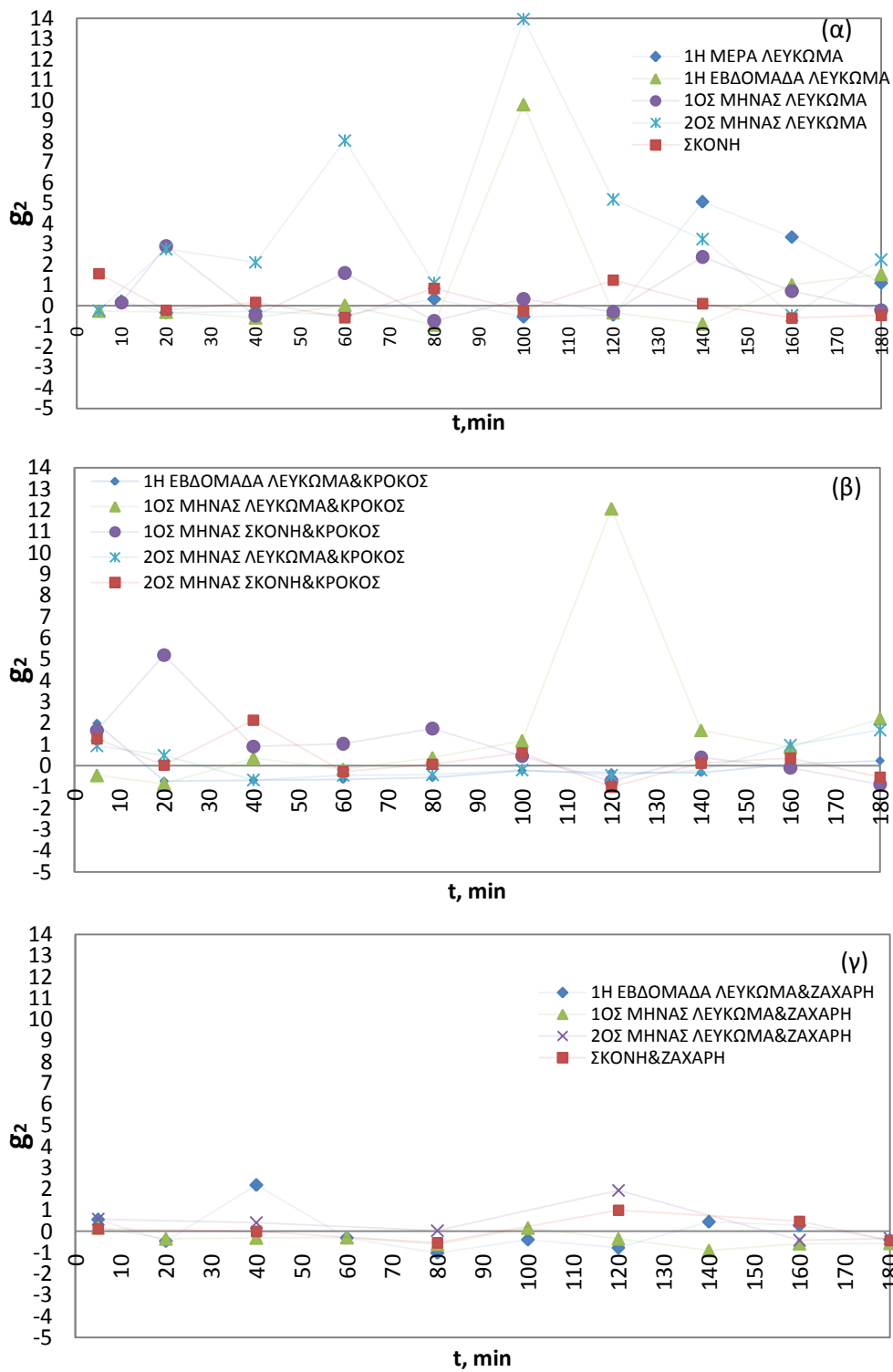
### 8.4 Ασυμμετρία και κύρτωση των ακτίνων των φυσαλίδων



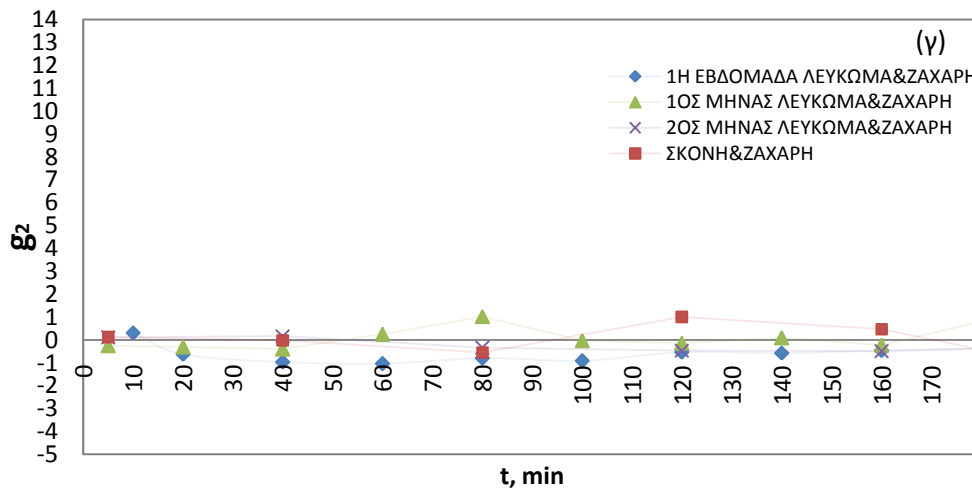
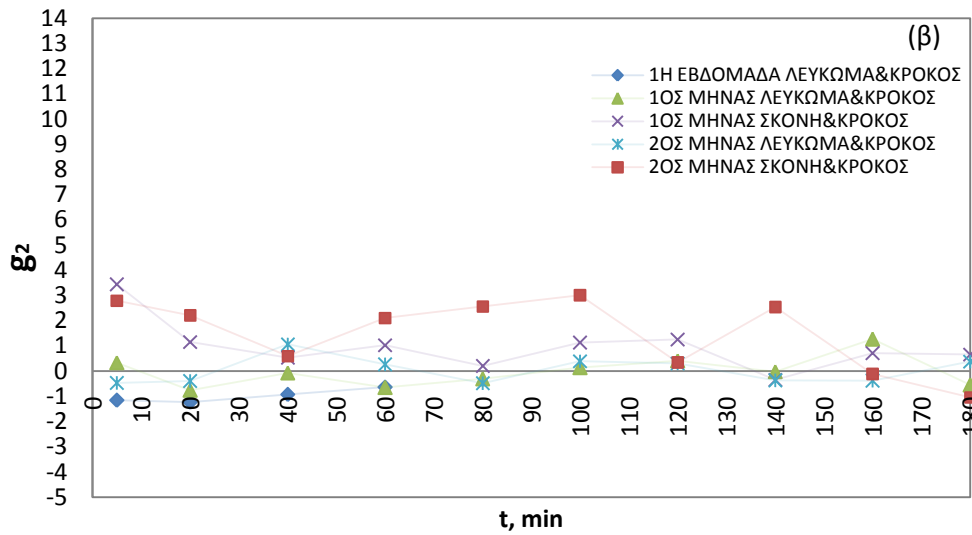
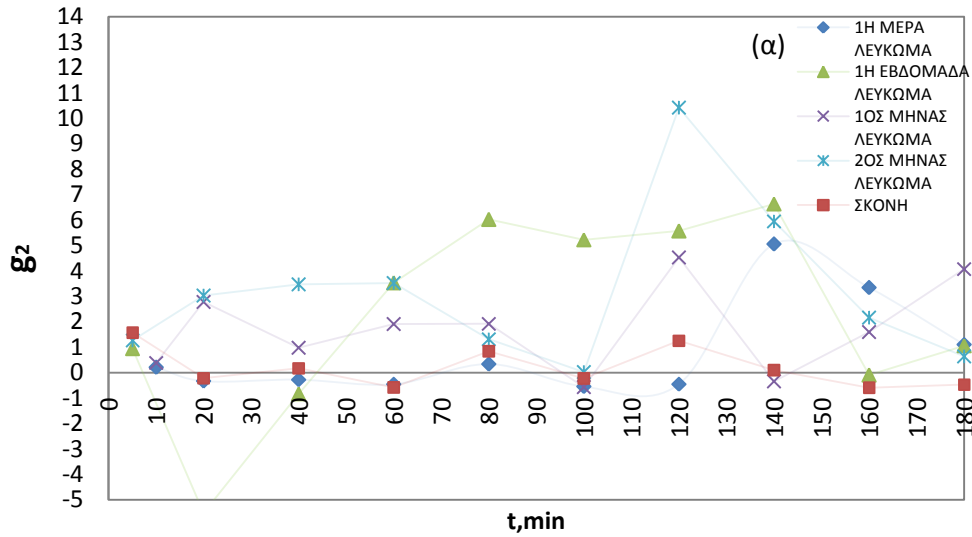
Σχήμα 11: Μεταβολή της ασυμμετρίας των ακτίνων των φυσαλίδων ( $g_1$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα συντηρημένα δείγματα (α) λευκώματος, (β) προσθήκης κρόκου και (γ) προσθήκη ζάχαρης αποθηκευμένα στους 20°C.



Σχήμα 12: Μεταβολή της ασυμμετρίας των ακτίνων των φυσαλίδων ( $g_1$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα συντηρημένα δείγματα (α) λευκώματος, (β) προσθήκης κρόκου και (γ) προσθήκη ζάχαρης αποθηκευμένα στους 4°C.



Σχήμα 13: Μεταβολή της κύρτωσης των ακτίνων των φυσαλίδων ( $g_2$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα συντηρημένα δείγματα (α) λευκώματος, (β) προσθήκης κρόκου και (γ) προσθήκη ζάχαρης αποθηκευμένα στους 20°C.



Σχήμα 14: Μεταβολή της κύρτωσης των ακτίνων των φυσαλίδων ( $g_2$ ) συναρτήσει του χρόνου αποσταθεροποίησης ( $t$ ) στα συντηρημένα δείγματα α) λευκώματος, β) προσθήκης κρόκου και γ) προσθήκη ζάχαρης αποθηκευμένα στους 4°C.