



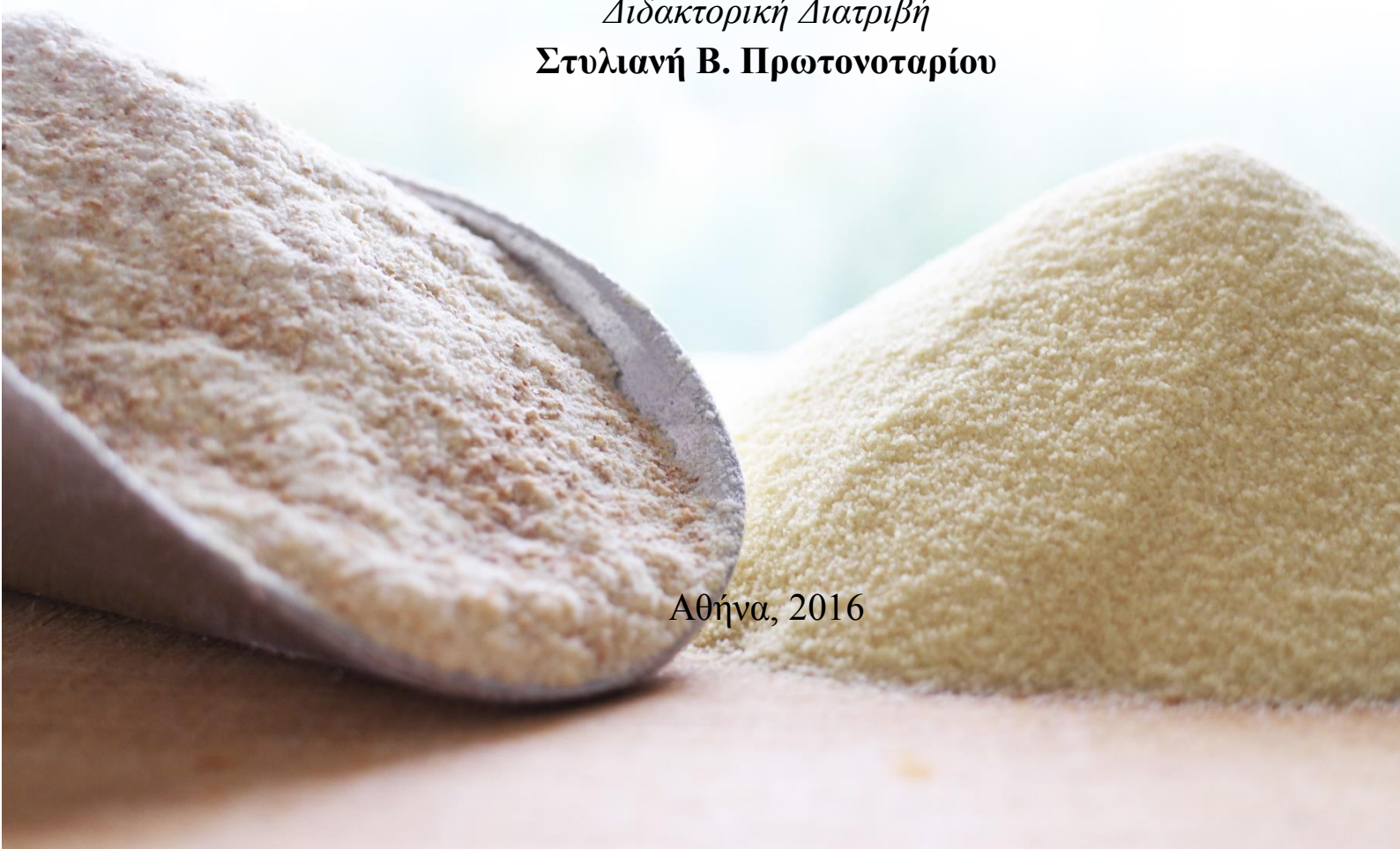
ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου  
Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας και  
Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων

Ανάπτυξη διεργασιών άλεσης δημητριακών  
καρπών με χρήση πεπιεσμένου αέρα.  
Εφαρμογή και ποιοτική αξιολόγηση σε  
προϊόντα αρτοποιίας

*Διδακτορική Διατριβή*  
**Στυλιανή Β. Πρωτονοταρίου**

Αθήνα, 2016







ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου  
Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας και  
Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων

Ανάπτυξη διεργασιών άλεσης δημητριακών  
καρπών με χρήση πεπιεσμένου αέρα.  
Εφαρμογή και ποιοτική αξιολόγηση σε  
προϊόντα αρτοποιίας

*Διδακτορική Διατριβή*

**Στυλιανή Β. Πρωτονοταρίου**

Επιβλέπουσα  
Ιωάννα Μαντάλα

Αθήνα, 2017



Ανάπτυξη διεργασιών άλεσης δημητριακών  
καρπών με χρήση πεπιεσμένου αέρα –  
Εφαρμογή και ποιοτική αξιολόγηση σε  
προϊόντα αρτοποιίας

*Διδακτορική Διατριβή*

**Στυλιανή Β. Πρωτονοταρίου**

**Επιβλέπουσα**

Ιωάννα Μαντάλα

**Συμβουλευτική επιτροπή**

Σταύρος Γιαννιώτης  
Κωνσταντίνος Γ. Μπλιαδέρης  
Καθηγητής

**Λοιπά μέλη**

Βάϊος Θ. Καραθάνος  
Νικόλαος Στοφόρος  
Βασιλική Ευαγγελίου  
Χρήστος Ριτζούλης

Αθήνα, 2017



## Επιβλέπουσα

Ιωάννα Μαντάλα  
Επίκουρη Καθηγήτρια  
Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας & Συντήρησης Γ. Προϊόντων  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

## Συμβουλευτική επιτροπή

Σταύρος Γιαννιώτης  
Ομότιμος Καθηγητής  
Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας & Συντήρησης Γ. Προϊόντων  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κωνσταντίνος Γ. Μπλιαδέρης  
Καθηγητής  
Εργαστήριο Χημείας – Βιοχημείας Τροφίμων, Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας  
Τροφίμων, Τμήμα Γεωπονίας  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

## Λοιπά μέλη

Βάιος Θ. Καραθάνος  
Καθηγητής  
Εργαστήριο Χημείας, Βιοχημείας και Φυσικοχημείας Τροφίμων, Επιστήμης  
Διαιτολογίας-Διατροφής  
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Νικόλαος Στοφόρος  
Καθηγητής  
Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας & Συντήρησης Γ. Προϊόντων  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Βασιλική Ευαγγελίου  
Επίκουρη Καθηγήτρια  
Εργαστήριο Χημείας & Ανάλυσης Τροφίμων  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Χρήστος Ριτζούλης  
Αναπλ. Καθηγητής  
Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων  
ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης

Copyright © Styliani V. Protonotariou

Development of jet milling process for cereals- Implementation and quality evaluation of bakery products

© Ph.D. Thesis, Agricultural University of Athens, Greece, 2016.

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ.2)».

Μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, συγχρηματοδοτήθηκε μέσω του Έργου «Υποτροφίες ΙΚΥ» από πόρους του ΕΠ «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (ΕΚΤ) του ΕΣΠΑ, 2007- 2013.



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας και Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων του Τμήματος Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών υπό την επίβλεψη της επίκουρης καθηγήτριας Ι. Μαντάλα, την οποία ευχαριστώ θερμά όχι μόνο για την καθοριστική καθοδήγηση και βοήθεια κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής, αλλά και για τη συνεχή υποστήριξη και συμπαράσταση σε όλους τους τομείς, εντός και εκτός Πανεπιστημίου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον ομότιμο καθηγητή Σταύρο Γιαννιώτη για τις πολύτιμες συμβουλές και χρήσιμες συζητήσεις καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ, επίσης, θερμά τον καθηγητή Κωνσταντίνο Γ. Μπυλιανό για την αποτελεσματική συνεργασία και τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον καθηγητή Νικόλαο Στοφόρο (Γ.Π.Α), τον καθηγητή Βάιο Καραθάνο (Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο), την επίκουρη καθηγήτρια Βασιλική Ευαγγελίου (Γ.Π.Α) και τον αναπλ. καθηγητή Χρήστο Ριζούλη (ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης).

Ειδικές ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Ε. Αναγνωσταρά για τη στενή συνεργασία και βοήθεια σε όλους τους τομείς καθώς και προς τους υποψήφιους διδάκτορες, παλαιότερους και νεότερους, Ο. Καλτσά, Κ. Τσατσαράγκου, Π. Παξιμαδά, Μ. Γεωργιάδου και Α. Δράκο για τη στενή συνεργασία και τη βοήθειά τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους μεταπτυχιακούς φοιτητές, Χ. Μπατζάκη, Μ. Βασταρδή και Σ. Ακριβού και τους προπτυχιακούς φοιτητές Ε. Τσαουσάκου, Γ. Αγγελίδη, Π. Στεργίου, Μ. Χρηστάκη και Π. Χαλούλο, με τους οποίους συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Ευχαριστώ επίσης θερμά την καθηγήτρια έρευνας και διευθύντρια του Ινστιτούτου Αγροχημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων (ΙΑΤΑ), Cristina M. Rosell για τη φιλοξενία στο εργαστήριό της στη Βαλένθια (CSIC).

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω προς την οικογένειά μου, και κυρίως τους γονείς μου, Βασίλη και Μαρία, τον αδελφό μου Κώστα και τον Νίκο μου, για την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια, την ενθάρρυνση και την υλική και ηθική στήριξη των επιλογών μου.

Στυλιανή Β. Πρωτονοταρίου

*στους δικούς μου ανθρώπους*

*Η επιστήμη, φίλε μου, συνίσταται από λάθη,  
αλλά είναι λάθη χρήσιμα γιατί λίγο-λίγο οδηγούν στην αλήθεια.*

Ιούλιος Βερν, 1826-1905, Γάλλος συγγραφέας

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίζεται από τις παρακάτω δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά:

1. **Protonotariou S.**, Drakos A., Evageliou V., Ritzoulis C., Mandala I., 2014. Sieving fractionation and jet mill micronization affect the functional properties of wheat flour. *Journal of Food Engineering* 134, 24-29.
2. **Protonotariou S.**, Mandala I., Rosell C.M., 2015. Jet milling effect on functionality, quality and *in vitro* digestibility of whole wheat flour and bread. *Food and Bioprocess Technology* 8, 1319-1329.
3. Angelidis G., **Protonotariou S.**, Mandala I., Rosell C.M., 2016. Jet milling effect on wheat flour characteristics and starch hydrolysis. *Journal of Food Science and Technology* 53 (1), 784-791.
4. **Protonotariou S.**, Batzaki C., Yanniotis S., Mandala I., 2016. Effect of jet milled whole wheat flour in biscuits properties. *LWT - Food Science and Technology* 74, 106-113.

## Λίστα Συντομογραφιών

<i>CF</i>	<i>Χονδρόκοκκο άλευρο T70</i>
<i>MF</i>	<i>Ενδιάμεσο κλάσμα άλεσης T70</i>
<i>FF</i>	<i>Λεπτόκοκκο κλάσμα άλεσης T70</i>
<i>JCF</i>	<i>Υπέρλεπτο κλάσμα από άλεση CF με πεπιεσμένο αέρα</i>
<i>WWF</i>	<i>Άλευρο ολικής άλεσης τύπου T90</i>
<i>JW1</i>	<i>WWF αλεσμένο με αέρα σε συνθήκες 4 bar και 4,51 kg/h</i>
<i>JW2</i>	<i>WWF αλεσμένο με αέρα σε συνθήκες 8 bar και 5,18 kg/h</i>
<i>JW3</i>	<i>WWF αλεσμένο με αέρα σε συνθήκες 8 bar και 2,54 kg/h</i>
<i>JW4</i>	<i>WWF αλεσμένο με αέρα σε συνθήκες 8 bar και 0,67 kg/h</i>
<i>BF</i>	<i>Άλευρο μπισκοτοποιίας</i>
<i>WB</i>	<i>Άρτοι που παρασκευάστηκαν με ποσότητες νερού 65,75 και 85%</i>
<i>JB1</i>	<i>και άλευρα</i>
<i>JB2</i>	<i>WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4</i>
<i>JB3</i>	<i>αντίστοιχα.</i>
<i>JB4</i>	
<i>WBF</i>	<i>Άρτοι που παρασκευάστηκαν με ποσότητες νερού όπως</i>
<i>JF1</i>	<i>υπολογίστηκαν από τον Φαρινογράφο και άλευρα</i>
<i>JF2</i>	<i>WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4</i>
<i>JF3</i>	<i>αντίστοιχα.</i>
<i>JF4</i>	
<i>WBM</i>	<i>Άρτοι που παρασκευάστηκαν με ποσότητες νερού όπως</i>
<i>JM1</i>	<i>υπολογίστηκαν από το Mixolab και άλευρα</i>
<i>JM2</i>	<i>WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4</i>
<i>JM3</i>	<i>αντίστοιχα.</i>
<i>JM4</i>	
<i>D<sub>50</sub></i>	<i>Διάμεσος</i>
<i>D<sub>43</sub></i>	<i>Μέση διάμετρος De Brouckere</i>
<i>D<sub>32</sub></i>	<i>Μέση διάμετρος Sauter</i>
<i>WHC</i>	<i>Ικανότητας συγκράτησης νερού</i>
<i>OBC</i>	<i>Ικανότητας συγκράτησης ελαίου</i>
<i>SuSRC</i>	<i>Ικανότητας συγκράτησης σουκρόζης</i>
<i>LaSRC</i>	<i>Ικανότητας συγκράτησης γαλακτικού οξέος</i>
<i>SCSRC</i>	<i>Ικανότητας συγκράτησης ανθρακικού νατρίου</i>
<i>DS</i>	<i>Κατεστραμμένο άμυλο</i>
<i>eGI</i>	<i>Εκτιμώμενος γλυκαιμικός δείκτης</i>
<i>RS</i>	<i>Ανθεκτικό άμυλο</i>
<i>DaS</i>	<i>Αφομοιώσιμο άμυλο</i>
<i>FS</i>	<i>Ελεύθερα σάκχαρα</i>
<i>G'</i>	<i>Ελαστικός χαρακτήρας</i>
<i>G''</i>	<i>Ιξώδης χαρακτήρας</i>
<i>ABEV</i>	<i>Φαινόμενο ιξώδες</i>
<i>ID</i>	<i>Ικανότητα διόγκωσης</i>
<i>ΔΣ</i>	<i>Διαλυτά στερεά</i>
<i>SF</i>	<i>Άπλωμα στα μπισκότα</i>

## Περίληψη

Η ευρεία κατανάλωση προϊόντων αρτοποιίας που ως βασικό συστατικό έχουν το άλευρο σίτου έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας προϊόντων των οποίων οι ιδιότητες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την κοκκομετρία του αλεύρου, άρα από τις συνθήκες άλεσής του. Η μοναδική ικανότητα του μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill) να αλέθει ιδιαίτερα σκληρά και θερμοευαίσθητα υλικά παράγοντας αλέσματα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά που φτάνουν σε μέγεθος κοκκομετρίας  $D_{50}$  έως και 10  $\mu\text{m}$ , τον καθιστά αναμφισβήτητα ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βιομηχανία τροφίμων. Η ανάγκη των καταναλωτών για πιο υγιεινή και πλούσια διατροφή έχει στρέψει τα τελευταία χρόνια την έρευνα στα προϊόντα αρτοποιίας ολικής άλεσης, τα οποία ωστόσο, παρουσιάζουν αρκετά τεχνολογικά προβλήματα όπως το σκούρο χρώμα, την παρουσία πίτυρου, τη μικρή διόγκωση κ.ά. Η λύση στα προβλήματα αυτά μπορεί εν μέρει να κρύβεται στην κοκκομετρία του αλεύρου.

Σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η μελέτη της επίδρασης της άλεσης με jet mill στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αλεύρων σίτου και η αξιολόγηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης των κονιορτοποιημένων αλεύρων σε άρτους και μπισκότα.

Αντικείμενο της πρώτης σειράς πειραμάτων ήταν η σύγκριση της παραδοσιακής άλεσης με την άλεση με πεπιεσμένο αέρα (jet mill). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία κλάσματα μαλακού αλεύρου σίτου τύπου T70 από κυλινδρόμυλο: ένα χονδρόκοκκο (CF), ένα ενδιάμεσο (MF) και ένα λεπτόκοκκο κλάσμα άλεσης (FF). Το δείγμα CF κονιορτοποιήθηκε με χρήση jet mill με σκοπό την παραγωγή ενός υπέρλεπτου κλάσματος (JCF). Το δείγμα CF παρουσίασε διπλή κατανομή με πολλά συσσωματώματα ακανόνιστου σχήματος. Στο JCF περιέχονταν σφαιρικοί κόκκοι με στενή κατανομή και  $D_{50}$  που μειώθηκε κατά 70% σε σχέση με το αρχικό δείγμα (CF) (από 63,18 στα 19,14  $\mu\text{m}$ ), ενώ στο FF κυριάρχησαν ακανόνιστου σχήματος συσσωματώματα με ελεύθερους αμυλόκοκκους και  $D_{50}$  30,12  $\mu\text{m}$ . Σε ό,τι αφορά το χρώμα, βελτιώθηκε με το jet mill αφού αυξήθηκε η φωτεινότητα των αλεσμάτων. Παρότι η κοκκομετρία του JCF ήταν σαφώς μικρότερη του FF, το κατεστραμμένο άμυλο ήταν λιγότερο (4,73 και 7,27% αντίστοιχα). Ως εκ τούτου, η σημαντική αύξηση της ικανότητας συγκράτησης νερού (WHC) στο JCF θεωρείται ότι οφείλεται κυρίως στην αυξημένη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου. Έτσι, το JCF παρουσίασε τη μεγαλύτερη WHC και μέχρι τους 75 °C είχε τη μεγαλύτερη έκλυση διαλυτών στερεών ( $\Delta\Sigma$ ). Το FF παρουσίασε καθυστερημένη ζελατινοποίηση και χαμηλή ελαστικότητα υποδεικνύοντας μια αδύναμη δομή. Αντιθέτως, στο JCF η ζελατινοποίηση του αμύλου έγινε σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επίσης παρουσίασε αυξημένες τιμές  $G'$  σε σχέση με το αρχικό δείγμα (CF) κατά τη θέρμανση, ενδεικτικό της γρήγορης ανάπτυξης μιας ελαστικής δομής, χαρακτηριστικό αρκετά σημαντικό για τη δομή των ζυμαριών κατά το ψήσιμο.

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της επίδρασης της άλεσης με jet mill σε μαλακό άλευρο σίτου (T70) και στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την κοκκομετρία του αλεύρου και την κατανάλωση ενέργειας, ώστε να γίνει η επιλογή των συνθηκών άλεσης για τη συνέχεια των πειραμάτων. Για το σκοπό

αυτό, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συνθήκες πίεσης (4 και 8 bar), διαφορετικός ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης (0,41-4,08 kg/h) και στην περίπτωση των 8 bar ανατροφοδότηση του δείγματος. Αύξηση της έντασης της διεργασίας (μικρός ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης, υψηλή πίεση αέρα ή/και ανατροφοδότηση) είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή αλεύρων με μικρότερη υγρασία, μεγαλύτερο ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου με μέγιστο 7,11%, αύξηση της απορρόφησης ενώ παρουσιάστηκε και βελτίωση στο χρώμα. Ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης καθόρισε σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας και άρα το κόστος της διεργασίας άλεσης. Σύμφωνα με την ανάλυση PCA οι μεταβλητές  $D_{50}$ , υγρασία, WHC (ικανότητα συγκράτησης νερού), LaSRC (ικανότητα συγκράτησης γαλακτικού οξέος), SCSRC (ικανότητα συγκράτησης ανθρακικού νατρίου) και χρώμα ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) εξήγησαν το 58,11% της διακύμανσης των αποτελεσμάτων, αναδεικνύοντας έτσι τη σημαντικότητά τους για την κατηγοριοποίηση των δειγμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας (κυμάνθηκε μεταξύ 2,00 και 19,50 kWh/kg), την αποτελεσματικότητα ( $10,55 \leq D_{50} \leq 44,58 \mu\text{m}$ ) και την παραλλακτικότητα των διεργασιών, επιλέχθηκαν οι παρακάτω συνδυασμοί άλεσης:

- Πίεση αέρα 4 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 2,50 kWh/kg,  $D_{50}$  44,58  $\mu\text{m}$ )
- Πίεση αέρα 8 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 2,00 kWh/kg,  $D_{50}$  22,94  $\mu\text{m}$ )
- Πίεση αέρα 8 bar, με ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 8,68 kWh/kg,  $D_{50}$  11,41  $\mu\text{m}$ )
- Πίεση αέρα 8 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 70% (κατανάλωση ενέργειας 6,70 kWh/kg,  $D_{50}$  10,55  $\mu\text{m}$ ).

Στη συνέχεια, οι επιλεγμένες συνθήκες άλεσης εφαρμόστηκαν σε άλευρο ολικής άλεσης (T90, WWF) από τις οποίες αντίστοιχα προέκυψαν τα άλευρα JW1, JW2, JW3 και JW4. Μεγαλύτερης έντασης διεργασίες είχαν ως αποτέλεσμα, μετατόπιση της καμπύλης κατανομής προς τα αριστερά με σειρά μεγέθους  $D_{50}$  WWF > JW1 > JW2 > JW3  $\geq$  JW4 (84,15, 53,49, 29,10, 17,2 και 18,11  $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα). Η υγρασία και ο εμφανής αριθμός των πιτύρων μειώθηκαν προοδευτικά με την αύξηση της έντασης της διεργασίας. Τα δείγματα JW3 (8 bar, 2,54 kg/h) και JW4 (8 bar, 0,67 kg/h), που είχαν υποστεί τις πιο έντονες διεργασίες άλεσης (δηλαδή, είχαν παραμείνει για περισσότερο χρόνο στο μύλο) είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά και διαφοροποιήθηκαν σημαντικά από τα υπόλοιπα δείγματα. Όσον αφορά τις ίνες, παρατηρήθηκε ανακατανομή και αύξηση των διαλυτών ινών σε σχέση με τις αδιάλυτες με τη μείωση του  $D_{50}$  των αλεύρων. Τέλος, τα λεπτοαλεσμένα άλευρα παρουσίασαν μεγαλύτερο ρυθμό υδρόλυσης εξαιτίας της αυξημένης επιφάνειας ανά μονάδα όγκου και του ότι οι αμυλόκοκκοι στα δείγματα αυτά είχαν αποσπαστεί από τον πρωτεϊνικό μανδύα, ευνοώντας την επιδεκτικότητα του αμύλου στην ενζυματική υδρόλυση.

Στο επόμενο στάδιο τα άλευρα ολικής άλεσης WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4 ενσωματώθηκαν σε μπισκότα τύπου digestive ώστε να επιτευχθεί μια υψηλή υποκατάσταση αλεύρου μπισκοτοποιίας (BF) από κονιορτοποιημένο άλευρο ολικής άλεσης. Αρχικά αξιολογήθηκε το ιξώδες των ζυμαριών και στη συνέχεια τα

φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων μπισκότων. Όσο πιο έντονες ήταν οι συνθήκες άλεσης των JW τόσο το ιξώδες του ζυμαριού (με 100% υποκατάσταση BF) παρουσίαζε αυξητική τάση, τάση που ακολούθησε και η σκληρότητα του μπισκότου. Η υποκατάσταση έως 30% επηρέασε κυρίως το χρώμα και τις διαστάσεις των μπισκότων. Περαιτέρω αύξηση της υποκατάστασης, έως και 100%, αύξησε σημαντικά την υγρασία και τη σκληρότητα των μπισκότων. Αποδεκτά προϊόντα και ως προς τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους μπόρεσαν να παραχθούν σε επίπεδα υποκατάστασης έως 50% που είναι ένα υψηλό ποσοστό σε σχέση με τα εμπορικά μπισκότα όπου το ποσοστό αλεύρου ολικής άλεσης δεν ξεπερνά το 25%.

Τα λεπτόκοκκα άλευρα ενσωματώθηκαν και σε άρτο. Για την παραγωγή άρτων υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών, πέραν της κοκκομετρίας του αλεύρου ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η περιεκτικότητα σε νερό. Ως εκ τούτου, τα τρία επόμενα κεφάλαια επικεντρώθηκαν στη μελέτη άρτων που παράχθηκαν με τα μικροαλεσμένα άλευρα ολικής (WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4) χρησιμοποιώντας τυχαίες ποσότητες νερού (65, 75 και 85%) καθώς και τη βέλτιστη ποσότητα νερού από Φαρινογράφο και Mixolab. Απλό γραμμικό μοντέλο εξήγησε ικανοποιητικά ( $R^2=83,07$ ) τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των απορροφήσεων που προέκυψαν από τις δύο διαφορετικές μεθόδους Mixolab και Φαρινογράφο.

Η μελέτη της διόγκωσης των ζυμαριών με άλευρα WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4 και νερό 65, 75 και 85%, εξηγήθηκε επαρκώς με απλό γραμμικό μοντέλο και έδειξε ότι οι διαφορετικές κοκκομετρίες αλεύρου επηρέασαν σημαντικά το ποσοστό διόγκωσης (θετική συσχέτιση). Η απόδοση κατά το ψήσιμο μειώθηκε όταν το ποσοστό νερού έφτασε το 85% ενώ η προσθήκη νερού σε ποσοστό 75% έγινε με επιτυχία. Σε αντίθεση με το αρχικό άλευρο, όταν χρησιμοποιήθηκαν τα κονιορτοποιημένα, ο ειδικός όγκος των αντίστοιχων άρτων βελτιώθηκε σημαντικά με την αύξηση του νερού στη συνταγή. Η αύξηση του νερού στους άρτους (85%) είχε ως αποτέλεσμα τη λιγότερο φωτεινή ψίχα για όλα τα άλευρα ενώ η σκληρότητα της ψίχας είχε την τάση να αυξάνεται με τη μείωση του νερού και τη μείωση της κοκκομετρίας. Σε γενικές γραμμές η ποσότητα νερού ήταν αυτή που κυρίως καθόρισε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων και δευτερευόντως η κοκκομετρία των αλεύρων.

Στη συνέχεια για την παραγωγή άρτων χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες τιμές απορρόφησης νερού, όπως προσδιορίστηκαν από τα φαρινογραφήματα των WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4: 73,70, 77,75, 79,45, 83,55 και 81,05% αντίστοιχα. Στους άρτους με JW προστέθηκε μεγαλύτερη ποσότητα νερού, εξαιτίας της αυξημένης απορρόφησης, μέρος του οποίου φάνηκε να εγκλωβίζεται στο εσωτερικό των άρτων με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη απόδοσή τους. Το δείγμα αναφοράς (WWF) είχε την πιο σκληρή ψίχα (3,31 N) με το μεγαλύτερο πορώδες. Μικρότερη κοκκομετρία αλεύρου οδήγησε σε πιο σκουρόχρωμη ψίχα. Στις περισσότερες ιδιότητες δεν παρατηρήθηκε κάποια τάση με βάση την ένταση της άλεσης. Επίσης, η κοκκομετρία του αλεύρου συσχετίστηκε σημαντικά μόνο με την απορρόφηση νερού. Στην οργανοληπτική αξιολόγηση μεγαλύτερη βαθμολογία είχε ο άρτος με το JW2 άλευρο (3,11). Στο σύνολό τους οι άρτοι με JW παρουσιάστηκαν βελτιωμένοι σε σχέση με το δείγμα αναφοράς.

Στο τελευταίο στάδιο οι άρτοι με WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4 παρασκευάστηκαν με βέλτιστες περιεκτικότητες νερού, όπως αυτές υπολογίστηκαν με

βάση το Mixolab (64,1, 65,0, 66,9, 68,0, και 66,6% αντίστοιχα). Τα μικροαλεσμένα άλευρα παρουσίασαν ζυμάρια με μικρότερη σταθερότητα σε σχέση με το αρχικό άλευρο (WWF). Το δείγμα JW2 ήταν το πιο ελαστικό, ενώ κατά κανόνα η μικρότερη κοκκομετρία οδήγησε σε ζυμάρια με μικρότερη συνοχή που σχετίζεται με το καθυστερημένο μαγιάτεμα. Η άλεση με jet mill είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τάσης μείωσης της διόγκωσης των ζυμαριών και κατά συνέπεια και του ειδικού όγκου των αντίστοιχων άρτων. Η σκληρότητα από την άλλη αυξήθηκε όσο μειώθηκε η κοκκομετρία. Η κλειστή και συμπαγής δομή που δημιουργήθηκε στα JW δείγματα οδήγησε και στη μείωση της φωτεινότητας και πιθανότατα είναι υπεύθυνη για τη μείωση του *eGI* (υπολογιζόμενου γλυκαιμικού δείκτη).

Συμπερασματικά η χρήση του φαρινογράφου για την παραγωγή άρτων με κονιορτοποιημένα άλευρα ολικής άλεσης φάνηκε να έχει καλύτερα αποτελέσματα από ότι αντίστοιχα είχε το Mixolab δεδομένου ότι οι άρτοι που παράχθηκαν στην πρώτη περίπτωση ήταν βελτιωμένοι σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (WWF), με αυξημένη απόδοση και μαλακότερη ψίχα. Αντίθετα στην περίπτωση του Mixolab οι άρτοι με τα JW άλευρα δεν έφεραν σημαντική βελτίωση.



## Abstract

The wide consumption of bakery products has led to the development of a variety of products whose properties are mainly determined by flour granulometry, and therefore by the grinding conditions. The unique ability of the air jet mill to micronize hard and heat sensitive materials producing powders with improved characteristics and particle sizes less than 10  $\mu\text{m}$ , undoubtedly has made it a useful tool for the food industry. Recently, research has focused on whole wheat products meeting consumers' demand for healthier eating habits. However, this kind of products presents several technological problems such as dark color, presence of bran, low specific volume etc. The solution to these problems could be the control of flour granulometry.

The objective of this study was to investigate the effect of jet milling on the physicochemical characteristics of wheat flour and the incorporation of micronized flour in bread's and biscuit's physical properties.

At the first experimental part, two milling processes, roller and jet milling, were compared producing different wheat flour fractions. For this purpose, three fractions of roller milled wheat flour (type T70) were obtained: a coarse (CF), an intermediate (MF) and a fine grain fraction (FF). An extra fine fraction was received by pulverizing CF in a jet mill (JCF). CF presented bimodal granules' volume distribution containing many agglomerates of irregular shape with  $D_{50}$  63.18  $\mu\text{m}$ . JCF contained spherical granules with  $D_{50}$  19.14  $\mu\text{m}$ , whereas FF contained irregular granules' fragments with a few free starch granules ( $D_{50}$  30.12  $\mu\text{m}$ ). Color parameters were improved and lightness was increased. Although the particle size of the JCF was clearly lower than FF, the damaged starch was lower, 4.73 and 7.27% respectively. Therefore, the significant increase of WHC in JCF considered to be primarily due to the higher specific surface area per weight unit. Thus, JCF presented the highest WHC and granules swelled fast (up to 75  $^{\circ}\text{C}$ ) with a great soluble solids leakage. FF presented a delayed gelatinization and low elasticity, indicating a weak structure. Furthermore, this fine flour was fast heated and induced starch gelatinization. JCF presented increased  $G'$  values under heating compared to CF, indicative of a fast developed, elastic structure, quite significant for dough structure during baking.

The second part of the study was focused on the effect of different jet milling conditions on soft wheat flour (T70) characteristics and simple power law mathematical models were proposed to optimize the process in order to specify the conditions of milling for further experiments. For this purpose different pressure conditions (4 and 8 bar), different feed rate (0.41-4.08 kg/h) and in some cases recirculation were used. As the intensity of the process increased (low feed rate, high pressure and/or recirculation) the particle size of produced flour decreased. The same trend was presented by moisture content, while damaged starch content increased, up to a max level of 7.11%. Decreasing particle size, WHC increased and the color improved. Energy consumption and the cost of milling process was mainly determined by the feed rate of the raw material. According to PCA analysis the variables  $D_{50}$ , moisture content, WHC; LaSRC, SCSRC, and color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) explained the 58.11% of results variance,

highlighting their importance for samples' classification. Considering the above results, the energy consumption (2.00-19.50 kWh/kg), the efficiency ( $10.55 \leq D_{50} \leq 44.58 \mu\text{m}$ ) and the variability of the process, the following milling conditions were chosen:

- Air pressure 4 bar, without feedback with 100% feed rate  
(energy consumption 2.50 kWh/kg,  $D_{50}$  44.58  $\mu\text{m}$ )
- Air pressure 8 bar, without feedback at a feed rate of 100%  
(energy consumption 2.00 kWh/kg,  $D_{50}$  22.94  $\mu\text{m}$ )
- Air pressure 8 bar, with feedback and 100% feed rate.  
(energy consumption 8.68 kWh/kg,  $D_{50}$  11.41  $\mu\text{m}$ )
- Air pressure 8 bar, without feedback at a feed rate of 70%.  
(energy consumption 6.70 kWh/kg,  $D_{50}$  10.55  $\mu\text{m}$ ).

The selected milling conditions were then applied to whole meal flour (T90, WWF) producing four flours: JW2, JW4, JW1 and JW3 respectively. The particle size distribution suggested that according to the intensity of the milling treatment, samples could be listed as WWF > JW1 > JW2 > JW3  $\geq$  JW4 (84.15, 53.49, 29.10, 17.2 and 18.11  $\mu\text{m}$ , respectively). Moisture content and number of brans were significantly reduced as the intensity of process increased. JW3 (8 bar, 2.54 kg / h) and JW4 (8 bar, 0.67 kg / h), which had been subjected to the most intense milling (i.e. had remained longer in the mill), presented similar characteristics and differed from the other samples. A redistribution of insoluble to soluble dietary fiber was observed because of milling. Finally, due to the reduction of flour particle size the surface area of the grains increased, increasing the susceptibility of the starch to enzymatic hydrolysis.

The produced flours (WWF, JW1, JW2, JW3 and JW4) were incorporated in digestive biscuits in order to substitute biscuit flour (BF) at a high level. Initially, apparent biaxial extensional viscosity (ABEV) of the dough was measured followed by the physico-chemical characterization of the produced biscuits. The more intense the milling conditions of JW, the higher was the viscosity of the dough (at 100% substitution level of BF), a trend which also followed the hardness of the biscuit. A substitution level of 30% was better explained from  $L^*$ ,  $b^*$  and spread factor. Further increase in the substitution level revealed as the most important factors the moisture content and the snap force. Acceptable biscuits with good sensory attributes could be produced up to a substitution level of 50%, increasing significantly the content of WWF in digestive biscuits which normally does not exceed the 25%.

Superfine flours were incorporated into bread. Apart from the flour particle size, another important factor for producing high quality breads is the water content. Therefore, the remaining three chapters focused on the study of breads produced with micronized flours (WWF, JW1, JW2, JW3 and JW4) and different amounts of water, random amounts (65, 75 and 85%) and optimum water content as it was calculated from Farinograph and Mixolab curves. Simple linear model explained sufficiently ( $R^2=83.07$ ) the correlation between water absorption from Mixolab and Farinograph.

The study of dough gassing power, which produced with WWF, JW1, JW2, JW3 and JW4 and 65, 75 and 85% water, was sufficiently explained by a simple linear model showing that dough fermentation was significantly affected by flour

granulometry. Bread yield, after baking, decreased when water content reached 85% while the addition of 75% water was achieved successfully. In contrast to control bread (WWF), breads with JW presented improved specific volume as the water content increased. The increase of water content, resulted in a less bright crumb with lower hardness. Generally bread quality characteristics were mainly affected by water content and secondarily by the particle size of the flour.

Subsequently, breads were produced with WWF, JW1, JW2, JW3 and JW4, containing water amount based on flour absorption obtained from Farinograph curves (73.70, 77.75, 79.45, 83.55 and 81.05% respectively). Breads with JW presented higher yield after baking, indicating that part of the water was entrapped inside the loaf. Control sample had the hardest crumb (3.31 N) with the higher porosity. Intense milling resulted in a darker crumb. The majority of the bread properties did not present any trend because of different flour particle size. Flour particle size was significantly correlated only with the water absorption. In sensory evaluation, sample with JW2 reached the higher score (3.11).

Finally, breads were produced with WWF, JW1, JW2, JW3 and JW4, containing water amount based on flour absorption obtained from Mixolab® curves (64.1, 65.0, 66.9, 68.0, and 66.6% respectively). Dough made with micronized flours presented less stability than dough made with WWF. JW2 had the most elastic dough. Generally, jet milling led to lower final values of consistency which has been related to a staling delay. Moreover, a trend for specific volume reduction and hardness increase was noticed because of milling. The compact structure of JW samples led to the reduction of lightness and was possibly responsible for *eGI* reduction.

In conclusion, the use of Farinograph in breadmaking of jet milled whole wheat flours presented improved characteristics in comparison to Mixolab®. Breads produced in the first case had increased yield and softer crumb compared to control sample (WWF).



## Περιεχόμενα

1.	ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2.	ΣΙΤΟΣ ΚΑΙ ΑΛΕΥΡΑ ΣΙΤΟΥ.....	2
2.1.	Δομή σίτου .....	2
2.2.	Χημική σύσταση σίτου .....	3
2.2.1.	Άμυλο .....	4
2.2.2.	Πρωτεΐνη.....	7
2.2.3.	Λίπη.....	8
2.2.4.	Ιχνοστοιχεία .....	8
2.2.5.	Ίνες.....	9
2.3.	Άλευρα Σίτου στην Ελλάδα και Διεθνώς.....	9
2.3.1.	Άλευρα τύπου 70% (T70).....	9
2.3.2.	Άλευρα τύπου 85% .....	10
2.3.3.	Άλευρα τύπου 90% (T90).....	10
2.3.4.	Άλευρα κατηγορίας Π.....	10
2.3.5.	Άλευρα κατηγορίας Μ .....	10
2.3.6.	Άλευρα κατηγορίας Κ.....	11
2.3.7.	Patent flour .....	11
2.3.8.	Μαλακό άλευρο.....	11
2.3.9.	Brown flour .....	12
2.4.	Άλευρο Ολικής άλεσης σίτου.....	12
2.5.	Πίτυρο.....	13
3.3.	Παραδοσιακοί μύλοι άλεσης.....	18
3.3.1.	Κυλινδρόμυλος (Roller mill).....	19
3.3.2.	Σφυρόμυλος (Hammer mill) .....	20
3.3.3.	Μύλος κοπής .....	21
3.3.4.	Οδοντωτός Μύλος (Toothed Disk mill) .....	21
3.3.5.	Μύλος αποφλοιώσης (Under runner Disk Huller) .....	22
3.3.6.	Μύλος με ακίδες (Pinned Disk mill) .....	22
3.3.7.	Μύλος περιστροφικός με σφαίρες ή ράβδους (Tumbeling).....	22
3.3.8.	Μύλος τριβής (Attrition mill) .....	24
3.4.	Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (Air jet mill).....	24
3.4.1.	Τύποι μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.....	25
3.4.2.	Εφαρμογή της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στα τρόφιμα .....	29
3.5.	Υλικά άλεσης .....	33
3.6.	Μύλοι άλεσης και κοκκομετρία.....	35
3.7.	Μέθοδοι κατανομής κόκκων.....	36
4.	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΑΡΤΟΠΟΙΑΣ.....	38
4.1.	Άρτος.....	38
4.1.1.	Διαδικασία αρτοποιήσης.....	38
4.1.2.	Ο ρόλος των διαφορετικών συστατικών άρτου.....	40
4.2.	Μπισκότα .....	44
4.2.1.	Μπισκότα τύπου short- dough.....	44
4.2.2.	Ο ρόλος των διαφορετικών συστατικών μπισκότου .....	45
5.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	48
5.1.	Στόχοι και Αντικείμενο Έρευνας.....	48
5.2.	Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill) .....	51
5.3.	Υλικά.....	52
5.3.1.	Άλευρα .....	52
5.3.2.	Υλικά για την παρασκευή μπισκότων .....	52
5.3.3.	Υλικά για παρασκευή άρτου .....	53
5.4.	Πειραματική διαδικασία.....	53
5.4.1.	Άλεση .....	53

5.4.2.	Παρασκευή μπισκότων .....	54
5.4.3.	Πειραματική διαδικασία παρασκευής άρτων .....	55
5.5.	Μέθοδοι-Μετρήσεις- Αναλύσεις.....	57
5.5.1.	Αναλύσεις Αλεύρων .....	57
5.5.2.	Ρεολογία .....	61
5.5.3.	Αναλύσεις μπισκότων .....	64
5.5.4.	Αναλύσεις άρτων.....	66
5.5.5.	Στατιστική Επεξεργασία.....	69
6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	70
6.1.	Σύγκριση άλεσης με κυλινδρόμυλο και μύλο με πεπιεσμένο αέρα.....	70
6.1.1.	Κατανομή μεγέθους και περιγραφή κόκκων αλεύρου .....	71
6.1.2.	Σύσταση και λειτουργικές ιδιότητες .....	74
6.1.3.	Ρεολογικό προφίλ.....	76
6.1.4.	Συμπέρασμα.....	79
6.2.	Επίδραση άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε μαλακό άλευρο σίτου- Βελτιστοποίηση διεργασίας.....	80
6.2.1.	Διεργασίες άλεσης, παραγωγή & αποδοτικότητα μύλου.....	81
6.2.2.	Μαθηματικά μοντέλα για την κατανόηση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.....	85
6.2.3.	Ιδιότητες και χαρακτηριστικά αλεύρων.....	87
6.2.4.	Επιλογή συνθηκών άλεσης.....	91
6.2.5.	Συμπέρασμα.....	93
6.3.	Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε άλευρο σίτου ολικής.....	95
6.3.1.	Παραγόμενα άλευρα, κατανομές μεγέθους. Μακροσκοπική και μικροσκοπική παρατήρηση .....	96
6.3.2.	Σύσταση αλεύρων .....	101
6.3.3.	Ενζυματική υδρόλυση αμύλου.....	102
6.3.4.	Συμπέρασμα.....	104
6.4.	Παραγωγή μπισκότων με άλευρο σίτου ολικής περασμένο από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.....	105
6.4.1.	Φαινόμενο διαξονικό εκτατικό ιξώδες ζύμης (Apparent biaxial extensional viscosity).. .....	107
6.4.2.	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μπισκότων .....	108
6.4.3.	Οργανοληπτική αξιολόγηση μπισκότων.....	114
6.4.4.	Συμπέρασμα.....	116
6.5.	Παραγωγή άρτου με άλευρο σίτου ολικής περασμένο από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.....	117
6.5.1.	Παραγωγή άρτων με διαφορετικά ποσοστά νερού .....	119
6.5.2.	Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει φαρινογραφήματος ....	129
6.5.3.	Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει Mixolab .....	142
6.5.4.	Συσχέτιση χαρακτηριστικών Mixolab και φαρινογράφου σε άλευρα ολικής άλεσης κονιορτοποιημένα με χρήση jet mill .....	152
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....	154
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	160
8.1.	Ελληνική Βιβλιογραφία .....	160
8.2.	Ξένη Βιβλιογραφία.....	160

## Ευρετήριο Σχημάτων

### Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση ανατομίας καρπού σίτου .....	3
Σχήμα 2.2 Τυπική διαβάθμιση παραγόμενου αλεύρου .....	10
Σχήμα 2.3 Αναπαράσταση κατά μάζα κατανομής του πίτυρου σίτου στα διάφορα συστατικά και πιθανά προϊόντα.....	14
Σχήμα 2.4 Αριθμός διαφορετικών προϊόντων ενισχυμένα με πίτυρα σίτου που παρήχθησαν από το 2001 έως το 2011.....	15

### Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής άλεσης σίτου (Hui, 2006).....	17
Σχήμα 3.2 Απεικόνιση κυλινδρόμυλου, λεπτομέρεια από την άλεση (Barbosa- Cánovas et al., 2005).....	20
Σχήμα 3.3 Σφυρόμυλος <a href="http://www.qclabequipment.com/MICROHAMMERCUTTERMILL.html">http://www.qclabequipment.com/MICROHAMMERCUTTERMILL.html</a> , <a href="http://www.fitzmill.com/parts-service/parts-service">http://www.fitzmill.com/parts-service/parts-service</a> (Barbosa- Cánovas et al., 2005).....	21
Σχήμα 3.4 Μύλος με ακίδες ( <a href="http://kemutecusa.com/products/milling/kek-universal-mills.html">http://kemutecusa.com/products/milling/kek-universal-mills.html</a> ). 22	
Σχήμα 3.5 Περιστροφικοί μύλοι: (α) τούνελ υπερχειλίσσης, (β) διαμερισματοποιημένος μύλος, (γ) κωνικός μύλος (Barbosa- Cánovas et al., 2005).....	23
Σχήμα 3.6 Μύλοι τριβής: (α) μονός, (β) διπλός και τύπου (γ) Buhr (Barbosa- Cánovas et al., 2005).....	24
Σχήμα 3.7 Μύλος κρούσης Fluid impact mill (Albus, 1964).....	26
Σχήμα 3.8 Σπειροειδής μύλος άλεσης με αέρα (spiral jet mill) (Chamayou & Dodds, 2007). .....	28
Σχήμα 3.9 Jet-O-Mizer Mill ( <a href="http://www.fluidenergype.com/jet-o-mizer-particle-size-reduction-systems-1-0-45-microns-features-benefits">http://www.fluidenergype.com/jet-o-mizer-particle-size-reduction-systems-1-0-45-microns-features-benefits</a> ). .....	28
Σχήμα 3.10 Μύλος αντίστροφης ρευστοποιημένης κλίνης Fluidized bed opposed jet mill ( <a href="http://www.hosokawamicron.co.jp/en/machines/126">http://www.hosokawamicron.co.jp/en/machines/126</a> ). .....	29
Σχήμα 3.11 Τύποι δράσης κατά την άλεση (Rumpf, 1954). .....	34
Σχήμα 3.12 Εύρη λειτουργίας μύλων σε σχέση με το μέγεθος κοκκομετρίας που προκύπτει μετά τη διεργασία α) και β) τη σκληρότητα κατά Mohs (Brown, 2013).....	35
Σχήμα 3.13 Τέσσερις διαφορετικές κατανομές του ίδιου αλεύρου, κατά αριθμό, μήκος, επιφάνεια και μάζα ή όγκο (Svarovsky, 1987). .....	36

### Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1 Αναπαράσταση διόγκωσης ζύμης.....	39
Σχήμα 4.2 Θερμοκρασιακό προφίλ δράσης της μαγιάς .....	43

### Κεφάλαιο 5

Σχήμα 5.1 Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill) .....	51
Σχήμα 5.2 Ενδεικτικό φαρινογράφημα αλεύρου σίτου.....	63
Σχήμα 5.3 Σχεδιαγραμματική απεικόνιση δοκιμής κάμψης τριών σημείων για μπισκότο.....	63

## Κεφάλαιο 6

Σχήμα 6.1 Καμπύλες κατανομής μεγέθους σωματιδίων ( $\mu\text{m}$ ) των κλασμάτων αλεύρου σίτου CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF).	71
Σχήμα 6.2 α) Εικόνες μικροσκοπίου με ενδεικτικές τιμές περιμέτρου για τα διάφορα κλάσματα αλεύρου σίτου JCF, FF, MF, CF και σχηματική απεικόνιση των κόκκων και β) Παράμετροι σχήματος και ποσοτικοποίηση αυτών για όλα τα κλάσματα άλεσης.	733
Σχήμα 6.3 α) Ικανότητα διόγκωσης και β) Διαλυτά στερεά διαφόρων κλασμάτων άλεσης CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF) σε σχέση με τη θερμοκρασία.	77
Σχήμα 6.4 α) Σύγκριση μηχανικών φασμάτων για τα δείγματα CF (χονδρόκοκκο κλάσμα) και JCF (jet milled CF). Διακύμανση $G'$ (Pa) και $G''$ (Pa) στο αρχικό στάδιο της θέρμανσης και β) Διακύμανση $G'$ (Pa) με τη θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) για τα διαφορετικά κλάσματα άλεσης CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF). Κύκλος θέρμανσης- ψύξης (45-95-55 $^{\circ}\text{C}$ , διατήρηση στους 95 $^{\circ}\text{C}$ για 10 min).	78
Σχήμα 6.5 Συσχέτιση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης με την κατανάλωση ενέργειας σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.	83
Σχήμα 6.6 Ενδεικτικές κοκκομετρικές κατανομές αλεύρων σίτου επεξεργασμένα με μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill). Δείγματα που επεξεργάστηκαν α) σε ρυθμό τροφοδοσίας 100% και β) σε πίεση 8 bar.	84
Σχήμα 6.7 Επίδραση της πίεσης του αέρα και του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης στην κατανάλωση ενέργειας. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.	86
Σχήμα 6.8 Επίδραση της πίεσης του αέρα και του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης στο μέγεθος της κοκκομετρίας του αλεύρου. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.	86
Σχήμα 6.9 Ανάλυση κύριων συνιστωσών με βάση τις τιμές των δειγμάτων και τα παραγοντικά φορτία των μεταβλητών.	92
Σχήμα 6.10 Ανάλυση συστάδων, ομαδοποίηση δειγμάτων με τη μέθοδο της Τετραγωνικής Ευκλείδειας απόστασης (Squared Euclidean Method).	92
Σχήμα 6.11 Καμπύλες κατανομής αλεύρου ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4.	97
Σχήμα 6.12 Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου φάσματος (SEM) για δείγματα αλεύρου ολικής άλεσης α) WWF, β) JW1, γ) JW2, δ) JW3, και ε) JW4.	98
Σχήμα 6.13 Πάνω: Ενδεικτικές εικόνες αλεύρου ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4. Κάτω: επισήμανση πίτυρου στα διάφορα δείγματα αλεύρου.	100
Σχήμα 6.14 Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στη κινητική υδρόλυσης του αμύλου σε δείγματα αλεύρου ολικής άλεσης WWF (■), JW1 (▲), JW2 (×), JW3 (●), JW4 (◆). Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4.	103
Σχήμα 6.15 Ανάλυση συστάδων, ομαδοποίηση δειγμάτων αλεύρων ολικής άλεσης με τη μέθοδο της Τετραγωνικής Ευκλείδειας απόστασης (Squared Euclidean Method).	103
Σχήμα 6.16 Ιξώδες σε συνάρτηση με το ρυθμό παραμόρφωσης για ζυμάρια που παρήχθησαν με BF: άλευρο μπισκοτοποιίας, WWF: άλευρο ολικής άλεσης, JW1, JW2, JW3, JW4.	107
Σχήμα 6.17 Ενδεικτικές εικόνες από τα παραγόμενα μπισκότα.	110
Σχήμα 6.18 Ανάλυση κύριων συνιστωσών με βάση τις τιμές των φυσικών ιδιοτήτων μπισκότων που περιείχαν WWF ή κονιορτοποιημένα WWF με πεπιεσμένο αέρα και BF σε διάφορα ποσοστά υποκατάστασης.	113
Σχήμα 6.19 Οργανοληπτική αξιολόγηση μπισκότων α) με JW2 και διαφορετικές υποκαταστάσεις BF (18,5, 30, 50 και 80%) και β) με 50% υποκατάσταση BF από WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4.	115



Σχήμα 6.20 Συσχέτιση χρόνου επώασης και διόγκωση ζυμαριών με άλευρα ολικής άλεσης σίτου WB και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JB1, JB2, JB3, JB4 με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού α) 65%, β) 75% και γ) 85%.....	120
Σχήμα 6.21 Επίδραση της κοκκομετρίας του αλεύρου και της περιεκτικότητας σε νερό στο ποσοστό διόγκωσης των ζυμαριών. ....	123
Σχήμα 6.22 Επίδραση της κοκκομετρίας του αλεύρου και της περιεκτικότητας νερού στην απόδοση του άρτου.. ....	124
Σχήμα 6.23 Ενδεικτικές φωτογραφίες παραγόμενων άρτων (επάνω) και λεπτομέρεια από τη ψίχα για των υπολογισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους (κάτω).....	126
Σχήμα 6.24 Σκληρότητα ψίχας άρτων σε σχέση με και την κοκκομετρία των αλεύρων για άρτους με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού 65, 75 και 85%. ....	127
Σχήμα 6.25 Ενδεικτικά φαρινογραφήματα αλεύρων α) WWF, β) JW1, γ) JW2, δ) JW3 και ε) JW4... ..	130
Σχήμα 6.26 Ενδεικτικές φωτογραφίες παραγόμενων άρτων (αριστερά) και λεπτομέρεια από τη ψίχα για τον υπολογισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους (δεξιά).....	134
Σχήμα 6.27 Οργανοληπτική αξιολόγηση άρτων ολικής άλεσης. ....	136
Σχήμα 6.28 Επίδραση της κοκκομετρίας του αλεύρου και του χρόνου αποθήκευσης (α) στην υγρασία των άρτων και (β) στην σκληρότητα ψίχας.....	139
Σχήμα 6.29 Συσχέτιση υγρασίας και σκληρότητας κατά την αποθήκευση (5 ημερών) σε άρτους ολικής άλεσης.....	140
Σχήμα 6.30 Καμπύλες Mixolab για άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4 σε σχέση με τη θερμοκρασία.....	143
Σχήμα 6.31 Καμπύλες συσχέτισης αύξησης όγκου ζυμαριών κατά την επώαση και χρόνου για άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF (■) και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1 (▲), JW2 (X), JW3 (●), JW4 (◆).....	147
Σχήμα 6.32 Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με αέρα στην in vitro πέψη του αμύλου σε ολικής άλεσης άρτους: WBM (■), JM1 (▲), JM2 (X), JM3 (●), JM4 (◆) και λευκός άρτος (+).....	150
Σχήμα 6.33 Συσχέτιση αποτελεσμάτων φαρινογράφου και Mixolab ως προς α) την απορρόφηση νερού και β) την εξασθένιση του ζυμαριού αλεύρων ολικής άλεσης που κονιορτοποιήθηκαν με χρήση jet milling. ....	153

## Ευρετήριο Πινάκων

### Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1 Κορυφαία προϊόντα που παράχθηκαν στην Ελλάδα για το 2013 .....	2
Πίνακας 2.2 Σύσταση διαφορετικών τμημάτων του καρπού σιταριού .....	4
Πίνακας 2.3 Ταξινόμηση πρωτεϊνών κατά Osborne .....	8
Πίνακας 2.4 Γενική σύσταση αλεύρων ολικής άλεσης και λευκού .....	13
Πίνακας 2.5 Τυπική σύσταση πίτυρου (Apprich et al. 2014) .....	13

### Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1 Παραδείγματα τροφίμων και συνθέστερων μέσων άλεσης .....	18
Πίνακας 3.2 Σύγκριση διαφορετικών μύλων άλεσης με πεπιεσμένο αέρα .....	26
Πίνακας 3.3 Υλικά και κατάταξη βάσει σκληρότητας .....	33
Πίνακας 3.4 Τύποι άλεσης σε σχέση με την κοκκομετρία των παραγόμενων προϊόντων .....	33
Πίνακας 3.5 Αναλυτικές τεχνικές για τον προσδιορισμό του μεγέθους της κοκκομετρίας .....	37

### Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1 Επίδραση διαφόρων συστατικών στα χαρακτηριστικά άρτου. ....	41
Πίνακας 4.2 Βασική περιγραφή της λειτουργίας των κύριων συστατικών του άρτου .....	41
Πίνακας 4.3 Τυπική σύσταση μπισκότου τύπου digestive .....	44
Πίνακας 4.4 Επίδραση διαφόρων συστατικών στα χαρακτηριστικά μπισκότου. ....	45

### Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1 Σειρές πειραμάτων και μετρήσεις που έλαβαν χώρα.....	50
Πίνακας 5.2 Άλευρα που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφ.6.1 .....	52
Πίνακας 5.3 Άλεση μαλακού αλεύρου σίτου (T70) με χρήση jet mill σε διαφορετικές συνθήκες .....	53
Πίνακας 5.4 Άλεση αλεύρου ολικής άλεσης (T90) με χρήση jet mill.....	54
Πίνακας 5.5 Συνταγή για την ανάπτυξη μπισκότων βασισμένη στο % βάρος του αλεύρου .....	54
Πίνακας 5.6 Μίγματα αλεύρων και κωδικοποίηση συνταγών για μπισκότα.....	55
Πίνακας 5.7 Κύρια συνταγή για την ανάπτυξη άρτων βασισμένη στο % βάρος του αλεύρου .....	56
Πίνακας 5.8 Παράμετροι σχήματος που υπολογίστηκαν .....	57

### Κεφάλαιο 6

Πίνακας 6.1 Τιμές χαρακτηριστικών μέσων διαμέτρων D32, D43 και D50 των κλασμάτων αλεύρου σίτου CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF) .....	72
Πίνακας 6.2 Χημική σύσταση και λειτουργικές ιδιότητες των κλασμάτων αλεύρου σίτου CF, MF, FF, και JCF.....	74
Πίνακας 6.3 Εξισώσεις κατανάλωσης ενέργειας κατά τη μείωση μεγέθους .....	80
Πίνακας 6.4 Συνθήκες άλεσης και αποδοτικότητα μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα .....	82
Πίνακας 6.5 Μαθηματικά μοντέλα για την κοκκομετρία του αλεύρου και την κατανάλωση ενέργειας .....	85
Πίνακας 6.6 Φυσικά χαρακτηριστικά και χημική σύσταση αλεύρων που παρήχθησαν με χρήση διαφορετικών συνθηκών άλεσης σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα και του αρχικού δείγματος .....	88
Πίνακας 6.7 Συντελεστές συσχέτισης ιδιοτήτων αλεύρων κονιορτοποιημένων σε διαφορετικές συνθήκες άλεσης με πεπιεσμένο αέρα .....	89
Πίνακας 6.8 Συνθήκες άλεσης και κοκκομετρίες παραγόμενων αλεύρων ολικής άλεσης .....	96

Πίνακας 6.9 Ιδιότητες χρώματος αλεύρων και χαρακτηριστικά πιτύρων που υπάρχουν σε αυτά.....	100
Πίνακας 6.10 Φυσικοχημικές ιδιότητες αλεύρου ολικής άλεσης (WWF) και αλεύρων που προέκυψαν από αυτό με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα σε διαφορετικές συνθήκες άλεσης .....	101
Πίνακας 6.11 Παράμετροι κινητικής υδρόλυσης αμύλου αλεύρου ολικής άλεσης (WWF) και αλεύρων που προέκυψαν από αυτό με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα σε διαφορετικές συνθήκες άλεσης .	102
Πίνακας 6.12 Κωδικοποίηση δειγμάτων και υποκαταστάσεις στο άλευρο μπισκοτοποιίας (BF) .....	106
Πίνακας 6.13 Ικανότητα συγκράτησης νερού (WHC), ιξώδες ζύμης και μέγεθος κοκκομετρίας αλεύρου (D50).....	109
Πίνακας 6.14 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μπισκότων .....	108
Πίνακας 6.15 Συνταγές για την παραγωγή άρτων με διαφορετικά ποσοστά νερού (65, 75 και 85%) με άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF ή επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4.....	119
Πίνακας 6.16 Φυσικές ιδιότητες άρτων παραγόμενων με άλευρο ολικής άλεσης σίτου WB και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε διάφορες συνθήκες JB1, JB2, JB3, JB4 και με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού (65, 75 και 85%) .....	121
Πίνακας 6.17 Συντελεστές συσχέτισης των φυσικών και μορφολογικών ιδιοτήτων άρτων ολικής άλεσης (με έντονο μαύρο σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις).....	122
Πίνακας 6.18 Μαθηματικό μοντέλο για τη σκληρότητα της ψίχας του άρτου .....	128
Πίνακας 6.19 Χαρακτηριστικές παράμετροι αλεύρων που υπολογίζονται με φαρινογράφο.....	129
Πίνακας 6.20 Συνταγές για την παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού και σε ποσοστό (%) επί του βάρους του αλεύρου.....	131
Πίνακας 6.21 Φυσικές Ιδιότητες άρτων παραγόμενων από άλευρο ολικής άλεσης (WWF) και λεπτόκοκκα αλεσμένα WWF .....	132
Πίνακας 6.22 Μορφολογικά χαρακτηριστικά άρτων παραγόμενων με άλευρα ολικής άλεσης και προσδιορισμός χρωματικών παραμέτρων ψίχας.....	133
Πίνακας 6.23 Συντελεστές συσχέτισης των φυσικών και μορφολογικών ιδιοτήτων ιδιοτήτων άρτων ολικής άλεσης (με έντονο μαύρο σημειώνονται οι σημαντικές συσχετίσεις).....	135
Πίνακας 6.24 Επίδραση κονιορτοποίησης αλεύρου ολικής άλεσης στη συνολική αποδοχή άρτων ....	136
Πίνακας 6.25 Δείκτης μπαγιατέματος παραγόμενων άρτων .....	138
Πίνακας 6.26 Συνταγές για την παραγωγή άρτων με βάση την απορρόφηση νερού (%) από το Mixolab για το άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4.....	143
Πίνακας 6.27 Παράμετροι που υπολογίστηκαν από τις καμπύλες του Mixolab για άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4. ....	144
Πίνακας 6.28 Φυσικές ιδιότητες παραγόμενων άρτων .....	148
Πίνακας 6.29 Παράμετροι από την κινητική της in vitro υδρόλυσης αμύλου, υπολογιζόμενος γλυκαιμικός δείκτης, και in vitro πέψη άρτων ολικής άλεσης σίτου WBM και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε διάφορες συνθήκες JM1, JM2, JM3, JM4.....	148



## 1. Γενική Εισαγωγή

---

Η διεργασία της άλεσης έχει ως κύριο στόχο τη μείωση του μεγέθους της πρώτης ύλης σε μικρότερα σωματίδια. Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα (jet milling) είναι μια διεργασία που τα τελευταία χρόνια έχει έρθει στο προσκήνιο με νέες εφαρμογές σε τρόφιμα. Η μοναδική ικανότητα του μύλου αυτού να αλέθει ιδιαίτερα σκληρά και θερμοευαίσθητα υλικά παράγοντας αλέσματα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά που φτάνουν σε μέγεθος κοκκομετρίας  $D_{50}$  έως και 10  $\mu\text{m}$ , τον καθιστά αναμφισβήτητα ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βιομηχανία τροφίμων. Ο ορισμός των ορίων λειτουργίας, η κατανόηση και η βελτιστοποίηση του μύλου είναι προαπαιτούμενα για την ορθή του χρήση.

Στην Ελλάδα ημερησίως καταναλώνονται περίπου 340 g σίτου ανά κάτοικο (<http://faostat.fao.org/site/609/DesktopDefault.aspx?PageID=609#ancor>). Η πλειοψηφία του σιταριού αλέθεται σε ποσοστό απόδοσης 65-75%. Ωστόσο, την τελευταία δεκαετία η έρευνα επικεντρώνεται στο άλευρο ολικής άλεσης (ποσοστό απόδοσης περίπου 90%, το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με τη χώρα παραγωγής), κυρίως λόγω της υψηλής διατροφικής του αξίας και της στροφής των καταναλωτών σε πιο υγιεινές διατροφικές συνήθειες. Αν και οι καταναλωτές επιθυμούν να απολαμβάνουν τα οφέλη από την κατανάλωση προϊόντων ολικής άλεσης, συχνά απορρίπτουν αυτά τα προϊόντα εξαιτίας της ανάπτυξης ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών, όπως τραχιά και αμμώδη υφή, έντονο άρωμα σπόρου, μικρότερη διόγκωση, παρουσία πιτύρων κ.ά. Ως εκ τούτου η ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ολικής άλεσης με βελτιωμένα χαρακτηριστικά αποτελεί πρόκληση τόσο για τη βιομηχανία όσο και για την επιστήμη των τροφίμων.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω η παρούσα διατριβή είχε ως στόχο την παραγωγή και μελέτη προϊόντων αρτοποιίας με άλευρα που κονιορτοποιήθηκαν με χρήση jet mill. Για το σκοπό αυτό αρχικά έγινε σύγκριση της συμβατικής άλεσης και της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα. Ακολούθησε μελέτη των ορίων λειτουργίας του μύλου και επιλογή βέλτιστων συνθηκών άλεσης, οι οποίες εφαρμόστηκαν σε άλευρο ολικής άλεσης. Τα παραγόμενα άλευρα μελετήθηκαν ως προς τις φυσικοχημικές και λειτουργικές τους ιδιότητες. Στη συνέχεια, τα μικροαλεσμένα άλευρα ολικής άλεσης ενσωματώθηκαν σε τελικά προϊόντα αρτοποιίας, με σκοπό τη βελτίωση των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. Αρχικά έγινε ενσωμάτωση σε μπισκότα τύπου digestive ώστε να αυξηθεί η συγκέντρωση αλεύρου ολικής άλεσης σε αυτά, χωρίς να υποβαθμιστεί ποιοτικά το προϊόν. Ακολούθησε ενσωμάτωση σε άρτους. Ταυτόχρονα με τη μελέτη της επίδραση της μικροάλεσης του αλεύρου ολικής άλεσης στον άρτο, διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών ποσοτήτων νερού σε αυτό.

## 2. Σίτος και άλευρα σίτου

Ο σίτος (*Triticum spp*) είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος σπόρος στα προϊόντα αρτοποιίας (Edwards, 2007). Ανήκει στην οικογένεια των Αγρωστωδών (*Gramineae*) ή Ποωδών (*Poaceae*). Τα πιο ευρέως καλλιεργούμενα είδη είναι το μαλακό σιτάρι (*Triticum aestivum*), που χρησιμοποιείται στα προϊόντα αρτοποιίας. Η άλεσή του δίνει το κοινό λευκό άλευρο και το σκληρό σιτάρι (*Triticum durum*) από την άλεση του οποίου προκύπτει κίτρινο άλευρο, σιμιγδάλι για την παραγωγή χωριάτικου ψωμιού και ζυμαρικών. Στην Ελλάδα ο σίτος για το 2013 αποτέλεσε το προϊόν με την τρίτη μεγαλύτερη παραγωγή σε ποσότητα (Πίνακας 2.1), ενώ στην Ευρώπη το σιτάρι κατείχε την πρώτη θέση στην παραγωγή φυτικών προϊόντων (226 Mt) (<http://faostat.fao.org/desktopdefault.aspx?pageid=342&lang=en&country=84>).

Σύμφωνα με το Διεθνές Συμβούλιο Σιτηρών (International Grains Council), η παραγωγή σίτου το 2015 έφτασε σε παγκόσμιο επίπεδο τους 721 εκατομμύρια τόνους. Σύμφωνα με τις προβλέψεις για το 2016 η παραγωγή αναμένεται να μειωθεί και να φτάσει τους 726 εκατομμύρια τόνους ([http://www.igc.int/en/downloads/grainsupdate/IGC\\_5yearprojections2015.pdf](http://www.igc.int/en/downloads/grainsupdate/IGC_5yearprojections2015.pdf)).

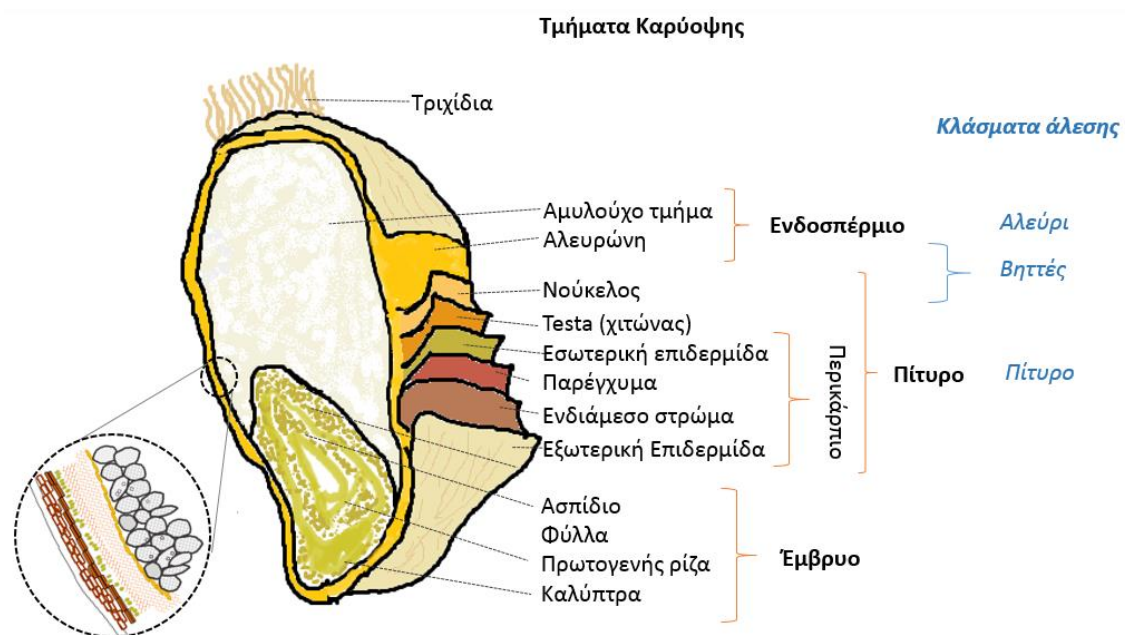
**Πίνακας 2.1 Κορυφαία προϊόντα που παράχθηκαν στην Ελλάδα για το 2013**  
([http://faostat3.fao.org/browse/rankings/commodities\\_by\\_country/E](http://faostat3.fao.org/browse/rankings/commodities_by_country/E)).

	<b>Προϊόν</b>	<b>Ποσότητα (t)</b>
1	Καλαμπόκι	2.259.526
2	Ελιές	1.917.623
3	Σιτάρι	1.857.198
4	Τομάτες	1.039.700
5	Σταφύλια	957.400
6	Πατάτες	903.486
7	Πορτοκάλια	805.500
8	Γάλα αγελαδινό	805.000
9	Γάλα κατσικίσιο	705.000
10	Ροδάκινα και νεκταρίνια	666.200

### 2.1. Δομή σίτου

Ο καρπός του σίτου είναι καρύοψη μήκους 5-8 mm, πλάτους 2,5-4,5 mm και βάρους 30-45 mg. Ανατομικά χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές, το πίτυρο, το ενδοσπέρμιο και το έμβρυο (Σχήμα 2.1). Το περικάρπιο, το μεγαλύτερο μέρος του πίτυρου, αποτελεί

το 12-15% του σπόρου και αφαιρείται κατά την άλεση μαζί με το στρώμα αλευρώνης του ενδοσπερμίου, δηλαδή το εξωτερικό τμήμα του σπόρου. Περικλείει ολόκληρο τον σπόρο και αποτελείται από εσωτερικά και εξωτερικά στρώματα. Το ενδοσπέρριο αποτελεί το 81-86% του σπόρου από όπου προκύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό αλεύρου κατά την άλεση. Το αμυλούχο ενδοσπέρριο περιέχει κόκκους αμύλου ενσωματωμένους ή που περιβάλλονται από ένα άμορφο πλέγμα πρωτεΐνης. Τρεις τύποι κυττάρων (περιφερειακά, πρισματικά και κεντρικά) απαρτίζουν το μεγαλύτερο μέρος του ενδοσπερμίου σίτου. Η ποικιλία του σίτου καθορίζει την εμφάνιση και την σκληρότητα του σπόρου. Σε γενικές γραμμές υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη συσχετίζεται με υαλώδης σπόρους. Το έμβρυο αποτελεί μόλις το 2-3% της καρύωσης και εμπεριέχει δύο βασικά τμήματα: τον εμβρυακό άξονα (πρωτογενής ρίζα και εμβρυακά φύλλα) και το ασπίδιο (Hui, 2006). Αυτό το τμήμα του σπόρου αποτελεί το κέντρο της φυσικοχημικής δραστηριότητας του σίτου. Δομικά αποτελείται από υποτυπώδη όργανα τα οποία συνθέτονται από μια μάζα μικρών κελιών των οποίων οι πυρήνες καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα τους. Υπό τις κατάλληλες συνθήκες υγρασίας και θέρμανσης, τα κύτταρα του εμβρύου αρχίζουν να διαιρούνται και χημικές διεργασίες ξεκινούν με αποτέλεσμα την ταχεία ανάπτυξη νέων ιστών. Οι αλλαγές στη δομή και ως εκ τούτου στη σύσταση, η οποία μεταβάλλεται κατά την ανάπτυξη του εμβρύου και του σπόρου, υποδηλώνει μια χημική αστάθεια. Σε σχέση με τα άλλα τμήματα του σπόρου, περιέχει υψηλά ποσοστά διαλυτών υδατανθράκων (15-18%).



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση ανατομίας καρπού σίτου.

## 2.2. Χημική σύσταση σίτου

Η ανατομία και η δομή του σίτου συσχετίζονται άμεσα με τις διαφορές που παρουσιάζονται στη σύσταση των διαφόρων βασικών τμημάτων του. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η τυπική χημική σύσταση ολόκληρου του σίτου καθώς και των βασικών

του τμημάτων. Το άμυλο είναι συσσωρευμένο στο ενδοσπέρμιο, ενώ το έμβρυο είναι πλούσιο σε πρωτεΐνες και λίπη. Το πίτυρο χαρακτηρίζεται από την υψηλή περιεκτικότητα σε πεντοζάνες (κυτταρίνη).

**Πίνακας 2.2 Σύσταση διαφορετικών τμημάτων του καρπού σιταριού (Dobraszczyk, 2001).**

<b>Τμήματα Καρπού</b>	<b>Συνολικό Βάρος (%)</b>	<b>Άμυλο (%)</b>	<b>Πρωτεΐνη (%)</b>	<b>Λίπη (%)</b>	<b>Πεντοζάνες (%)</b>	<b>Ιχνοστοιχεία (%)</b>
Ενδοσπέρμιο	82-85	70-85	8-13	1-1,6	0,5-3	0,3-0,8
Πίτυρο	15	0	7-8	01-5	30-40	3-10
Έμβρυο	3	20	35-50	15	20	5-6
Ολόκληρος	100	60-70	10-14	1,5-2,5	5-8	1,6-2

### 2.2.1. Άμυλο

Ο σίτος είναι πλούσιος σε υδατάνθρακες με βασικό εκπρόσωπο το άμυλο (60-70%). Ακολουθούν οι αραβινοξυλάνες (1,5-8%), οι β-γλυκάνες (0,5-7%), τα σάκχαρα (~3%) και οι γλυκοφρουκτάνες (~1%). Το άμυλο είναι ο κύριος αποθηκευτικός υδατάνθρακας για το σίτο. Εξαιτίας των μοναδικών ιδιοτήτων του καθορίζει την υφή πολλών τροφίμων και ιδιαιτέρως των προϊόντων αρτοποιίας (Goesaert et al., 2005).

#### 2.2.1.1. Αμυλόζη και Αμυλοπηκτίνη

Το άμυλο εμφανίζεται με την μορφή κόκκων και αποτελείται από δύο αδιάλυτες στο νερό ομογλυκάνες, την αμυλόζη και την αμυλοπηκτίνη. Φυσιολογικά το άμυλο σίτου αποτελείται από 25-28% αμυλόζη και 72-75% αμυλοπηκτίνη. Η αμυλόζη είναι ένα γραμμικό πολυμερές που αποτελείται από 500-6000 περίπου μονάδες D- γλυκόζης συνδεδεμένες με α-(1→4) γλυκοζιτικούς δεσμούς (Shibanuma et al., 1994) και έχει μοριακό βάρος  $8 \times 10^4$  έως  $10^6$ . Η αμυλοπηκτίνη είναι υπεύθυνη για την κοκκώδη μορφή του αμύλου. Περιέχει 30000-3000000 μονάδες γλυκόζης και ως εκ τούτου έχει σημαντικά υψηλότερο μοριακό βάρος ( $10^7$ - $10^9$ ) από την αμυλόζη (Buléon et al., 1998). Η σύνδεση των δομικών δομών της αμυλοπηκτίνης είναι διακλαδισμένη αποτελούμενη κυρίως από α-(1→4) γλυκοζιτικούς δεσμούς και σε ένα μικρότερο ποσοστό, 4-5%, από α-(1→6) γλυκοζιτικούς δεσμούς, που επίσης ονομάζονται σημεία διακλάδωσης.

#### 2.2.1.2. Αμυλόκοκκοι

Στο ενδοσπέρμιο σίτου το άμυλο εμφανίζεται με τη μορφή δύο διαφορετικών πληθυσμών κόκκων που διαφέρουν σε μέγεθος και σχήμα. Παρουσιάζονται μικροί σφαιρικοί κόκκοι τύπου Β με μέσο μέγεθος τα 5 μm και μεγαλύτεροι, ελλειψοειδείς, τύπου Α με μέση διάμετρο 20 μm (Karlsson et al., 1983). Με χρήση μικροσκοπίου πόλωσης φαίνεται η μερικώς κρυσταλλική δομή των κόκκων. Ο βαθμός κρυσταλλικότητας κυμαίνεται μεταξύ 20-40% (Hizukuri, 1996) και κυρίως οφείλεται



στη δομή της αμυλοπηκτίνης. Σε μικροσκοπικό επίπεδο παρατηρούνται ημικρυσταλλικές και άμορφες δομές. Οι άμορφες δομές είναι λιγότερο πυκνές, πλούσιες σε αμυλόζη και περιέχουν μη κρυσταλλική αμυλοπηκτίνη (Buléon et al., 1998).

### 2.2.1.3. Άμυλο και διεργασίες

Σε πολλές διεργασίες στη βιομηχανία τροφίμων το άλευρο ή και το άμυλο χρησιμοποιούνται διεσπαρμένα στο νερό και υπό θέρμανση. Η θέρμανση επιφέρει μια σειρά δομικών αλλαγών που ονομάζονται ζελατινοποίηση (Atwell et al., 1988). Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό, την κατανομή του και την ένταση της θερμικής διεργασίας, η μοριακή δομή των αμυλόκοκκων μπορεί να μεταμορφωθεί πλήρως από ημικρυσταλλική σε άμορφη. Κατά τη διάρκεια της ανάμιξης το άμυλο απορροφά νερό έως και 50% του ξηρού του βάρους. Η απορρόφηση οφείλεται στον εγκλωβισμό του νερού στον κενό χώρο μεταξύ των κόκκων και στη διόγκωση (swelling). Η διόγκωση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Εάν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας ζελατινοποίησης, οι περιγραφόμενες αλλαγές είναι αναστρέψιμες. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, περισσότερο νερό διεισδύει στους αμυλόκοκκους και ξεκινάει η διαδικασία ενυδάτωσης. Η άμορφη περιοχή ενυδατώνεται περαιτέρω αυξάνοντας τη μοριακή κινητικότητα επηρεάζοντας την κρυσταλλική δομή, στην οποία οι κρύσταλλοι λιώνουν (Tester & Debon, 2000, Waigh et al., 2000). Οι αντιδράσεις αυτές είναι ενδόθερμες και μη αναστρέψιμες. Συνοδεύονται με απώλεια της ικανότητας στροφής του πολωμένου φωτός (birefringence), που μπορεί να παρατηρηθεί με χρήση πολωμένου μικροσκοπίου.

Με χρήση θερμιδόμετρου διαφορικής σάρωσης (DSC) μπορεί επίσης να παρατηρηθεί το ενδόθερμο λιώσιμο των κρυστάλλων. Οι μετρήσεις ιξώδους, με χρήση αμυλογράφου ή άλλων οργάνων μέτρησης ιξώδους όπως, rapid visco analyzer, μπορεί επίσης να επιτρέψει την παρακολούθηση του φαινομένου της ζελατινοποίησης. Χαρακτηριστικά σημεία είναι η θερμοκρασία έναρξης της ζελατινοποίησης ( $T_0$  περίπου 45 °C), η μέγιστη τιμή ( $T_p$  περίπου 60 °C) και η τελική θερμοκρασία ( $T_c$  περίπου 75 °C). Αυτές οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται και εξαρτώνται από τη φύση του αμύλου και την περιεκτικότητα του εναιωρήματος σε νερό. Η απώλεια της μοριακής δομής και της κρυσταλλικότητας κατά τη ζελατινοποίηση συνοδεύεται από περαιτέρω διόγκωση των αμυλόκοκκων εξαιτίας της αυξανόμενης απορρόφησης νερού και μιας περιορισμένης διαλυτοποίησης του αμύλου. Η αμυλόζη είναι κυρίως διαλυτή στο νερό, αυξάνοντας σημαντικά το ιξώδες του εναιωρήματος. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από το διαχωρισμό φάσης της αμυλόζης με την αμυλοπηκτίνη που είναι μη αναμίξιμα (Kalichevsky & Ring, 1987). Περαιτέρω θέρμανση έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πάστας αμύλου αποτελούμενη από διαλυτοποιημένο άμυλο και διογκωμένους, άμορφους αμυλόκοκκους. Το σχήμα των αμυλόκοκκων στο στάδιο αυτό είναι ακόμα εμφανές, εκτός και αν εφαρμοστεί διαμητική τάση ή υψηλότερες θερμοκρασίες (Tester & Debon, 2000, Eliasson & Gudmundsson, 1996).

Κατά τη διάρκεια της ψύξης εάν υπάρχει συνεχής ανάδευση το ιξώδες της πάστας αμύλου αυξάνεται, ενώ εάν δεν υπάρχει ανάδευση ένα πήγμα αμύλου (gel) σχηματίζεται σε συγκεντρώσεις πάνω από 6%. Η δεύτερη διεργασία σχετίζεται άμεσα με τα προϊόντα αρτοποιίας. Οι αλλαγές που συμβαίνουν κατά την ψύξη και αποθήκευση στην πάστα αμύλου ορίζονται ως αναδιάταξη αμύλου (retrogradation) (Atwell et al., 1988). Γενικά, η άμορφη δομή μπορεί να διαταχθεί πάλι σε μια κρυσταλλική μορφή. Η αναδιάταξη μπορεί να διαιρεθεί σε δύο υποδιεργασίες. Η πρώτη συνδέεται με την αμυλόζη και συμβαίνει σε ένα εύρος χρόνου από μερικά λεπτά έως κάποιες ώρες, ενώ η δεύτερη συνδέεται με την αμυλοπηκτίνη και συμβαίνει μετά από ώρες ή ημέρες. Έτσι, η αναδιάταξη της αμυλόζης είναι υπεύθυνη για την αρχική σκληρότητα του πήγματος αμύλου ή του ψωμιού, ενώ από την άλλη η αναδιάταξη της αμυλοπηκτίνης καθορίζει τη μακροπρόθεσμη δομή του σχηματιζόμενου πήγματος, την κρυσταλλικότητα και τη σκληρότητα τροφίμων που περιέχουν άμυλο. Κατά την ψύξη, υπολείμματα κόκκων που είναι εμπλουτισμένα σε άμορφη αμυλοπηκτίνη ενσωματώνονται σε ένα συνεχές πλέγμα αμυλόζης. Τα μόρια αμυλόζης που διαλύονται κατά την ζελατινοποίηση επανασυνδέονται σε διπλές έλικες μέσω ενυδατωμένων τμημάτων του μορίου σχηματίζοντας ένα συνεχές πλέγμα (Miles et al., 1985). Καθώς η αναδιάταξη της αμυλόζης προχωρά, συνεχίζεται ο σχηματισμός διπλής έλικας και τελικά πολύ σταθερές κρυσταλλικές δομές σχηματίζονται, οι οποίες δεν μπορούν να λιώσουν σε ενδεχόμενη θέρμανση. Η αναδιάταξη της αμυλοπηκτίνης απαιτεί πολλές ώρες ή ημέρες και συμβαίνει σε υπολείμματα κόκκων που έχουν ενσωματωθεί στο αρχικό πήγμα αμυλόζης (Miles et al., 1985). Οι κρύσταλλοι της αμυλοπηκτίνης λιώνουν περίπου στους 60 °C. Ως εκ τούτου, το ψωμί μπορεί μερικώς να «φρεσκαριστεί» με θέρμανση. Το λεγόμενο μπαγιάτεμα μπορεί να μετρηθεί με χρήση του DSC, αξιολογώντας την αναδιάταξη της αμυλοπηκτίνης η οποία δύναται να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες όπως το pH, η παρουσία η απουσία συστατικών χαμηλού μοριακού βάρους όπως αλάτι, σάκχαρα και λιπίδια (Eliasson & Gudmundsson, 1996).

#### **2.2.1.4. Ανθεκτικό άμυλο (Resistant Starch, RS)**

Ως ανθεκτικό άμυλο ορίζεται το άμυλο που δεν απορροφάται στο λεπτό έντερο των ανθρώπων. Διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι RS που ορίστηκαν από τους Englyst et al. (1996). Ο τύπος 1 ορίζεται ως φυσικώς απρόσιτο, ο τύπος 2 (RS2) ως φυσικό άμυλο και ο τύπος 3 (RS3) ως αναδιατεταγμένο άμυλο. Μία τέταρτη κατηγορία είναι τα χημικώς τροποποιημένα άμυλα. Το ανθεκτικό άμυλο φέρεται να είναι ένα ευεργετικό και καλό μέσο ζύμωσης στο παχύ έντερο λόγω της υψηλής παραγωγής βουτυρικού, το οποίο θεωρείται ότι παίζει σημαντικό ρόλο στη πρόληψη του καρκίνου στο παχύ έντερο. Τα προϊόντα ζύμωσης από το RS είναι γνωστό ότι μειώνουν το pH στο κόλον οδηγώντας στη μειωμένη παραγωγή δυνητικά επιβλαβών υποπροϊόντων, όπως αμμωνία και φαινόλες που κατηγορούνται ότι προωθούν την ογκογένεση (Fassler et al., 2006). Επιπρόσθετα, ο χαμηλός γλυκαιμικός του δείκτης συνδέεται με οφέλη υγείας και πιο συγκεκριμένα με ρύθμιση του διαβήτη τύπου 2 (Behall et al., 2006, Konik-Rose et al., 2007).

## 2.2.2. Πρωτεΐνη

Η περιεκτικότητα του σπόρου σε πρωτεΐνη εξαρτάται από το γενότυπο και τις συνθήκες ανάπτυξης και καλλιέργειας του σπόρου. Ιδιαίτερα σημαντικά είναι ο χρόνος και η ποσότητα της αζωτούχας λίπανσης. Οι πρωτεΐνες κατανέμονται σε όλα τα τμήματα του καρπού αλλά σε σημαντικά διαφορετικές αναλογίες. Το έμβryo χαρακτηρίζεται από την υψηλή περιεκτικότητά του σε πρωτεΐνη (>30%), το ενδοσπέρμιο περιέχει έως 13% πρωτεΐνη ενώ το πίτυρο περίπου 7% (Belitz et al., 2009). Οι πρωτεΐνες μπορούν να κατανεμηθούν σύμφωνα με την εκχυλιστικότητα και τη διαλυτότητά τους σε διάφορους διαλύτες. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η κλασική ταξινόμηση του Osborne T. B. όπως διαφοροποιήθηκε από τους Goesaert et al. (2005).

Σύμφωνα με την κλασική ταξινόμηση, οι αλβουμίνες είναι διαλυτές σε νερό, οι σφαιρίνες αδιάλυτες σε νερό, αλλά διαλυτές σε αραιό διάλυμα NaCl και αδιάλυτες σε πυκνό, οι γλιαδίνες είναι διαλυτές σε 70% αιθυλική αλκοόλη και οι γλουτενίνες διαλύονται σε αραιό οξύ ή υδροξείδιο του νατρίου.

Οι αλβουμίνες είναι οι μικρότερες πρωτεΐνες του σίτου και ακολουθούνται σε μέγεθος από τις γλοβουλίνες. Τα περισσότερα ένζυμα στο σίτο συναντώνται στις αλβουμίνες και τις γλοβουλίνες οι οποίες συγκεντρώνονται κυρίως στο περίβλημα, στην αλευρώνη και στο ενδοσπέρμιο του σπόρου και καλύπτουν περίπου το 25% της συνολικής πρωτεΐνης του σπόρου (Belderok et al., 2000).

Οι γλιαδίνες και οι γλουτενίνες είναι αποθηκευτικές πρωτεΐνες και αποτελούν περίπου το 75% των πρωτεϊνών του σίτου. Βρίσκονται στο αλευρώδες ενδοσπέρμιο και όχι στο πίτυρο ή στο έμβryo. Πρόκειται για μοναδικές πρωτεΐνες εξαιτίας του τεχνολογικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν. Δεν έχουν ενζυμική δράση, αλλά βοηθούν στην παραγωγή ζύμης με σπογγώδη δομή καθώς συγκρατούν τα αέρια που παράγονται (Belderok et al., 2000).

### 2.2.2.1. Γλουτένη

Ο σίτος είναι μοναδικός ανάμεσα στους άλλους δημητριακούς καρπούς λόγω της ικανότητας του αλεύρου του να σχηματίζει συνεκτική, ιξωδοελαστική ζύμη κατά την ανάμιξή του με νερό. Το παραγόμενο ζυμάρι συγκρατεί τα αέρια που παράγονται κατά τη ζύμωση οδηγώντας στη διόγκωση των καρβελιών η οποία διατηρείται και μετά το ψήσιμο. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι οι πρωτεΐνες της γλουτένης, γλιαδίνες και γλουτενίνες, καθορίζουν τις ιδιότητες της ζύμης. Η γλιαδίνη ενυδατωμένη έχει μικρή ελαστικότητα και είναι λιγότερο συνεκτική από τη γλουτενίνη και συνεισφέρει κυρίως στο ιξώδες και την εκτατότητα της ζύμης. Από την άλλη η γλουτενίνη ενυδατωμένη προσδίδει ελαστικότητα και συνεκτικότητα στη ζύμη (Wieser et al., 2006). Μια σωστή αναλογία των δύο (γλιαδίνη: γλουτενίνη, 2:1) μπορεί να δώσει επιθυμητές ιδιότητες σε ζύμη και ψωμί.

Πίνακας 2.3 Ταξινόμηση πρωτεϊνών κατά Osborne, τροποποιημένη από τους Goesaert et al. (2005).

Κλάσματα κατά Osborne	Διαλυτότητα	Σύσταση	Βιολογικός ρόλος	Λειτουργικός ρόλος
Αλβουμίνη	Νερό και ρυθμιστικό διάλυμα	Πρωτεΐνες εκτός γλουτένης (κυρίως μονομερής)	Μεταβολικές και δομικές πρωτεΐνες	Προστασία από παθογόνα
Γλοβουλίνη	Αλάτι	Πρωτεΐνες εκτός γλουτένης (κυρίως μονομερής)	Μεταβολικές και δομικές πρωτεΐνες	Παρέχει αποθέματα τροφής στο έμβρυο
Γλιαδίνη	Υδατική αλκοόλη	Πρωτεΐνες γλουτένης (κυρίως μονομερής, χαμηλού μοριακού βάρους)	Προλαμίνες-αποθηκευτικές πρωτεΐνες	Ιξώδες/ Πλαστικότητα ζύμης
Γλουτενίνη	Οξικό οξύ	Πρωτεΐνες γλουτένης (υψηλού μοριακού βάρους)	Προλαμίνες-αποθηκευτικές πρωτεΐνες	Ιξώδες/ Πλαστικότητα ζύμης
Υπόλειμμα	Μη εκχυλίσιμη σε νερό και ρυθμιστικό διάλυμα. Εκχυλίσιμο σε ουρία+DTT+SDS, SDS+φωσφορικό διάλυμα+υπέρηχο κ.α.	Πρωτεΐνες γλουτένης (υψηλού μοριακού βάρους) και πολυμερή εκτός γλουτένης	Προλαμίνες-αποθηκευτικές πρωτεΐνες	-

### 2.2.3. Λίπη

Ο σίτος δεν είναι πλούσιος σε λίπη, ωστόσο τα λιπαρά του επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα και την υφή των τροφίμων εξαιτίας της αμφιπαθητικής τους ιδιότητας να συνδέονται με πρωτεΐνες και άμυλο δημιουργώντας σύμπλοκα.

Βρίσκονται κυρίως στο έμβρυο του σπόρου (11%) και σε μικρό ποσοστό στο στρώμα της αλευρώνης και ακόμα μικρότερο στο ενδοσπέρμιο. Τα λιπαρά των σιτηρών έχουν παρόμοια σύσταση και αποτελούνται από λινολεϊκό οξύ σε ποσοστό 39-69%, ολεϊκό οξύ 11-36% και παλμιτικό οξύ 18-28% (Delcour & Hosenev, 2010). Τα τριγλυκερίδια βρίσκονται κυρίως στο έμβρυο και στο στρώμα της αλευρώνης ενώ τα φωσφολιπίδια και τα γλυκολιπίδια εδράζουν στο ενδοσπέρμιο. Ανάλογα με το ρυθμό εκχύλισης το άλευρο σίτου μπορεί να περιέχει 0,5-3% λίπη (Hosenev, 1994).

### 2.2.4. Ιχνοστοιχεία

Το μεγαλύτερο ποσοστό των ιχνοστοιχείων (>90%) βρίσκεται στο πίτυρο, στην αλευρώνη και το έμβρυο. Κατά συνέπεια προϊόντα ολικής άλεσης προτείνονται με σκοπό την αύξηση της διατροφής σε ιχνοστοιχεία.

### 2.2.5. Ίνες

Πολυάριθμες μελέτες (π.χ. Weickert & Pfeiffer, 2008, Rave et al., 2007) αποδεικνύουν την ευεργετική δράση από την κατανάλωση των ινών κατά καρδιακών παθήσεων και καρκίνου. Επιπρόσθετα, συμβάλλουν στην ομαλοποίηση του επιπέδου λίπους στο αίμα, στη ρύθμιση της γλυκόζης και στην πρόληψη της δυσκοιλιότητας. Ως φυτική ίνα ορίζεται η λιγνίνη συν τα συστατικά των πολυσακχαριτών των φυτών που είναι άπεπτα από ένζυμα του ανθρώπινου γαστρεντερικού σωλήνα (Bermink, 1994). Αυτά τα συστατικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις διαλυτές και τις αδιάλυτες ίνες. Οι διαλυτές σε νερό διαιτητικές ίνες περιλαμβάνουν πηκτικούς παράγοντες και υδροκολλοειδή. Στις αδιάλυτες ίνες ανήκουν οι κυτταρίνες, οι ημικυτταρίνες και η λιγνίνη. Τα δημητριακά ολικής άλεσης είναι καλή πηγή αδιάλυτων φυτικών ινών. Οι αραβινοξυλάνες (AX) και οι (1→3),(1→4)-β-γλυκάνες είναι κύρια συστατικά του κυτταρικού τοιχώματος στο ενδοσπέρμιο του σίτου.

Η αυξανόμενη ενημέρωση των καταναλωτών για τα πιθανά οφέλη μιας δίαιτας πλούσιας σε φυτικές ίνες έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση προϊόντων ολικής άλεσης. Παραδοσιακά, η ενίσχυση σε ίνες έχει επικεντρωθεί στη χρήση παραπροϊόντων άλεσης δημητριακών καρπών και για το λόγο αυτό υπάρχει εκτεταμένη έρευνα.

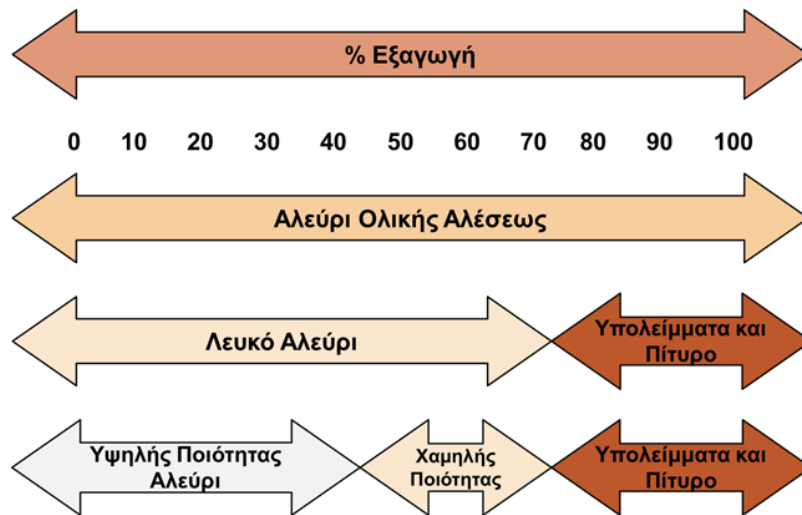
## 2.3. Άλευρα σίτου στην Ελλάδα και διεθνώς

Ως άλευρο σίτου νοείται αποκλειστικά και μόνο το προϊόν άλεσης υγιούς σίτου βιομηχανικά καθαρισμένου από κάθε ανόργανη ή οργανική ουσία.

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (ΚΤΠ, Άρθρο 104, 2014), επιτρέπεται η παραγωγή αλεύρων τύπου 70%, τύπου 85%, τύπου 90%, κατηγορίας Π, κατηγορίας Μ και κατηγορίας Κ. Οι διαφορετικοί τύποι αλεύρου σχετίζονται με διαφορετικές προδιαγραφές ως προς τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά (υγρασία, πρωτεΐνες, λιπαρές ουσίες, πίτυρα, υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα). Η απόδοση της άλεσης χρησιμοποιείται για να εκφράσει το ποσοστό του καρπού σε άλευρο. Έτσι, ο όρος 70% αναφέρεται στα 70 κιλά αλεύρου που παράγονται από 100 κιλά σιτάρι. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται διαγραμματικά ο βαθμός απόδοσης του σπόρου σε άλευρο και τα προϊόντα που μπορεί να προκύψουν.

### 2.3.1. Άλευρα τύπου 70% (T70)

Πρόκειται για λευκό άλευρο, σχεδόν απαλλαγμένο από πίτυρο και είναι το πιο σύνηθες για την παραγωγή λευκού άρτου. Μπορεί να περιέχει υγρασία κατ' ανώτατο όριο 13,5% και λιπαρές ουσίες 1,1%. Η υγρή γλουτένη πρέπει να είναι τουλάχιστον 26% και για άλευρα αλλοδαπής τουλάχιστον 28%. Η τέφρα έχει ανώτατο όριο 0,5% και για άλευρα αλλοδαπής φτάνει το 0,55%. Το υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα έχει ανώτατο όριο 0,015%.



Σχήμα 2.2 Τυπική διαβάθμιση παραγόμενου αλεύρου (Hoseney, 1994).

### 2.3.2. Άλευρα τύπου 85%

Περιέχουν υγρασία κατ' ανώτατο όριο 14% και η υγρή γλουτένη πρέπει να είναι τουλάχιστον 25%. Η οξύτητα σεθειϊκό οξύ έχει ανώτατο όριο 0,13%. Η τέφρα πρέπει να είναι μεταξύ 0,85-0,9% και τα αντίστοιχα όρια για το πίτυρο είναι 4-5%. Το υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα έχει ανώτατο όριο 0,3% και οι λιπαρές ουσίες 1,8%.

### 2.3.3. Άλευρα τύπου 90% (T90)

Προερχόμενα από μαλακό σίτο πρέπει να έχουν υγρασία 14-14,5% και τέφρα 1,25-1,35%. Η υγρή γλουτένη πρέπει να είναι καλής ποιότητας, τουλάχιστον 25%. Η οξύτητα σεθειϊκό οξύ έχει ανώτατο όριο 0,15%. Το υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα έχει ανώτατο όριο 0,03% και το πίτυρο κυμαίνεται στα 10-13,5%.

### 2.3.4. Άλευρα κατηγορίας Π

Τα άλευρα αυτής της κατηγορίας αναφέρονται και ως άλευρα «πολυτελείας» και χρησιμοποιούνται ευρέως στη ζαχαροπλαστική. Η τέφρα δεν θα πρέπει να είναι ανώτερη του 0,45%. Το υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα έχει ανώτατο όριο 0,015% και η οξύτητα σεθειϊκό οξύ 0,07%. Απαιτείται γλουτένη καλής ποιότητας τουλάχιστον 28%. Όσον αφορά την υγρασία, φτάνει έως το 14% τη χειμερινή περίοδο.

### 2.3.5. Άλευρα κατηγορίας M

Τα άλευρα της κατηγορίας αυτής προέρχονται από σκληρό σίτο και χαρακτηρίζονται από το κίτρινό τους χρώμα. Η τέφρα είναι έως 0,9%, η γλουτένη καλής ποιότητας 25% τουλάχιστον, η μέγιστη οξύτητα σεθειϊκό οξύ 0,15% και το υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα έχει ανώτατο όριο 0,03%. Όσον αφορά την υγρασία, φτάνει έως το 14,5% τη χειμερινή περίοδο.

### 2.3.6. Άλευρα κατηγορίας K

Η τέφρα που περιέχεται στα άλευρα αυτής της κατηγορίας φτάνει έως το 1,4%. Το υπόλειμμα τετραχλωράνθρακα έχει ανώτατο όριο 0,03% και η οξύτητα σε θειικό οξύ 0,15%. Η γλουτένη καλής ποιότητας είναι τουλάχιστον 25%. Τέλος, η υγρασία κατά τη χειμερινή περίοδο επιτρέπεται να φτάσει το 14,5%.

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα διάφοροι τύποι αλεύρου χρησιμοποιούνται με τις παρακάτω εμπορικές ονομασίες:

### 2.3.7. Patent flour

Μειωμένος ρυθμός παραγωγής οδηγεί σε παραγωγή λευκού αλεύρου με την ονομασία *patent flour*. Το συγκεκριμένο άλευρο μπορεί να παραχθεί με άλεση του Baker's flour που οδηγεί σε μειωμένη συγκέντρωση πρωτεΐνης καλύτερης ποιότητας. Χρησιμοποιείται για αύξηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη σε φύλλα κρούστας ή για την παραγωγή λευκότερων άρτων (Edwards, 2007).

### 2.3.8. Μαλακό άλευρο

Τα είδη του μαλακού αλεύρου διαχωρίζονται κυρίως με βάση το τελικό προϊόν και τη χρήση τους.

#### 2.3.8.1. Άλευρο για όλες τις χρήσεις (Baker's flour)

Χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακή χρήση και μπορεί να περιέχει και σκληρό άλευρο σε ποσοστό 20%. Είναι λευκό και η τιμή falling number δεν θα πρέπει να είναι πολύ χαμηλή.

#### 2.3.8.2. Άλευρο που φουσκώνει μόνο του

Πρόκειται για μαλακό άλευρο στο οποίο έχουν προστεθεί βελτιωτικοί παράγοντες. Η υγρασία του είναι μικρότερη από 13,4%. Συνήθως περιέχουν όξινο ανθρακικό νάτριο (E500, NaHCO<sub>3</sub>) και οξύ φωσφορικού ασβεστίου (E341 [CaH<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]).

#### 2.3.8.3. Άλευρο για κέικ

Άλευρο που υπόκειται σε κατεργασία με χλώριο ή θέρμανση για λεύκανση.

#### 2.3.8.4. Άλευρο μπισκοτοποιίας

Εκτός από τα τύπου κράκερ τα υπόλοιπα μπισκότα παράγονται από μαλακό άλευρο με μικρή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη και κατεστραμμένο άμυλο. Όσον αφορά τη ζύμη,

θα πρέπει να είναι ελαστική. Στα ημίγλυκα μπισκότα (short dough) η ανάπτυξη της γλουτένης αποφεύγεται και χρησιμοποιούνται αναγωγικοί παράγοντες, όπως π.χ. διοξειδίο του θείου. Στα προϊόντα τύπου γκοφρέτας απαιτείται εκτατότητα της ζύμης.

### 2.3.9. Brown flour

Ο όρος αναφέρεται σε άλευρα με απόδοση λιγότερη από 100% και περισσότερη από 70%. Τα βελτιωτικά σε αυτό τον τύπο αλεύρου επιτρέπονται.

## 2.4. Άλευρο Ολικής άλεσης σίτου

Πρόκειται για άλευρο που προέρχεται από το σύνολο του σπόρου. Σύμφωνα με τον διεθνή ορισμό (AACC, 1999) το άλευρο ολικής άλεσης δύναται να παραχθεί από σίτο (εκτός του σκληρού) έτσι ώστε οι αναλογίες του σπόρου προ άλεσης –πίτυρο, έμβρυο και ενδοσπέρμιο– να παραμένουν αμετάβλητες. Η χλωρίωση του καθώς και οποιαδήποτε επιπρόσθετη επεξεργασία απαγορεύεται. Έχει μικρή διάρκεια ζωής (περίπου 3 μήνες) που πιθανότατα οφείλεται σε οξειδωση των λιπαρών που βρίσκονται στο εξωτερικό τμήμα του καρπού και απουσιάζουν από το λευκό άλευρο (Edwards, 2007). Ενώ δυνητικά κάθε άλευρο θα μπορούσε να είναι ολικής, το πρόβλημα δημιουργείται κατά την ενσωμάτωση αυτών των αλεύρων στα τελικά προϊόντα. Τα άλευρα αυτά είναι πλούσια σε πρωτεΐνες, ωστόσο η ποιότητά τους είναι χαμηλή καθώς ένα μεγάλο ποσοστό τους προέρχεται από το εξωτερικό περίβλημα του σίτου. Η επίδραση αυτή καθιστά σημαντικά δύσκολη την παραγωγή προϊόντων με μεγάλη εκτατότητα, όπως φύλλο ζαχαροπλαστικής. Το άλλο πρόβλημα είναι ότι τα σωματίδια πίτυρου διαρρηγνύουν τις φυσαλίδες αέρα, μειώνοντας το ποσοστό ανύψωσης-διόγκωσης του ψωμιού. Έτσι, τα ψωμιά ολικής άλεσης είναι πιο δύσκολα στον χειρισμό και η ποιότητά τους είναι υποδεέστερη από εκείνη των λευκών (Owens, 2001). Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια οι καταναλωτές δείχνουν αυξημένη προτίμηση σε προϊόντα ολικής άλεσης λόγω της αυξημένης διατροφικής τους αξίας. Διεθνώς οι εταιρίες τροφίμων ανταποκρινόμενες στις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των καταναλωτών για πιο υγιεινά προϊόντα και υποστηρίζοντας τα οφέλη των προϊόντων ολικής άλεσης, από το 2000 έως το 2011 αύξησαν την παραγωγή τους κατά 1960% (Mintel, 2011). Η γενική σύσταση του αλεύρου ολικής άλεσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4. Το άλευρο ολικής περιέχει περισσότερες βιταμίνες, ιχνοστοιχεία, αντιοξειδωτικά και πρωτεΐνες, καθώς αυτά τα συστατικά είναι συγκεντρωμένα στις εξωτερικές στοιβάδες του σπόρου (Hemery et al., 2007, Weaver, 2001). Επιπρόσθετα, για λόγους υγείας προτείνεται η κατανάλωση προϊόντων ολικής άλεσης, αφού έρευνες δείχνουν ότι η κατανάλωσή τους σχετίζεται με τη μείωση των καρδιοαγγειακών νοσημάτων (CVD), του διαβήτη τύπου 2, και βελτιώνει την υγεία του εντέρου (Slavin, 2003). Αυτή η αυξημένη διατροφική τους αξία είναι και ο λόγος του έντονου ερευνητικού ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη τελικών προϊόντων ολικής άλεσης με βελτιωμένα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά.



Σε σχέση με το λευκό άλευρο σίτου (T70) το άλευρο ολική άλεσης (T90) έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία, πρωτεΐνες, λιπίδια και ίνες, ενώ έχει λιγότερο άμυλο (Cauvain & Young, 2006).

**Πίνακας 2.4 Γενική σύσταση αλεύρων ολικής άλεσης και λευκού (Cauvain & Young, 2006).**

Συστατικά αλεύρου (%)	Ολικής άλεσης	Λευκό
Υγρασία	13- 14	13- 14,5
Άμυλο	67- 73	71-78
Πρωτεΐνη	10- 15	8- 13
Λιπίδια	2	1- 1,5
Ίνες	2	0,2

## 2.5. Πίτυρο

Κατά την ελληνική νομοθεσία τα πίτυρα ανήκουν στα υποπροϊόντα της άλεσης. Σε αυτήν την κατηγορία υπάρχουν τα χονδρά πίτυρα, τα ψιλά πίτυρα, τα κτηνάλευρα και τα δευτερεύοντα άλευρα.

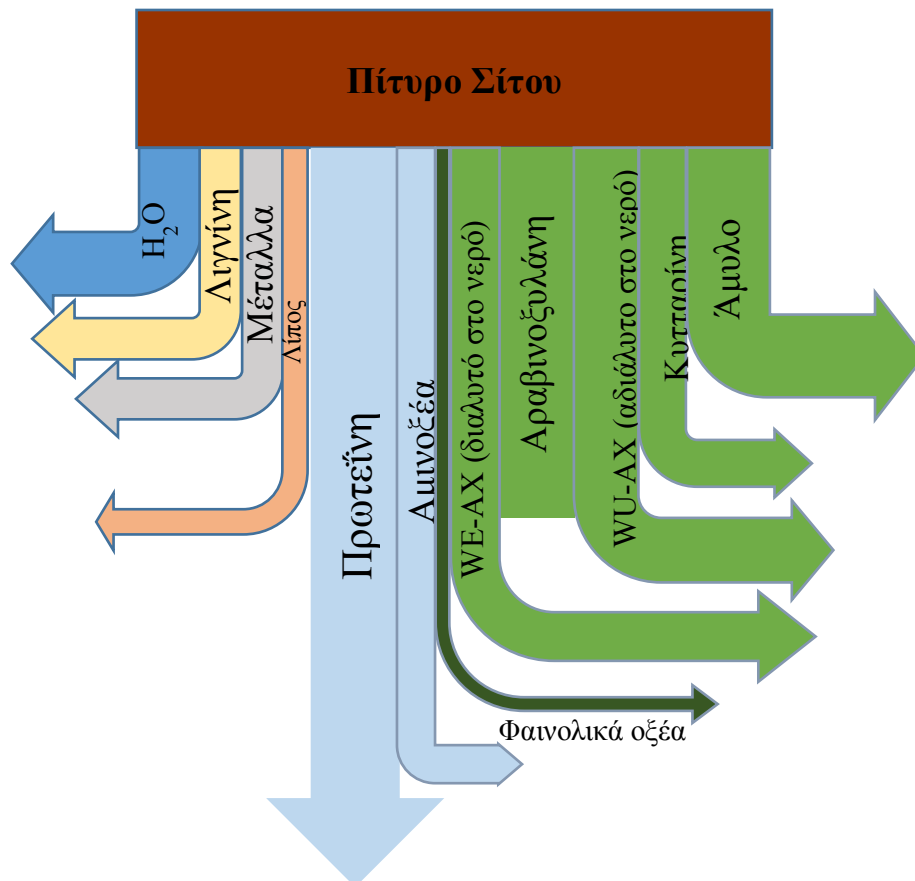
**Πίνακας 2.5 Τυπική σύσταση πίτυρου (Apprich et al., 2014).**

Συστατικό	Ποσοστό (%)
Νερό	12,1
Πρωτεΐνη	13,2-18,4
Λίπος	3,5-3,9
Φυτοστερόλες	0,16-0,17
α- Λινολενικό οξύ	0,16
Συνολικοί Υδατάνθρακες	56,8
Άμυλο	13,8-24,9
Κυτταρίνη	11
Συνολικές αραβινοξυλάνες	10,9-26
Συνολική β-γλυκάνη	2,1-2,5
Φαινολικά οξέα	1,1
Φερουλικό οξύ	0,02-1,5
Φυτικό οξύ	4,2-5,4
Τέφρα	3,4-8,1

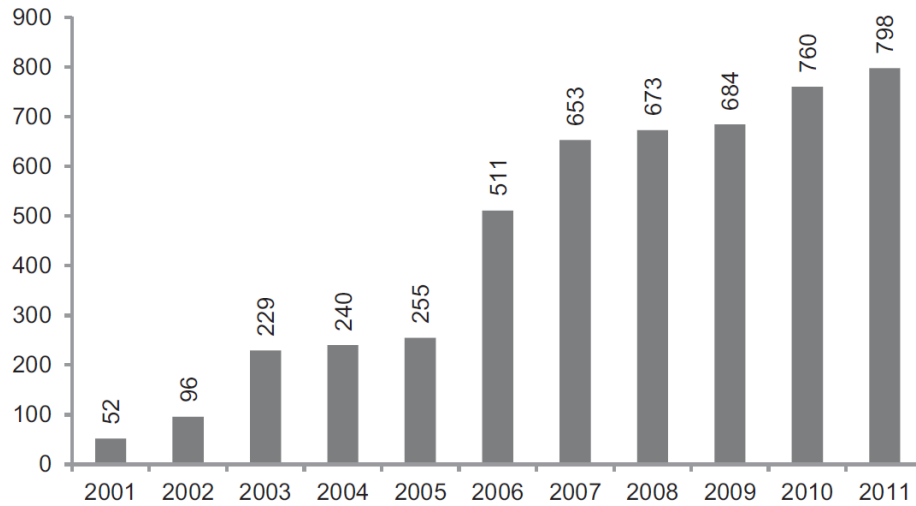
Το πίτυρο αποτελεί το πιο σημαντικό παραπροϊόν της άλεσης, υπολογίζοντας ότι αποτελεί περίπου το 25% του βάρους του σπόρου (Neves et al., 2006). Ωστόσο το κλάσμα του πίτυρου ενδέχεται να περιέχει επίσης τμήματα ενδοσπερμίου και αλευρώνης, καθώς δεν είναι πιθανό να διαχωριστεί πλήρως από την υπόλοιπη καρύωση

(Koutinas et al., 2006). Η τυπική σύσταση του πίτυρου παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5. Τα φαινολικά και τα πολυμερή της λιγνίνης κατανέμονται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις εντός του πίτυρου. Οι όροι διαλυτές και αδιάλυτες ίνες αναφέρονται σε διάφορες ετερογενείς χημικές δομές που έχουν διαφορετική ανθεκτικότητα κατά την υδρόλυσή τους από τα ένζυμα της πέψης. Τα εύρη τιμών στα συστατικά του πίτυρου καθορίζονται από τις διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού τους, τις διαφορετικές τεχνολογίες άλεσης και τις καλλιεργητικές τεχνικές.

Υποθέτοντας πως όλη η παραγωγή σίτου προοριζόταν προς ανθρώπινη κατανάλωση, το πίτυρο, ως υποπροϊόν, θα έφτανε τα 150 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Προς το παρόν το πίτυρο χρησιμοποιείται κυρίως ως ζωοτροφή και μόνο ένα μικρό ποσοστό του πωλείται ως εμπορικό προϊόν για ενσωμάτωση σε άλλα τρόφιμα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι αποδίδει υψηλή ποσότητα βιομάζας και ότι η αξία του ως ζωοτροφή είναι μικρή, η βιομηχανία τροφίμων έχει ως στόχο την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης θρεπτικής αξίας με προσθήκη πίτυρου σίτου. Πολλές πιθανές χρήσεις του πίτυρου σίτου για την παραγωγή προϊόντων συνοψίζονται από τον Apprich et al. (2014) (Σχήμα 2.3). Η χρήση του πίτυρου στη βιομηχανία τροφίμων έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία (Σχήμα 2.4). Η συνεχής παραγωγή νέων προϊόντων ενισχυμένων με πίτυρο δείχνει τη δυναμική και τη συνεχή εξέλιξη του τομέα αυτού.



Σχήμα 2.3 Αναπαράσταση κατά μάζα κατανομής των συστατικών του πίτυρου σίτου και πιθανά προϊόντα του (Apprich et al., 2014).



**Σχήμα 2.4** Αριθμός διαφορετικών προϊόντων ενισχυμένων με πίτυρα σίτου που παρήχθησαν από το 2001 έως το 2011 (<http://db2.datamonitor.com/product-launch-analytics>).

Η κατανάλωση του πίτυρου δύναται να προσφέρει πολλά οφέλη στην υγεία του ανθρώπου. Είναι αποδεδειγμένο ότι τα δημητριακά ολικής άλεσης ή το κλάσμα πίτυρου από μόνο του, μπορούν να ρυθμίσουν την αίσθηση της πείνας και του κορεσμού, το γλυκαιμικό δείκτη και διάφορα προβλήματα φλεγμονών στους καταναλωτές. Επίσης έχουν πρεβιοτική και αντιοξειδωτική δράση (Prückler et al., 2014).

### 3. Άλεση και μύλοι

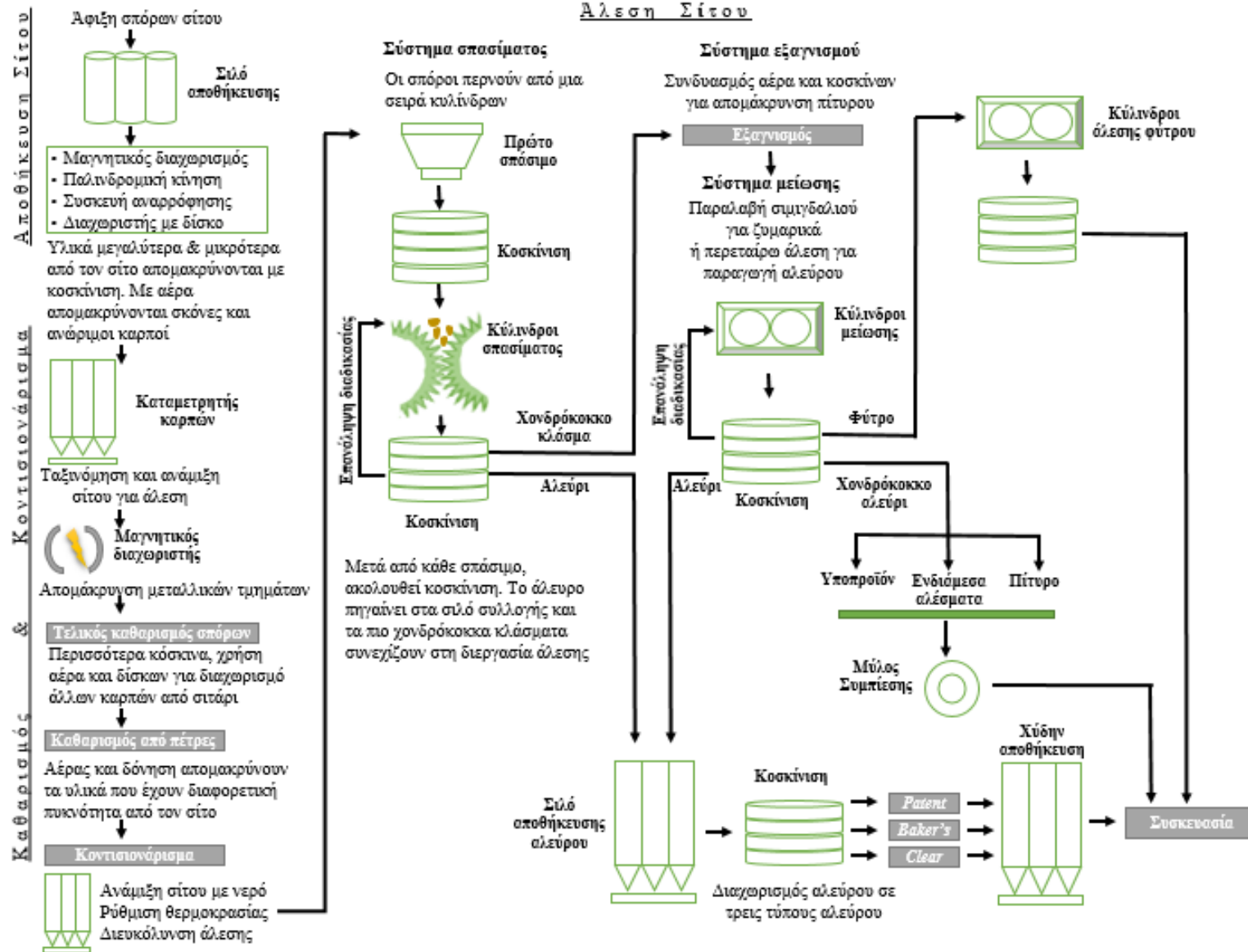
---

#### 3.1. Ιστορική αναδρομή

Αντικειμενικός και κύριος σκοπός της άλεσης είναι η μείωση του μεγέθους. Η διεργασία της άλεσης χρονολογείται στους προϊστορικούς χρόνους, καθώς έχουν βρεθεί αρχαίες επιγραφές που δείχνουν σιτηρά που κονιορτοποιούνται σε ένα γουδί. Κάποια εργαλεία χειρός, όπως πέτρες που διαμορφώθηκαν σε γουδιά και γουδοχέρια, θεωρούνται τα πρώτα μέσα σύνθλιψης και κονιορτοποίησης και χρονολογούνται περίπου στα 8000 π.Χ. Τα πρώτα κόσκινα έκαναν την εμφάνισή τους περίπου στα 6000 π.Χ. Οι πρώτοι μηχανικοί μύλοι περιλάμβαναν δύο οριζόντιες πέτρες σε μορφή δίσκων. Ο σίτος τοποθετούνταν ανάμεσα στις δύο πέτρες οι οποίες γύριζαν χειροκίνητα. Περισσότερο αποδοτική έγινε η άλεση με την χρήση περιστροφικών μύλων. Περίπου στα 100 π.Χ. χρησιμοποιήθηκε η ενέργεια του νερού στην άλεση και περίπου στα 1200 μ.Χ. χρησιμοποιήθηκε η αιολική ενέργεια με τη δημιουργία των πρώτων ανεμόμυλων. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα για την παραγωγή αλεύρου έχει τις ρίζες της στον 16<sup>ο</sup> αιώνα και περιλαμβάνει διάφορα στάδια άλεσης με ενδιάμεσες κοσκινίσεις. Με την ανακάλυψη του ατμού δημιουργήθηκαν μύλοι που περιλάμβαναν δύο κυλίνδρους που περιστρέφονταν με αντίθετη φορά, με ρυθμιζόμενο διάκενο και ταχύτητα περιστροφής. Έτσι, έχει το πλεονέκτημα της ρύθμισης των συνθηκών άλεσης, ταχύτητα και διάκενο, ανάλογα με την πρώτη ύλη άλεσης. Επιπρόσθετα, δόθηκε η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων με διαφορετική κοκκομετρία.

#### 3.2. Διεργασία άλεσης σίτου

Ο όρος *άλεση* καλύπτει ένα μεγάλο εύρος διεργασιών περιλαμβάνοντας και τη μείωση του μεγέθους του σπόρου σε μικρότερα σωματίδια. Όσον αφορά τα δημητριακά, χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του εμβρύου και του πίτυρου από το ενδοσπέρμιο και για την τελική παραγωγή αλεύρου. Το λευκό άλευρο είναι το τελικό προϊόν της άλεσης και ο στόχος είναι η μέγιστη απόδοση αυτού (% άλευρο/σπόρο). Το εξωτερικό τμήμα του σπόρου, περικάρπιο και αλευρώνη, χρησιμοποιείται κυρίως ως παραπροϊόν για ζωτροφές. Τα κλάσματα της άλεσης που λαμβάνονται διαφέρουν ως προς τη χημική τους σύσταση και για τον λόγο αυτό η τελική τους χρήση διαφέρει. Αναλυτικότερα η σύγχρονη άλεση σίτου ξεκινάει με την παραλαβή της πρώτης ύλης και τον καθαρισμό της. Ο καθαρισμός περιλαμβάνει τον διαχωρισμό του σίτου από ξένες ουσίες με χρήση α. μαγνητικού διαχωριστή για την απομάκρυνση μεταλλικών σωματιδίων, β. διάφορων κοσκίνων και γ. αεροδιαχωρισμού για απομάκρυνση ξένων σωματιδίων και άλλων καρπών πριν από το πρώτο σπάσιμο. Πριν από το πρώτο σπάσιμο, ο σίτος διαβρέχεται με σκοπό την εύκολη απομάκρυνση του εξωτερικού τμήματος του πίτυρου και το μαλάκωμα του



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής άλεσης σίτου (Hui, 2006).

ενδοσπερμίου για ευκολότερη άλεση. Το πρώτο σπάσιμο έχει σκοπό το διαχωρισμό του πίτυρου από τον υπόλοιπο καρπό. Σε αυτό το στάδιο υπάρχει μικρή παραγωγή αλεύρου. Το υπόλοιπο τμήμα του σπόρου οδηγείται σε επόμενες αλέσεις. Συνολικά ο σπόρος υπόκειται σε τέσσερις με πέντε αλέσεις. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να απομονωθεί το μέγιστο ποσοστό αλεύρου ενώ το υπόλοιπο, πίτυρο και έμβρυο, προορίζεται για χρήση σε δημητριακά πρωινού, ζωοτροφές ή άλευρα κατώτερης ποιότητας (Σχήμα 3.1).

### 3.3. Παραδοσιακοί μύλοι άλεσης

Οι διαφορετικοί μύλοι άλεσης αναπτύχθηκαν εξαιτίας της ποικιλομορφίας των πρώτων υλών και της ανάγκης για παραγωγή αλεσμάτων με διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά.

**Πίνακας 3.1 Παραδείγματα τροφίμων και συνηθέστερων μέσων άλεσης (Barbosa- Cánovas et al., 2005).**

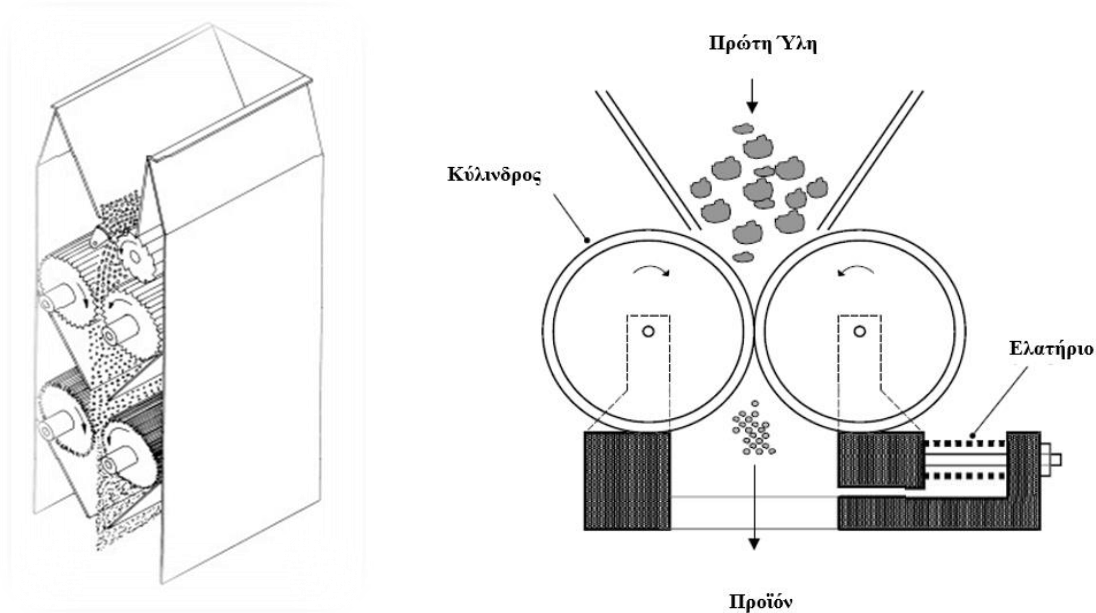
	Κυλινδρόμυλος	Σφυρόμυλος	Τριβής	Περιστροφικός
Χονδρόκοκκα	•			
Ενδιάμεσου μεγέθους	•	•	•	•
Λεπτά & υπέρλεπτα		•	•	•
Σοκολάτα	•			•
Κακάο			•	•
Καλαμπόκι (υγρό)			•	
Φρούτα ξηρά		•		
Γάλα σε σκόνη		•		
Λαχανικά ξηρά		•		
Σπόροι	•		•	
Πιπέρι		•	•	
Φακές			•	
Καρύδια			•	
Αλάτι		•		•
Μπαχαρικά		•		
Άμυλο (υγρό)			•	
Ζάχαρη		•		•

Οι σύγχρονοι μύλοι λειτουργούν με εφαρμογή πίεσης, διάτμησης, τριβής, δυνάμεις κοπής ή και συνδυασμό αυτών. Όταν το μέσο της άλεσης είναι αέρας, η άλεση αναφέρεται ως ξηρή, ενώ όταν υπάρχει εναιώρημα, η άλεση θεωρείται υγρή. Η εφαρμογή της μηχανικής ενέργειας συνήθως οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας στα υπό άλεση υλικά, όπως και σε κάποια τμήματα του μύλου. Η αυξημένη θερμοκρασία πολλές φορές επιφέρει ποιοτική υποβάθμιση των πρώτων υλών και για τον λόγο αυτό απαιτείται ψύξη αυτών κατά την άλεση.

Κάποιοι σύγχρονοι μύλοι είναι εξοπλισμένοι με εναλλάκτες θερμότητας ενεργοποιώντας τη δυνατότητα μεταφοράς της μάζας που εξατμίζεται από το υλικό στο ρεύμα αέρα. Έτσι, λαμβάνουν χώρα ανταλλαγή θερμότητας και μάζας με ταυτόχρονη κονιορτοποίηση και ξήρανση του υλικού. Οι μύλοι στους οποίους συμβαίνουν τα παραπάνω φαινόμενα ονομάζονται μύλοι ξήρανσης (drier-mills). Η πλειονότητα των μύλων είναι συνεχούς λειτουργίας. Η ποικιλία των μύλων είναι πολύ μεγάλη, ενώ κάποια τρόφιμα παραδοσιακά αλέθονται από συγκεκριμένους τύπους μύλων (Πίνακας 3.1). Μερικά σημαντικά παραδείγματα μύλων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων, καθώς και ο τρόπος λειτουργίας τους περιγράφονται παρακάτω.

### 3.3.1. Κυλινδρόμυλος (Roller mill)

Οι κυλινδρόμυλοι χρησιμοποιούνται για επιλεκτική άλεση με σκοπό την παραγωγή σωματιδίων με κοκκώδες σχήμα και βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στους δημητριακούς καρπούς. Πέραν αυτών χρησιμοποιούνται επίσης για λεπτή άλεση κακάο και μπαχαρικών. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι κυλινδρόμυλοι στην άλεση των δημητριακών καρπών είναι ότι η διαδικασία μπορεί να υποδιαιρεθεί σε πολλά στάδια και οι δυνάμεις άλεσης δρουν στο υλικό μόνο μία φορά σε κάθε στάδιο. Επίσης, ανάλογα με την πρώτη ύλη μπορεί να επιλεγεί η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων, η διάμετρός τους, η δομή της επιφάνειάς τους, καθώς και η ταχύτητά τους. Συνήθως αποτελούνται από ένα περίβλημα μέσα στο οποίο υπάρχουν 2-3 ζεύγη κυλίνδρων (Σχήμα 3.2). Το υλικό για να αλεστεί τροφοδοτείται από δύο κυλίνδρους που βρίσκονται πάνω από το κύριο ζεύγος κυλίνδρων άλεσης. Το προϊόν περνά χωρίς κοσκίνισμα κατευθείαν από τους πάνω κυλίνδρους στους κάτω, όπου υποβάλλεται σε περαιτέρω άλεση. Προκειμένου να βελτιωθεί η παροχή του προς άλεση υλικού, ο μύλος είναι εφοδιασμένος με ανεμιστήρα για καλύτερο πέρασμα και καθαρισμό των υλικών από τους κυλίνδρους. Οι κύλινδροι είναι κατασκευασμένοι από εξαιρετικά πυκνό και ανθεκτικό σίδηρο και μπορούν να ζεσταθούν λόγω της θερμότητας που παράγεται από την τριβή. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στο τελικό προϊόν και για την αποφυγή τους υπάρχει ειδικό ψυκτικό σύστημα το οποίο δύναται να αυξήσει την απόδοση της άλεσης.



Σχήμα 3.2 Απεικόνιση κυλινδρόμυλου, λεπτομέρεια από την άλεση (Barbosa- Cánovas et al., 2005).

Δεδομένου ότι είναι δυνατόν οι παράμετροι άλεσης να αλλάζουν, τα υλικά μπορούν να κονιορτοποιηθούν ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους μέσω σύνθλιψης, διάτμησης ή/και δυνάμεων κοπής. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι δυνάμεις δρουν στο υλικό εξαρτάται από την ταχύτητα και την απόσταση των κυλίνδρων. Προκειμένου το υλικό να τροφοδοτηθεί θα πρέπει η γωνία τροφοδότησης να είναι μικρότερη από τη γωνία τριβής. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος μεταξύ της διαμέτρου των κυλίνδρων και του υλικού θα πρέπει να είναι μεγάλος. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των κυλίνδρων, όσο πιο αργή είναι η ταχύτητα και πιο μικρό το διάκενο που επιλέγεται τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που δρουν στο υλικό. Η σκληρότητα του υλικού μπορεί να περιορίσει τις δυνάμεις άλεσης. Επίσης, μπορεί να καθορίσει την κατανομή του μεγέθους των κόκκων.

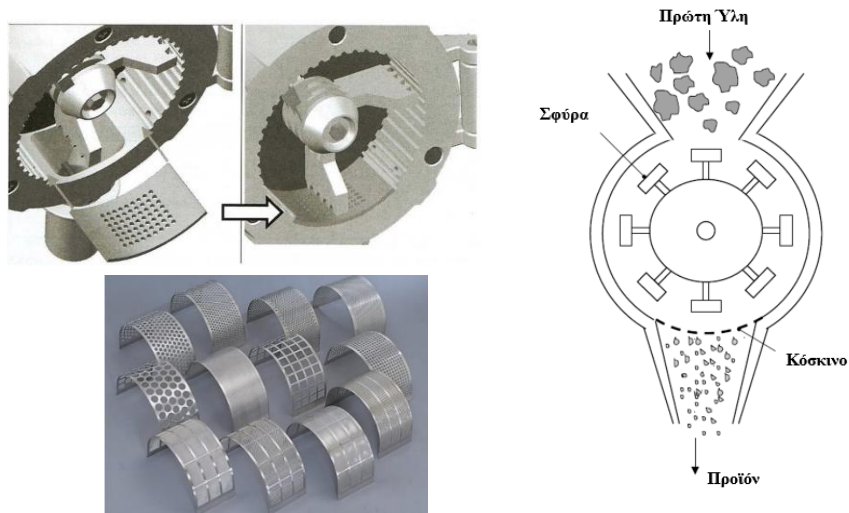
Η αποδοτικότητα των κυλινδρόμυλων εξαρτάται από τη ποσότητα του υλικού τροφοδοσίας, τις πτυχώσεις και την ταχύτητα περιστροφής των κυλίνδρων. Η ποσότητα του υλικού τροφοδοσίας περιορίζεται από το στρώμα αέρα που σχηματίζεται πάνω από τους κυλίνδρους. Το στρώμα αέρα μπορεί να μειωθεί με τη βοήθεια ειδικού μηχανισμού για να αυξηθεί η αποδοτικότητα του μύλου.

### 3.3.2. Σφυρόμυλος (Hammer mill)

Οι σφυρόμυλοι χρησιμοποιούνται κυρίως για χονδρόκοκκη άλεση εύθραυστων και ινωδών υλικών. Τα υλικά αλέθονται με κρούση και μπορούν να σπάσουν στα διάφορα συστατικά τους, κάτι που χρησιμεύει σε επόμενα στάδια επεξεργασίας, όπως στο διαχωρισμό των συστατικών με κοσκίνιση και στην έκθλιψη. Οι μύλοι αυτοί αποτελούνται από έναν ρότορα με σφυριά που περιστρέφεται (Σχήμα 3.3). Το υλικό που τροφοδοτείται



συνθλίβεται υπό την επίδραση δυνάμεων και αποβάλλεται διά μέσου ενός κόσκινου. Η κοκκομετρία των υλικών καθορίζεται από τη διάμετρο του κόσκινου, την ταχύτητα ταλάντευσης και τον αριθμό και μέγεθος των σφυριών.



Σχήμα 3.3 Σφυρόμυλος <http://www.qclabequipment.com/MICROHAMMERCUTTERMILL.html>, <http://www.fitzmill.com/parts-service/parts-service> (Barbosa- Cánovas et al., 2005).

### 3.3.3. Μύλος κοπής

Οι μύλοι κοπής ή τεμαχισμού χρησιμοποιούνται κυρίως σε προϊόντα που είναι ανθεκτικά στη συμπίεση και στην τριβή, όπως τα φρούτα και τα λαχανικά. Οι ρότορες τεμαχισμού είναι εφοδιασμένοι με λεπίδες- πτερύγια, ενώ λεπίδια είναι προσαρμοσμένα στο περίβλημα και στο κόσκινο. Τα μαχαίρια αρχικά τεμαχίζουν το υλικό που τροφοδοτείται στο μύλο και τελικά κονιορτοποιείται ως αποτέλεσμα της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται μεταξύ των σταθερών και των περιστρεφόμενων λεπίδων.

### 3.3.4. Οδοντωτός Μύλος (Toothed Disk mill)

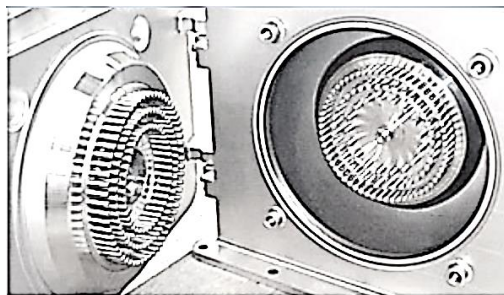
Οι οδοντωτοί μύλοι χρησιμοποιούνται για λεπτή ξηρή ή υγρή άλεση μαλακών και μη κολλωδών υλικών. Απαρτίζονται από ένα περίβλημα που περιέχει ένα ρότορα και ένα στάτορα. Το υλικό για να αλεστεί τροφοδοτείται στο μύλο μέσω ενός ανοίγματος στο κέντρο του στάτορα. Στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω διάτμησης, συμπίεσης και τριβής στα δόντια που βρίσκονται παρατεταμένα σε σειρές πάνω στο δίσκο. Το αλεσμένο υλικό περνάει μέσα στο δακτύλιο συλλογής και από εκεί στην έξοδο. Το τελικό μέγεθος του αλέσματος καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ ρότορα και στάτορα και την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.

### 3.3.5. Μύλος αποφλοΐωσης (Under runner Disk Huller)

Οι μύλοι αποφλοΐωσης χρησιμοποιούνται κυρίως για αποφλοΐωση και διαχωρισμό του εμβρύου από την υπόλοιπη καρύωση και όχι για κονιορτοποίηση. Αποτελούνται από ένα στάτορα τοποθετημένο πάνω σε ένα ρότορα. Και τα δύο τμήματα είναι επικαλυμμένα με κορούνδιο, ένα ιδιαιτέρως σκληρό υλικό. Η αποτελεσματικότητά του αποδίδεται στην τριβή των κόκκων ανάμεσα στους δύο δίσκους και εξαρτάται από την απόσταση αυτών.

### 3.3.6. Μύλος με ακίδες (Pinned Disk mill)

Οι μύλοι με ακίδες χρησιμοποιούνται για άλεση ελαιωδών υλικών, μετρίως σκληρών, ξηρών ή που περιέχουν χαμηλή υγρασία. Περιλαμβάνουν ένα περίβλημα στο εσωτερικό του οποίου υπάρχει ένας ρότορας και ένας στάτορας (Σχήμα 3.4). Και τα δύο είναι εφοδιασμένα με ακίδες διατεταγμένες σε ομόκεντρους κύκλους έτσι ώστε να καλύπτουν τους κενούς χώρους. Το υλικό για να αλεστεί τροφοδοτείται στο μύλο μέσω του στάτορα και φτάνει στο ρότορα. Η αυξανόμενη περιφερειακή ταχύτητα οδηγεί στη συμπίεση του υλικού μέσα από τις ακίδες. Η τελική λεπτότητα του υλικού εξαρτάται από την κατανομή και το σχήμα των ακίδων, την περιφερειακή ταχύτητα του ρότορα και τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης. Χρησιμοποιούνται για ξηρή και υγρή άλεση. Η υγρή άλεση γίνεται στην περίπτωση της εκχύλισης του αμύλου, για παράδειγμα από διαβρεγμένο αραβόσιτο ώστε να απομακρυνθεί το έμβρυο (Meuser, 1993).

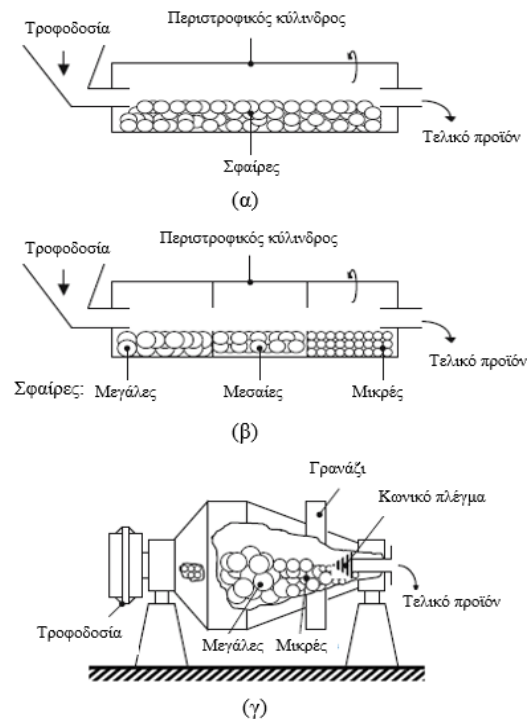


Σχήμα 3.4 Μύλος με ακίδες (<http://kemutecusa.com/products/milling/kek-universal-mills.html>).

### 3.3.7. Μύλος περιστροφικός με σφαίρες ή ράβδους (Tumbling)

Οι περιστροφικοί μύλοι ή μύλοι ανατάραξης χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές βιομηχανίες για λεπτή άλεση. Αποτελούνται από έναν οριζόντιο κύλινδρο που περιέχει σφαίρες ή ράβδους και περιστρέφεται αργά (Σχήμα 3.5). Ο κύλινδρος είναι συνήθως από ατσάλι με μία επιπρόσθετη επένδυση από πορσελάνη, πυρίτιο ή καουτσούκ. Οι σφαίρες είναι από ατσάλι ή πυρόλιθο, ενώ οι ράβδοι από ανθρακοχάλυβα. Η διεργασία της άλεσης συμβαίνει ως εξής: καθώς ο κύλινδρος περιστρέφεται, το μέσο άλεσης (σφαίρες ή ράβδοι)

κινείται από τη μία πλευρά στην άλλη με αποτέλεσμα να προσκρούει πάνω στο προς άλεση υλικό το οποίο ουσιαστικά γεμίζει τους κενούς χώρους που σχηματίζει το μέσο.



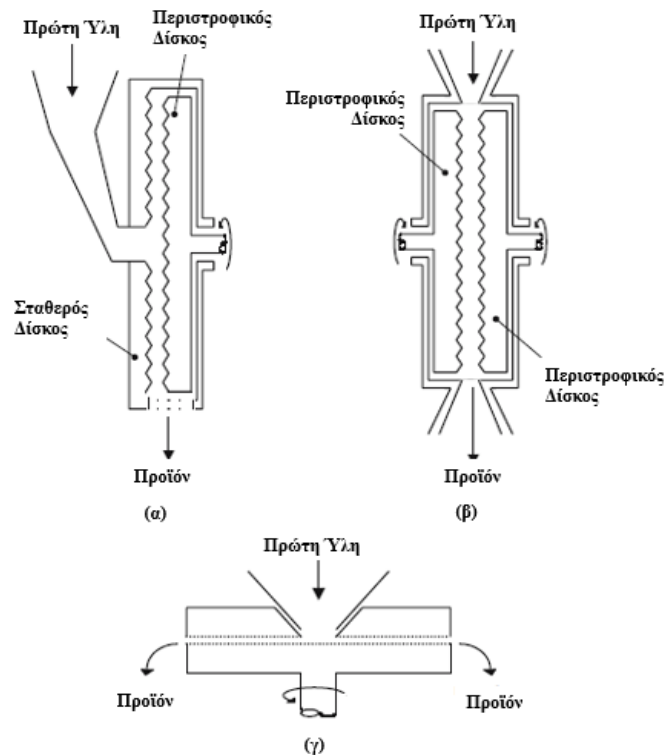
**Σχήμα 3.5 Περιστροφικοί μύλοι: (α) τούνελ υπερχείλισης, (β) διαμερισματοποιημένος μύλος, (γ) κωνικός μύλος (Barbosa- Cánovas et al., 2005).**

Με τον τρόπο αυτό δυνάμεις κρούσης και διάτμησης ασκούνται στο υλικό άλεσης με αποτέλεσμα μια αποτελεσματική μείωση του μεγέθους του. Διάφοροι τέτοιου τύπου μύλοι αναπτύχθηκαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 κυρίως για να επιτευχθεί η συνεχής λειτουργία τους. Κατασκευάστηκαν εγκάρσια χωρίσματα και κάθε τμήμα περιείχε σφαίρες διαφορετικού μεγέθους, από μεγαλύτερου σε μικρότερου, με αποτέλεσμα να υπάρχει καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας κατά την άλεση. Επίσης, πολύ αποδοτική είναι η χρήση κωνικού σφαιρόμυλου όπου συνυπάρχουν σφαίρες με διαφορετικό μέγεθος. Καθώς περιστρέφεται ο κωνικός θάλαμος, οι μεγάλες σφαίρες κινούνται προς το σημείο της μεγάλης διαμέτρου του, ενώ οι μικρές πάνε προς την έξοδο. Ως εκ τούτου, η αρχική θραύση του υλικού τροφοδοσίας γίνεται από τις μεγάλες σφαίρες, ενώ η τελική μείωση γίνεται από τις μικρότερες, αυξάνοντας την απόδοση αυτής της διάταξης σημαντικά. Αυτός ο τύπος μύλου χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή κακάο (Barbosa- Cánovas et al., 2005).

### 3.3.8. Μύλος τριβής (Attrition mill)

Η λειτουργία των μύλων τριβής βασίζεται στη μηχανική μείωση του μεγέθους των στερεών σωματιδίων μέσω της έντονης ανατάραξης ενός εναιωρήματος και τη σύνθλιψη μεταξύ δύο επιφανειών (Sadler et al., 1975). Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζονται οι διάφοροι τύποι μύλου τριβής. Συχνά, τα υλικά που έχουν ήδη υποστεί χονδρή άλεση, περνιούνται από το μύλο τριβής για καλύτερη ανάμιξη και περαιτέρω μείωση του μεγέθους τους.

Οι δίσκοι του μύλου τριβής βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση ώστε μετά την άλεση και μέσω της βαρύτητας το δείγμα περνάει από την περιοχή άλεσης (<http://www.fao.org/docrep/x5738e/x5738e0j.htm>).



Σχήμα 3.6 Μύλοι τριβής: (α) μονός, (β) διπλός και τύπου (γ) Buhr (Barbosa- Cánovas et al., 2005).

### 3.4. Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (Air jet mill)

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα ανήκει στην κατηγορία των μύλων ενέργειας ρευστού (fluid energy mill) και χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπέρλεπτων αλεσμάτων, με κοκκομετρία μικρότερη των 40  $\mu\text{m}$  (Chamayou & Dodds, 2007) και για παραγωγή χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων (Midoux et al., 1999). Από τα 1950 και μετά, πέραν των σφυρόμυλων και κυλινδρόμυλων, αυτός ο τύπος άλεσης χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την παραγωγή υπέρλεπτων αλεσμάτων (Prior et al., 1993). Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του μύλου αυτού είναι απαραίτητη η θεωρητική του γνώση.

Ο κύριος θάλαμος αποτελείται από 2 με 8 ακροφύσια συμμετρικά ευθυγραμμισμένα με γωνία μεταξύ 52-60°, έτσι ώστε ένα κυκλικό ρεύμα αέρα με υψηλή ταχύτητα περιστροφής να εμφανίζεται όταν εφαρμόζεται πίεση. Επιπρόσθετα υπάρχει ένα ακροφύσιο τροφοδοσίας μέσω του οποίου το δείγμα εισέρχεται ομοιόμορφα στον κύριο θάλαμο άλεσης. Δύο τύποι ακροφυσίων χρησιμοποιούνται. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι το *συγκλίνον ακροφύσιο* το οποίο έχει μια απότομη στένωση που οδηγεί σε ταχύτητα ήχου και η πίεση εξόδου φτάνει το 50% της πίεσης εισόδου. Ο άλλος τύπος ακροφυσίου είναι *συγκλίνον-αποκλίνον* γνωστός και ως *Laval* που μελετήθηκε από τους Voropayev και Eskin (2002). Στο συγκεκριμένο τύπο το αέριο διαστέλλεται στο αποκλίνον τμήμα, αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητά του (Albus, 1964).

Τα υπέρλεπτα κλάσματα άλεσης παράγονται με επιτάχυνση των κόκκων σε υψηλής ταχύτητας ρεύμα αέρα. Το μέσο της άλεσης είναι συνήθως ο πεπιεσμένος αέρας, αλλά στις παραφαρμακευτικές βιομηχανίες χρησιμοποιείται επίσης το άζωτο. Η μείωση του μεγέθους είναι αποτέλεσμα των συγκρούσεων μεταξύ κόκκων και μεταξύ κόκκων και εσωτερικής επιφάνειας του μύλου (Létang et al., 2002). Το αλεσμένο δείγμα μπορεί να συλλεχθεί σε έναν κυκλώνα-διαχωριστή ή άμεσα μέσω σακούλας-φίλτρου ή δοχείου συλλογής.

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- μπορεί να φτάσει σε κοκκομετρία μικρότερη των 40 μm, ακόμα και σε κοκκομετρία της τάξεως των 10 μm,
- οδηγεί σε στενή κατανομή μεγέθους κόκκων,
- υπάρχει χαμηλός κίνδυνος μόλυνσης για το προϊόν,
- ο μηχανολογικός εξοπλισμός είναι απλός, αφού ο κύριος θάλαμος της άλεσης δεν αποτελείται από κινητά μέρη,
- εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος υλικών,
- δύναται να χρησιμοποιηθεί για κονιορτοποίηση θερμοευαίσθητων υλικών και
- υπάρχουν μοντέλα δυναμικότητας από εργαστηριακή κλίμακα (1 g/h) έως βιομηχανική (6 t/h).

Το βασικό τους μειονέκτημα περιορίζεται στην αναγκαία χρήση αεροσυμπιεστή, ο οποίος μπορεί να διασφαλίσει υψηλή παροχή αέρα με πίεση έως και 10 bar.

### 3.4.1. Τύποι μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα

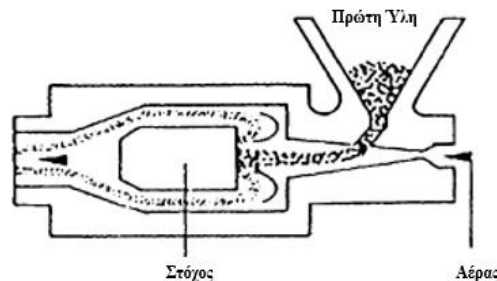
Διάφοροι τύποι άλεσης με πεπιεσμένο αέρα αναπτύχθηκαν με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή τους στα επιθυμητά αποτελέσματα που σχετίζονται όχι μόνο με το μέγεθος της κοκκομετρίας αλλά και με το κόστος παραγωγής και την τελική καθαρότητα των προϊόντων. Στον Πίνακα 3.2 παρατίθεται ενδεικτικά σύγκριση τριών μύλων άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (κρούσης, αντίστροφης ρευστοποιημένης κλίνης και σπειροειδής).

Πίνακας 3.2 Σύγκριση διαφορετικών μύλων άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (Brown, 2013).

Παράμετρος	Μύλος Κρούσης ρευστού	Τύπου Spiral/ Loop	Αντίστροφη Ρευστοποιημένη κλίνη
Μέγεθος κοκκομετρίας	Μικρό	Μικρότερο	Ελάχιστο
Ειδική ενέργεια	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
Σχήμα κόκκων	Οδοντωτό	Οδοντωτό/ κυκλικά	Κυκλικό και στιλπνό
Κόστος αγοράς	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό

### 3.4.1.1 Μύλος κρούσης (Fluid impact mill)

Ιστορικά οι μύλοι τύπου fluid impact είναι οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν το 1882 από τον Goessling (Goessling, 1882) και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην κρούση των κόκκων πάνω σε μια σταθερή επιφάνεια υπό την επίδραση ρεύματος αέρα, η οποία οδηγεί ουσιαστικά τους κόκκους στην επιφάνεια κρούσης (Σχήμα 3.7). Ο διαχωρισμός και η ανακυκλοφορία του δείγματος γίνεται με τη βοήθεια κόσκινου στο κάτω μέρος του μύλου. Ο συγκεκριμένος τύπος μύλου πρακτικά δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανική κλίμακα δεδομένου ότι η φθορά της επιφάνειας στόχου (target) είναι πολύ μεγάλη και η απόδοσή του χαμηλή. Μετεξέλιξη του συγκεκριμένου τύπου αποτελεί και ο Alpine Micron Jet στον οποίο το υλικό τροφοδοσίας επιταχύνεται και προσκρούει σε ένα στόχο-δακτύλιο που περιστρέφεται γύρω από τον κάθετο άξονα ενός διαχωριστή που είναι ενσωματωμένος στο σύστημα. Η πίεση του αέρα σε συνδυασμό με το σχεδιασμό του μύλου οδηγούν σε ταχύτητες που φτάνουν την ταχύτητα του ήχου. Ο διαχωριστής ανατροφοδοτεί τα χονδρόκοκκα κλάσματα στη ζώνη άλεσης περιορίζοντας την υπέρλεση, αφού ταυτόχρονα απομακρύνει τα λεπτά αλέσματα. Η άλεση σε αυτή την περίπτωση γίνεται με δράση δυνάμεων κρούσης και τριβής. Η συνεχή πρόσκρουση του ρεύματος αέρα και της πρώτης ύλης στον στόχο σημαίνει ότι υπάρχει επιλεκτική θραύση, δηλαδή, μόνο σωματίδια μεγαλύτερα από ένα συγκεκριμένο μέγεθος έχουν την απαιτούμενη δύναμη αδράνειας, ώστε να αφήσουν τη ροή του αέρα να χτυπήσει το στόχο (Laitone, 1979).



Σχήμα 3.7 Μύλος κρούσης Fluid impact mill (Albus, 1964).

### 3.4.1.2 Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα αντιρροής (Opposed jet mill)

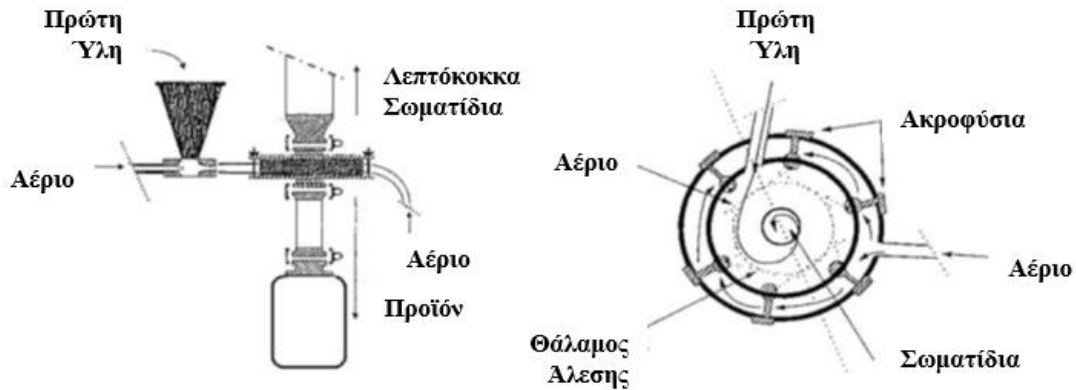
Η εξώθηση ενός ρεύματος κόκκων ως προς ένα άλλο ρεύμα κόκκων είναι ένας τρόπος για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της συνεχούς φθοράς της επιφάνειας-στόχου. Αυτή η μέθοδος εισήχθη από τους Willoughby και Andrews το 1917. Το τροφοδοτούμενο υλικό παρασύρεται στον κύριο θάλαμο της άλεσης μέσω του ρεύματος αέρα το οποίο παρέχεται από τα ακροφύσια. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σύγκρουση των κόκκων μεταξύ τους (κόκκοι με κόκκους) και τελικά η κονιορτοποίησή τους, έως ότου οι κόκκοι γίνουν αρκετά λεπτοί και το ρεύμα αέρα και οι φυγοκεντρικές δυνάμεις τα παρασύρουν στην έξοδο.

### 3.4.1.3 Σπειροειδής μύλος (Spiral jet mill)

Οι μύλοι τύπου spiral παρήχθησαν για πρώτη φορά το 1934 από την εταιρεία Micronizer Company. Σε αυτόν τον τύπο μύλου, το υλικό τροφοδοσίας εγχέεται μέσω σωλήνα venturi μέσα σε έναν επίπεδο σφαιρικό θάλαμο στον οποίο επίσης εισέρχεται υψηλής περιφερειακής ταχύτητας αέρας (Σχήμα 3.8). Αυτό παράγει μιας υψηλής ταχύτητας δίνη που περιστρέφεται μέσα στο θάλαμο και προκαλεί συγκρούσεις μεταξύ των κόκκων. Η περιστρεφόμενη δίνη στο θάλαμο άλεσης λειτουργεί συγχρόνως και ως φυγοκεντρικός διαχωριστής. Έτσι, τα λεπτόκοκκα κλάσματα φεύγουν από την κεντρική έξοδο ενώ τα χονδρόκοκκα ωθούνται στην περιφέρεια λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων, παραμένουν στη δίνη και υποβάλλονται σε περαιτέρω συγκρούσεις.

Οι μύλοι αυτοί χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στη βιομηχανία χάρη στην ικανότητά τους για λεπτή άλεση υλικών με σκληρότητα μικρότερη των 3,5 Mohs. Ευνοείται η χρήση τους σε βιομηχανίες φαρμάκων εξαιτίας της απλότητας και της ευκολίας καθαρισμού τους. Πολλές εταιρείες προτείνουν μύλους τέτοιου τύπου με διάφορες παραλλαγές ως προς τον κύριο θάλαμο άλεσης (flat cylinder Hosokawa, octagonal, Jet Pharma, Elliptical FPS), την ύπαρξη ίδιας εξόδου ή διαφορετικής για αέρα και προϊόν, τον αριθμό των ακροφυσίων και την ικανότητα ρύθμισης της γωνίας τους ή όχι. Κάποιοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν μικρούς μύλους τέτοιου τύπου για κονιορτοποίηση υλικών υψηλής αξίας (Chamayou & Dodds, 2007).

Επιπρόσθετα υπάρχει μία υποκατηγορία των μύλων τύπου spiral, εκείνοι που είναι σε οβάλ σχήμα. Η κύρια διαφορά είναι το οβάλ σχήμα ή σχήμα «φασολιού» του βασικού θαλάμου άλεσης, το οποίο είναι στερεωμένο κάθετα και όχι οριζόντια. Τα ακροφύσια είναι λιγότερα και συνήθως τοποθετούμενα στη βάση του μύλου και κοντά στην είσοδο της πρώτης ύλης. Επίσης έχουν μεγαλύτερη απόδοση, έως και 6 t/h. Αυτός ο μύλος εισήχθη για πρώτη φορά το 1941 από την εταιρεία Jet-O-Mizer Company (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8 Σπειροειδής μύλος άλεσης με αέρα (spiral jet mill) (Chamayou & Dodds, 2007).



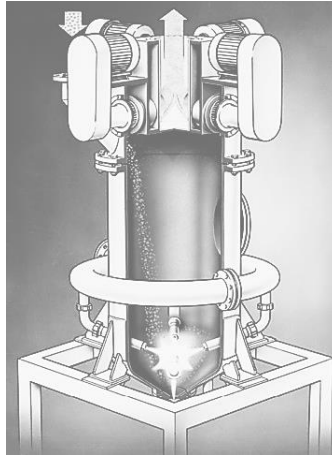
Σχήμα 3.9 Jet-O-Mizer Mill (<http://www.fluidenergype.com/jet-o-mizer-particle-size-reduction-systems-1-0-45-microns-features-benefits>).

#### 3.4.1.4 Μύλος αντίστροφης ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized bed opposed jet mill)

Στους μύλους ρευστοποιημένης κλίνης, ο αέρας χρησιμοποιείται ώστε να δώσει κρούσεις υψηλής ενέργειας μεταξύ των σωματιδίων που είναι διασκορπισμένα σε μια ρευστοποιημένη κλίνη. Έτσι, αυτοί οι μύλοι φέρουν υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων στο θάλαμο άλεσης. Τα ακροφύσια παρέχουν μόνο αέρα και υπόκεινται σε μικρότερη καταπόνηση από ότι στον ανεστραμμένο μύλο άλεσης (Σχήμα 3.10). Η πρώτη ύλη εισέρχεται στον μύλο από έναν τροφοδότη-κοχλία και η έξοδός του είναι προσαρτημένη



στο πάνω τμήμα του μύλου, μέσω ενός φυγοκεντρικού ταξινομητή. Η ταχύτητα περιστροφής του ταξινομητή καθορίζει το ανώτερο μέγεθος των σωματιδίων τα οποία φεύγουν από το θάλαμο της άλεσης. Τα σωματίδια που είναι μεγαλύτερα από αυτό το ανώτερο μέγεθος ανατροφοδοτούνται και επιστρέφουν στη ζώνη άλεσης.



**Σχήμα 3.10** Μύλος αντίστροφης ρευστοποιημένης κλίνης Fluidized bed opposed jet mill (<http://www.hosokawamicron.co.jp/en/machines/126>).

Ο Vogel (1991) έχει περιγράψει την ανάπτυξη τέτοιων μύλων από την εταιρεία Alpine company. Αυτοί οι μύλοι χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανίες και είναι διαθέσιμοι σε διάφορα μεγέθη. Οι θάλαμοι είναι από διάμετρο 10 cm έως 1,25 m, δυναμικότητας 10 kg/h έως 2 t/h. Η δυναμικότητά του εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος των σωματιδίων της πρώτης ύλης.

### 3.4.2. Εφαρμογή της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στα τρόφιμα

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα εφαρμόζεται ευρέως με επιτυχία στις βιομηχανίες χημικών, παραφαρμακευτικών και ορυκτών προϊόντων (Midoux et al., 1999). Λόγω των πλεονεκτημάτων του, τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στην εφαρμογή της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα και στα τρόφιμα.

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα συνδυάστηκε επιτυχώς με αεροδιαχωριστή για την παραγωγή αμύλου σίτου με χαμηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη (<2% ξ.β.), λιπίδια και πεντοζάνες. Παρόλα αυτά ο μύλος φάνηκε να μην έχει την ικανότητα να εξαλείψει διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ διαφορετικών τύπων σίτου. Η σκληρότητα του σίτου επιδρά σημαντικά στην απόδοση της άλεσης και την κλασμάτωση. Ο σκληρός σίτος απαιτεί το λιγότερο πέντε αλέσεις, όταν αντίστοιχα ο μαλακός χρειάζεται τρεις αλέσεις. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα σκληρά άλευρα είχαν απόδοση 24% με ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου που έφτασε 12%, ενώ τα μαλακά άλευρα σίτου είχαν απόδοση 39% και κατεστραμμένο άμυλο 6,4%. Συγκριτικά με τους παραδοσιακούς

μύλους άλεσης, ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα διαχώρισε καλύτερα τα συστατικά του αλεύρου σίτου (Létang et al., 2002).

Οι Pelgrom et al. (2013) θέλησαν να παραλάβουν πρωτεΐνη από το κίτρινο κτηνοτροφικό μπιζέλι (*Pisum sativum*) χρησιμοποιώντας ξηρή άλεση με πεπιεσμένο αέρα σε συνδυασμό με ταξινομητή αέρα. Εκτεταμένη άλεση, με ταχύτητα 4000 rpm, είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή υπέρλεπτων αλεύρων ( $D_{50} < 10 \mu\text{m}$ ) με μικρή ρευστότητα και μεγαλύτερο ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου. Ο ταξινομητής αέρα χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των μικρών κλασμάτων (κυρίως αποτελούμενα από πρωτεΐνες) από τα μεγαλύτερα (κυρίως αποτελούμενα από άμυλο) με σκοπό την απομόνωση κλασμάτων ενισχυμένων σε πρωτεΐνη. Αυτά τα συμπυκνώματα πρωτεΐνης έφτασαν έως και 55% (β/ξ.β.) με μέγιστη ανάκτηση πρωτεΐνης στο 77%. Η λειτουργικότητα των αλεσμάτων αξιολογήθηκε με τη μέτρηση της ικανότητας συγκράτησης νερού η οποία αυξήθηκε με την άλεση. Σύμφωνα με τους ερευνητές, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά για την παρασκευή προϊόντων με υψηλή συγκέντρωση πρωτεϊνών ή για την αντικατάσταση πρωτεΐνης αυγού.

Η επίδραση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε ριζάλευρο έδειξε ότι είναι δυνατή η παραγωγή υπέρλεπτων κλασμάτων με μέγεθος  $< 10 \mu\text{m}$  και στενή κατανομή. Τόσο το μέγεθος των κόκκων όσο και η μέθοδος άλεσης επηρέασαν το επίπεδο του κατεστραμμένου αμύλου το οποίο αυξήθηκε δραματικά όταν το μέγεθος των κόκκων ήταν  $< 10 \mu\text{m}$ . Επίσης, σε αυτήν την κοκκομετρία το ιζώδες κορυφής (peak) και το τελικό (final) ιζώδες μειώθηκαν απότομα, ενώ παρουσίασαν μειωμένη σταθερότητα κατά τη θέρμανση και την αύξηση της διάτμησης. Τα άλευρα με κοκκομετρία 120-150  $\mu\text{m}$  είχαν παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες οι οποίες διαφοροποιούνται σημαντικά όταν η κοκκομετρία φτάσει  $< 50 \mu\text{m}$  (Hossen et al., 2011). Οι Araki et al. (2009) μελέτησαν την επίδραση της υγρής και της ξηρής άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε ρυζάλευρο και στη διόγκωση άρτων στους οποίους ενσωματώθηκαν τα κονιοροποιημένα άλευρα. Λιγότερο κατεστραμμένο άμυλο, με ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους της κοκκομετρίας είχαν ως αποτέλεσμα την καλύτερη διόγκωση του άρτου, αποδεικνύοντας ότι οι παραπάνω παράμετροι – κατεστραμμένο άμυλο και κοκκομετρία αλεύρου – είναι καθοριστικοί για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του άρτου.

Ρύζι, μετά από υγρή (WR) και ξηρή άλεση (DR) με πεπιεσμένο αέρα, χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ζυμαρικών (noodles) ελεύθερων γλουτένης, των οποίων τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αξιολογήθηκαν. Η ξηρή άλεση είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του κατεστραμμένου αμύλου το οποίο συνεισέφερε στην αύξηση της ικανότητας ενυδάτωσης του αλεύρου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά τη ζελατινοποίηση, η διόγκωση στα WR άλευρα ήταν μεγαλύτερη από ότι στα αντίστοιχα DR άλευρα, επιδεικνύοντας αυξημένο μέγιστο ιζώδες. Όσον αφορά τα noodles, το άλευρο DR βελτίωσε την εκτατότητα και την ανθεκτικότητά τους αυξάνοντας επίσης την απώλεια στερεών κατά το μαγείρεμα. Έτσι, αυτή η μελέτη παρείχε πολύτιμες πληροφορίες για την

καλύτερη κατανόηση των poodles ελεύθερων γλουτένης που παρασκευάζονται με χρήση ριζαλεύρου (Heo et al., 2013).

Ρυζάλευρο με χαμηλή περιεκτικότητα σε κατεστραμμένο άμυλο, μικρή κοκκομετρία ( $D_{50} \leq 30 \mu\text{m}$ ), χαμηλή θερμοκρασία ζελατινοποίησης, υψηλό τελικό ιξώδες (ιδιότητες RVA) παράχθηκε τόσο με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα όσο και με μύλο με ακίδες. Τέτοιο άλευρο είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή άρτων με μεγάλη διόγκωση (Ashida et al., 2010).

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υποκαταστατών λίπους, αυξάνοντας την επιφανειακή υδροφοβικότητα των πρωτεϊνικών μορίων, το μέγεθος των οποίων ήταν μικρότερο από  $3 \mu\text{m}$ . Οι Hayakawa et al. (1993) κονιορτοποίησαν ασπράδι αυγού, καζεΐνη και κέλυφος από σπόρο σόγιας. Η υδροφοβικότητα εξαιτίας της άλεσης αυξήθηκε σημαντικά στην περίπτωση της καζεΐνης, ενώ για τα άλλα δύο προϊόντα δεν παρουσιάστηκαν διαφορές. Παλαιότερη μελέτη σχετική με τη γευσιγνωσία και τη διέγερση των κυττάρων της στοματικής κοιλότητας έδειξε ότι πάστα που περιείχε πρωτεΐνη ή άμυλο με λεπτά σωματίδια ( $0,5-3 \mu\text{m}$ ) παρομοίασε τη γεύση ελαίου ή λίπους (Singer et al., 1988). Έτσι, η κονιορτοποιημένη καζεΐνη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο λίπους ή ελαίου.

Οι Homco-Ryan et al. (2004) πρόσθεσαν τροποποιημένη γλουτένη αραβοσίτου (cgm) σε κρεατοσκευάσματα. Η εμπορική cgm κοσκινίστηκε. Το κλάσμα που είχε κοκκομετρία  $<38 \mu\text{m}$  (mc38) χρησιμοποιήθηκε ως είχε, ενώ το κλάσμα που είχε  $500 \mu\text{m} < D_{50} < 38 \mu\text{m}$  κονιορτοποιήθηκε με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα (jcg με  $D_{50} 7,6 \mu\text{m}$ ). Τα παραγόμενα προϊόντα αξιολογήθηκαν ως προς τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά και την υφή τους. Όσον αφορά την υφή τους δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων. Οι δοκιμαστές δεν εντόπισαν διαφορές στα αρώματα (γαλοπούλα, χοιρινό, σπόρος, γρασίδι), όπως αντίθετα συνέβη στο χρώμα. Το mc38 είχε τη χειρότερη απόχρωση. Μετρώντας ενόργανα το χρώμα κατέληξαν στο ότι το jcg είχε ήταν λιγότερο κόκκινο τόσο στα ωμά όσο και στα μαγειρεμένα κρεατοσκευάσματα. Η φωτεινότητά για αυτά τα δείγματα ήταν μεγαλύτερη από ότι στα αντίστοιχα mc38, ενώ δεν διέφερε σημαντικά από τα cgm.

Πρόσφατα μελετήθηκε η επίδραση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στις φυσικοχημικές και οργανοληπτικές ιδιότητες απολιπωμένης σόγιας (Muttakin et al., 2015). Η κονιορτοποιημένη σόγια είχε σημαντικά ενισχυμένες ιδιότητες ενυδάτωσης, με αύξηση της ικανότητας συγκράτησης νερού, του δείκτη διαλυτότητα στο νερό, και της ικανότητας διόγκωσής της, κατά 24, 39 και 32%, αντίστοιχα. Οι διαλυτές διαιτητικές ίνες και η ικανότητα δέσμευσης του λίπους επίσης αυξήθηκαν σημαντικά ( $P < 0,05$ ). Επιπρόσθετα με τη χρήση του μύλου βελτιώθηκαν και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της σόγιας, αφού η πικρή γεύση μειώθηκε, με αύξηση της γλυκιάς. Η τραχύτητα μειώθηκε και το χρώμα έγινε πιο φωτεινό υποδεικνύοντας ότι τα παραγόμενα προϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τελικά τρόφιμα διαφοροποιώντας τις ιδιότητές τους.

Οι Phat et al. (2015) συνέκριναν την επίδραση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα και με κυλινδρόμυλο σε λυοφιλιομένα μανιτάρια. Χρησιμοποιήθηκε η συμβατική άλεση με χρήση κυλινδρόμυλου (RM) και η κονιορτοποίηση με jet mill σε τρεις διαφορετικές συνθήκες (16.000 rpm (JMP1), 9000 rpm (JMP2), και 5000 rpm (JMP3)) με τελικό μέγεθος κοκκομετρίας 243,6, 5,5, 12,9, και 25,2  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα. Η μείωση του μεγέθους είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής επιφάνειας, του πορώδους και της πυκνότητας της σκόνης. Το δείγμα με τη μικρότερη κοκκομετρία (JMP1) είχε την υψηλότερη πυκνότητα (0,17 g/ml), τη μεγαλύτερη διαλυτότητα στο νερό (53,1%), καθώς και τη μεγαλύτερη ικανότητα διάγκωσης (11,28 ml/g). Επιπρόσθετα, η εκχύλιση πρωτεϊνών και πολυσακχαριτών παρουσιάστηκαν βελτιωμένες μετά την άλεση με πεπιεσμένο αέρα. Τα αποτελέσματα αυτά προτείνουν ότι η άλεση με πεπιεσμένο αέρα θα μπορούσε να δώσει, τεχνολογικά, περισσότερες ευκαιρίες στις σκόνες μανιταριών να ενσωματωθούν σε μια ευρύτερη ποικιλία τροφίμων.

Οι Limsangouan και Isobe (2009) συνέκριναν την επίδραση τριών διαφορετικών μύλων άλεσης (σύνθλιψης, σφυρόμυλος, μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα) στις λειτουργικές ιδιότητες τριών ψυχανθών (κουκιά, σόγια, πράσινο φασόλι). Διαφορετικές διαδικασίες άλεσης μετέβαλλαν τις λειτουργικές ιδιότητες των δειγμάτων ( $P < 0,05$ ), ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων των παραγόμενων αλεύρων και της ταχύτητας του αέρα. Ο σφυρόμυλος κρίθηκε καταλληλότερος για την παραγωγή αλεσμάτων ψυχανθών με υψηλότερη αντιοξειδωτική ικανότητα, περισσότερα φαινολικά και ανθεκτικό άμυλο. Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα, σε σχέση με το σφυρόμυλο, είχε ελαφρώς διαφορετική αποδοτικότητα όσον αφορά τις λειτουργικές ιδιότητες των παραγόμενων αλεύρων εξαιτίας της ποσότητας του αέρα (πίεση αέρα 7 kg/cm<sup>3</sup>, όγκος αέρα 2,6 m<sup>3</sup>/min) που προκάλεσε οξείδωση κατά τη διάρκεια της άλεσης (Wachiraphansakul & Devahastin, 2007). Οι Marin και Deleu (2013) συνέκριναν διαφορετικούς μύλους άλεσης με σκοπό την αύξηση της ικανότητας εκχύλισης πολύτιμων χημικών ουσιών (π.χ. αραβινοξυλάνη) από πίτυρο σίτου. Καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με συνδυασμό άλεσης με σφαίρες και με πεπιεσμένο αέρα.

Σε μία πρόσφατη μελέτη (Sibakov et al., 2014), ο εμπλουτισμός του πίτυρου βρώμης σε β-γλυκάνη επιτεύχθηκε με αφαίρεση λίπους, εντατική μείωση μεγέθους, ηλεκτροστατικό διαχωρισμό, ταξινόμηση με αέρα και άλεση με πεπιεσμένο αέρα. Η ταξινόμηση με αέρα δεν ήταν αρκετά αποτελεσματική ώστε να επιτυγχάνονται συγκεντρώσεις β-γλυκάνης, υψηλότερες από 40,3% όπως συνέβη ύστερα από άλεση με πεπιεσμένο αέρα και ηλεκτροστατικό διαχωρισμό (56,2%). Ο εμπλουτισμός ήταν εξίσου επιτυχημένος ανεξάρτητα από τη σειρά που έγιναν οι διεργασίες, πρώτα η άλεση με πεπιεσμένο αέρα ή πρώτος ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός.

Οι Lee et al. (2012) παρήγαγαν κονιορτοποιημένο φλοιό σόγιας και ρυζάλευρο με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποίησαν ως επικάλυψη αλεύρου σίτου για βαθύ τηγάνισμα ντόνατς, μειώνοντας την απορρόφηση ελαίου έως και 30%.

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την άλεση μιγμάτων τασιενεργών ουσιών-διαλυτών με σκοπό την καλύτερη επικάλυψη των αρχικών κόκκων από τις τασιενεργές ουσίες (surfactant) επιτρέποντας καλύτερη αποσύνθεση των συσσωματωμάτων που σχηματίστηκαν λόγω της ομαλής επιφάνειας του προϊόντος σε σχέση με αυτό που πρόκειται να διαλύσει. Αποδόμηση τέτοιου τύπου συσσωματωμάτων λαμβάνεται με ταυτόχρονη άλεση κακάο με ζάχαρη, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να μην σχηματίζονται συσσωματώματα κατά τη διασπορά του κακάο (Ahrné et al., 2008).

### 3.5. Υλικά άλεσης

Οι πρώτες ύλες μπορούν να καταταχθούν με βάση τη σκληρότητά τους (Πίνακας 3.3). Στη βιομηχανία τροφίμων συναντώνται πρώτες ύλες με σκληρότητα μικρότερη των τεσσάρων Mohs. Στον Πίνακα 3.4 φαίνεται η κατηγοριοποίηση του τύπου της άλεσης σε σχέση με την κοκκομετρία των παραγόμενων προϊόντων. Η επιφάνεια των κόκκων αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθός τους. Η άλεση δεν εξαρτάται μόνο από τη σκληρότητα της πρώτης ύλης αλλά και από την ανθεκτικότητα και τα μορφολογικά της χαρακτηριστικά. Εκτός από αυτά, η θερμοχωρητικότητα και η αγωγιμότητα του υλικού, καθώς και το είδος της μηχανικής δράσης, επηρεάζουν την άλεση. Για να θεωρηθεί ένα υλικό ως σκόνη, θα πρέπει να έχει μέγεθος <1 mm.

Πίνακας 3.3 Υλικά και κατάταξη βάσει σκληρότητας (Zogg, 1987).

Σκληρότητα (Mohs)	Υλικό
6-10	χαλαζίας, τσιμέντο
3-4	αλάτι, κάρβουνο
<3	σπόροι δημητριακών, τρόφιμα, γύψος

Πίνακας 3.4 Τύποι άλεσης σε σχέση με την κοκκομετρία των παραγόμενων προϊόντων (Zogg, 1987).

Τύπος άλεσης	Μέγεθος σωματιδίων (mm)	Επιφάνεια σωματιδίων (m <sup>2</sup> )
Σύνθλιψη		
χονδρόκοκκα	>50	<120
λεπτόκοκκα	5-50	120-1200
Κονιορτοποίηση		
χονδρόκοκκα	0,5-5	1200-1,2x10 <sup>4</sup>
λεπτόκοκκα	0,05-0,5	1,2x10 <sup>4</sup> -1,2x10 <sup>5</sup>
υπέρλεπτα	0,005-0,05	1,2x10 <sup>5</sup> -1,2x10 <sup>6</sup>
κολλοειδή	<0,005	>1,2x10 <sup>6</sup>

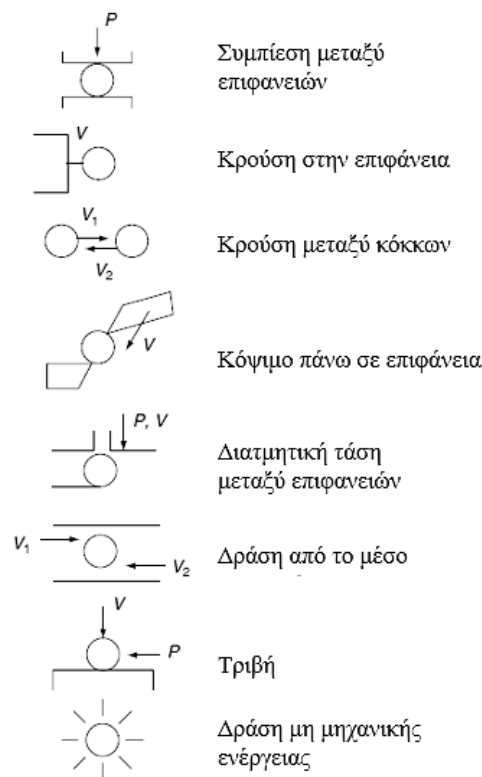
Η κονιορτοποίηση μπορεί να συντελεστεί με την υποβολή των υλικών σε διάφορους τύπους δράσης, οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις ομάδες (Σχήμα 3.11):

1. Δράσεις που συμβαίνουν μεταξύ στερεών επιφανειών (συμπίεση, τριβή, διατμητική τάση) οι οποίες είτε μπορεί να είναι επιφάνειες εργαλείων είτε επιφάνειες των υπό άλεση σωμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις, η ένταση της δράσης περιορίζεται από τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί ή από το μικρότερο διάκενο που υπάρχει μεταξύ των επιφανειών.

2. Δράσεις που συμβαίνουν από επαφή με μία μόνο στερεή επιφάνεια, η οποία θα μπορούσε να είναι είτε εκείνη ενός εργαλείου ή ενός άλλου σωματιδίου. Σε αυτή την περίπτωση, οι δράσεις περιορίζονται από την κινητική ενέργεια της κίνησης της μίας επιφάνειας ως προς την άλλη.

3. Δράσεις που οφείλονται στο μέσο που υπάρχει (π.χ. αέρα) ή στις αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτό.

4. Δράσεις από μη μηχανική ενέργεια (ηλεκτρικές εκκενώσεις).



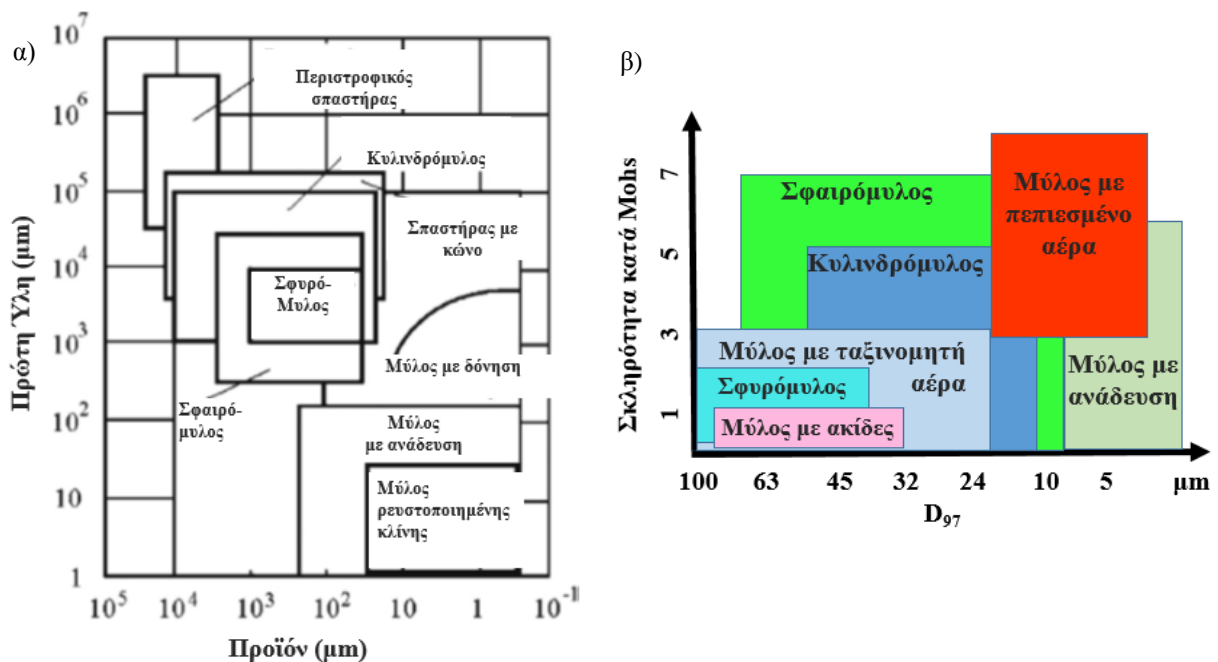
Σχήμα 3.11 Τύποι δράσης κατά την άλεση (Rumpf, 1954).

Οι διάφοροι τύποι δράσης συχνά συνδυάζονται κατά τη διάρκεια της άλεσης. Πολλοί μύλοι άλεσης είναι σχεδιασμένοι ώστε να συνδυάζονται αυτοί οι τύποι δράσης με σκοπό το καλύτερο αποτέλεσμα άλεσης. Το καλύτερο παράδειγμα ενός τέτοιου μύλου είναι ο κυλινδρόμυλος, στον οποίο συμπίεση, τριβή, διάτμηση και δυνάμεις κοπής συνδυάζονται

για την άλεση. Εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού και τον τύπο της δράσης στη οποία υπόκεινται, ο βαθμός άλεσης εξαρτάται επίσης από την ένταση της δράσης, η οποία περιορίζεται από τον τύπο του εργαλείου άλεσης και την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια.

### 3.6. Μύλοι άλεσης και κοκκομετρία

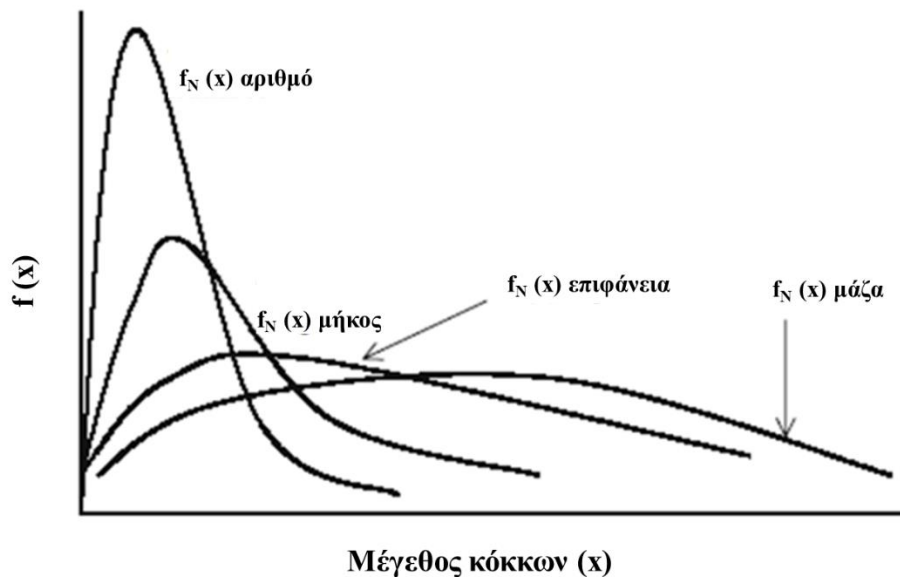
Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί παραπάνω, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος εμπορικών μύλων η επιλογή και η χρήση των οποίων βασίζεται σε πολλούς παράγοντες, όπως τις φυσικές ιδιότητες του προς άλεση υλικού και το επιθυμητό τελικό μέγεθος κοκκομετρίας (Angelo & Subramanian, 2008). Στο Σχήμα 3.12α παρουσιάζονται μύλοι άλεσης διαθέσιμοι για ένα εύρος πρώτης ύλης με μέγεθος από  $1-10^7$   $\mu\text{m}$  και για τελική κοκκομετρία  $10^{-1}-10^5$   $\mu\text{m}$ . Οι σφυρόμυλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 1 mm (Rosenqvist, 2004), ενώ για υπέρλεπτη άλεση ( $D_{90} \leq 10$   $\mu\text{m}$ ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιστροφικοί μύλοι με σφαίρες (Kano et al., 2001) και μύλοι άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (Midoux et al., 1999). Αντίστοιχα, ο Brown (2013) παρουσίασε μύλους άλεσης σε σχέση με τη σκληρότητα της πρώτης ύλης και την τελική κοκκομετρία δειγμάτων που προκύπτουν (Σχήμα 3.12β). Επιπρόσθετα έδωσε τα εύρη παραγωγής τους σε σχέση με την τελική κοκκομετρία των αλεσμάτων. Οι μύλοι άλεσης με πεπιεσμένο αέρα μπορούν με επιτυχία να παράξουν υπέρλεπτα κλάσματα άλεσης με μεγάλη σχετικά σκληρότητα (2-7 mohs) (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 Εύρη λειτουργίας μύλων σε σχέση με το μέγεθος κοκκομετρίας που προκύπτει μετά τη διεργασία α) και β) τη σκληρότητα κατά Mohs (Brown, 2013).

### 3.7. Μέθοδοι κατανομής κόκκων

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι προσδιορισμού της κατανομής του μεγέθους των κόκκων με πέντε κύριους εκπρόσωπους: την κοσκίνιση, την μικροσκοπική μέτρηση, την καθίζηση, τα φασματοφωτόμετρα και τις τεχνικές μέτρησης *on-line*. Για την επιλογή της μεθόδου δύο παράγοντες είναι σταθεροί. Είναι σημαντικοί: το μέγεθος και η εμφάνιση των κόκκων. Διαφορετικές μέθοδοι δίνουν και διαφορετικού τύπου κατανομές. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές κατανομές για ένα δεδομένο υλικό ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης: κατά αριθμό, κατά μήκος, κατά επιφάνεια και κατά μάζα ή όγκο. Από αυτές τις κατανομές η δεύτερη (κατά μήκος) πρακτικά δεν χρησιμοποιείται, αφού το μήκος ενός σωματιδίου από μόνο του δεν μπορεί να ορίσει πλήρως τις διαστάσεις του. Οι κατανομές αυτές συσχετίζονται μεταξύ τους, αλλά η μετατροπή είναι εφικτή μόνο στην περίπτωση που οι παράγοντες σχήματος είναι πλήρως ορισμένοι.



Σχήμα 3.13 Τέσσερις διαφορετικές κατανομές του ίδιου αλεύρου, κατά αριθμό, μήκος, επιφάνεια και μάζα ή όγκο (Svarovsky, 1987).

Ο Πίνακας 3.5 απεικονίζει μια σύνοψη των υπάρχοντων μεθόδων κατανομής σε σχέση με τον τύπο της κατανομής και το τελικό μέγεθος των κόκκων. Ωστόσο, ο πίνακας είναι ενδεικτικός αφού η τελική επιλογή της μεθόδου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι είναι δύσκολο να ταξινομηθούν, όπως η ισοδύναμη διάμετρος, το εύρος κατανομής, η ποσότητα του δείγματος, ο βαθμός αυτοματοποίησης κλπ. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι πολλοί από αυτούς τους παράγοντες είναι αλληλένδετοι και η σημαντικότητά τους σχετίζεται.



**Πίνακας 3.5 Αναλυτικές τεχνικές για τον προσδιορισμό του μεγέθους της κοκκομετρίας (Barbosa-Cánonas et al., 2005).**

Τεχνική	Μέγεθος (μm)	Τύπος κατανομής
Κοσκίνιση		
πλεκτό σύρμα	37-4000	κατά όγκο
ηλεκτροδιαμόρφωση	5-120	κατά όγκο
Μικροσκόπιο		
οπτικό	3-1000	κατά αριθμό
μετάδοσης ηλεκτρονίων	0,002-1	
ηλεκτρονικής σάρωσης	0,02-1000	
Βαρυμετρική με ίζημα		
σταδιακή	2-100	κατά μάζα
συσσωρευτική	2-100	κατά μάζα
Φυγοκεντρική καθίζηση		
δύο στρώματα	0,01-10	κατά μάζα
Ταξινόμηση με ροή		
βαρυμετρική με έκπλυση (ξηρή)	5-100	κατά μάζα
φυγοκεντρική με έκπλυση (ξηρή)	2-50	κατά μάζα
διαχωρισμός κρούσης (ξηρή)	0,3-50	κατά μάζα ή αριθμό
διαχωρισμός με κυκλώνα (ξηρή ή υγρή)	5-50	κατά μάζα
Μετρητής σωματιδίων	0,8-200	κατά αριθμό
Διάθλαση με laser	0,1-3000	κατά αριθμό

## 4. Προϊόντα αρτοποιίας

---

### 4.1. Άρτος

Η ονομασία *άρτος* (χωρίς άλλη ένδειξη) αποδίδεται σε προϊόν που παρασκευάζεται με ψήσιμο σε ειδικούς κλιβάνους, σε καθορισμένες συνθήκες μάζας αποτελούμενης από άλευρο σίτου, νερό, ζύμη και μικρή ποσότητα άλατος (ΚΤΠ, Άρθρο 111, 2014). Σύμφωνα με την ελληνική ονομασία ο όρος *ψωμί* περιλαμβάνει:

α) *Άσπρο ψωμί* – Παρασκευάζεται από άλευρα T70 από μαλακό σιτάρι και διατίθεται στην κατανάλωση με την ονομασία ψωμί άσπρο T70.

β) *Μαύρο ψωμί* – Παρασκευάζεται από άλευρα T90 με την προσθήκη ξηράς γλουτένης από μαλακό σιτάρι σε αναλογία 3% και διατίθεται στην κατανάλωση με την ονομασία ψωμί μαύρο T90.

γ) *Σύμμικτο ψωμί* – Παρασκευάζεται από ισόποση ανάμιξη αλεύρων κατηγορίας Μ από σκληρό σιτάρι και αλεύρων T.70% από μαλακό σιτάρι και διατίθεται στην κατανάλωση με την ονομασία ψωμί σύμμικτο.

#### 4.1.1. Διαδικασία αρτοποιήσης

Η διαδικασία αρτοποιήσης αποτελείται από τα εξής βασικά στάδια:

- ανάμιξη υλικών για δημιουργία ζύμης,
- επώαση,
- κλιβανισμός,
- ψύξη,
- τεμαχισμός σε φέτες και
- συσκευασία.

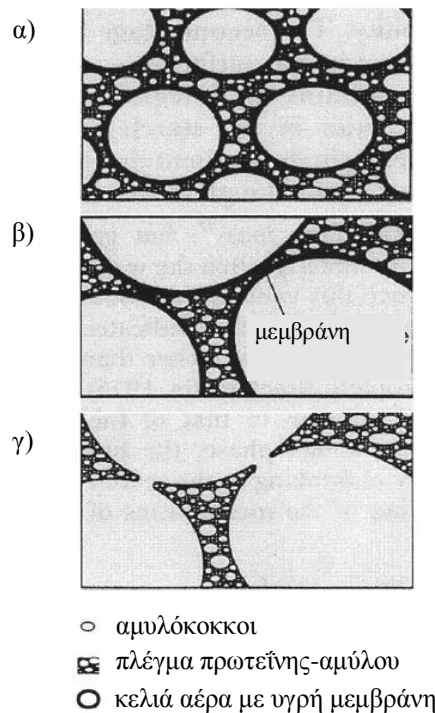
##### 4.1.1.1. Ανάμιξη

Η διαδικασία της ανάμιξης είναι ένα από τα βασικά στάδια για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της ζύμης, που έχουν άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η ομοιόμορφη ανάμιξη κατανέμει τα διάφορα υλικά, ενυδατώνει τα συστατικά του αλεύρου, παρέχει την απαιτούμενη μηχανική ενέργεια για την ανάπτυξη του πρωτεϊνικού πλέγματος και βοηθάει στην ενσωμάτωση φυσαλίδων αέρα στη ζύμη. Κάθε ζύμη θα πρέπει να αναμιγνύεται για ένα βέλτιστο χρόνο, ώστε να υπάρχει πλήρης ανάπτυξή της, σημείο στο οποίο υπάρχει μέγιστη αντίσταση στην εκτατότητα. Ηπιότερη – μη επαρκής ανάμιξη – έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία σημείων στη ζύμη που δεν είναι καλά αναμεμιγμένα, παρεμβαίνοντας στο στάδιο της επώασης, καθώς πρωτεΐνες και άμυλο δεν κατανέμονται ομοιογενώς (Moss, 1972). Αντιθέτως όταν υπάρχει υπερανάμιξη, η ζύμη μετατρέπεται από μαλακή και ελαστική σε χαλαρή και κολλώδη (Sliwinski et al.,

2004), και η μείωση της συνοχής της αποδίδεται στην αποδυνάμωση του πρωτεϊνικού δικτύου, καθώς προκαλείται καταστροφή του δικτύου της γλουτένης (Evans et al., 1981). Η ζύμη του άρτου είναι ένα ιξωδοελαστικό υλικό που επιδεικνύει μια ενδιάμεση ρεολογική συμπεριφορά μεταξύ παχύρευστου υγρού και ελαστικού στερεού. Γενικά η ζύμη θα πρέπει να είναι εκτατή και αρκετά ελαστική ώστε να διογκωθεί και να κρατήσει τα αέρια που απελευθερώνονται κατά το στοφάρισμα.

#### 4.1.1.2. Επώαση

Κατά τη διάρκεια της επώασης, η οποία γίνεται σε θερμοκρασίες 27-40 °C (ανάλογα με τον τύπο του άρτου) και υψηλή σχετική υγρασία (85%), ο μεταβολισμός της μαγιάς έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα και την ανάπτυξη φυσαλίδων αέρα που σχηματίστηκαν κατά την ανάμιξη, οδηγώντας στην ανάπτυξη και διόγκωση της ζύμης. Ο χρόνος επώασης εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητα της μαγιάς, καθώς και από τη θερμοκρασία της διεργασίας. Η ανάπτυξη των φυσαλίδων αέρα κατά την επώαση και τον κλιβανισμό καθορίζει τα χαρακτηριστικά της δομής του άρτου, όπως τον όγκο και την υφή του.



**Σχήμα 4.1 Αναπαράσταση διόγκωσης ζύμης. α) Αρχικό στάδιο επώασης, τα διογκούμενα κελιά αέρα ενσωματώνονται στο πλέγμα αμύλου- πρωτεΐνης. β) Προχωρημένη φάση επώασης και πρώτη φάση ψησίματος, το πλέγμα αμύλου- πρωτεΐνης αποτυγχάνει να εγκλείσει τα κελιά αέρα, αφήνοντας μια υγρή μεμβράνη. γ) Στο τέλος του κλιβανισμού, η υγρή μεμβράνη καταρρέει (Gan et al., 1995).**

Κατά την αλκοολική ζύμωση της μαγιάς, οι υδατάνθρακες διασπώνται απελευθερώνοντας διοξείδιο του άνθρακα το οποίο με τη σειρά του οδηγεί στη διόγκωση της ζύμης. Στο στάδιο αυτό απελευθερώνονται χιλιάδες μικροσκοπικές φυσαλίδες

διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες καλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα υγρής γλουτένης και μεγαλώνουν καθώς προχωρά η επώαση (Σχήμα 4.1). Η μάλαξη της ζύμης μετά την επώαση έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή των φυσαλίδων στο ψωμί. Το μέγεθος, η κατανομή, η ανάπτυξη και η κατάρρευση των φυσαλίδων που απελευθερώνονται κατά την επώαση και τον κλιβανισμό επιδρούν σημαντικά στην τελική ποιότητα του άρτου, όσον αφορά τόσο την εμφάνιση όσο και τον τελικό του όγκο (Cauvain, 2003).

#### 4.1.1.3. Κλιβανισμός

Κατά τη διάρκεια του κλιβανισμού, οι πιο σημαντικές αλλαγές που παρατηρούνται είναι η αύξηση του όγκου, ο σχηματισμός της κρούστας, η αδρανοποίηση ζυμών και ενζυματικών δραστηριοτήτων, η πήξη των πρωτεϊνών και η ζελατινοποίηση του αμύλου στη ζύμη (Pyley, 1988). Η θερμοκρασία κλιβανισμού ποικίλλει από φούρνο σε φούρνο και κυμαίνεται σε ένα εύρος 220-250 °C. Στόχος είναι να επιτευχθεί θερμοκρασία 92-96 °C στο κέντρο του άρτου έως το τέλος του κλιβανισμού. Όσο η έντονη θερμότητα διαπερνά τη ζύμη, τα αέρια της διαστέλλονται με μία ταυτόχρονη διόγκωση της ζύμης. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, ο ρυθμός της ζύμωσης και της παραγωγής κυψελίδων αέρα επίσης αυξάνεται και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου η θερμοκρασία φτάσει τη θερμοκρασία αδρανοποίησης της μαγιάς (περίπου 45 °C). Τα σάκχαρα και τα προϊόντα που παράγονται από την δράση των ενζύμων επί των πρωτεϊνών είναι ελεύθερα για να ενισχύσουν τη γλυκύτητα της ψίχας και να συμμετάσχουν στην αντίδραση Maillard (σε θερμοκρασία >150 °C) ή σε αντιδράσεις μη ενζυματικής αμαύρωσης, που είναι υπεύθυνες για το καφέ χρώμα της κρούστας (Rosell, 2011). Το ψήσιμο έχει μικρή επίδραση στο δίκτυο της γλουτένης ενώ επηρεάζει σημαντικά τη δομή των αμυλόκοκκων (Khuo et al., 1975). Η ζελατινοποίηση αμύλου ξεκινά περίπου στους 60 °C. Αρχικά οι κόκκοι αμύλου απορροφούν το ελεύθερο νερό στη ζύμη. Η α-αμυλάση δρα μετατρέποντας το άμυλο σε δεξτρίνες και στη συνέχεια σε σάκχαρα φτάνοντας στη μέγιστη ενεργότητά της στους 60-70 °C. Πολύ μικρή δραστηριότητα της α-αμυλάσης μπορεί να περιορίσει τον όγκο του άρτου, ενώ πολύ μεγάλη δραστηριότητα προκαλεί κατάρρευση της δομής του.

#### 4.1.2. Ο ρόλος των διαφορετικών συστατικών άρτου

Οι λειτουργικές ιδιότητες των διάφορων συστατικών που χρησιμοποιούνται στα προϊόντα αρτοποιίας είναι πολλές και ποικίλουν. Ενδεικτικά μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες: δημιουργία δομής, αερισμός, γεύση και άρωμα, χρώμα και διάρκεια ζωής (Πίνακας 4.1). Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά του άρτου και οι διαφορετικές τους δράσεις.

**Πίνακας 4.1 Επίδραση διαφόρων συστατικών στα χαρακτηριστικά άρτου. M=μεγάλη επίδραση και εξάρτηση από την ποσότητά τους, Π= περιορισμένη συνεισφορά- απουσία ή παρουσία του είναι εμφανής, K= καμία σημαντική συνεισφορά (Stanley & Young, 2006).**

	Δομή	Αερισμός	Γεύση&Άρωμα	Χρώμα	Διάρκεια Ζωής
Άλευρο σίτου	M	M	M	K(λευκό)	K
Ίνες	M	M	M	Π	M
Αλάτι	M	Π	Π	K	Π
Μαγιά	M	M	K	K	K
Νερό	M	K	M	K	M

**Πίνακας 4.2 Βασική περιγραφή της λειτουργίας των κύριων συστατικών του άρτου (Doerry, 1995).**

Συστατικό	Λειτουργία	Περιγραφή
Άλευρο	Δομή	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Πρωτεΐνη (γλιαδίνη &amp; γλουτενίνη)+νερό= δημιουργία ιξωδοελαστικής δομής (γλουτένη) για διατήρηση αερίων, που σχηματίζεται από ζύμωση σακχάρων και συνεισφέρει στη δομή του ζυμαριού και του άρτου</li> <li>2. Άμυλο+νερό+θέρμανση=ιξώδες πήγμα Κατά την αποθήκευση, αναδιάταξη που οδηγεί σε μπαγιάτεμα και αύξηση σκληρότητας στους άρτους</li> </ol>
Νερό	Ενυδάτωση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ενυδάτωση για σχηματισμό γλουτένης</li> <li>2. Ενυδάτωση μη αμυλούχων τμημάτων και κατεστραμμένου αμύλου</li> <li>3. Μέσο διασποράς και διάλυσης, μέσο για χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις</li> <li>4. Διόγκωση του ζυμαριού</li> </ol>
Μαγιά	Διόγκωση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Παράγει CO<sub>2</sub> +αιθανόλη κατά τη ζύμωση</li> <li>2. Δημιουργεί πρόδρομες ουσίες γεύσης</li> <li>3. Ο ρυθμός ζύμωσης ελέγχεται από θερμοκρασία, συγκέντρωση σακχάρων, επίπεδο νερού, pH, αλάτι, ποσότητα και τύπο μαγιάς</li> </ol>
Αλάτι	Βελτίωση Γεύσης	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Βοηθά στον έλεγχο της ζύμωσης</li> <li>2. Ενδυνάμωση ζυμαριού εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με το αλάτι</li> <li>3. Διευρύνει την απαιτούμενη ανάπτυξη του ζυμαριού</li> </ol>

#### 4.1.2.1. Φυτικές Ίνες

Ένα από τα μεγάλα προβλήματα από την προσθήκη ινών στον άρτο είναι η αργή ενυδάτωσή τους, η οποία αλλάζει το ιξώδες της ζύμης. Στην αρχή της ανάμιξης οι ζύμες που περιέχουν ίνες, συμπεριλαμβανομένης και εκείνης από άλευρο ολικής άλεσης, έχουν κολλώδη υφή η οποία χάνεται καθώς σταδιακά το νερό απορροφάται από τις ίνες αυξάνοντας τη σκληρότητά τους. Στο στάδιο της μορφοποίησης το αυξημένο ιξώδες στη ζύμη μπορεί να συμβάλλει στην καταστροφή της σχετικά ευάλωτης δομής των κελιών αέρα με αποτέλεσμα την ποιοτική υποβάθμιση των άρτων, αφού συνήθως εμφανίζονται

σκούρες περιοχές στη ψίχα (Cauvain & Young, 2008). Μία επίσης σημαντική επίδραση των ινών είναι η μείωση της ικανότητας συγκράτησης των αερίων της ζύμης επιδρώντας αρνητικά στον όγκο του, χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να αναστραφεί με κατάλληλη βελτιστοποίηση της συνταγής. Όσον αφορά το μέγεθος, λεπτόκοκκα σωματίδια τείνουν να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην απώλεια του όγκου του ψωμιού από ότι τα χονδρόκοκκα. Οι ίνες επίσης επιδρούν στις οργανοληπτικές ιδιότητες των άρτων μεταβάλλοντας την υφή, τη γεύση και το άρωμά τους.

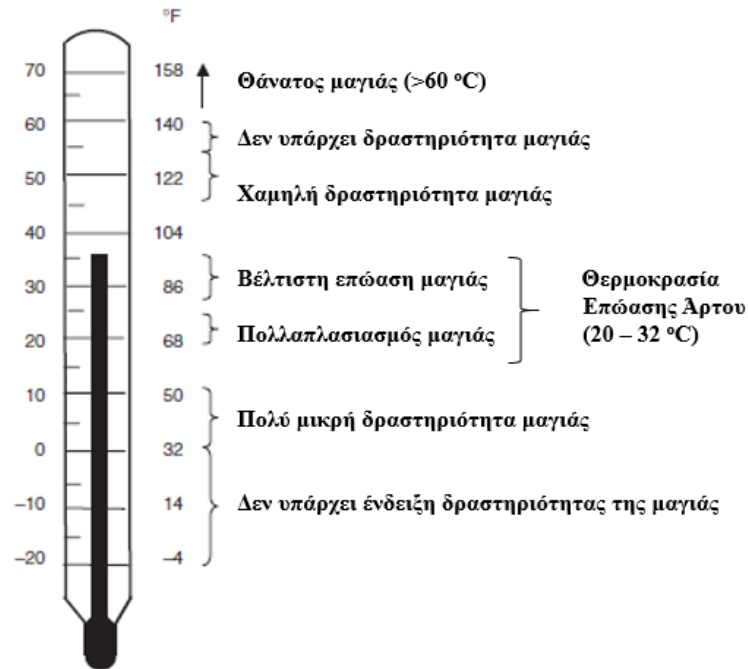
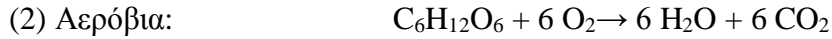
#### 4.1.2.2. Αλάτι

Ο ρόλος του αλατιού είναι σημαντικός στη αρτοποιία διότι όχι μόνο προσδίδει γεύση, αλλά επίσης ενισχύει τη δύναμη της γλουτένης κάνοντάς την πιο εκτατή και αναστέλλει τη δράση της μαγιάς. Για τους παραπάνω λόγους η ποσότητα αλατιού που χρησιμοποιείται θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Εάν δεν χρησιμοποιηθεί επαρκής ποσότητα αλατιού, η επώαση και η ζύμωση συμβαίνουν πολύ γρήγορα. Εάν χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποσότητα η επώαση και η ζύμωση επιβραδύνονται (Lai & Lin, 2006). Επιπρόσθετα, όσο περισσότερο αλάτι χρησιμοποιείται σε μία συγκεκριμένη συνταγή, τόσο περισσότερη μαγιά απαιτείται για να επιτευχθεί ο ίδιος χρόνος επώασης (Williams & Pullen, 1998).

#### 4.1.2.3. Μαγιά Αρτοποιίας

Η μαγιά αρτοποιίας ή *Saccharomyces cerevisiae* χρησιμοποιείται για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα στο ψωμί. Δρα στα απλά σάκχαρα για να παράξει διοξείδιο του άνθρακα και αλκοόλη (Williams & Pullen, 1998). Μετά από την άμεση ζύμωση των σακχάρων που ήδη βρίσκονται στη ζύμη, η μαγιά μπορεί να τραφεί από σάκχαρα που προέρχονται από το άμυλο. Ωστόσο, μόνο το κατεστραμμένο άμυλο μπορεί να αποδομηθεί και αυτός είναι και ο λόγος που η ύπαρξή του σε συνδυασμό με την παρουσία α-αμυλάσης είναι απαραίτητη. Η αλκοόλη χάνεται κατά τη διάρκεια του κλιβανισμού, οπότε δεν επιδρά σημαντικά στα προϊόντα αρτοποιίας. Μετά την ανάμιξη όλο το οξυγόνο που έχει ενσωματωθεί στη ζύμη αρχίζει να καταναλώνεται από τη μαγιά (1). Εξαιτίας των αναερόβιων συνθηκών που επικρατούν, ο μεταβολισμός της μαγιάς στρέφεται προς τη ζύμωση (2). Αρχικά το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται στο ελεύθερο νερό και όταν φτάσει σε σημείο κορεσμού, συσσωρεύεται σε αέρια μορφή, ασκώντας εσωτερικά πίεση στο δίκτυο γλουτένης, το οποίο λόγω της δομής του, επιτρέπει στη ζύμη να φουσκώσει, διατηρώντας ταυτόχρονα την εξωτερική του δομή (Poitrenaud, 2006). Η όλη διαδικασία είναι πολύ θερμοευαίσθητη και ο ρυθμός της είναι ταχύτερος σε θερμοκρασίες 40-43 °C. Η μαγιά αδρανοποιείται σε θερμοκρασία 55 °C (Σχήμα 4.2). Αυτό το θερμοκρασιακό προφίλ είναι κρίσιμο στην αρτοποιία (Cauvain & Young, 2006). Όσο περισσότερη είναι η ποσότητα της μαγιάς, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός παραγωγής του διοξειδίου του

άνθρακα. Σημαντικοί επίσης παράγοντες για τη δράση της μαγιάς είναι η παρουσία σακχάρων και το pH του περιβάλλοντος (βέλτιστο 4-6).



Σχήμα 4.2 Θερμοκρασιακό προφίλ δράσης της μαγιάς (Lai & Lin, 2006).

#### 4.1.2.4. Νερό

Χημικά, το νερό είναι το απλούστερο συστατικό που χρησιμοποιείται στην αρτοποιία, αλλά εξαιτίας των ειδικών ιδιοτήτων του διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα και τη διάρκεια ζωής του άρτου (Cauvain & Young, 2008). Ο ρόλος του σχετίζεται με τη διαλυτοποίηση και τη διασπορά των συστατικών κατά τη διάρκεια της ανάμιξης και με τον σχηματισμό συμπλόκων, όπως η γλουτένη στο ψωμί. Οι ιδιότητες της ζύμης ποικίλλουν σύμφωνα με το επίπεδο του νερού που προστίθεται. Όταν προστίθεται μικρή περιεκτικότητα σε νερό, η ζύμη που προκύπτει είναι σκληρή και δύσκολη στο χειρισμό (Cauvain & Young, 2008) και αντίστοιχα οι παραγόμενοι άρτοι έχουν μικρό όγκο και φτωχή εξωτερική εμφάνιση. Από την άλλη, όταν προστίθεται πολύ νερό επίσης υπάρχει δυσκολία χειρισμού της ζύμης, η οποία γίνεται πολύ χαλαρή και μορφοποιείται δύσκολα.

## 4.2. Μπισκότα

Τα μπισκότα ανήκουν στην κατηγορία των «ζαχαρούχων δίπυρων», προϊόντα που παρασκευάζονται με ξήρανση σε ειδικούς κλιβάνους μάζας και περιέχουν άλευρο ή αμυλάλευρο, ζάχαρη, λιπαρές ύλες, γάλα, αφρόγαλα, καφέ, κακάο, σοκολάτα και άλλες επιτρεπόμενες πρώτες ύλες (ΚΤΠ, Άρθρο 142, 2014). Γενικά, χαρακτηρίζονται από μικρή υγρασία, υψηλή περιεκτικότητα σε λιπαρά ή/και σε σάκχαρα και από τραγανή υφή. Θεωρείται ένα εύχρηστο προϊόν αφού έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και συμπαγή δομή (Manley, 1991).

### 4.2.1. Μπισκότα τύπου short- dough

Τα μπισκότα τύπου short- dough είναι ένα δημοφιλές προϊόν που χαρακτηρίζεται από ένα απλό σύστημα που αποτελείται από τρεις κύριες πρώτες ύλες (άλευρο, ζάχαρη, λίπος) και ξεχωρίζει από τα άλλα μπισκότα στο ότι δεν είναι συνεκτικό υπό πίεση και σπάει εύκολα (Baltsavias et al., 1997). Επίσης είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό (<20% wb) (Baldino et al., 2014). Αυτές οι ζύμες παράγονται σε δύο στάδια, σχηματίζοντας αρχικά ένα γαλάκτωμα, με λίπος και νερό, και στη συνέχεια προσθέτοντας το άλευρο. Καθώς στο πρώτο στάδιο δεν υπάρχει γλουτένη για να αναπτυχθεί, η εισαγόμενη ενέργεια μπορεί να είναι υψηλή, αφού αυτό βοηθά στην καλύτερη διασπορά του λίπους.

**Πίνακας 4.3** Τυπική σύσταση μπισκότου τύπου digestive, υπολογιζόμενη με βάση το % αλεύρου (Cauvain & Young, 2006).

Συστατικά	% Αλεύρου
Άλευρο μπισκοτοποιίας	78
Άλευρο ολικής άλεσης	22
Φυτικό λίπος	31
Ζάχαρη	24
Διττανθρακικό νάτριο	1,56
Διττανθρακικό αμμώνιο	0,38
Ταρταρικό οξύ	1,67
Σιρόπι μελάσας	1,2
Αλάτι	1,1
Νερό	14,3

Το δεύτερο στάδιο της ανάμιξης, όπου προστίθεται το άλευρο, είναι πολύ γρήγορο ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη της γλουτένης. Σε κάποιες περιπτώσεις, ζάχαρη προστίθεται μαζί με το άλευρο (Edwards, 2007). Σε αυτή την κατηγορία μπισκότων ανήκουν και τα μπισκότα με την εμπορική ονομασία digestive. Μία τυπική συνταγή ενός τέτοιου μπισκότου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3 (Cauvain & Young, 2006).



#### 4.2.2. Ο ρόλος των διαφορετικών συστατικών μπισκότου

Η επίδραση των διαφόρων συστατικών του μπισκότου στη δομή, τον αερισμό, τη γεύση, το άρωμα, το χρώμα και τη διάρκεια ζωής του, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Οι σχετικά υψηλές ποσότητες σε λιπαρά και σάκχαρα προσδίδουν στη ζύμη πλαστικότητα και συνεκτικότητα χωρίς να σχηματίζεται δυνατό δίκτυο γλουτένης. Το επίπεδο του νερού, καθώς και η συγκέντρωση ζάχαρης παίζουν ρόλο στον περιορισμό της ζελατινοποίησης και της διόγκωσης του αμύλου.

**Πίνακας 4.4 Επίδραση διαφόρων συστατικών στα χαρακτηριστικά μπισκότου. Μ=μεγάλη επίδραση και εξάρτηση από την ποσότητά τους, Π= περιορισμένη συνεισφορά- απουσία ή παρουσία του είναι ανιχνεύσιμη, Κ= καμία σημαντική συνεισφορά (Stanley & Young, 2006).**

	Δομή	Αερισμός	Γεύση&Άρωμα	Χρώμα	Διάρκεια Ζωής
Άλευρο σίτου	Μ	Π	Μ	Κ	Κ
Ίνες	Π	Π	Π	Κ	Μ
Ζάχαρη	Μ	Π	Μ	Μ	Μ
Μπέικιν παουντερ	Π	Μ	Π	Κ	Κ
Όξινο ανθρακικό νάτριο	Π	Μ	Κ	Μ	Κ
Λιπαρά	Μ	Μ	Μ	Π	Κ
Αλάτι	Π	Κ	Κ	Κ	Π
Νερό	Μ	Κ	Μ	Κ	Μ

##### 4.2.2.1. Νερό

Η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή μπισκότων επιδρά στην ανάπτυξη της γλουτένης στη ζύμη, στο άπλωμα κατά το ψήσιμο, την τελική υγρασία και την οργανοληπτική αξιολόγησή τους.

##### 4.2.2.2. Ζάχαρη

Η ζάχαρη ή άλλες γλυκαντικές ουσίες καθορίζουν τις ιδιότητες της ζύμης και κατ' επέκταση του μπισκότου. Συνεισφέρει σημαντικά στη γλυκύτητα και το άρωμα, καθώς επίσης και στο χρώμα της επιφάνειας μέσω της καραμελοποίησης. Όσο η ποσότητα της ζάχαρης αυξάνεται, δρα ως παράγοντας σκληρότητας, δημιουργώντας μια τραγανή και σκληρή δομή. Το μέγεθος της κοκκομετρίας της ζάχαρης επηρεάζει την κρεμοποίηση και το άπλωμα των μπισκότων κατά το ψήσιμο. Καθώς ψήνονται τα μπισκότα, τα αδιάλυτα σάκχαρα λιώνουν και η ζύμη απλώνει. Η χονδρόκοκκη ζάχαρη διαλύεται λιγότερο εύκολα από ότι η λεπτόκοκκη, έτσι η χονδρόκοκκη οδηγεί σε μικρότερο άπλωμα της ζύμης και σε εμφάνιση φαινομένου «cracking» στην επιφάνεια του μπισκότου. Το φαινόμενο

«cracking» αναφέρεται στην εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια του μπισκότου και προκαλείται από την επανακρυστάλλωση της ζάχαρης.

#### 4.2.2.3. Baking powder

Το baking powder αποτελείται από ένα ή περισσότερα οξέα, από μαγειρική σόδα και από άμυλο. Το άμυλο λειτουργεί ως αδρανές φορέας για οξέα και βάσεις και αποτρέπει τις μεταξύ τους αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Η αντίδραση διόγκωσης τυπικά εξελίσσεται μέσα στο χρόνο και δεν γίνεται στιγμιαία. Τα οξέα που αντιδρούν περισσότερο στο στάδιο της παραγωγής της ζύμης χαρακτηρίζονται ως «ταχείας δράσης», ενώ εκείνα που δρουν κατά τον κλιβανισμό χαρακτηρίζονται ως «αργής δράσης». Αυτός ο τρόπος δημιουργίας πυρήνων αέρα μπορεί να συμβεί με την ενσωμάτωση αέρα κατά την ανάμιξη. Συχνά τα διογκωτικά μέσα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό (double-acting), με σκοπό να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος. Η αρχική απελευθέρωση αερίου παρέχει μικρά κελιά αέρα που προωθούν την ομοιόμορφη διαστολή κατά τη διάρκεια του κλιβανισμού (Lai & Lin, 2006).

#### 4.2.2.4. Φοινικέλαιο

Το φοινικέλαιο παράγεται από τον πολτό του καρπού φοίνικα (*Elaeis guineensis*) και είναι μοναδικό ανάμεσα στα άλλα φυτικά έλαια εξαιτίας του υψηλού ποσοστού (10 -15%) κορεσμένων ακυλ εστέρων (Persmark et al., 1976). Επιπρόσθετα, έχει σχεδόν 5% ελεύθερων λιπαρών οξέων τα οποία διαδραματίζουν ρόλο στη σκληρότητα. Σε θερμοκρασία δωματίου, το φοινικέλαιο εμφανίζεται σε στερεή μορφή και όταν προστίθεται σε τελικά προϊόντα προσδίδει σε αυτά αμμώδη υφή.

#### 4.2.2.5. Λειτουργία ελαίων στα μπισκότα

Τα μπισκότα συνήθως έχουν σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε λιπαρά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής –μεγαλύτερη από άλλα προϊόντα αρτοποιίας– και ως εκ τούτου έχουν και μεγαλύτερη ανάγκη για αντίσταση σε οξειδωτική αποικοδόμηση. Οι τέσσερις βασικές λειτουργίες των λιπαρών είναι η *λίπανση*, ο *αερισμός*, η *βελτίωση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών* και το *άπλωμα* (spread) των μπισκότων.

Με την επικάλυψη των κόκκων ζάχαρης και αλεύρου από λιπαρά, ο χρόνος και η απαιτούμενη ενέργεια ανάμιξης μειώνονται ενώ η ζύμη γίνεται πιο μαλακή. Επίσης, μειώνεται η ανάπτυξη της γλουτένης ώστε το τελικό προϊόν να είναι πιο μαλακό. Τέλος, βοηθάει ώστε να αποφευχθεί το κόλλημα των μπισκότων στην επιφάνεια ψησίματος. Όσον αφορά τον αερισμό, είναι η δεύτερη σπουδαιότερη λειτουργία που επιτελούν τα λιπαρά στη ζύμη των μπισκότων και συμβαίνει κυρίως κατά το πρώτο στάδιο της ανάμιξης όπου δημιουργείται η κρέμα. Ο αέρας που εγκλωβίζεται κατά την ανάμιξη παρέχει ένα πλαίσιο

όπου συστέλλονται τα αέρια και απελευθερώνονται υδρατμοί κατά το ψήσιμο. Ως αποτέλεσμα υπάρχει αυξημένη διόγκωση, ομοιόμορφη εμφάνιση και μαλακή δομή. Ο ομοιόμορφος αερισμός είναι κρίσιμος λόγω της επίδρασής του στην πυκνότητα της ζύμης και στο τελικό τους βάρος. Γενικά, υψηλό ποσοστό λιπαρών παράγει πιο μαλακά και πιο απλωμένα μπισκότα (Manley, 1991).

## 5. Πειραματικό Μέρος

### 5.1. Στόχοι και Αντικείμενο Έρευνας

Η παρούσα διατριβή αποσκοπεί στη μελέτη και την ανάπτυξη της διεργασίας άλεσης αλεύρου σίτου με πεπιεσμένο αέρα (jet mill) και την ενσωμάτωσή του σε τελικά προϊόντα αρτοποιίας ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη μελέτη για την επίδραση της άλεσης με jet mill σε άρτους με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού και σε μπισκότα τύπου digestive.

Γενικός στόχος είναι η παραγωγή νέας γνώσης, η οποία θα βελτιώσει τη διεργασία της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα και την ανάπτυξη των προϊόντων ολικής άλεσης με επιθυμητά φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά.

Οι επιμέρους στόχοι της παρούσας διατριβής μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω σημεία:

- Σύγκριση παραδοσιακής άλεσης με κυλινδρόμυλο και άλεσης με jet mill
  - Κατανόηση της λειτουργίας του jet mill και βελτιστοποίηση της διεργασίας άλεσης για άλευρο σίτου
  - Μελέτη επίδρασης διαφορετικών συνθηκών άλεσης με jet mill στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αλεύρου ολικής άλεσης σίτου
  - Επίτευξη υψηλής υποκατάσταση αλεύρου μπισκοτοποιίας από κονιορτοποιημένο άλευρο ολικής άλεσης σε μπισκότα
  - Ανάπτυξη άρτων ολικής άλεσης με άλευρα jet mill και βελτιστοποίηση του περιεχόμενου νερού
  - Διερεύνηση επίδρασης άλεσης με jet mill στον υπολογιζόμενο γλυκαιμικό δείκτη
- Αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση βάσει της οποίας έγινε ο τελικός σχεδιασμός της παρούσας έρευνας. Κρίθηκε σκόπιμο να γίνει σύγκριση της συμβατικής άλεσης με κυλινδρόμυλο και της άλεσης με jet mill, ώστε να αξιολογηθούν οι λειτουργικές ιδιότητες αλεύρων διαφορετικής κοκκομετρίας που προήλθαν είτε από κοσκίνιση (κυλινδρόμυλος), είτε από άλεση με jet mill. Προπειράματα πραγματοποιήθηκαν για τον καθορισμό των ορίων λειτουργίας του μύλου και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των αλεσμάτων που προέκυψαν από αυτόν σε τελικά προϊόντα αρτοποιίας. Στο πρώτο στάδιο αξιολόγησης του jet mill, χρησιμοποιήθηκε μαλακό άλευρο σίτου τύπου T70, που είναι και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στην αρτοποιία, ώστε από τη μία να αξιολογηθεί η λειτουργία του μύλου και η κατανάλωση ενέργειας και από την άλλη να καθοριστούν οι συνθήκες άλεσης που χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια των πειραμάτων. Μετά τον καθορισμό και την επιλογή τεσσάρων τελικών συνθηκών άλεσης έγινε εφαρμογή τους σε άλευρο σίτου ολικής άλεσης τύπου T90. Τα παραγόμενα άλευρα αξιολογήθηκαν ως προς τις λειτουργικές και φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Για να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση της χρήσης του jet mill κρίθηκε σκόπιμο να ενσωματωθούν τα παραγόμενα άλευρα σε τελικά προϊόντα. Έτσι, αρχικά ενσωματώθηκαν σε μπισκότα τύπου digestive υποκαθιστώντας σε διαφορετικά ποσοστά (0-100%) το άλευρο μπισκοτοποιίας. Αξιολογήθηκε το ιξώδες του

ζυμαριού και ακολούθησε μελέτη φυσικοχημικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων μπισκότων.

Σε επόμενο στάδιο τα κονιορτοποιημένα άλευρα ολικής άλεσης, με τα διαφορετικά μεγέθη κοκκομετρίας, ενσωματώθηκαν σε άρτους. Ταυτόχρονα με τη μελέτη της δυνατότητας ενσωμάτωσης των αλεύρων αυτών στους άρτους πραγματοποιήθηκε μελέτη επίδρασης διαφορετικών περιεκτικοτήτων νερού σε αυτούς. Διεξήχθησαν τρεις σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων έγινε αξιολόγηση άρτων ολικής άλεσης με περιεκτικότητα νερού 65, 75 και 85%. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η βέλτιστη περιεκτικότητα νερού για κάθε ένα από τα παραγόμενα άλευρα όπως υπολογίστηκε από τη χρήση φαρινογράφου. Για τους παραγόμενους άρτους πραγματοποιήθηκε φυσικοχημική και οργανοληπτική αξιολόγηση καθώς και μελέτη παλαίωσης. Στην τελευταία σειρά πειραμάτων, στην παραγωγή των άρτων χρησιμοποιήθηκε ποσότητα νερού που προσδιορίστηκε με χρήση Mixolab. Την αξιολόγηση των ζυμαριών ακολούθησε η ποιοτική αξιολόγηση των παραγόμενων άρτων. Τέλος έγινε *in vitro* διαδικασία υδρόλυσης αμύλου και μελέτη του υπολογιζόμενου γλυκαιμικού δείκτη (*eGD*).

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κεφάλαια των πειραμάτων και οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα.

Πίνακας 5.1 Σειρές πειραμάτων και μετρήσεις που έλαβαν χώρα.

Σειρά Πειραμάτων	Τίτλος	Μετρήσεις
1	Σύγκριση άλεσης με σφαιρόμυλο και μύλο με πεπιεσμένο αέρα	Κατανομή μεγέθους σωματιδίων, υγρασία, γλουτένη, τέφρα, πρωτεΐνη, χρώμα, ικανότητα συγκράτησης νερού, κατεστραμμένο άμυλο, ικανότητα διόγκωσης, διαλυτά στερεά, ιξωδοελαστικότητα εναιωρημάτων αλεύρων (25%) και μικροσκοπική παρατήρηση των αλεύρων
2	Επίδραση άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε μαλακό άλευρο σίτου-Βελτιστοποίηση διεργασίας	Κατανομή μεγέθους σωματιδίων, υγρασία, πρωτεΐνη, τέφρα, υγρή και ξηρή γλουτένη, προφίλ ικανότητας συγκράτησης νερού, ελαίου, σουκρόζης, γαλακτικού οξέος και ανθρακικού νατρίου, pH, χρώμα ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ), πορώδες-πυκνότητα και κατεστραμμένο άμυλο
3	Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε άλευρο σίτου ολικής	Κατανομή μεγέθους σωματιδίων, υγρασία, πρωτεΐνη, τέφρα, διαλυτές και αδιάλυτες ίνες, ικανότητα συγκράτησης νερού, χρώμα, παρουσία πιτύρων, μικροδομή, κινητική μελέτη υδρόλυσης του αμύλου, ελεύθερα σάκχαρα, ανθεκτικό και αφομοιώσιμο αμύλου
4	Παραγωγή μπισκότων με άλευρο σίτου ολικής περασμένο από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα	Ιξώδες ζυμαριών, υγρασία, άπλωμα, δύναμη σπασίματος, χρώμα και οργανοληπτική αξιολόγηση μπισκότων
5	Παραγωγή άρτων με διαφορετικά ποσοστά νερού (65, 75 και 85%)	Κινητική διόγκωσης ζυμαριών, απόδοση, ειδικός όγκος, υγρασία, χρώμα, επιφανειακό πορώδες άρτων
6	Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει φαρινογραφήματος	Φαρινογράφημα, απόδοση ψησίματος, υγρασία, πορώδες, ειδικός όγκος και οργανοληπτική αξιολόγηση άρτων, σκληρότητα, ελαστικότητα και μορφολογία ψίχας, μελέτη παλαίωσης άρτων
7	Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει Mixolab	Ρεολογικός χαρακτηρισμός ζυμαριών (Mixolab) Κινητική διόγκωσης ζυμαριών Χρώμα, διόγκωση, υγρασία, σκληρότητα. <i>In vitro</i> υδρόλυση αμύλου, ελεύθερα σάκχαρα (FS), ανθεκτικό άμυλο (RS), αφομοιώσιμο άμυλο (DS) υπολογιζόμενος γλυκαιμικός δείκτης (eGI) άρτων

## 5.2. Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill)

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill), μοντέλο 0101S Jet-O-Mizer Milling, της εταιρείας Fluid Energy Processing & Equipment (Telford, Pennsylvania, USA). Αποτελείται από τον τροφοδότη της πρώτης ύλης, τον σιγαστήρα, την κύρια μονάδα επεξεργασίας του μύλου, τη σακούλα συλλογής του προϊόντος, από όπου διαφεύγει ο αέρας, τρία ακροφύσια, δύο άλεσης και ένα ώθησης, το οποίο βοηθά ώστε το δείγμα να φτάσει στην κύρια μονάδα επεξεργασίας ομοιόμορφα, τους ρυθμιστές πίεσης και τη μονάδα ελέγχου, από όπου ρυθμίζεται ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης. Ο μύλος λειτουργεί με μέγιστη πίεση αέρα 8 bar και μέγιστο ρυθμό τροφοδοσίας πρώτης ύλης 10 kg/h. Ο τροφοδότης λειτουργεί με δόνηση έχοντας μια δυναμικότητα ροής πρώτης ύλης 0-100% που ρυθμίζεται από τη μονάδα ελέγχου. Η δυναμικότητα του τροφοδότη μεταφράζεται σε kg/h, ρυθμός τροφοδοσίας, ανάλογα τις φυσικές ιδιότητες της πρώτης ύλης και την αντίστασή τους στη ροή. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill) και τα διάφορα μέρη του.

Για τη λειτουργία του μύλου απαιτείται σύνδεσή του με αεροσυμπιεστή και φίλτρο αέρα. Έτσι ο μύλος είναι συνδεδεμένος με κοχλιοφόρο συμπιεστή (KAESER Γερμανίας τύπου SM 12) πίεσης αέρα 8bar, ισχύος 7,5 kW/10HP εφοδιασμένος με λιπαντικά FOOD-GRADE, κάθετο αεροφυλάκιο (SICC Ιταλίας) χωρητικότητας 500Lt/11bar, πιστοποιημένο κατά CE 87/404 και με ξηραντή προσροφητικού (KAESER Γερμανίας τύπου DC 7,5).



Σχήμα 5.1 Μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill).

### 5.3. Υλικά

#### 5.3.1. Άλευρα

Παρακάτω παραθέτονται τα άλευρα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία:

- Τρία διαφορετικά κλάσματα μαλακού αλεύρου σίτου (T70) (Πίνακας 5.2)
- Το χονδρόκοκκο άλευρο κονιορτοποιήθηκε με χρήση jet mill σε πίεση 8 bar και με ρυθμό τροφοδοσίας 4,85 kg/h.

Πίνακας 5.2 Άλευρα που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφ.6.1.

Κλάσμα αλεύρου	Συντομογραφία
Λεπτόκοκκο	FF
Ενδιάμεσο	MF
Χονδρόκοκκο	CF
Jet milled χονδρόκοκκο	JCF

- Μαλακό άλευρο σίτου τύπου T70 (Μύλοι Λούλη Α.Ε.)
- Άλευρο ολικής άλεσης τύπου T90 (Μύλοι Λούλη Α.Ε.)
- Άλευρο μπισκοτοποιίας (ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Α.Ε.)

Το άλευρο μπισκοτοποιίας ήταν προσφορά της εταιρίας ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Α.Ε. Όλα τα υπόλοιπα άλευρα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν προσφορά της εταιρείας Μύλοι Λούλη Α.Ε.

#### 5.3.2. Υλικά για την παρασκευή μπισκότων

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή μπισκότων τύπου digestive είναι οι εξής:

- Άλευρο Σίτου Μπισκοτοποιίας (Παπαδόπουλος Α.Ε.)
- Άλευρο σίτου ολικής άλεσης (T90, Μύλοι Λούλη Α.Ε.) και αλέσματα που προέκυψαν από την κονιορτοποίησή του με χρήση jet mill σε τέσσερις διαφορετικές συνθήκες άλεσης (Πίνακας 5.4)
- Κρυσταλλική ζάχαρη (Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης, Λάρισα, Ελλάδα, με μέγεθος κόκκων <220μm)
- Φυτικό έλαιο (Νέα Φυτίνη, Unilever S.A, Αθήνα, Ελλάδα)
- Ιωδιούχο αλάτι (Κάλλας Α.Ε, Αθήνα, Ελλάδα)
- Διττανθρακική Σόδα (ΗΛΙΟΣ ΜΠΑΧΑΡΙΚΑ)
- Κρεμόριο (ΗΛΙΟΣ ΜΠΑΧΑΡΙΚΑ)



### 5.3.3. Υλικά για παρασκευή άρτου

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή άρτων είναι οι εξής:

- Άλευρο σίτου ολικής άλεσης (T90, Μύλοι Λούλη Α.Ε.) και αλέσματα που προέκυψαν από την κονιορτοποίησή του με χρήση jet mill σε τέσσερις διαφορετικές συνθήκες άλεσης (Πίνακας 5.4)
- Ξηρή μαγιά αρτοποιίας (Saf-instant, S.I. Lesaffre, Γαλλία)
- Ιωδιούχο αλάτι (Κάλλας Α.Ε, Αθήνα, Ελλάδα)

## 5.4. Πειραματική διαδικασία

### 5.4.1. Άλεση

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων (Κεφ 6.1) πραγματοποιήθηκε ενδεικτική άλεση με χρήση jet mill με σκοπό τη σύγκριση του αλέσματος με το αρχικό που προήλθε από συμβατική άλεση (σφαιρόμυλο). Για την πραγματοποίηση της άλεσης χρησιμοποιήθηκε πίεση αέρα 8 bar και παροχή δείγματος 100% (δυναμικότητα μηχανήματος, ροή πρώτης ύλης) που για το συγκεκριμένο δείγμα μετρήθηκε σε 4,85 kg/h.

Πίνακας 5.3 Άλεση μαλακού αλεύρου σίτου (T70) με χρήση jet mill σε διαφορετικές συνθήκες.

Κωδικός Δείγματος	Πίεση (bar)	Δυναμικότητα Μηχανήματος Ροή πρώτης ύλης (%)	Ανατροφοδότηση
control	-	-	-
8R100	8	100	OXI
8R90	8	90	OXI
8R80	8	80	OXI
8R70	8	70	OXI
8R60	8	60	OXI
4R100	4	100	OXI
4R90	4	90	OXI
4R80	4	80	OXI
4R70	4	70	OXI
4R60	4	60	OXI
2x8R100	8	100	NAI
2x8R90	8	90	NAI
2x8R80	8	80	NAI

Στη συνέχεια (Κεφ 6.2) χρησιμοποιήθηκε μαλακό άλευρο σίτου T70 το οποίο αλέστηκε με χρήση jet mill σε διαφορετικές συνθήκες (Πίνακας 5.3), ώστε να καθοριστούν οι συνθήκες άλεσης για τα επόμενα πειράματα. Όπου αναφέρεται ανατροφοδότηση νοείται η διπλή άλεση, δηλαδή το κονιορτοποιημένο άλευρο οδηγείται εκ νέου στον

τροφοδότη της πρώτης ύλης. Στο κεφάλαιο που ακολούθησε (Κεφ. 6.3) οι τέσσερις επιλεγμένες συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν για την άλεση αλεύρου σίτου ολικής άλεσης (T90) με jet mill (Πίνακας 5.4).

**Πίνακας 5.4 Άλεση αλεύρου ολικής άλεσης (T90) με χρήση jet mill σε τέσσερις διαφορετικές συνθήκες.**

Κωδικοποίηση Δειγμάτων	Πίεση αέρα (bar)	Ρυθμός τροφοδοσίας μηχανήματος (%)	Ανατροφοδότηση
WWF	-	-	-
JW1	4	100	OXI
JW2	8	100	OXI
JW3	8	100	NAI
JW4	8	70	OXI

#### 5.4.2. Παρασκευή μπισκότων

Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με τη ζύγιση των πρώτων υλών, σε ποσότητες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Η ζάχαρη, το νερό, το έλαιο, το αλάτι και η σόδα προστέθηκαν στον κάδο του αναμίκτη (Hobart mixer, N50, Hobart Co., Οχάιο), όπου αναμίχθηκαν για 3 min σε ταχύτητα 475 rpm, χρησιμοποιώντας επίπεδο αναδευτήρα, ώστε να επιτευχθεί μια ομοιογενής κρέμα. Στη συνέχεια προστέθηκε το αλεύρο και το μίγμα αναμίχθηκε για άλλα 3 min σε ταχύτητα 475 rpm. Το ζυμάρι που προέκυψε μορφοποιήθηκε έτσι ώστε το πάχος του να είναι 7 mm. Χρησιμοποιώντας κουπάτ (6 cm) έγινε η τελική διαμόρφωση των μπισκότων. Τα μπισκότα ψήθηκαν στους 190 °C για 10 min, αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 30 min, ώστε να ψυχθούν.

Το αλεύρο μπισκοτοποιίας υποκαταστάθηκε από αλεύρο ολικής άλεσης σε ποσοστά 0, 18,5, 30, 50, 80 και 100%. Η υποκατάσταση έγινε για όλα τα αλεύρα (αρχικό αλεύρο ολικής άλεσης και κονιορτοποιημένα, Πίνακας 5.4) και συνολικά παρασκευάστηκαν 26 διαφορετικές συνταγές μπισκότων (Πίνακας 5.6).

**Πίνακας 5.5 Συνταγή για την ανάπτυξη μπισκότων βασισμένη στο % βάρος του αλεύρου.**

Συστατικό	Ποσοστό % επί του αλεύρου
Κρυσταλλική ζάχαρη	28,3
Φυτικό έλαιο	35,3
Αλάτι	1,1
Διτανθρακική Σόδα	1,3
Κρεμμόριο	0,6
Νερό	20,0
Μηλικό Οξύ	0,3

Πίνακας 5.6 Μίγματα αλεύρων και κωδικοποίηση συνταγών για μπισκότα.

	Κωδικός Δείγματος	Άλευρο Ολικής (%)	Άλευρο μπισκοτοποιίας BF (%)
Άλευρο ολική άλεσης	18 WWF	18,5	81,5
	30 WWF	30	70
	50 WWF	50	50
	80 WWF	80	20
	WWF	100	0
Συνθήκες άλεσης: πίεση 4 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 4,51 kg/h	18 JW1	18,5	81,5
	30 JW1	30	70
	50 JW1	50	50
	80 JW1	80	20
	JW1	100	0
Συνθήκες άλεσης: πίεση 8 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 5,18 kg/h	18 JW2	18,5	81,5
	30 JW2	30	70
	50 JW2	50	50
	80 JW2	80	20
	JW2	100	0
Συνθήκες άλεσης: πίεση 8 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 2,54 kg/h	18 JW3	18,5	81,5
	30 JW3	30	70
	50 JW3	50	50
	80 JW3	80	20
	JW3	100	0
Συνθήκες άλεσης: σε πίεση 8 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 0,67 kg/h.	18 JW4	18,5	81,5
	30 JW4	30	70
	50 JW4	50	50
	80 JW4	80	20
	JW4	100	0
Άλευρο μπισκοτοποιίας	BF	0	100

### 5.4.3. Πειραματική διαδικασία παρασκευής άρτων

Για την παραγωγή των άρτων αρχικά ζυγίστηκαν στον κάδο του αναμίκτη (Hobart Mixer, N50, Hobart Co., Οχάιο) τα στερεά υλικά, άλευρο, μαγιά και αλάτι. Τα στερεά υλικά αναμίχθηκαν για 1 min και στη συνέχεια προστέθηκε το νερό, η ποσότητα του οποίου ήταν μεταβλητή (Πίνακας 5.7). Η ανάμιξη πραγματοποιήθηκε για 8 min σε ταχύτητα 475 rpm. Το τελικό ζυμάρι που σχηματίστηκε χωρίστηκε σε κομμάτια των 50 g, (δύο εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη διόγκωσης των ζυμαριών). Η επώαση πραγματοποιήθηκε στους 30 °C και σε υγρασία 85% για 70 min, οπότε έγινε πλήρης ανάπτυξη του ζυμαριού. Ακολούθησε ψήσιμο για 15 min στους 180 °C. Μετά το στάδιο του κλιβανισμού, τα αρτοσκευάσματα αφέθηκαν για περίπου 1 h σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια συσκευάστηκαν σε σακούλες πολυαιθυλενίου για 24h για περαιτέρω μελέτη.

Πίνακας 5.7 Κύρια συνταγή για την ανάπτυξη άρτων βασισμένη στο % βάρος του αλεύρου.

Κεφάλαιο	Νερό	Αλάτι (g/100g αλεύρου)	Μαγιά (g/100g αλεύρου)	Χρόνος Ανάμιξης (min/rpm)	Επώαση (min/°C)	Ψήσιμο (min/°C)
6.5.1	65%, 75%, 85%					
6.5.2	Φαρινογράφος	1,5	0,7	8/475	70/30	15/180
6.5.3	Mixolab					

## 5.5. Μέθοδοι-Μετρήσεις-Αναλύσεις

### 5.5.1. Αναλύσεις Αλεύρων

#### 5.5.1.1. Μέτρηση κοκκομετρίας




Η κοκκομετρική κατανομή και μέτρηση μεγέθους των αλεύρων έγινε με συσκευή κοκκομετρικής ανάλυσης με σκέδαση φωτός Malvern Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Worcestershire, Ηνωμένο Βασίλειο) εξοπλισμένη με μονάδα ξηρής διασποράς Scirocco (Malvern Instruments, Worcestershire, Ηνωμένο Βασίλειο). Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στην αρχή της περίθλασης με λέιζερ για να καθοριστεί το επί τις εκατό (%) ποσοστό κατ' όγκο των κόκκων που κατανέμεται σε καθεμιά από τις κοκκομετρικές κλάσεις σε μεγέθη από 0,01 έως 1000 μm. Από τα δεδομένα που λήφθηκαν υπολογίστηκαν κατ' όγκο η διάμεσος ( $D_{50}$ ), η μέση διάμετρος De Brouckere ( $D_{43} = \sum n_i d_i^4 / \sum n_i d_i^3$ ) και η μέση διάμετρος Sauter ( $D_{32} = \sum n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^2$ ), όπου  $n_i$  είναι ο αριθμός των κόκκων με διάμετρο  $d_i$ .

Η διάμεσος είναι η τιμή του μεγέθους των σωματιδίων που διαιρεί τον πληθυσμό τους ακριβώς σε δύο ίσα μέρη, δηλαδή, το 50% των τιμών είναι πάνω από αυτή την τιμή ενώ το υπόλοιπο 50% κάτω από αυτήν. Η παράμετρος De Brouckere είναι η μέση διάμετρος που βασίζεται στην πυκνότητα των κόκκων και η παράμετρος Sauter εκφράζει τη σχέση όγκου προς την επιφάνεια των κόκκων. Ο δείκτης διάθλασης και η απορρόφηση ήταν 1,53 και 0,7 αντίστοιχα.

#### 5.5.1.2. Οπτική παρατήρηση με μικροσκόπιο και ανάλυση εικόνας

Με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου και λογισμικού επεξεργασίας εικόνων Image-Pro Plus 7.0 (Media Cybernetics, Ουάσιγκτον) υπολογίστηκαν διάφοροι παράμετροι σχήματος όπως η κυκλικότητα, το πόσο δηλαδή ένα σχήμα προσεγγίζει εκείνο του κύκλου, η διάσταση (aspect), που είναι ο λόγος της μεγαλύτερης και της μικρότερης διάστασης του κόκκου και το «κουτί» X/Y, ο λόγος δηλαδή, μεταξύ πλάτους και ύψους του πλαισίου που οριοθετεί ένα επιλεγμένο αντικείμενο (Πίνακας 5.8). Αρκετές εικόνες καταγράφηκαν με χρήση οπτικού μικροσκοπίου (Kruss Ortronik, Γερμανία) σε μεγέθυνση x10 και κάμερας (SONY, Topica TP-1002DS). Τα δείγματα παρασκευάστηκαν με ανάμιξη αλεύρου και ισοπροπυλικής αλκοόλης σε αντικειμενοφόρο πλάκα και πάνω στο μίγμα τοποθετήθηκε η καλυπτρίδα (Wilson and Donelson, 1969).

Πίνακας 5.8 Παράμετροι σχήματος που υπολογίστηκαν.

Παράμετροι σχήματος	Σχηματική αναπαράσταση
Διάσταση (aspect) είναι ο λόγος μεταξύ μεγαλύτερης και μικρότερης διάστασης της έλλειψης	
Κουτί (box) X/Y είναι ο λόγος μεταξύ πλάτους και ύψους του πλαισίου που οριοθετεί ένα επιλεγμένο αντικείμενο	
Κυκλικότητα είναι το μέτρο του πόσο ένα σχήμα προσεγγίζει εκείνο του κύκλου (περίμετρος *2/4*π*περιοχή)	

### 5.5.1.3. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (ΗΜΣ, Scanning Electron Microscope, SEM)

Άλευρο σίτου τοποθετήθηκε σε μεταλλικό στέλεχος (stub) με χρήση αυτοκόλλητης ταινίας διπλής όψεως και ακολούθησε επικάλυψη με παχύ στρώμα χρυσού και παλλαδίου πάχους 100–200 Å με χρήση επιμεταλλωτή (JEE 400, JEOL, Ιαπωνία). Η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων έγινε σε τάση 10 kV με χρήση SEM (S-4800, Hitachi, Ιαπωνία) εφοδιασμένο με συσκευή εκπομπής πεδίου, οθόνη παρατήρησης RX Bruker, ανιχνευτή μετάδοσης και ψηφιακές κάμερες μικροανάλυσης. Το SEM διαθέτει ένα προβολέα εκπομπής πεδίου (FEG) με ανάλυση 1.4 nm σε 1 kV. Η ανάλυση μικροδομής διεξήχθη χρησιμοποιώντας λογισμικό ανάλυσης εικόνας (Image-Pro Plus 7.0, Media Cybernetics, Ουάσιγκτον) στην Κεντρική Υπηρεσία για την πειραματική έρευνα του πανεπιστημίου της Βαλένθια.

### 5.5.1.4. Ανάλυση Χρώματος

Οι παράμετροι χρώματος μετρήθηκαν με χρωματόμετρο Minolta (CR-200, Minolta Company, Ramsey, Νιού Τζέρσεϊ) αφού πρώτα έγινε βαθμονόμηση με χρήση λευκής πλάκας ( $L^*=96,9$ ,  $a^*=0,04$ ,  $b^*=1,84$ ). Οι μετρήσεις του χρώματος βασίστηκαν στον προσδιορισμό των χρωματικών παραμέτρων του συστήματος CIE (1976). Το  $L^*$  εκφράζει τη φωτεινότητα με τιμή  $L^*=0$  να αντιστοιχεί στο μαύρο και τιμή  $L^*=100$  να αντιστοιχεί στο λευκό. Οι τιμές των  $a^*$ ,  $b^*$  είναι οι ορθογώνιες συντεταγμένες του χρώματος πάνω στο επίπεδο διατομής του χρώματος, κάθετο στον άξονα μαύρου-άσπρου. Η θετική τιμή για το  $a^*$  υποδεικνύει κόκκινο χρώμα, ενώ η αρνητική τιμή πράσινο χρώμα. Η θετική τιμή για το  $b^*$  υποδεικνύει κίτρινο χρώμα, ενώ η αρνητική τιμή μπλε χρώμα. Πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις για το κάθε δείγμα.

### 5.5.1.5. Χημική Ανάλυση

Η υγρασία, η γλουτένη (υγρή και ξηρή) και η περιεχόμενη τέφρα μετρήθηκαν με τις μεθόδους 44-15.02, 38-10.01 και 08-01.01 του AACC (2012), αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα σε άζωτο προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της Kjeldahl με μονάδα απόσταξης Kjeltac 8100 και μετατράπηκε σε πρωτεΐνη (Nx5,7) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο 46-13.01 (AACC, 2012). Τέλος με τη μέθοδο 32-07.01 (AACC, 2012) προσδιορίστηκαν οι συνολικές και οι αδιάλυτες ίνες.

### 5.5.1.6. Ικανότητα δέσμευσης νερού (WHC), ελαίου (OHC) και άλλων διαλυτών

Η φυγοκεντρική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ικανότητας συγκράτησης νερού (WHC), ελαίου (OHC) και των διαλυτών: σουκρόζης (SuSRC), γαλακτικού οξέος (LaSRC) και ανθρακικού νατρίου (SCSRC) με βάση τη μέθοδο AACC 56-11.02. Ποσότητα αλεύρου 0,5 g και 5 g διαλύτη, ανάλογα με τον προσδιορισμό, τοποθετήθηκαν σε προζυγισμένο σωλήνα ο οποίος αναδεύτηκε με χρήση vortex για 1 min και φυγοκεντρήθηκε στα 1000g για 30 min. Το υπερκείμενο υγρό απορρίφθηκε και ο σωλήνας με το ίζημα ξαναζυγίστηκε. Η ποσότητα διαλύτη που δεσμεύτηκε υπολογίστηκε από τη διαφορά (βάρος του δείγματος μετά την φυγοκέντρωση μείον το αρχικό βάρος του δείγματος x 100) με τα αποτελέσματα να εκφράζονται σε g διαλύτη/g στερεού.

### 5.5.1.7. Ικανότητα διόγκωσης και διαλυτά στερεά

Η ικανότητα διόγκωσης υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφουν οι Yasui et al. (1999) και Zaidul et al. (2008) με κάποιες τροποποιήσεις. Ζυγίστηκαν 200 mg (ξ.β.) αλεύρου και 5 mL απεσταγμένου νερού, τα οποία προστέθηκαν σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Στη συνέχεια, οι σωλήνες αναμίχθηκαν με χρήση vortex για 10 s και επώαστηκαν σε υδατόλουτρο σε ένα εύρος θερμοκρασιών (65, 75, 85 και 95 °C) για 20 min με συχνές αναμίξεις. Στη συνέχεια, ψύχθηκαν σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 20 °C για 5 min και φυγοκεντρήθηκαν στα 3000 g για 10 min. Το υπερκείμενο ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε σε προζυγισμένο σωλήνα. Το ίζημα ζυγίστηκε ξεχωριστά. Τέλος, όλοι οι σωλήνες ξηράθηκαν στους 105 °C και επαναζυγίστηκαν. Η ικανότητα διόγκωσης (ΙΔ) υπολογίστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 5.1 και τα διαλυτά στερεά (ΔΣ) σύμφωνα με την Εξίσωση 5.2.

$$\text{Ικανότητα Διόγκωσης (ΙΔ)} \left( \frac{g}{g} \text{ ξ.β.} \right) = \frac{\text{βάρος διογκομένων αμυλόκοκκων}}{\text{ξηρό βάρος διογκομένων αμυλόκοκκων}} \quad (5.1)$$

$$\text{Διαλυτά Στερεά (ΔΣ)} (\%) = \frac{\text{ξηρό βάρος υπερκείμενης φάσης}}{\text{συνολικό ξηρό βάρος αμυλόκοκκων}} \times 100 \quad (5.2)$$

### 5.5.1.8. Κατεστραμμένο άμυλο

Το κατεστραμμένο άμυλο (απορρόφηση ιωδίου) μετρήθηκε με το SDmatic (Chopin, Villeneuve-la-Garenne, Γαλλία) σύμφωνα με τη μέθοδο 76-33.01 (AACC, 2012). Η αμπερομετρική αυτή μέθοδος στηρίζεται στην ταχύτητα με την οποία το ιώδιο απορροφάται από τους θραυσμένους αμυλόκοκκους. Διάλυμα παρασκευάζεται με 120 ml αποσταγμένου νερού, 3 g ιωδιούχου καλίου, 3 g βορικού οξέος και μια σταγόνα θειοθειικού νατρίου. Το ιώδιο μέσω του εμβόλου διοχετεύεται και αυτόματα 1 g αλεύρου εισάγεται στο διάλυμα. Η συσκευή μετρά την απορρόφηση του ιωδίου (AI%) το οποίο έρχεται σε επαφή με το κατεστραμμένο άμυλο. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή μέτρησης τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του σπασμένου αμύλου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της εταιρίας ΜΥΛΟΙ ΛΟΥΛΗ Α.Ε.

### 5.5.1.9. Κινητική υδρόλυσης αμύλου

Η υδρόλυση του αμύλου μετρήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε από τους Gularte και Rosell (2011) με μικρές διαφοροποιήσεις. Δείγμα αλεύρου (0,1 g) προστέθηκε σε 10 mL ρυθμιστικού διαλύματος μηλεϊνικού νατρίου 0,1 M (sodium maleate) (pH 6,9) που περιείχε παγκρεατική  $\alpha$ -αμυλάση (6 U/mL, Τύπος VI-B,  $\geq 10$  μονάδες/mg στερεού, Sigma Chemical, Μισούρι) και επώαστηκαν σε υδατόλουτρο υπό ανάδευση σε θερμοκρασία 37 °C. Δείγματα των 200  $\mu$ L απομακρύνθηκαν ανά τακτά διαστήματα κατά τη διάρκεια της επώασης (0,25-16 h) και αναδεύτηκαν με 200  $\mu$ L αιθανόλης (96%, w/w) ώστε να σταματήσει η ενζυματική αντίδραση. Τα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν στα 10.000 g για 5 min στους 4 °C. Το ίζημα εκπλύθηκε με αιθανόλη 50% (200  $\mu$ L) και τα υπερκείμενα συλλέχθηκαν και αποθηκεύτηκαν στους 4 °C για περαιτέρω επεξεργασία. Το υπερκείμενο (100  $\mu$ L) αραιώθηκε με 850  $\mu$ L ρυθμιστικού διαλύματος οξικού νατρίου (CH<sub>3</sub>COONa) 0,1 M (pH 4,5) και επώαστηκαν με 50  $\mu$ L αμυλογλυκοσιδάσης (33 U/mL) στους 50 °C για 30 min σε υδατόλουτρο υπό ανάδευση.

Για τον προσδιορισμό του ανθεκτικού αμύλου (RS), μετά από 16 h υδρόλυσης, το ίζημα διαλύθηκε σε 2 mL KOH 2 M χρησιμοποιώντας ομογενοποιητή τύπου Polytron ultraturrax IKA-T18 (IKA, Wilmington, Βόρεια Καρολίνα) για 1 min στην ταχύτητα 3. Το ομογενοποιημένο μίγμα διαλύθηκε σε 8 mL οξικού νατρίου (CH<sub>3</sub>COONa) 1,2 M (pH 3,8) και επώαστηκε με 100  $\mu$ L αμυλογλυκοσιδάσης (33 U/mL) στους 50 °C για 30 min σε υδατόλουτρο. Μετά τη φυγοκέντρωση στα 2.000 g για 10 min, το υπερκείμενο κρατήθηκε για τον προσδιορισμό της γλυκόζης. Το αφομοιώσιμο άμυλο (DS) προσδιορίστηκε στο υπερκείμενο μετά από 16 h επώασης.

Με σκοπό τον προσδιορισμό των ελεύθερων σακχάρων (FS), δείγμα αλεύρου (0,1 g) διαλύθηκε σε 2 mL αιθανόλης 80% και παρέμεινε σε υδατόλουτρο υπό ανάδευση σε θερμοκρασία 85 °C για 5 min. Στη συνέχεια φυγοκεντρήθηκε για 10 min στα 2.000 g. το υπερκείμενο διαχωρίστηκε ώστε να μετρηθούν τα FS. Αυτό πραγματοποιήθηκε δύο φορές.



Η περιεκτικότητα σε γλυκόζη μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ειδικό εμπορικό διαγνωστικό σκεύασμα (kit) με ένζυμα οξειδάση και υπεροξειδάση (GOPOD, Megazyme, Ιρλανδία). Η απορρόφηση μετρήθηκε στα 510 nm χρησιμοποιώντας αναγνώστη πλακών Epoch (Biotek Instruments, Νιου Χάμσαϊρ). Το άμυλο υπολογίστηκε βάσει της γλυκόζης (mg)  $\times$  0,9. Διεξήχθησαν τέσσερις επαναλήψεις για κάθε προσδιορισμό.

Τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκαν σε εξίσωση πρώτου βαθμού (Εξίσωση 5.3) (Goni, et al., 1997):

$$C_t = C_\infty (1 - e^{-kt}) \quad (5.3)$$

Όπου  $C_t$  είναι η συγκέντρωση του προϊόντος κατά τον χρόνο  $t$ ,  $C_\infty$  είναι η συγκέντρωση στο τέλος, και  $k$  είναι η σταθερά της εξίσωσης. Το διάγραμμα του  $\ln[(C_\infty - C_t)/C_\infty] = -kt$  ως προς το  $t$  χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της κλίσης που αντιστοιχεί στην τιμή  $-k$ .

## 5.5.2. Ρεολογία

### 5.5.2.1. Ρεολογικές μετρήσεις εναιωρημάτων αλεύρων

Δυναμικές ρεολογικές μετρήσεις εναιωρημάτων αλεύρου σε νερό (25% w/w) πραγματοποιήθηκαν με χρήση περιστροφικού ρεομέτρου (Universal Stress Rheometer/Rheometrics Scientific, Inc., Νιου Τζέρσει) που έφερε γεωμετρία παράλληλων πλακών (20 mm διάμετρος, 0,5 mm κενό). Αφού βρέθηκε η ιξωδοελαστική περιοχή (LVR) σε ένα εύρος θερμοκρασιών, πραγματοποιήθηκε δυναμικό πείραμα θερμοκρασιακού κύκλου σε σταθερή τάση 0,5% μέσα στην LVR. Τα ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά ελαστικός ( $G'$ ) και ιξώδης χαρακτήρας ( $G''$ ) καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης- ψύξης (40-90-55 °C). Το δείγμα τοποθετήθηκε μεταξύ των δύο πλακών και παρέμεινε σε κατάσταση ισορροπίας για 5 min πριν ξεκινήσει το πείραμα. Χρησιμοποιήθηκε «παγίδα» νερού προς αποφυγή της εξάτμισης του νερού. Για τον ίδιο λόγο τοποθετήθηκε παραφινέλαιο γύρω από το δείγμα. Ο ρυθμός αύξησης/ μείωσης της θερμοκρασίας ήταν 5 °C/min και τα δείγματα παρέμειναν στους 90 °C για 10 min. Η συχνότητα ήταν 1Hz.

Τα δυναμικά ταλαντωτικά πειράματα (oscillatory tests) στηρίζονται είτε στην άσκηση μιας ταλαντωτικής παραμόρφωσης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και στην παρατήρηση της ημιτονοειδούς τάσης που αναπτύσσεται εξετάζοντας ταυτόχρονα τη διαφορά στη γωνία φάσης που έχουν, είτε στην άσκηση μιας ταλαντωτικά μεταβαλλόμενης διατμητικής τάσης και την παρατήρηση της προκύπτουσας παραμόρφωσης. Οι παραμορφώσεις που εφαρμόζονται είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται χωρίς να καταστρέφεται η εσωτερική δομή του δείγματος. Αυτό ακριβώς

κάνει αυτή τη μέθοδο ιδιαίτερα χρήσιμη στην περιγραφή των ιδιοτήτων των τροφίμων που είναι χρονικά και θερμοκρασιακά εξαρτώμενες καθώς επιτρέπει τη συνεχή εκτίμηση των δυναμικών συντελεστών του τροφίμου χωρίς να καταστρέφονται δομικά στοιχεία που δημιουργούνται σε αυτό με την πάροδο του χρόνου.

Το ζυμάρι των άρτων ανήκει στην κατηγορία των ιξωδοελαστικών υλικών και συνδυάζει ταυτόχρονα ιδιότητες ρευστών και στερεών (ημι-στερεό). Ο παράγοντας  $G'$ , παράγοντας αποθήκευσης ή ελαστικός παράγοντας (Pa ή  $N/m^2$ ), ο οποίος αντιπροσωπεύει την ενέργεια που αποθηκεύεται στο υλικό και ανακτάται από αυτό σε κάθε κύκλο παραμόρφωσης, εκφράζει τον ελαστικό χαρακτήρα (χαρακτήρα στερεού) ενός υλικού, γι' αυτό όσο πιο πολύ προσομοιάζει με στερεό ένα υλικό τόσο πιο μεγάλη τιμή έχει. Αντίστροφα αν το υλικό προσομοιάζει με υγρό η τιμή του  $G''$  θα είναι μεγαλύτερη. Ο παράγοντας  $G''$ , παράγοντας απώλειας (Pa ή  $N/m^2$ ), ο οποίος αντιπροσωπεύει την ενέργεια που χάνεται σε κάθε κύκλο παραμόρφωσης, μέσω διάχυσής της στο περιβάλλον ως θερμότητα λόγω του ιξώδους του ρευστού, εκφράζει τον ιξώδη χαρακτήρα ενός υλικού. Για τα ιξωδοελαστικά υλικά όπου ούτε όλη η ενέργεια της ταλάντωσης αποθηκεύεται ούτε όλη χάνεται, οι τιμές των  $G'$  και  $G''$  βρίσκονται ανάμεσα στις δύο αυτές ακραίες τιμές. Τα ζυμάρια που παρουσιάζουν συντελεστή αποθήκευσης μεγαλύτερο από τον συντελεστή απώλειας στο πεδίο συχνοτήτων ( $G' > G''$ ) εμφανίζουν ελαστικό –στερεό χαρακτήρα.

### 5.5.2.2. Φαρινογράφος Hancocry – Brabender

Για τον προσδιορισμό των ρεολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων δειγμάτων αλεύρου ακολουθήθηκε η μέθοδος 54-21.01 (AACC, 2012). Ο φαρινογράφος μετρά και καταγράφει τη δύναμη που χρειάζονται οι δυο σιγμοειδείς βραχίονες του ζυμωτηρίου για να περιστραφούν με σταθερή ταχύτητα. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ενδεικτικό φαρινογράφημα αλεύρου σίτου και κάποια χαρακτηριστικά που υπολογίζονται με βάση αυτό. Τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνονται από το φαρινογράφημα είναι τα ακόλουθα:

- *Απορρόφηση (%)*: είναι το ποσοστό (επί αλεύρου) του νερού που χρειάζεται για να φτάσει το ζυμάρι σε συνεκτικότητα 500 FU (φαρινογραφικές μονάδες).

- *Χρόνος άφιξης (AT, Arrival Time)*: είναι ο χρόνος σε λεπτά (min) που χρειάζεται το γράφημα για να φτάσει την γραμμή των 500 FU. Ο χρόνος άφιξης είναι μέτρο της ταχύτητας με την οποία προσλαμβάνεται το νερό από το άλευρο και όσο μεγαλύτερος είναι τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη του αλεύρου.

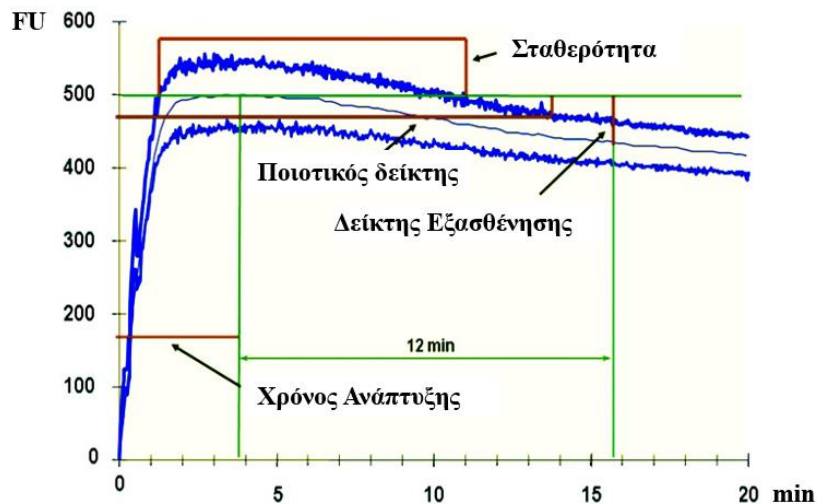
- *Χρόνος ανάπτυξης του ζυμαριού (DDT, Dough development time)*: είναι ο χρόνος (min) στον οποίο η καμπύλη φτάνει στο πρώτο μέγιστο (πλήρης ανάπτυξη ζυμαριού).

- *Σταθερότητα (S, Stability)*: είναι η διαφορά μεταξύ του χρόνου άφιξης και του χρόνου αναχώρησης, δηλαδή του χρόνου κατά τον οποίο η κορυφή της καμπύλης εγκαταλείπει τις 500 FU. Δείχνει την αντοχή του ζυμαριού στη μηχανική καταπόνηση από το ζυμωτήριο. Είναι γενικά αποδεκτό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή στην ανάμιξη.

• *Δείκτης εξασθένησης* (WI, Weakening Index): είναι η απομάκρυνση της καμπύλης από τις 500 FU ύστερα από ορισμένο χρονικό διάστημα συνεχούς ανάμιξης που μετρείται από την στιγμή που η καμπύλη φθάσει στο μέγιστο. Μετρείται σε FU (ή BU) και δείχνει την εξασθένηση του ζυμαριού εξαιτίας της μηχανικής καταπόνησης. Ζυμάρι με μικρό δείκτη εξασθένησης παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην ανάμιξη.

• *Δείκτης ελαστικότητας* (Elasticity Index): είναι ο λόγος του εύρους του φαρινογραφήματος στα 20 min ζυμάματος διά το εύρος του φαρινογραφήματος την στιγμή του χρόνου ανάπτυξης. Ένα άλευρο που επιδεικνύει μεγάλο δείκτη ελαστικότητας, περιέχει γλουτένη καλής ποιότητας ή πολύ ανθεκτική στην μηχανική καταπόνηση. Άλευρα με μεγάλο δείκτη ελαστικότητας περιέχουν γλουτένη υψηλής ποιότητας και ανθεκτική στη μηχανική καταπόνηση.

• *Ποιοτικός δείκτης* (FQN, Farinograph quality number): εμπειρική τιμή που βασίζεται στον χρόνο ανάπτυξης και την αντοχή στην ανάμιξη. Πιο δυνατά άλευρα έχουν υψηλότερο ποιοτικό δείκτη.



Σχήμα 5.2 Ενδεικτικό φαρινογράφημα αλεύρου σίτου.

### 5.5.2.3. Mixolab

Άλευρο τοποθετήθηκε στο δοχείο του Mixolab® και αναμίχθηκε με την απαιτούμενη ποσότητα νερού ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη ανάπτυξη ζυμαριού (54-60.01, AACC, 2012). Σταθερή συνοχή ζυμαριού χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση της ρεολογικής συμπεριφοράς των δειγμάτων. Το βάρος του ζυμαριού ήταν σταθερό στα 75 g. Η απορρόφηση νερού αναφέρεται σε άλευρο με υγρασία 14% (ξ.β.). Τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνονται από το γράφημα του Mixolab είναι τα ακόλουθα:

• *Ανάπτυξη*: σε σταθερή θερμοκρασία, στην αρχή της δοκιμής, προσδιορίζεται η δυνατότητα απορρόφησης νερού των αλεύρων και φαίνονται οι ιδιότητες του ζυμαριού κατά τη διάρκεια ανάμιξης (σταθερότητα, ελαστικότητα, απορροφούμενη ενέργεια).

- *Επίδραση της θερμοκρασίας στην πρωτεΐνη*: όταν η θερμοκρασία του ζυμαριού αυξάνεται, μειώνεται η συνεκτικότητά της. Το πόσο μεγάλη θα είναι αυτή η μείωση εξαρτάται από την ποιότητα της πρωτεΐνης.

- *Ζελατινοποίηση του αμύλου*: από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και μετά, τα φαινόμενα που έχουν σχέση με τη ζελατινοποίηση του αμύλου επιβάλλονται και παρατηρείται μια αύξηση στη συνεκτικότητα του ζυμαριού. Το πόσο μεγάλη θα είναι αυτή η αύξηση εξαρτάται από την ποιότητα του αμύλου και σε κάποιες περιπτώσεις από τα πρόσθετα.

- *Δράση αμυλάσης*: η αξία της συνεκτικότητας όταν ξαναπέφτει η θερμοκρασία εξαρτάται σε ένα βαθμό από την ενδογενή ή πρόσθετη δραστηριότητα της αμυλάσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της συνεκτικότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η αμυλασική δραστηριότητα.

- *Επαναδιάταξη του αμύλου*: όταν κρυνώνει το ζυμάρι, το άμυλο υποχωρεί και η συνεκτικότητα αυξάνεται. Μερικά χημικά επιδρούν στο φαινόμενο και περιορίζουν τη σημαντικότητά του, οπότε και διασφαλίζουν ένα τελικό προϊόν πιο ευέλικτο.

#### 5.5.2.4. Προσδιορισμός φαινομένου ιξώδους ζυμαριού μπισκότων (Apparent biaxial extensional viscosity of the dough)

Η συνταγή για την παραγωγή των ζυμαριών ήταν αντίστοιχη με εκείνη για την παραγωγή μπισκότων (Πίνακας 5.5) σε ποσοστό υποκατάστασης 100%. Το ζυμάρι είχε πάχος 1 cm και διάμετρο 4 cm. Το φαινόμενο ιξώδες (ABEV) των ζυμαριών υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μηχανήμα Instron (Universal Testing Machine, Instron 1100, Μασαχουσέτη), σύμφωνα με τη μέθοδο των HadiNezhad & Butler (2009). Το ζυμάρι τοποθετήθηκε σε δίσκο και συμπιέστηκε με έμβολο (διαμέτρου 4 cm) στο 75% του αρχικού του ύψους. Η ταχύτητα του εμβόλου ήταν 10 mm/min. Το ABEV υπολογίστηκε από την εξίσωση 5.4.

$$ABEV = \frac{2h_t F_t}{\pi \nu R^2} \quad (5.4)$$

Όπου  $F_t$  είναι η δύναμη συμπίεσης ( $N$ ) στο χρόνο  $t$ ,  $h_t$  είναι το ύψος του δείγματος του ζυμαριού ( $m$ ) στο χρόνο  $t$ ,  $R$  είναι η αρχική ακτίνα ( $m$ ) του δείγματος και  $\nu$  είναι η ταχύτητα κεφαλής ( $m/s$ ).

### 5.5.3. Αναλύσεις μπισκότων

#### 5.5.3.1. Φυσικά χαρακτηριστικά μπισκότων

Έξι μπισκότα τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο και μετρήθηκε το πλάτος ( $W$ ) τους. Τα μπισκότα περιστράφηκαν κατά  $90^\circ$  και το πλάτος ξαναμετρήθηκε. Για το πάχος ( $T$ ) έξι

μπισκότα τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο, άλλαξαν σειρά και έγιναν συνολικά έξι μετρήσεις. Το άπλωμα ( $SF$ ) υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο 10-50.05 (AACC, 2012) (Εξίσωση 5.5). Τέλος μετρήθηκε το βάρος, ο όγκος και η πυκνότητα των μπισκότων.

$$SF = \pi \lambda \alpha \tau \omicron \varsigma / \upsilon \psi \omicron \varsigma \quad (5.5)$$

### 5.5.3.2. Χρώμα

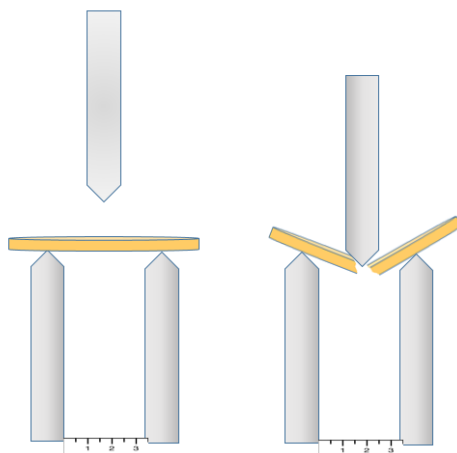
Οι παράμετροι  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  μετρήθηκαν με χρωματόμετρο Minolta (CR-200, Minolta Company, Ramsey, NJ, USA) στο κέντρο της επάνω επιφάνειας των μπισκότων.

### 5.5.3.3. Υγρασία

Η υγρασία των μπισκότων μετρήθηκε με βάση τη μέθοδο 44-15.02 (AACC, 2012). Δείγμα μπισκότου κονιορτοποιήθηκε σε γουδί, Ακολούθησε ξήρανση 1 g σε κλίβανο με αέρα στους 105 °C μέχρι σταθερού βάρους.

### 5.5.3.4. Δοκιμή σπασίματος τριών σημείων

Η δύναμη σπασίματος, είναι η ελάχιστη δύναμη που απαιτείται για να σπάσει ένα μπισκότο χρησιμοποιώντας το τεστ κάμψης τριών σημείων. Το μπισκότο στηρίχθηκε σε δύο δοκούς μήκους 5 cm και ύψους 6 cm που μεταξύ τους βρίσκονταν σε απόσταση 3 cm. Ένα έμβολο μήκους 5 cm και ύψους 4,65 cm κατέβαινε με ταχύτητα 10 mm/min, ώσπου να σπάσει το μπισκότο (Σχήμα 5.2). Οι μετρήσεις έγιναν με το Instron Universal Testing (Model 1100, Massachusetts, USA).



Σχήμα 5.3 Σχεδιαγραμματική απεικόνιση δοκιμής κάμψης τριών σημείων για μπισκότο.

### 5.5.3.5. Οργανοληπτική Αξιολόγηση

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των μπισκότων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο 50 δοκιμαστές ηλικίας 20-50 ετών, φοιτητές και απλοί καταναλωτές χρησιμοποίησαν ηδονικό τεστ με κλίμακα εννέα σημείων. Τα μπισκότα αξιολογήθηκαν ως προς το χρώμα, την υφή, την εμφάνιση, τη γεύση και τη συνολική αποδοχή. Όσο υψηλότερη ήταν η βαθμολογία, τόσο καλύτερη ήταν η ποιότητα του μπισκότου (Gurta et al., 2011). Σε αυτό το πρώτο στάδιο αξιολογήθηκαν μπισκότα που περιείχαν άλευρο JW2 (Πίνακας 5.4) και μπισκοτοποιίας BF σε διάφορες αναλογίες (18,5, 30, 50, 80 και 100%) (Πίνακας 5.6). Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο όγκος των δειγμάτων ήταν πολύ μεγάλος, το άλευρο JW2 επιλέχθηκε ενδεικτικά, εξαιτίας της ενδιάμεσης κοκκομετρίας του, ώστε να υπολογιστεί η επίδραση του επιπέδου υποκατάστασης και να επιλεγεί το βέλτιστο. Στο δεύτερο στάδιο, ένα πάνελ από δέκα ημι-εκπαιδευμένους δοκιμαστές αξιολόγησαν μπισκότα (50WWF, 50JW1, 50JW2, 50JW3 και 50JW4) με υποκατάσταση BF στο 50%, αφού ήταν το ποσοστό υποκατάστασης που επιλέχθηκε από το πρώτο στάδιο αξιολόγησης. Οι δοκιμαστές βαθμολόγησαν από 1- 9 διάφορα ποιοτικά χαρακτηριστικά των μπισκότων: παρουσία ινών (1: χαμηλή, 9: υψηλή), φωτεινότητα (1: ανοιχτό, 9: σκούρο), σκληρότητα (1: μαλακό, 9: σκληρό), αίσθηση στο στόμα (1: αμμώδες, 9: κανένα υπόλειμμα στο στόμα), ένταση του γλυκού (1: χαμηλή, 9: υψηλή), ένταση αλμυρού (1: χαμηλή, 9: υψηλή), και η επίγευση (1: χαμηλή, 9: υψηλή).

### 5.5.4. Αναλύσεις άρτων

#### 5.5.4.1. Ικανότητα επώασης, διόγκωσης ζυμαριού άρτου

Δύο δείγματα των 50 g ζυμαριού τοποθετούνταν σε διαβαθμισμένους γυάλινους ογκομετρικούς κυλίνδρους και κατόπιν σε θάλαμο επώασης θερμοκρασίας 30 °C και 85% υγρασίας για 90 min. Μετρήσεις για τη διόγκωση των ζυμαριών καταγράφηκαν με βάση την εμφανή διαβάθμιση των ογκομετρικών κυλίνδρων με ακρίβεια  $\pm 0,5$  mL. Τα πειράματα διεξήχθησαν εις διπλούν.

#### 5.5.4.2. Χρώμα

Οι παράμετροι  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  μετρήθηκαν με χρωματόμετρο Minolta (Chroma Meter CR-400/410, Konica Minolta, Japan) στο κέντρο της φέτας του άρτου. Επιπρόσθετα υπολογίστηκε η διαφορά χρώματος ( $\Delta E$ ) χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 5.6, γνωστή ως CIE76.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (5.6)$$

Όπου τα  $L_0^*$ ,  $a_0^*$  και  $b_0^*$  αναφέρονται στο δείγμα αναφοράς, ενώ τα  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$  στα υπόλοιπα δείγματα.

### 5.5.4.3. Υγρασία

Η υγρασία των άρτων προσδιορίστηκε βάσει της πρότυπης μεθόδου 44-15.02 (AACC, 2012), ακολουθώντας τη διαδικασία της ξήρανσης σε δύο στάδια.

### 5.5.4.4. Ειδικός Όγκος

Ο ειδικός όγκος των άρτων ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της εκτόπισης και χρήση πρότυπων γυάλινων σφαιριδίων διαμέτρου 2 mm ως το μέσο εκτόπισης (Hwang & Hayakawa, 1980).

### 5.5.4.5. Προσδιορισμός Απόδοσης κατά το ψήσιμο

Η απόδοση προσδιορίζεται από την απώλεια υγρασίας κατά το ψήσιμο (%) και υπολογίζεται από την εξίσωση 5.7.

$$\text{Απόδοση (\%)} = \frac{\text{Βάρος ψημένου ψωμού}}{\text{Βάρος ζύμης}} \times 100 \quad (5.7)$$

### 5.5.4.6. Μέτρηση πορώδους

Ο υπολογισμός του πορώδους των άρτων μετρήθηκε σε δείγματα ψίχας μεγέθους 1,5 x 1,5 x 1,5cm (μήκος x πλάτος x ύψος). Η πραγματική πυκνότητα ( $\rho_s$ ) του δείγματος ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) είναι ο λόγος της μάζας των στερεών ( $m_s$ ) προς τον όγκο των στερεών ( $V_s$ ). Ο όγκος των στερεών ( $V_s$ ,  $\text{m}^3$ ) μετρήθηκε με τη χρήση στερεοπυκνόμετρου εκτόπισης ηλίου (Stereopycnometer SPY-3, Quantachrome, Syosset, N.Y., Η.Π.Α). Η φαινόμενη πυκνότητα υπολογίστηκε από την μέτρηση του πραγματικού όγκου του δείγματος ( $V_b$ ) και εκφράζεται με την εξίσωση 5.8 και το συνολικό πορώδες του δείγματος υπολογίστηκε με την εξίσωση 5.9.

$$\rho_b = m_s / V_b \quad (5.8)$$

$$\varepsilon = 1 - \rho_s / \rho_b \quad (5.9)$$

### 5.5.4.7. Επιφανειακά μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας

Τα επιφανειακά μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων υπολογίστηκαν με την χρήση εικόνων που λήφθηκαν από φέτες του άρτου από το μέσο της φρατζόλας με χρήση

σκάνερ (HP scanjet 4370, Hewlett – Packard, Η.Π.Α). Οι εικόνες επεξεργάστηκαν με χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας ImageProPlus 7 (Media Cybernetics, Η.Π.Α). Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν ήταν το χρώμα της ψίχας, το επιφανειακό πορώδες (επιφάνεια πόρων/συνολική επιφάνεια (2x2 cm), η πυκνότητα πόρων (πόροι/ cm<sup>2</sup>) και η μέση διάμετρος πόρων (mm).

#### 5.5.4.8. Προφίλ υφής της ψίχας (TPA)

Το TPA αξιολογήθηκε με χρήση του Texture Analyzer TA-XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, UK), χρησιμοποιώντας φέτες άρτου με πάχος 1cm. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή συμπίεσης-αποσυμπίεσης δύο κύκλων παραμορφώσεων. Η συμπίεση έγινε έως το 50% του αρχικού ύψους με ταχύτητα κίνησης του εμβόλου 1 mm/s. Το κυλινδρικό έμβολο από ανοξείδωτο χάλυβα είχε διάμετρο 25 mm.

#### 5.5.4.9. Μέτρηση χαρακτηριστικών υφής με χρήση Instron

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας και της ελαστικότητας της ψίχας των άρτων μετρήθηκε με χρήση συσκευής μέτρησης υφής Instron (Universal Testing Machine, Model 1100, Η.Π.Α) εξοπλισμένο με έμβολο συμπίεσης διαμέτρου 4 cm. Τα δείγματα ψίχας είχαν διαστάσεις 2 x 2 x 2cm. Η συμπίεση στην ψίχα έγινε έως το 50% του αρχικού της ύψους και ταχύτητα εμβόλου 101 mm/min. Ως σκληρότητα ψίχας ορίστηκε η μέγιστη δύναμη (N) κατά τη συμπίεση.

Όσον αφορά την ελαστικότητα της ψίχας (REL%), υπολογίστηκε με τεστ συμπίεσης-χαλάρωσης, με περίοδο χαλάρωσης 4 min και βάθος συμπίεσης 25% του αρχικού ύψους της ψίχας. Η σχετική ελαστικότητα της ψίχας (η δύναμη, με την οποία αντιστέκεται το δείγμα στην εφαρμοζόμενη μηχανική τάση κατά τη φάση της συμπίεσης) υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 5.10.

$$REL\% = (F_{res}/F_{max}) \times 100 \quad (5.10)$$

Όπου  $F_{max}$  (N) είναι η μέγιστη δύναμη της ψίχας σε βάθος συμπίεσης 25% και  $F_{res}$  (N) είναι η δύναμη μετά το πέρας της φάσης χαλάρωσης (4 min).

#### 5.5.4.10. *In Vitro* πέψη αμύλου και εκτιμώμενος γλυκαιμικός δείκτης

Δύο φέτες άρτου ξηράθηκαν με σκοπό την αξιολόγηση της *in vitro* πέψης. Η ενζυματική υδρόλυση του άρτου προσδιορίστηκε ακολουθώντας τη μέθοδο που αναφέρεται από τους Gularte και Rosell (2011) χρησιμοποιώντας 100 mg κονιορτοποιημένου λυοφυλιωμένου άρτου. Η κινητική της *in vitro* πέψης υπολογίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που όρισαν οι Goni et al. (1997) και περιγράφηκε παραπάνω για το άλευρο (Κεφ. 5.5.1.9).



Επιπρόσθετα υπολογίστηκαν τα RS, DS, και FS, όπως περιγράφηκαν για το άλευρο. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν ως ποσοστό σε υγρή βάση. Ένα μη γραμμικό μοντέλο (Εξίσωση 5.3) εφαρμόστηκε για να περιγράψει την κινητική της υδρόλυσης του αμύλου. Ο δείκτης υδρόλυσης (HI) υπολογίστηκε διαιρώντας την περιοχή κάτω από την καμπύλη υδρόλυσης του δείγματος με το εμβαδόν ενός πρότυπου υλικού (λευκού άρτου) για μία περίοδο χρόνου (0-180 min). Ο εκτιμώμενος γλυκαιμικός δείκτης (*eGI*) υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση που περιγράφηκε από τους Granfeldt et al. (1992) και τους Chung et al. (2008) (Εξίσωση 5.11). Οι τιμές είναι ο μέσος όρος τεσσάρων επαναλήψεων.

$$eGI = 8,198 + 0,862HI \quad (5.11)$$

#### 5.5.4.11. Μελέτη παλαίωσης

Τα δείγματα άρτου μετά το ψήσιμο αφέθηκαν να κρυσώσουν και αποθηκεύτηκαν σε σακούλες πολυαιθυλενίου στους 25 °C και 60% RH για 5 ημέρες. Για τη μελέτη παλαίωσης κατά τη διάρκεια των 5 ημερών μετρήθηκαν υγρασία και σκληρότητα, όπως περιγράφονται στα κεφ. 5.5.4.3 και 5.5.4.8 αντίστοιχα. Η πρώτη μέτρηση λήφθηκε 1h μετά το ψήσιμο και θεωρήθηκε ημέρα 1<sup>η</sup>.

#### 5.5.4.12. Οργανοληπτική Αξιολόγηση άρτων

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των άρτων πραγματοποιήθηκε από δέκα ημι-εκπαιδευμένους δοκιμαστές χρησιμοποιώντας εννιαβάθμια κλίμακα αξιολόγησης της έντασης των παρακάτω ιδιοτήτων: πορώδες, ευθραυστότητα, σκληρότητα, συνεκτικότητα, άρωμα σπόρου, συνολικό άρωμα, πικρή γεύση, αλμυρή γεύση, επίγευση, συνολική γεύση, χρώμα κόρας, χρώμα ψίχας και παρουσία πιτύρων. Τέλος αξιολογήθηκε η συνολική αποδοχή των άρτων.

#### 5.5.5. Στατιστική Επεξεργασία

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος Statgraphics Centurion XV (Statgraphics, Rockville, MD, USA). Για τη σύγκριση των μέσων τιμών των υπό μελέτη ιδιοτήτων σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% χρησιμοποιήθηκε ανάλυση διακύμανσης ANOVA. Για τη συσχέτιση των υπό εξέταση ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (PCA).

## 6. Αποτελέσματα και Συζήτηση

---

### 6.1. Σύγκριση άλεσης με κυλινδρόμυλο και μύλο με πεπιεσμένο αέρα

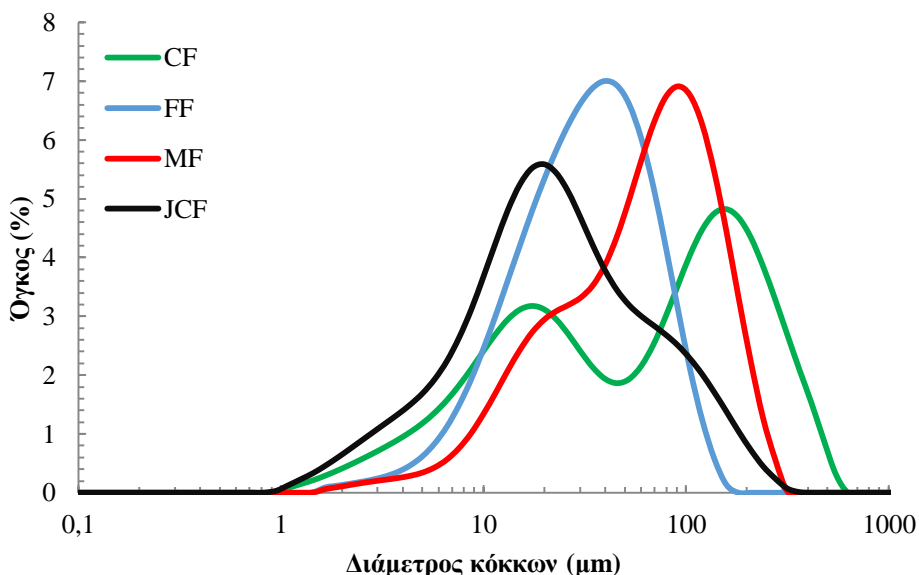
Η μείωση του μεγέθους της κοκκομετρίας μπορεί να έχει σημαντική επίδραση σε ένα πολύπλοκο σύστημα όπως αυτό των τροφίμων. Οι πιο σημαντικές επιδράσεις είναι κυρίως φυσικοχημικές και οφείλονται στην αύξηση της επιφάνειας των κόκκων (Schubert 1987, Wang & Flores, 2000, Toth et al., 2005). Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα θα μπορούσε να είναι μια εναλλακτική διεργασία για τη μείωση της κοκκομετρίας. Υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία για την επίδραση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στις ιδιότητες τροφίμων. Διαφορετικοί μέθοδοι άλεσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πλούσιων σε αδιάλυτες ίνες κλασμάτων από φλοιό πορτοκαλιού (Chau et al., 2006). Όσον αφορά τους δημητριακούς καρπούς, η άλεση με πεπιεσμένο αέρα έχει συνδυαστεί με αεροδιαχωριστή με σκοπό τον διαχωρισμό του αμύλου από την πρωτεΐνη για την παραγωγή λεπτόκοκκων κλασμάτων πλούσιων σε άμυλο. Οι Graveland και Henderson (1991) ισχυρίστηκαν, με πατέντα, ότι παρήγαγαν βελτιωμένο άλευρο σίτου με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα (jet mill). Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη, μικροαλεσμένο άλευρο ολικής άλεσης παράχθηκε με χρήση jet mill και ενσωματώθηκε σε ψωμιά προσδίδοντάς τους καλύτερη ποιότητα (Kim et al., 2013).

Το μέγεθος της κοκκομετρίας του αλεύρου είναι καθοριστικό χαρακτηριστικό για τις λειτουργικές του ιδιότητες. Σε αυτή την 1η σειρά πειραμάτων τρία κλάσματα μαλακού αλεύρου σίτου τύπου T70, από κυλινδρόμυλο, λήφθηκαν χρησιμοποιώντας κοσκίνισμα: ένα χονδρόκοκκο (CF) με  $D_{50} > 200 \mu\text{m}$ , ένα ενδιάμεσο (MF) με  $100 \mu\text{m} < D_{50} < 200 \mu\text{m}$  και ένα λεπτόκοκκο κλάσμα άλεσης (FF) με  $D_{50} < 100 \mu\text{m}$ . Επιπρόσθετα το δείγμα CF κονιοροποιήθηκε με χρήση jet mill με σκοπό την παραγωγή ενός υπέρλεπτου κλάσματος (JCF). Για όλα τα δείγματα πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική κατανομή καθώς και περαιτέρω φυσικοχημικός χαρακτηρισμός τους. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκαν η υγρασία, η γλουτένη, η τέφρα, η πρωτεΐνη, το χρώμα, η ικανότητα συγκράτησης νερού (WHC), το κατεστραμμένο άμυλο (DaS), η ικανότητα διόγκωσης (ID), τα διαλυτά στερεά (ΔΣ) και η ιξωδοελαστικότητα εναιωρημάτων αλεύρων (25%). Τέλος έγινε μικροσκοπική παρατήρηση των αλεύρων.

Σκοπός ήταν η κατανόηση των ιδιοτήτων αλεύρων με μικρή κοκκομετρία και η σύγκριση των διαφορετικών τύπων άλεσης.

### 6.1.1. Κατανομή μεγέθους και περιγραφή κόκκων αλεύρου

Οι κατανομές μεγέθους των αλεύρων για τα διάφορα κλάσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Το δείγμα CF (χονδρόκοκκο) παρουσίασε ξεκάθαρα διπλή κατανομή μεγέθους, κάτι που ήταν λιγότερο εμφανές στο MF, δύσκολο να εντοπιστεί στο JCF, ενώ στο FF δεν παρουσιάστηκε καθόλου. Είναι γνωστό ότι το άλευρο σίτου εμφανίζει φυσιολογικά διπλή κατανομή μεγέθους, αφού διακρίνονται σε αυτό δύο πληθυσμοί, ένας με μικρά και ένας με μεγάλα σωματίδια (Blanchard et al., 2012). Στην πραγματικότητα, οι κόκκοι στα άλευρα σίτου μπορούν να ταξινομηθούν σε τρία κύρια κλάσματα σύμφωνα με το μέγεθός τους: α) ολόκληρα κύτταρα ενδοσπερμίου, τμήματα του ενδοσπερμίου και συμπλέγματα κόκκων αμύλου με πρωτεΐνη (>35μm σε διάμετρο), β) μεγάλοι και μεσαίοι κόκκοι αμύλου, κάποιοι εκ των οποίων είναι προσκολλημένοι με πρωτεΐνη (15-35 μm σε διάμετρο) και γ) μικρά τμήματα πρωτεΐνης και αποκολλημένοι κόκκοι αμύλου (<15 μm σε διάμετρο) (Barbosa- Canovas & Yan, 2003). Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος της κοκκομετρίας των διαφόρων κλασμάτων άλεσης. Τα δείγματα MF (ενδιάμεσο κλάσμα) και CF (χονδρόκοκκο κλάσμα) παρουσίασαν παρόμοιες τιμές  $D_{50}$ , 60,6 μm και 63,18 μm αντίστοιχα, εξαιτίας της διπλής κατανομής του CF. Οι τιμές  $D_{43}$  είναι πιο ευαίσθητες στην παρουσία μεγάλων σε όγκο κόκκων σε σχέση με το  $D_{50}$  και όπως είναι λογικό μεγαλύτερη τιμή  $D_{43}$  καταγράφηκε για το CF σε σχέση με το MF, 113,14 μm και 81,67 μm αντίστοιχα.



Σχήμα 6.1 Καμπύλες κατανομής μεγέθους σωματιδίων (μm) των κλασμάτων αλεύρου σίτου CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF).

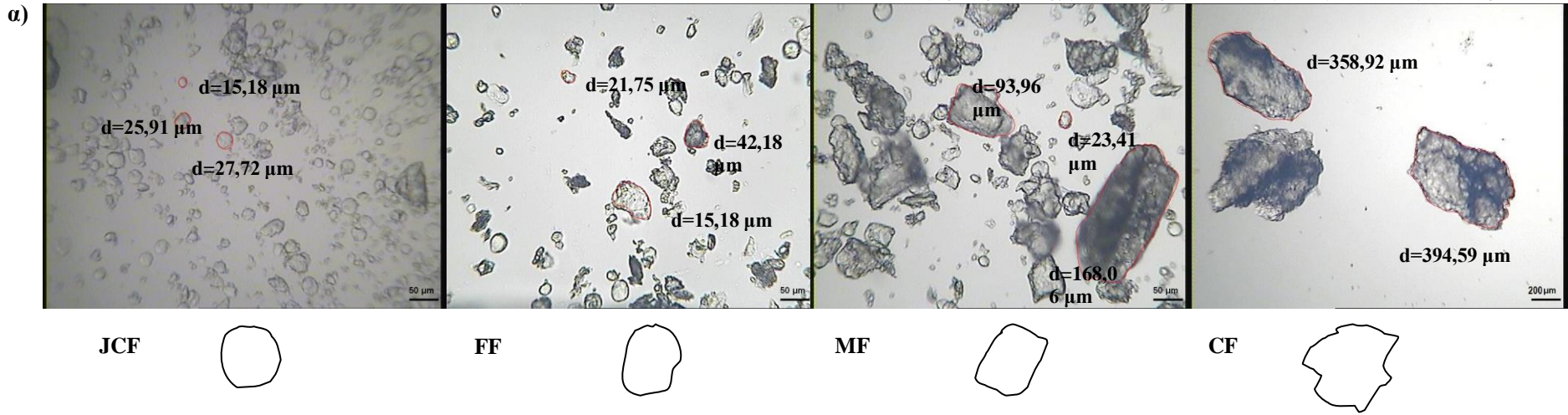
**Πίνακας 6.1 Τιμές χαρακτηριστικών μέσων διαμέτρων  $D_{32}$ ,  $D_{43}$  και  $D_{50}$  των κλασμάτων αλεύρου σίτου CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF).**

<b>Κλάσμα αλεύρου</b>	<b><math>D_{32}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>D_{43}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>D_{50}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
FF	22,53	41,77	30,12
CF	19,64	113,14	63,18
MF	33,98	81,67	60,60
JCF	13,07	41,39	19,14

Το δείγμα FF (λεπτόκοκκο άλεσμα) είχε  $D_{50}$  30,12  $\mu\text{m}$  κάτι που σημαίνει ότι τουλάχιστον το μισό του πληθυσμού των κόκκων ήταν ελεύθεροι κόκκοι αμύλου, μικρά τμήματα πρωτεΐνης και τμήματα πρωτεΐνης με εγκλωβισμένους αμυλόκοκκους, αφού όλα τα παραπάνω εμπίπτουν στην κατηγορία των  $D_{50} < 35 \mu\text{m}$ . Ειδικότερα, τα μικρά σωματίδια αντιπροσωπεύουν κυρίως του ελεύθερους κόκκους αμύλου με μέγεθος περίπου 25  $\mu\text{m}$  (Posner, 2009). Οι αμυλόκοκκοι στο άλευρο σίτου διακρίνονται σε δύο τύπους και ο διαχωρισμός τους αφορά κυρίως το μέγεθος και το σχήμα τους. Πιο συγκεκριμένα, η διάμετρος των αμυλόκοκκων τύπου A κυμαίνεται από 10  $\mu\text{m}$  έως 36-50  $\mu\text{m}$  παρουσιάζοντας φακοειδές σχήμα, ενώ οι αμυλόκοκκοι τύπου B έχουν διάμετρο  $< 10 \mu\text{m}$  και παρουσιάζουν πιο σφαιροειδές σχήμα (Hareland, 1994). Πέραν των μορφολογικών διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ των δύο τύπων αμυλόκοκκων, διαφέρουν επίσης και σε ποιοτικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα οι B αμυλόκοκκοι παρουσιάζουν μικρότερο ιξώδες ζελατινοποίησης σε σχέση με τους A τύπου αμυλόκοκκους (Geera et al., 2006), με αποτέλεσμα η αναλογία A:B αμυλόκοκκων να επιδρά σε τελικά προϊόντα που έχουν ως βάση το άλευρο, όπως ο άρτος (Sahlström et al., 1998, Park et al., 2004, 2005).

Η χρήση άλεσης με πεπιεσμένο αέρα είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή αλεύρων με πολύ χαμηλό  $D_{50}$ , αφού στο δείγμα JCF το μέγεθος μειώθηκε κατά 70% σε σχέση με το αρχικό δείγμα (CF), από 63,18 στα 19,14  $\mu\text{m}$  (Πίνακας 6.1). Παρά την μικρή τιμή  $D_{50}$  στο JCF, η κατανομή του ήταν ευρεία, εξαιτίας της πρώτης ύλης από την οποία προήλθε και είχε ανομοιόμορφο πληθυσμό κόκκων (Σχήμα 6.1). Η τιμή  $D_{32}$ , αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος με βάση την ειδική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου και χαρακτηρίζει καλύτερα τα μικρά και σφαιρικά σωματίδια (Zúñiga et al., 2013). Έτσι, το JCF είχε τη μικρότερη τιμή  $D_{32}$  (13,07  $\mu\text{m}$ ).

Διαφορετικά μεγέθη κόκκων συνυπάρχουν σε ένα μικτό πληθυσμό κλασμάτων σίτου, όπως φάνηκε και από τις εικόνες του οπτικού μικροσκοπίου (Σχήμα 6.2α), οι οποίοι διέφεραν επίσης και ως προς το σχήμα τους. Στο ίδιο σχήμα έγινε σχηματική απεικόνιση των πιο συχνά παρατηρούμενων κόκκων για το κάθε δείγμα αλεύρου, ενώ φάνηκαν και διάφορες επιμέρους παράμετροι του σχήματός τους. Τα ποσοτικά στοιχεία αυτών των παραμέτρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2β. Όσο το μέγεθος των κόκκων μειωνόταν, το σχήμα τους άλλαζε. Οι μικρότεροι κόκκοι (JCF) φαίνονταν πιο σφαιρικοί, ενώ οι μεγαλύτεροι (CF) παρουσίασαν ένα πιο πολυγωνικό σχήμα. Το δείγμα MF εμφάνισε μικρούς και μεγάλους, σχεδόν ορθογώνιους κόκκους. Οι κόκκοι του JCF είχαν τη μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς το σχήμα τους με κανονική συμμετρία και



β)

Παράμετροι σχήματος	Σχηματική αναπαράσταση	JCF	FF	MF	CF
Διάσταση (aspect)		1,4±0,32	1,48±0,53	1,49±0,37	1,57±0,58
Κουτί (box) X/Y		0,99±0,25	0,93±0,26	0,98±0,33	0,95±0,29
Κυκλικότητα		1,12±0,21	1,16±0,22	1,15±0,31	1,32±0,54

Σχήμα 6.2 α) Εικόνες μικροσκοπίου με ενδεικτικές τιμές περιμέτρου για τα διάφορα κλάσματα αλεύρου σίτου JCF, FF, MF, CF και σχηματική απεικόνιση των κόκκων και β) Παράμετροι σχήματος και ποσοτικοποίηση αυτών για όλα τα κλάσματα άλεσης.

ακολουθούνταν από τους κόκκους του δείγματος MF. Οι μικρές τιμές της παραμέτρου Box X/Y για τα δείγματα CF και FF, φανερώνουν ανώμαλο περίγραμμα και ακανόνιστο σχήμα. Στην πρώτη περίπτωση (CF) οι τιμές αντιπροσωπεύουν τα συσσωματώματα, ενώ στη δεύτερη (FF) τα διάφορα τμήματα-θραύσματα που υπάρχουν σε μεγάλο βαθμό στο δείγμα αυτό.

### 6.1.2. Σύσταση και λειτουργικές ιδιότητες

Η σύσταση και οι λειτουργικές ιδιότητες διαφόρων κλασμάτων αλεύρου σίτου, από κυλινδρόμυλο και από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα, μελετήθηκαν και συνοψίστηκαν στον Πίνακα 6.2.

Αναφορικά με το χρώμα των αλεύρων, μια χαμηλή τιμή για την παράμετρο  $a^*$  και μια υψηλή τιμή για την παράμετρο  $L^*$  είναι επιθυμητές, αφού οι καταναλωτές προτιμούν λευκό άλευρο χωρίς στίγματα. Η λευκότητα του αλεύρου καθορίζεται κυρίως από δύο ανεξάρτητους παράγοντες, τη φωτεινότητα και το «κιτρίνισμα». Η φωτεινότητα επηρεάζεται σημαντικά από τη διεργασία της άλεσης, το μέγεθος της κοκκομετρίας και το περιεχόμενο πίτυρο και συσχετίζεται με την τέφρα του αλεύρου. Από την άλλη, το κιτρίνισμα, οφείλεται κυρίως στα καροτενοειδή, φυσικές χρωστικές του αλεύρου (Oliver et al., 1993). Το JCF ήταν το λιγότερο κίτρινο και πιο φωτεινό δείγμα, ενώ το CF παρουσίασε τη χαμηλότερη τιμή  $L^*$  (Πίνακας 6.2). Οι Takahashi et al. (2013) βρήκαν ότι η κονιορτοποίηση του ρυζάλευρου σε μικροκλίμακα βελτίωσε τη λευκότητά του, κάτι που είναι σε συμφωνία με την παρούσα έρευνα.

**Πίνακας 6.2 Χημική σύσταση και λειτουργικές ιδιότητες των κλασμάτων αλεύρου σίτου CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF).**

Κλάσμα αλεύρου		CF	MF	FF	JCF
Ικανότητα συγκράτησης νερού (%)		68,04 <sup>a</sup> ±1,24	68,49 <sup>a</sup> ±0,72	80,35 <sup>b</sup> ±1,67	95,35 <sup>c</sup> ±1,95
Ικανότητα συγκράτησης ελαίου (%)		99,18 <sup>c</sup> ±3,16	83,99 <sup>b</sup> ±2,06	108,74 <sup>d</sup> ±2,62	78,11 <sup>a</sup> ±2,56
Υγρασία (%)		13,73 <sup>a</sup> ±0,09	12,26 <sup>b</sup> ±0,04	11,25 <sup>c</sup> ±0,16	7,66 <sup>d</sup> ±0,05
Τέφρα (%)		0,43 <sup>ab</sup> ±0,04	0,39 <sup>a</sup> ±0,03	2,91 <sup>c</sup> ±0,13	0,51 <sup>b</sup> ±0,03
Γλουτένη	Υγρή	22,48 <sup>a</sup> ±1,04	27,1 <sup>b</sup> ±0,51	nd	24,47 <sup>a</sup> ±0,16
	Ξηρή	7,87 <sup>a</sup> ±0,13	9,2 <sup>c</sup> ±0,23	nd	8,38 <sup>b</sup> ±0,00
Πρωτεΐνη		8,40 <sup>a</sup> ±0,05	9,08 <sup>b</sup> ±0,01	16,60 <sup>d</sup> ±0,01	9,00 <sup>c</sup> ±0,00
Κατεστραμμένο άμυλο (%)		2,5*	4,7	7,27	4,73
$L^*$		88,60 <sup>b</sup> ±0,45	91,36 <sup>c</sup> ±0,06	86,87 <sup>a</sup> ±0,06	92,29 <sup>d</sup> ±0,18
Χρώμα	$a^*$	-1,91 <sup>a</sup> ±0,06	-1,40 <sup>b</sup> ±0,04	-1,12 <sup>d</sup> ±0,02	-1,33 <sup>c</sup> ±0,06
	$b^*$	12,18 <sup>c</sup> ±0,15	9,16 <sup>b</sup> ±0,07	12,29 <sup>c</sup> ±0,06	6,91 <sup>a</sup> ±0,03

\*Όπως θεωρητικά υπολογίστηκε από CF και FF

Η περιεχόμενη υγρασία στο άλευρο μειώθηκε με τη μείωση της κοκκομετρίας, εξαιτίας της μεγαλύτερης επιφάνειας που είναι διαθέσιμη για αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Επίσης, η υγρασία στο δείγμα JCF μειώθηκε εξαιτίας της ιδιαιτερότητας

της άλεσης με αέρα, όπου το άλευρο εκτίθεται σε ένα ξηρό ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας.

Η πρωτεΐνη και η τέφρα ήταν σημαντικά αυξημένες στο FF. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η διαδικασία της κλασματοποίησης με χρήση κοσκίνων διαφοροποιεί σημαντικά τη σύσταση των παραγόμενων κλασμάτων, όπως ήταν αναμενόμενο.

Είναι γνωστό ότι τα λεπτόκοκκα κλάσματα μαλακού σίτου έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη ( $\leq 20-25\%$ ), τα ενδιάμεσα κλάσματα έχουν σχετικά χαμηλή πρωτεΐνη, περίπου 5%, ενώ η σύσταση των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων δεν έχει αξιοσημείωτες διαφορές σε σχέση με το άλευρο ολικής άλεσης (Létang et al., 2002). Επιπρόσθετα, η ποσότητα της υγρής γλουτένης αυξήθηκε με μείωση του μεγέθους της κοκκομετρίας με χρήση κοσκίνων, δηλαδή ήταν 27,10% για το MF και 22,48% για το CF. Ωστόσο η άλεση με πεπιεσμένο αέρα δεν άλλαξε σημαντικά την περιεκτικότητα των δειγμάτων σε υγρή γλουτένη, αφού το JCF είχε 24,47% υγρή γλουτένη. Θεωρείται ότι η διαλυτή πρωτεΐνη βρίσκεται κυρίως στο FF, επειδή η περιεχόμενη γλουτένη δεν μπόρεσε να προσδιοριστεί στο δείγμα αυτό. Η μέθοδος προσδιορισμού της γλουτένης απαιτεί εκπλύσεις μέσω των οποίων πιθανόν να απομακρύνθηκε η διαλυτή πρωτεΐνη.

Όσο μικρότερο ήταν το μέγεθος της κοκκομετρίας τόσο μεγαλύτερη ήταν η WHC, ενώ η ικανότητα δέσμευσης ελαίου (OHC) παρουσίασε αντίθετη τάση. Η WHC του JCF ήταν 40% μεγαλύτερη από αυτή του CF και η OHC ήταν 22% μικρότερη. Η τιμή της WHC συσχετίζεται με την υφή των τελικών προϊόντων, αφού κατά τη θέρμανση, οι πρωτεΐνες μετουσιώνονται και απελευθερώνουν νερό, το οποίο προσλαμβάνουν οι ίνες και το άμυλο. Η ζελατινοποίηση του αμύλου εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του νερού που με τη σειρά της καθορίζει την τελική υφή και διόγκωση των προϊόντων αρτοποιίας. Οι τιμές WHC για τα CF και MF ήταν μεγαλύτερες από αυτές που βρέθηκαν βιβλιογραφικά για τα μαλακά άλευρα και κυμάνθηκαν στα 50-55%. Ήταν πιο κοντά στις τιμές που βρέθηκαν για τα σκληρά άλευρα, περίπου 62% (Blanchard et al., 2012).

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ποσότητα απορρόφησης νερού είναι το κατεστραμμένο άμυλο. Σύμφωνα με τους Berton et al. (2002) αυξημένη ποσότητα κατεστραμμένου αμύλου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές WHC. Το δείγμα FF περιείχε μεγάλο ποσοστό διερρηγμένων κόκκων αμύλου, αφού παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή κατεστραμμένου αμύλου (7,27%) αλλά όχι τη μεγαλύτερη τιμή WHC (80,35%). Το JCF παρουσίασε παρόμοια τιμή κατεστραμμένου αμύλου με το MF και μεγαλύτερη από το CF (4,73, 4,70 και 2,5%, αντίστοιχα). Η διαδικασία άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στην παρούσα μελέτη δεν άλλαξε δραματικά την ποσότητα του κατεστραμμένου αμύλου, αφού η κλασμάτωση φάνηκε να είναι σημαντικότερη, και το μεγαλύτερο ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου βρέθηκε σημαντικά αυξημένο στο πιο λεπτόκοκκο κλάσμα (FF). Ως εκ τούτου, η αυξημένη WHC στο JCF δεν μπορεί να αποδοθεί στο κατεστραμμένο άμυλο που έχει. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ενυδάτωσης και η απορρόφηση νερού (Manley et al., 2011, Pauly et al., 2013). Αυτό δικαιολογεί την αυξημένη τιμή WHC στο JCF.

Η ικανότητα διόγκωσης (ΙΔ) και τα διαλυτά στερεά (ΔΣ) των διαφορετικών κλασμάτων άλεσης ήταν εξαρτώμενα από τη θερμοκρασία όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2 α και β αντίστοιχα. Στους 95 °C η διόγκωση συνεχίστηκε και σημειώθηκαν υψηλές τιμές ΙΔ, υποδεικνύοντας ότι επιτεύχθηκε υψηλή ενυδάτωση σε αυξημένες θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει και στο άμυλο σίτου κατά τη θέρμανση (Mandala & Bayas, 2004, Mandala, 2012). Το CF παρουσίασε παρόμοιες τιμές ΙΔ με το MF και το JCF. Σημαντικά μικρότερες τιμές ΙΔ παρουσιάστηκαν στο δείγμα FF, και πιθανότατα το υψηλό ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου περιόρισε τη διόγκωση των αμυλόκοκκων. Για το δείγμα JCF οι τιμές της ΙΔ δεν διαφοροποιήθηκαν σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας (75-95 °C), σχηματίζοντας ένα πλατώ. Επιπρόσθετα, μια πρώιμη, μεγάλη διαρροή διαλυτών στερεών παρατηρήθηκε στο δείγμα αυτό, πιθανότατα λόγω του αποχωρισμού αμύλου-προτεΐνης κατά την άλεση. Έκλυση αμυλόζης συμβαίνει ταχύτατα και συνοδεύεται από μεγάλη διόγκωση αμυλόκοκκων που μπορεί να οδηγήσει σε πολτούς με αυξημένο ιξώδες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

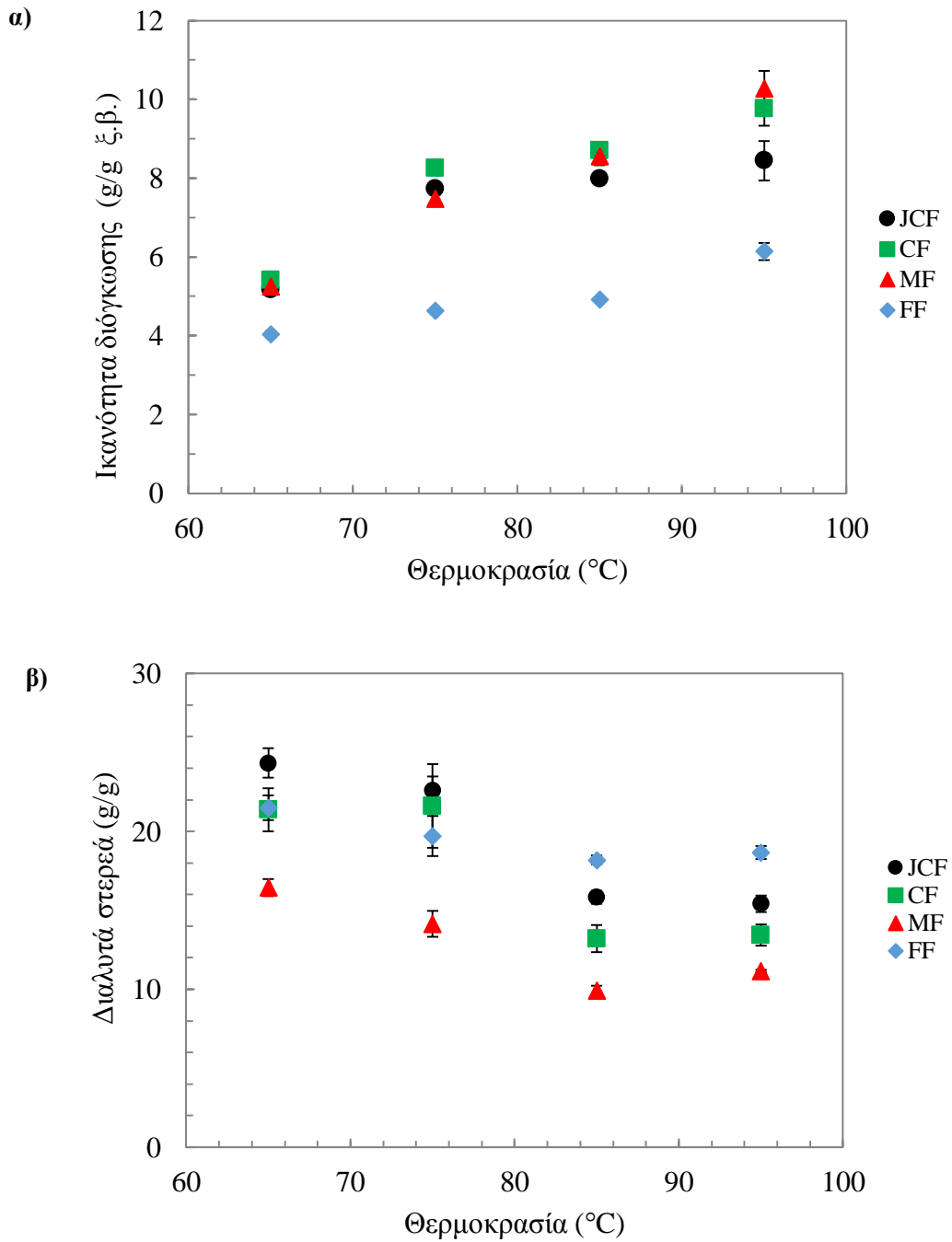
Υψηλές τιμές ΔΣ βρέθηκαν επίσης στο FF και παρέμειναν υψηλές σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών 65-95 °C. Σύμφωνα με τους Collado και Corke, (2003) για το άμυλο σίτου στους 95 °C η ΙΔ είναι 21 g/g και η ΔΣ 41 g/g. Οι τιμές της παρούσας μελέτης διαφοροποιούνται σημαντικά με τις τιμές των ΙΔ και ΔΣ να είναι από 6,14 έως 10,27 g/g και από 11,16 έως 18,67 g/g αντίστοιχα, αφού πρόκειται για δείγματα αλεύρου και όχι καθαρού αμύλου.

Η ικανότητα διόγκωσης μπορεί να δείχνει επίσης την έκταση της συνεργατικής δράσης διαφόρων δυνάμεων στους κόκκους (Moorthy & Ramanujam, 1986). Από την άλλη πλευρά, μια υψηλή ικανότητα διόγκωσης μπορεί να συσχετίζεται με μια πιο χαλαρή δομή που επιτρέπει ταυτόχρονη απορρόφηση νερού και υψηλή έκλυση διαλυτών στερεών από τον αμυλόκοκκο. Η διαλυτότητα συνήθως συσχετίζεται με την ικανότητα διόγκωσης. Στην παρούσα μελέτη οι ΙΔ και ΔΣ δεν ακολούθησαν την ίδια τάση κατά τη θέρμανση, υποδεικνύοντας ότι η διόγκωση του αμύλου και η έκλυση των πολυσακχαριτών γίνεται με διαφορετικό ρυθμό (Σχήμα 6.3). Πιο συγκεκριμένα, η έκλυση αμυλόζης και ότι έχει να κάνει με τη διαλυτότητα συμβαίνει πιο γρήγορα από τη διόγκωση και ότι έχει να κάνει με την ενυδάτωση στους κόκκους αλεύρου. Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα αναδεικνύει την παρατήρηση αυτή και φαίνεται ότι σε αυτή την πολύ μικρή κοκκομετρία η μεταφορά μάζας (έκλυση διαλυτών στερεών) συμβαίνει ταχύτερα από την απορρόφηση νερού και τη διόγκωση έως τους 75 °C.

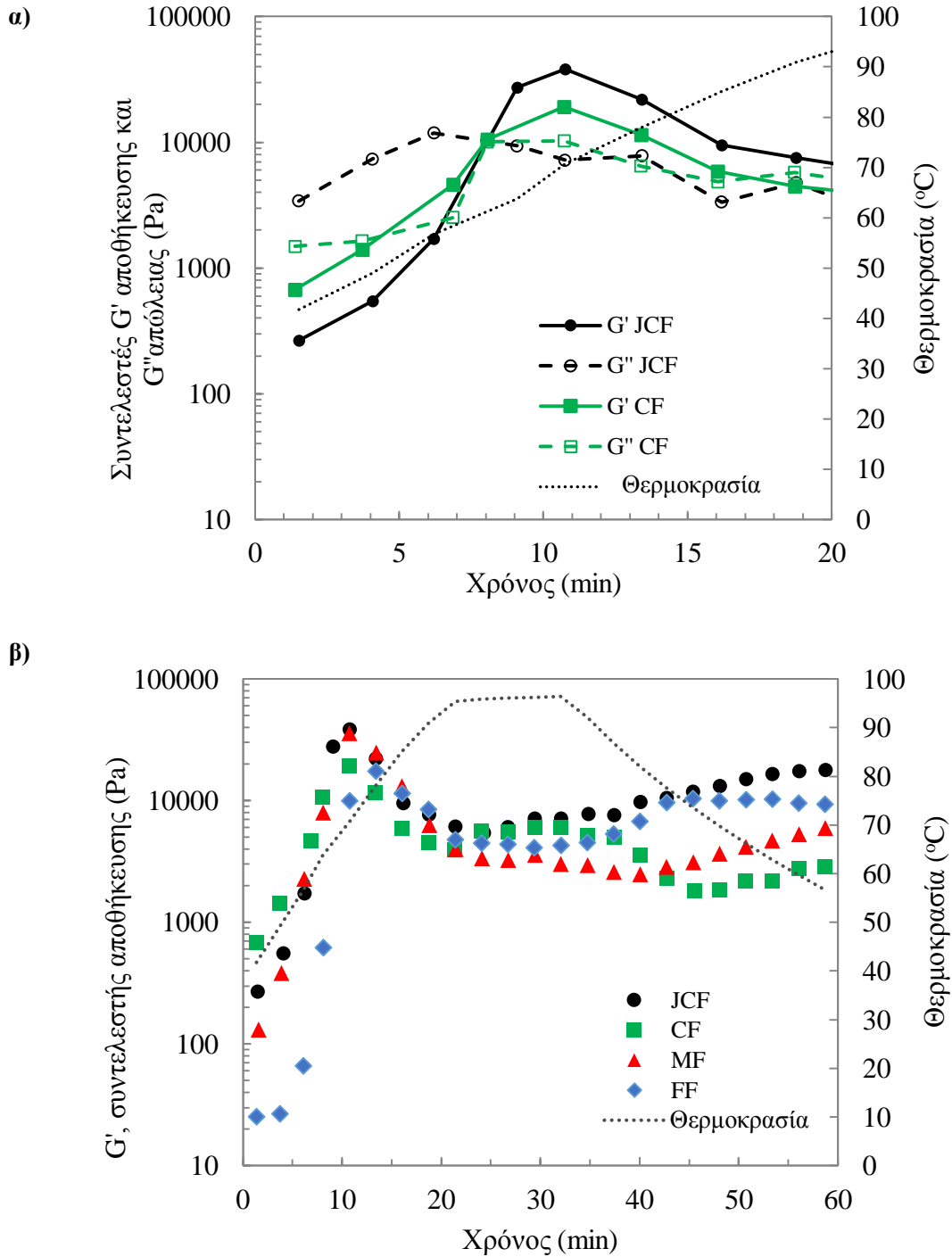
### 6.1.3. Ρεολογικό προφίλ

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 6.4 α και β, όπου παρουσιάζονται τα μηχανικά φάσματα των συντελεστών αποθήκευσης και απώλειας ( $G'$ ,  $G''$ ), ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, οι μέγιστες και οι τελικές τιμές του  $G'$  υπό ψύξη, ήταν σημαντικά διαφοροποιημένες μεταξύ των δειγμάτων και άμεσα συνδεδεμένες με το μέγεθος της κοκκομετρίας.





Σχήμα 6.3 α) Ικανότητα διόγκωσης και β) Διαλυτά στερεά διαφόρων κλασμάτων άλεσης CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF) σε σχέση με τη θερμοκρασία (65, 75, 85 και 95 °C).



Σχήμα 6.4 α) Σύγκριση φασμάτων ελαιωμάτων αλεύρου σε νερό (25% w/w) για τα δείγματα CF (χονδρόκοκκο κλάσμα) και JCF (jet milled CF). Διακύμανση  $G'$  (Pa) και  $G''$  (Pa) στο αρχικό στάδιο της θέρμανσης και β) Διακύμανση  $G'$  (Pa) με τη θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) για τα διαφορετικά κλάσματα άλεσης CF (χονδρόκοκκο κλάσμα), MF (ενδιάμεσο κλάσμα), FF (λεπτόκοκκο κλάσμα), και JCF (jet milled CF). Κύκλος θέρμανσης- ψύξης (45-95-55  $^{\circ}\text{C}$ , διατήρηση στους 95  $^{\circ}\text{C}$  για 10 min).

Καθώς η θερμοκρασία αυξήθηκε, το ιξώδες του εναιωρήματος αυξήθηκε και η δομή του από εκεί που ήταν περισσότερο ιξώδης (viscous-like) άρχισε να παρουσιάζει

χαρακτηριστικά στερεού (solid-like), όπου οι τιμές του  $G'$  αυξήθηκαν σημαντικά και για τα δύο δείγματα (CF και JCF). Αύξηση στην αρχική τιμή του  $G'$  παρατηρήθηκε σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για το δείγμα JCF ακολουθούμενο από το MF και το CF, υποδεικνύοντας, όπως παρατηρήθηκε και από την παραπάνω ανάλυση των  $I\Delta$  και  $\Delta\Sigma$  τιμών, μια γρηγορότερη δομική αλλαγή που συμβαίνει υπό θέρμανση για τα δείγματα αυτά (Σχήμα 6.4 β).

Επιπλέον, μία απότομη αύξηση του  $G'$  με την αύξηση της θερμοκρασίας σημειώθηκε για το JCF, το οποίο παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή  $G'$ , ακολουθούμενο από το MF. Η μέγιστη τιμή  $G'$  ήταν κυρίως αποτέλεσμα της μέγιστης διόγκωσης των αμυλόκοκκων. Ένα πλατώ, δηλαδή ένα διάστημα με σταθερές τιμές  $G'$  μπορεί να προκύψει (βλ. δείγμα JFC, Σχήμα 6.4) εξαιτίας της αναστρέψιμης διόγκωσης και διαλυτοποίησης της αμυλόζης (Ahmed et al., 2008) ακολουθούμενη από μία απότομη πτώση της  $G'$  υπό εκτεταμένη θέρμανση και διάτμηση και μη αναστρέψιμη κατάσταση. Σε αυτό το σημείο το εναιώρημα πήζει. Το ύψος της κορυφής δείχνει την ικανότητα των κόκκων για ελεύθερη διόγκωση πριν από τη φυσική κατάρρευσή τους. Μια ξαφνική πτώση μετά τη μέγιστη τιμή υποδεικνύει την κατάρρευση κατά το ψήσιμο όπως και μια μεγάλη ικανότητα διόγκωσης (Adebowale & Lawal, 2003). Παρατηρείται μια μετατόπιση της καμπύλης  $G'$  για το δείγμα FF και καθυστερημένη αντίδραση, κατά τη θέρμανση, συμπεριφορά που είναι τελείως διαφορετική από αυτή των άλλων δειγμάτων. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω για τη χαμηλή  $\Delta\Sigma$ , το υψηλό ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου και τα υψηλά ποσοστά διαλυτών πρωτεϊνών δικαιολογούν μια πιο ασθενή δομή. Φαινόμενα αναδιάταξης και δημιουργία πηγματος παρατηρήθηκαν κατά τη ψύξη από τους 80-55 °C σε όλα τα δείγματα σύμφωνα με την αύξηση των τιμών  $G'$  που παρατηρήθηκαν σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος.

#### 6.1.4. Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της σειράς πειραμάτων, η διεργασία της άλεσης και η κοκκομετρική κατανομή καθορίζουν τις λειτουργικές ιδιότητες τη σύσταση και τη συμπεριφορά των αλεύρων σίτου. Σε σχέση με τη συμβατική άλεση, η άλεση με πεπιεσμένο αέρα έχει αξιοσημείωτη επίδραση στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου αλεύρου (JCF). Το άλευρο αυτό είχε πολύ μικρό μέγεθος ( $D_{50}=19 \mu\text{m}$ ), που είναι κοντά στο μέγεθος των ελεύθερων κόκκων αμύλου. Παρουσίασε σημαντικά υψηλές τιμές WHC, ενώ το κατεστραμμένο άμυλο αυξήθηκε ελαφρώς. Όσον αφορά το χρώμα, βελτιώθηκε αφού αυξήθηκε η φωτεινότητά του. Παρουσίασε αυξημένες τιμές  $G'$  κατά τη θέρμανση, ενδεικτικό της γρήγορης ανάπτυξης μιας ελαστικής δομής, γεγονός αρκετά σημαντικό για τη δομή των ζυμαριών κατά το ψήσιμο. Εξαιτίας της επίδρασης της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του αλεύρου σίτου, η επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (π.χ. ρυθμός τροφοδοσίας και πίεση) σε άλευρα σίτου, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών τους, παρουσιάζει ερευνητικό ενδιαφέρον και αποτελεί σκοπό μελέτης στα κεφάλαια που ακολουθούν.

## 6.2. Επίδραση άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε μαλακό άλευρο σίτου – Βελτιστοποίηση διεργασίας

Στις διεργασίες παραγωγής κόνεων, είναι πολύ σημαντικός ο έλεγχος της κατανομής μεγέθους σωματιδίων. Ειδικά στις ξηρές διεργασίες, εξαιτίας της κολλητικότητας της σκόνης και των συσσωματωμάτων που μπορούν να δημιουργηθούν, γίνεται πιο δύσκολη η κατανομή και η άλεση σε λεπτόκοκκα κλάσματα.

Από άποψη ενεργειακής κατανάλωσης, η μείωση της κοκκομετρίας θεωρείται ότι είναι μια αναποτελεσματική διεργασία, καθώς μόνο το 0,1-2% της ενέργειας που παρέχεται στο μύλο χρησιμοποιείται για τη μείωση της κοκκομετρίας των στερεών (Richardson et al., 2002). Προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια, προτείνεται η βελτιστοποίηση της διεργασίας άλεσης (Ishito et al., 2002). Έτσι, αρχικά η έρευνα στον τομέα της άλεσης είχε ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι πρώτες απόπειρες οδήγησαν στη δημιουργία εμπειρικών εξισώσεων που συνέδεαν τη μείωση της κοκκομετρίας με την κατανάλωση ενέργειας. Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα οι πρώτες εξισώσεις-νόμοι προτάθηκαν από τους Rittinger (1867) και Kick (1883). Το 1957 ένας τρίτος νόμος προτάθηκε από τον Bond (Πίνακας 6.3). Ωστόσο, κανένας από τους παραπάνω ενεργειακούς νόμους δεν εφαρμόζονται ικανοποιητικά καλά στην πράξη και έχουν αποτύχει στη βαθύτερη εξήγηση της διεργασίας της άλεσης. Στη βιομηχανία τροφίμων πέραν της εξοικονόμησης ενέργειας σημαντικά είναι η κατανόηση και ο έλεγχος της ποιότητας του αλέσματος. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός του τελικού μέγεθος της κοκκομετρίας, ο οποίος εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις ιδιότητες της πρώτης ύλης (Sanguansri & Augustin, 2006). Για μια συγκεκριμένη πρώτη ύλη διαφορετικές συνθήκες άλεσης έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντων με διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 6.3 Εξισώσεις κατανάλωσης ενέργειας κατά τη μείωση μεγέθους.

	Εξίσωση	Θεωρία	Συντομογραφία
Rittinger	$E = k_1 \left( \frac{1}{x_p} - \frac{1}{x_f} \right)$	Η ενέργεια που απαιτείται για τη μείωση του μεγέθους είναι ανάλογη της νέας επιφάνειας	$E$ , καταναλισκόμενη ενέργεια $x_p$ , μέγεθος τελικού προϊόντος
Kick	$E = k_2 \log \left( \frac{x_f}{x_p} \right)$	Παρόμοιες μειώσεις μεγέθους απαιτούν παρόμοιες καταναλώσεις ενέργειας	$x_f$ , μέγεθος αρχικού δείγματος
Bond	$E = k_3 \left( \frac{10}{\sqrt{x_p}} - \frac{10}{\sqrt{x_f}} \right)$	Η καθαρή ενέργεια που απαιτείται για την κονιορτοποίηση είναι ανάλογη με το συνολικό μήκος των νέων σωματιδίων που δημιουργούνται	$k_1, k_2, k_3$ , σταθερές

Σκοπός της ενότητας αυτής ήταν η μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αλεύρου σίτου και η καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης, ώστε να καθοριστούν οι συνθήκες άλεσης για τη συνέχεια των πειραμάτων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συνθήκες πίεσης (4 και 8 bar), διαφορετικός ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης (0,41-4,08 kg/h) και σε ορισμένες περιπτώσεις

επανακυκλοφορία του δείγματος. Χρησιμοποιήθηκε μαλακό άλευρο σίτου τύπου T70 και για όλα τα αλέσματα πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω αναλύσεις:

- Μελέτη σύστασης αλεύρων. Υπολογισμός υγρασίας, πρωτεΐνης, τέφρας, υγρής και ξηρής γλουτένης
- Προφίλ ικανότητας συγκράτησης νερού (WHC), ελαίου (OHC), διαλυτών: σουκρόζης (SuSRC), γαλακτικού οξέος (LaSRC) και ανθρακικού νατρίου (SCSRC), τα οποία είναι ενδεικτικά για την ποιότητα του αλεύρου
- Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση master sizer.
- Προσδιορισμός pH, χρώματος ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), πορώδους-πυκνότητας και κατεστραμμένου αμύλου.

### 6.2.1. Διεργασίες άλεσης, παραγωγή & αποδοτικότητα μύλου

Το μαλακό άλευρο σίτου (T70) αλέστηκε σε δεκατρείς διαφορετικούς συνδυασμούς συνθηκών άλεσης (Πίνακας 6.4). Όσον αφορά την πίεση του αέρα επιλέχθηκε η μέγιστη δυνατή (8 bar) και η μισή αυτής (4 bar). Σύμφωνα με τους Miller et al (1996) σε εύρος πίεσης αέρα μεταξύ 5-8 bar ο μύλος παρουσίασε μια σταθερότητα. Σε μικρότερη πίεση (4 bar) η άλεση έγινε σημαντικά ανομοιόμορφη, ενώ στα 2 bar το σύστημα έγινε ακόμα πιο ασταθές και μεγάλη ποσότητα του αρχικού δείγματος παρέμεινε στο δοχείο άλεσης. Σε δοκιμές που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η άλεση σε πίεση μικρότερη των 4 bar ήταν αδύνατη. Έτσι, επιλέχθηκε η άλεση σε ακραίες συνθήκες πίεσης, δηλαδή στα 4 και 8 bar. Όσον αφορά το ρυθμό τροφοδοσίας της πρώτης ύλης ήταν σε συνάρτηση με τις διακριτές τιμές του τροφοδότη (feeder), οι οποίες εκφράζονται με ποσοστά, από 0-100% της δυναμικότητάς του. Τα ποσοστά αυτά μεταφράζονται σε kg/h τα οποία καθορίζονται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης (κρυσταλλικότητα, μέγεθος κ.α.). Για το άλευρο σίτου η άλεση ήταν δυνατή στα ποσοστά 60-100% για τα 8 και τα 4 bar. Όταν επιλέχθηκε να γίνει ανατροφοδότηση του δείγματος η άλεση επιτεύχθηκε σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 80-100%. Στον Πίνακα 6.4 φαίνεται η κωδικοποίηση των δειγμάτων, οι συνθήκες άλεσής τους, ο ρυθμός παροχής του αλεύρου στις διάφορες συνθήκες άλεσης, καθώς και η απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας για την κάθε διεργασία. Τέλος φαίνεται το μέγεθος της κοκκομετρίας ( $D_{50}$ ) του αλεύρου.

Ως ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης νοείται ο ρυθμός με τον οποίο το αρχικό δείγμα εισέρχεται στον κύριο θάλαμο άλεσης. Για μία δεδομένη αρχική σκόνη, η μείωση της κοκκομετρίας της τείνει να αυξάνει τη συνοχή των κόκκων της. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αύξησης της επιφάνειας ανά μονάδα βάρους, ευνοώντας τη δημιουργία περισσότερων σημείων επαφής για διασωματιδιακή σύνδεση και αλληλεπιδράσεις, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περισσότερο συνεκτικής σκόνης που αντιστέκεται στη ροή (Fitzpatrick et al., 2004, Katikaneni et al., 1995, Teunou et al., 1999).

Πίνακας 6.4 Συνθήκες άλεσης και αποδοτικότητα μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.

Κωδικός Δείγματος	Πίεση (bar)	Δυναμικότητα Μηχανήματος Ροή πρώτης ύλης (%)	Απόδοση Προϊόντος		Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/kg)	Ρυθμός Τροφοδοσίας α ύλης (kg/h)	D <sub>50</sub> (μm)
			Ανατροφοδότηση	(%)			
control	-	-	-	-	-	-	127,45
8R100	8	100	94,88	OXI	2,00	4,08	22,94
8R90	8	90	93,51	OXI	2,95	2,71	20,39
8R80	8	80	91,98	OXI	3,95	2,00	19,15
8R70	8	70	90,22	OXI	6,70	1,19	10,55
8R60	8	60	89,94	OXI	11,90	0,66	11,17
4R100	4	100	96,22	OXI	2,50	2,71	44,58
4R90	4	90	95,33	OXI	2,86	2,24	34,76
4R80	4	80	94,28	OXI	3,60	1,85	28,81
4R70	4	70	92,32	OXI	7,25	0,91	12,22
4R60	4	60	88,33	OXI	19,50	0,26	10,62
2x8R100	8	100	91,20	NAI	8,68	1,93	11,41
2x8R90	8	90	90,41	NAI	8,85	1,20	10,57
2x8R80	8	80	89,52	NAI	12,65	0,72	10,93

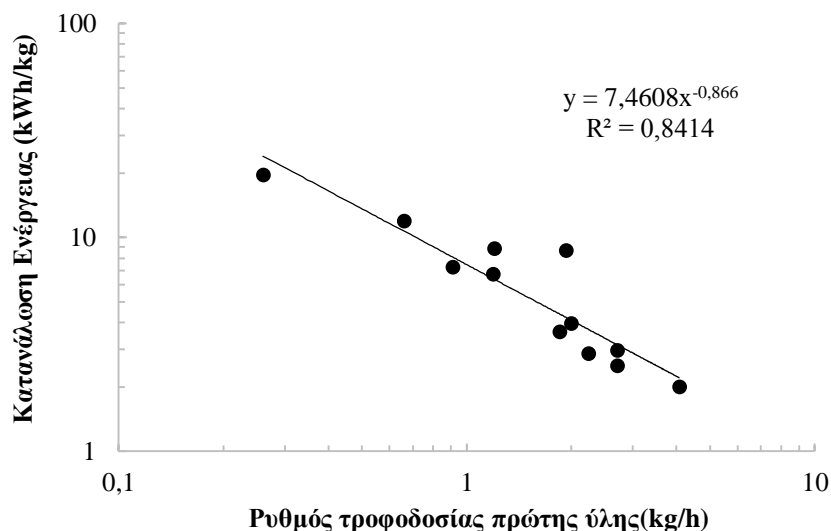
Τα φυσικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, όπως το μέγεθος της κοκκομετρίας, το σχήμα και η τραχύτητά τους θα μπορούσαν να συσχετίζονται με τους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Κόκκοι με πιο τραχιά και ακανόνιστη επιφάνεια πιθανόν να μη συνδέονται μεταξύ τους τόσο εύκολα όσο οι πιο στρογγυλοί κόκκοι με αποτέλεσμα την αυξημένη αντίστασή τους στη ροή. Όπως φάνηκε και σε προηγούμενη ενότητα (βλ. 6.1), η χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή αλεύρων με πιο ομοιόμορφους, στρογγυλούς και μικρούς κόκκους, μειώνοντας το ρυθμό ροής και ευνοώντας τη συνεκτικότητά τους. Για το λόγο αυτό τα δείγματα με ανατροφοδότηση (2x8R100, 2x8R90, 2x8R80) παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερο ρυθμό τροφοδοσίας πρώτης ύλης σε σχέση με τα αντίστοιχα δείγματα χωρίς ανατροφοδότηση (8R100, 8R90, 8R80). Δηλαδή το αναμενόμενο ήταν ο ρυθμός να μειωνόταν κατά 50% αφού το δείγμα εισέρχεται εις διπλούν στο μύλο, ωστόσο η μείωση φτάνει έως και 64% στην περίπτωση των 8R80 και 2x8R80 με 2 και 0,72 kg/h, αντίστοιχα.

Η ρευστότητα και η συνεκτικότητα του αρχικού αλεύρου, με σχετικά χαμηλή υγρασία (<16%), μπορεί να θεωρηθεί ότι εξαρτάται κυρίως από τους προσωρινούς δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών των σωματιδίων, είτε μέσω φυσικών αλληλεπιδράσεων (van der Waals) είτε μέσω χαμηλών ενεργειακά δεσμών (δεσμοί υδρογόνου). Η πυκνότητα των δεσμών υδρογόνου μεταξύ των σωματιδίων εξαρτάται από τη βιοχημική σύνθεση της επιφάνειας των σωματιδίων και, πιο συγκεκριμένα, από τα υδρόφιλα συστατικά και τις ειδικές αλληλεπιδράσεις τους με το νερό (Landillon et al., 2008). Εξαιτίας λοιπόν της μικρής υγρασίας του αρχικού αλεύρου οι δεσμοί υδρογόνου που σχηματίζονται δεν είναι πολλοί και δεν είναι

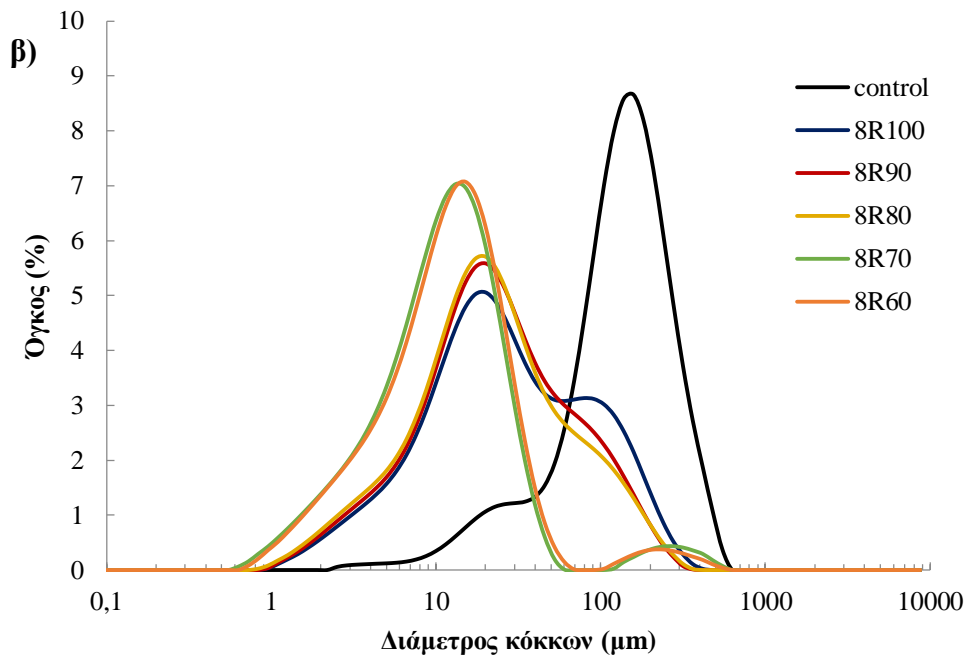
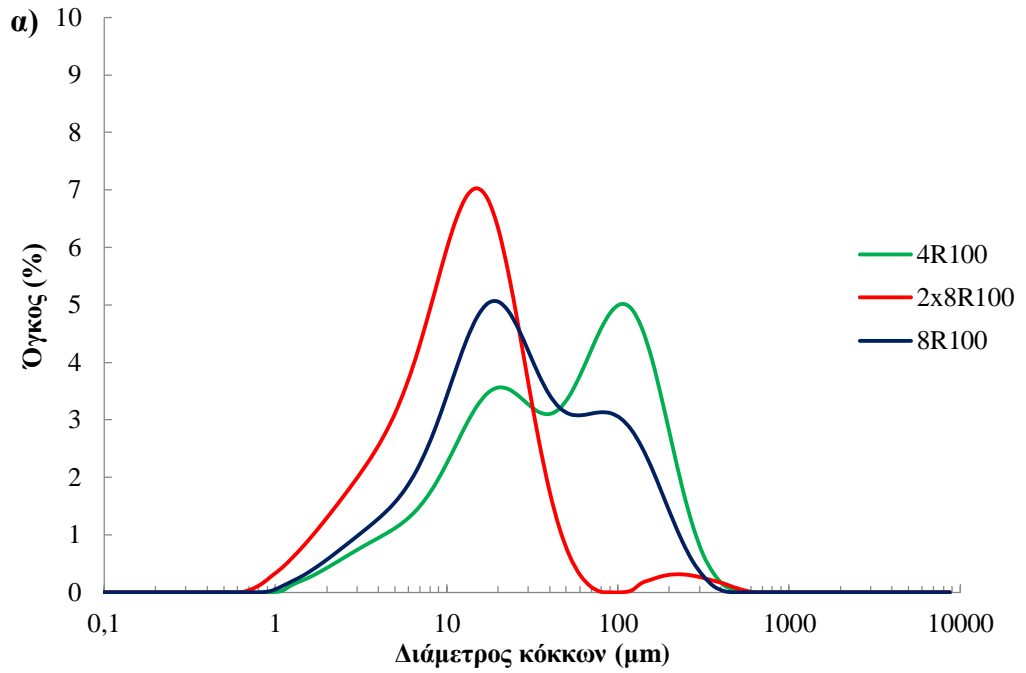
υπαίτιοι για τη χαμηλή ροή των αλεύρων, κάτι που έχει συζητηθεί σε παλαιότερες δημοσιεύσεις (Teunou & Fitzpatrick, 1999, Teunou et al., 1999).

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εκφράζεται σε kWh/kg και όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.4 αυξήθηκε με αύξηση της έντασης της διεργασίας και μείωση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης. Παρατηρείται ότι μειωμένος ρυθμός τροφοδοσίας επιφέρει μεγαλύτερη κατανάλωση αφού για την επεξεργασία ίδιας ποσότητας δείγματος απαιτείται περισσότερος χρόνος παροχής αέρα –λειτουργίας αεροσυμπιεστή– που είναι το πλέον ενεργοβόρο στην όλη διεργασία της άλεσης. Η λογαριθμική συσχέτιση της κατανάλωσης ενέργειας με το ρυθμό τροφοδοσίας της πρώτης ύλης φαίνεται στο Σχήμα 6.5.

Πέραν του κόστους παραγωγής κρίσιμος παράγοντας για την επιλογή των συνθηκών άλεσης ήταν η κοκκομετρία και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων αλεύρων. Ενδεικτικές κοκκομετρικές κατανομές παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6. Εντονότερες διεργασίες άλεσης έχουν ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση των καμπυλών προς τα αριστερά, την εμφάνιση στενότερων και λεπτόκυρτων κατανομών, δηλαδή, καμπυλών που χαρακτηρίζονται από τη συγκέντρωση των τιμών στο κέντρο της κατανομής, και την παραγωγή αλεύρων με μικρότερο μέγεθος ( $D_{50}$ ). Οι λιγότερο έντονες διεργασίες, π.χ. σε πίεση 4 bar, δίνουν δικόρυφες κατανομές, ενδεικτικό της ανομοιομορφίας του πληθυσμού των κόκκων και της συνύπαρξης λεπτών και χονδρών κόκκων. Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης προκύπτει ότι εντονότερες διεργασίες άλεσης, δηλαδή αύξηση της πίεσης του αέρα, μείωση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης και ανατροφοδότηση, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή λεπτότερων αλεσμάτων.



Σχήμα 6.5 Συσχέτιση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης με την κατανάλωση ενέργειας σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.



**Σχήμα 6.6** Ενδεικτικές κοκκομετρικές κατανομές αλεύρων σίτου επεξεργασμένα με μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill). Δείγματα που επεξεργάστηκαν α) σε ρυθμό τροφοδοσίας 100% και β) σε πίεση 8 bar.



Παρατηρείται ότι διαφορετικές συνθήκες άλεσης δύναται να παράξουν άλευρα με παρόμοιο μέγεθος (π.χ. 8R70, 8R60, 4R70, 4R60, 2x8R100, 2x8R90, 2x8R80). Ωστόσο οι διαφορές τους στην κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικές αφού η αύξηση σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά το 100%, όπως συμβαίνει μεταξύ των δειγμάτων 8R70 και 4R60 όπου η κατανάλωση από 6,70 έφτασε στις 19,5 kWh/kg, ενώ το  $D_{50}$  τους ήταν παρόμοιο, 10,55 και 10,62  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα. Τα δείγματα που παρήχθησαν με ανατροφοδότηση (2x8R100, 2x8R90, 2x8R80) παρουσίασαν παρόμοια  $D_{50}$  (10,57-11,41  $\mu\text{m}$ ), ενώ οι καταναλώσεις ενέργειας αυξήθηκαν σε μεγάλο ποσοστό έως 47% (από 8,68 σε 12,65 kWh/kg). Σύμφωνα με τους Tuunila και Nystrom (1998), η επίδραση της άλεσης με ανατροφοδότηση δεν επιφέρει τόσο σημαντικές αλλαγές ώστε να θεωρηθεί οικονομικά επικερδής η επανάληψη της άλεσης στον ίδιο μύλο. Η πιο οικονομική διεργασία που εμπεριέχει ανατροφοδότηση (2x8R100), με κατανάλωση ενέργειας 8,68 kWh/kg, έδωσε άλευρο με  $D_{50}$  11,41  $\mu\text{m}$ , ενώ αντίστοιχο μέγεθος ( $D_{50}$  10,55  $\mu\text{m}$ ) έδωσε η διεργασία 8R70 με κατανάλωση ενέργειας 6,70 kWh/kg.

### 6.2.2. Μαθηματικά μοντέλα για την κατανόηση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα

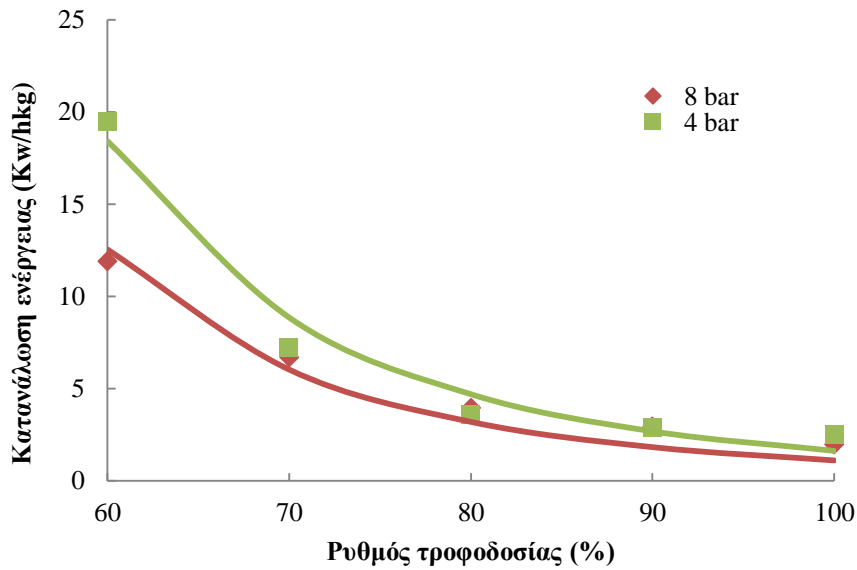
Για την καλύτερη κατανόηση και περιγραφή της επίδρασης του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης και της πίεσης του αέρα στο μέγεθος των κόκκων αλεύρου και στην κατανάλωση ενέργειας αναπτύχθηκαν τα μαθηματικά μοντέλα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5. Στα Σχήματα 6.7 και 6.8 απεικονίζονται το μέγεθος της κοκκομετρίας ( $D_{50}$ ) και η κατανάλωση ενέργειας ως προς τον ρυθμό τροφοδοσίας της πρώτης ύλης.

**Πίνακας 6.5 Μαθηματικά μοντέλα για την κοκκομετρία του αλεύρου και την κατανάλωση ενέργειας.**

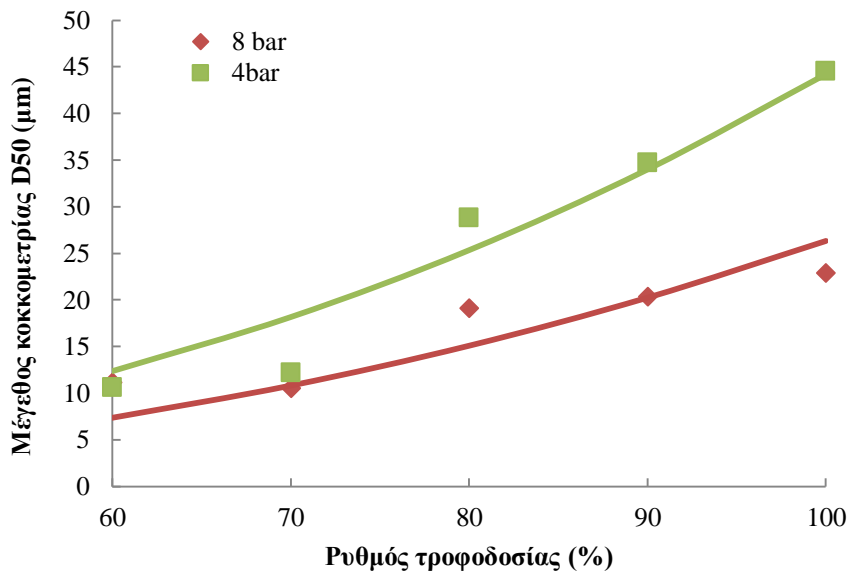
Μαθηματικό μοντέλο κοκκομετρίας αλεύρου ( $D_{50}$ )	$D_{50o}$	$n_1$	$m_1$	$R^2$	$S_R$	$S_E$
$D_{50} = D_{50o} * (FR/FR_o)^{n_1} * (P/P_o)^{m_1}$	13,41	2,49	-0,75	0,922	0,366	0,240
<i>Asymptotic Standard Error</i>	1,44	0,36	0,16			
Μαθηματικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας (E)	$E_o$	$n_2$	$m_2$	$R^2$	$S_R$	$S_E$
$E = E_o * (FR/FR_o)^{n_2} * (P/P_o)^{m_2}$	7,08	-4,80	-0,55	0,967	0,115	0,090
<i>Asymptotic Standard Error</i>	0,49	0,45	0,14			

Συντομογραφίες:

$D_{50o}, E_o, n_1, m_1, n_2, m_2,$ $P_o=6, FR_o=70$	Σταθερές των μοντέλων	(αδιάστατες) (bar, %)
$FR$	Ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης (%)	
$P$	Πίεση αέρα (bar)	



**Σχήμα 6.7** Επίδραση της πίεσης του αέρα και του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης στην κατανάλωση ενέργειας. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.



**Σχήμα 6.8** Επίδραση της πίεσης του αέρα και του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης στο μέγεθος της κοκκομετρίας του αλεύρου. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας και η μείωση της πίεσης του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αλεύρων με μεγαλύτερο  $D_{50}$ . Όπως είναι λογικό υπάρχει μια αλληλεπίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας και της πίεσης του αέρα που καθορίζουν το τελικό μέγεθος

κοκκομετρίας. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τους ισχυρισμούς των Tuunila και Nystrom (1998), σύμφωνα με τους οποίους ο ρυθμός τροφοδοσίας και η πίεση του αέρα καθορίζουν τη λεπτότητα των υλικών άλεσης. Ωστόσο, η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας φαίνεται να είναι ισχυρότερη, αφού η τιμή του εκθετικού συντελεστή  $n_1$  είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του  $m_1$  (2,49 και -0,75 αντίστοιχα). Το προτεινόμενο μοντέλο έχει καλή προσαρμογή με  $R^2=0,922$ .

Σύμφωνα με τους Gommeren et al. (1996), η άλεση με πεπιεσμένο αέρα είναι μια ενεργοβόρα διεργασία και αυτός είναι ο λόγος της συνεχούς προσπάθειας μοντελοποίησης της διεργασίας. Όπως φάνηκε και από τις τιμές που καταγράφηκαν παραπάνω, μείωση του ρυθμού τροφοδοσίας και της πίεσης του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Και από αυτό το μοντέλο φαίνεται ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας καθορίζει σε μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας έναντι της πίεσης του αέρα, αφού η τιμή του εκθετικού συντελεστή  $n_2$  είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του  $m_2$  (-4,80 και -0,55 αντίστοιχα). Η προσαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση αυτή είναι ακόμη καλύτερη αφού  $R^2 = 0,967$ .

### 6.2.3. Ιδιότητες και χαρακτηριστικά αλεύρων

Η μείωση του μεγέθους της κοκκομετρίας έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των περισσότερων φυσικοχημικών ιδιοτήτων, λόγω της αύξησης της επιφάνειας των σωματιδίων (Tóth et al., 2006). Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες αλεύρων που παρήχθησαν με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα, ενώ στον Πίνακα 6.7 φαίνονται οι συντελεστές συσχέτισης των ιδιοτήτων αυτών.

Η περιεχόμενη υγρασία μειώνεται προοδευτικά με την ένταση της διεργασίας και συνδέεται θετικά με το μέγεθος της κοκκομετρίας του αλεύρου ( $r=0,842$ ,  $P\leq 0,05$ ), αφού μεγαλύτερη επιφάνεια κόκκου ήταν διαθέσιμη για αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Η μείωση αυτή έφτασε έως και το 133% με μέγιστη υγρασία στο δείγμα control (13,42%) και ελάχιστη στο δείγμα 8R70 (5,76%). Μείωση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης είχε ως αποτέλεσμα τη μικρότερη υγρασία στο δείγμα ( $r=0,785$ ,  $P\leq 0,05$ ). Ο μειωμένος ρυθμός τροφοδοσίας σημαίνει ότι λιγότεροι κόκκοι αλεύρου βρίσκονται κάθε στιγμή στον κύριο θάλαμο επεξεργασίας του μύλου, άρα είναι πιο εκτεθειμένοι στο ρεύμα αέρα με αποτέλεσμα τη μείωση της υγρασίας.

Σε αντίθεση με την υγρασία, η τέφρα, η πρωτεΐνη, το pH, η πυκνότητα και η γλουτένη δεν επηρεάζονται σημαντικά από το  $D_{50}$ . Αν και κάποιες από τις παραπάνω ιδιότητες διαφοροποιούνται στατιστικά σημαντικά μεταξύ των δειγμάτων, τελικά δεν υπάρχει μια ξεκάθαρη τάση. Όσον αφορά τη γλουτένη, την τέφρα και την πρωτεΐνη, οι τιμές των δειγμάτων είναι πολύ κοντά αφού τα δείγματα δεν είχαν υποστεί κλασματοποίηση και το αρχικό δείγμα ήταν για όλα τα αλέσματα το ίδιο (control).

Είναι γενική παραδοχή ότι η άλεση αυξάνει το κατεστραμμένο άμυλο (Oladunmoye et al. 2010). Στην παρούσα έρευνα το κατεστραμμένο άμυλο αυξήθηκε σημαντικά με τη μείωση του  $D_{50}$  ( $r=-0,858$ ,  $P\leq 0,05$ ).

Πίνακας 6.6 Φυσικά χαρακτηριστικά και χημική σύσταση αλεύρων που παρήχθησαν με χρήση διαφορετικών συνθηκών άλεσης σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα και του αρχικού δείγματος.

	Control	8R100	8R90	8R80	8R70	8R60	4R100	4R90	4R80	4R70	4R60	2x8R100	2x8R90	2x8R80
<b>D<sub>50</sub> (μm)</b>	127,45	22,94	20,39	19,15	10,55	11,17	44,58	34,76	28,81	12,22	10,62	11,41	10,57	10,93
<b>Υγρασία (%)</b>	13,42 <sup>k</sup>	9,92 <sup>i</sup>	8,71 <sup>gh</sup>	8,81 <sup>h</sup>	5,76 <sup>a</sup>	5,93 <sup>b</sup>	10,02 <sup>ij</sup>	10,09 <sup>j</sup>	8,68 <sup>g</sup>	6,90 <sup>e</sup>	6,65 <sup>c</sup>	7,28 <sup>f</sup>	6,83 <sup>e</sup>	6,21 <sup>d</sup>
<b>Τέφρα (%)</b>	0,38 <sup>a</sup>	0,4b <sup>c</sup>	0,39 <sup>ab</sup>	0,39 <sup>ab</sup>	0,38 <sup>ab</sup>	0,37 <sup>a</sup>	0,45 <sup>e</sup>	0,45 <sup>de</sup>	0,45 <sup>de</sup>	0,44 <sup>de</sup>	0,42 <sup>cd</sup>	0,45 <sup>de</sup>	0,43 <sup>de</sup>	0,43 <sup>de</sup>
<b>Πρωτεΐνη (%)</b>	7,89 <sup>a</sup>	8,86 <sup>b</sup>	8,92 <sup>b</sup>	8,89 <sup>b</sup>	9,38 <sup>cd</sup>	9,69 <sup>g</sup>	8,89 <sup>b</sup>	9,26 <sup>c</sup>	9,70 <sup>g</sup>	9,45 <sup>def</sup>	9,50 <sup>ef</sup>	9,30 <sup>cd</sup>	9,34 <sup>cde</sup>	9,54 <sup>fg</sup>
<b>pH</b>	6,16 <sup>a</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>	6,22 <sup>b</sup>
<b>Πραγματική πυκνότητα (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,4 <sup>e</sup>	1,42 <sup>f</sup>	1,48 <sup>h</sup>	1,46 <sup>g</sup>	1,37 <sup>cd</sup>	1,34 <sup>ab</sup>	1,38 <sup>d</sup>	1,36 <sup>bcd</sup>	1,36 <sup>abcd</sup>	1,38 <sup>bcd</sup>	1,34 <sup>a</sup>	1,34 <sup>abc</sup>	1,35 <sup>abc</sup>	1,35 <sup>abcd</sup>
<b>Υγρή γλουτένη (%)</b>	33,01 <sup>e</sup>	29,75 <sup>cd</sup>	32,59 <sup>e</sup>	32,11 <sup>de</sup>	25,48 <sup>a</sup>	29,45 <sup>c</sup>	28,31 <sup>bc</sup>	26,19 <sup>ab</sup>	25,98 <sup>ab</sup>	25,36 <sup>a</sup>	26,4 <sup>ab</sup>	26,24 <sup>ab</sup>	26,04 <sup>ab</sup>	25,76 <sup>ab</sup>
<b>Ξηρή γλουτένη (%)</b>	10,94 <sup>h</sup>	9,66 <sup>def</sup>	10,27 <sup>fg</sup>	10,30 <sup>g</sup>	8,48 <sup>a</sup>	9,61 <sup>cd</sup>	9,85 <sup>efg</sup>	9,16 <sup>bcd</sup>	9,24 <sup>bcde</sup>	8,82 <sup>ab</sup>	8,95 <sup>abc</sup>	8,82 <sup>ab</sup>	8,80 <sup>ab</sup>	8,98 <sup>abc</sup>
<b>OHC (24h) (%)</b>	78,25 <sup>g</sup>	62,44 <sup>cde</sup>	62,98 <sup>de</sup>	63,64 <sup>ef</sup>	66,98 <sup>f</sup>	64,24 <sup>ef</sup>	57,66 <sup>ab</sup>	56,99 <sup>ab</sup>	54,22 <sup>a</sup>	63,06 <sup>de</sup>	62,33 <sup>cde</sup>	58,78 <sup>bc</sup>	59,78 <sup>bcde</sup>	59,19 <sup>bcd</sup>
<b>WHC (%)</b>	66,67 <sup>a</sup>	74,87 <sup>b</sup>	78,98 <sup>bc</sup>	80,83 <sup>cd</sup>	89,99 <sup>f</sup>	81,41 <sup>cd</sup>	75,38 <sup>b</sup>	75,07 <sup>bc</sup>	77,74 <sup>b</sup>	83,71 <sup>de</sup>	80,32 <sup>cd</sup>	86,08 <sup>ef</sup>	86,95 <sup>ef</sup>	87,75 <sup>ef</sup>
<b>LaSRC (%)</b>	96,28 <sup>a</sup>	109,20 <sup>e</sup>	109,74	107,56 <sup>de</sup>	120,44 <sup>g</sup>	118,85 <sup>fg</sup>	99,71 <sup>b</sup>	104,00 <sup>cd</sup>	103,33 <sup>c</sup>	119,16 <sup>g</sup>	117,59 <sup>fg</sup>	120,09 <sup>g</sup>	115,40 <sup>f</sup>	118,89 <sup>g</sup>
<b>SCSRC (%)</b>	71,98 <sup>a</sup>	88,37 <sup>e</sup>	89,27 <sup>e</sup>	89,57 <sup>e</sup>	108,13 <sup>h</sup>	98,53 <sup>g</sup>	76,25 <sup>b</sup>	79,38 <sup>c</sup>	84,26 <sup>d</sup>	104,07 <sup>g</sup>	98,15 <sup>f</sup>	112,23 <sup>i</sup>	107,71 <sup>h</sup>	109,41 <sup>h</sup>
<b>SuSRC (%)</b>	87,60 <sup>a</sup>	111,18 <sup>de</sup>	108,52 <sup>de</sup>	110,59 <sup>de</sup>	112,54 <sup>e</sup>	108,61 <sup>de</sup>	93,81 <sup>b</sup>	98,63 <sup>c</sup>	99,23 <sup>c</sup>	108,26 <sup>de</sup>	119,14 <sup>f</sup>	107,76 <sup>d</sup>	107,65 <sup>de</sup>	108,48 <sup>de</sup>
<b>Κατεστραμμένο άμυλο (%)</b>	2,13 <sup>a</sup>	6,25 <sup>c</sup>	6,78 <sup>cd</sup>	6,48 <sup>cd</sup>	7,11 <sup>d</sup>	6,99 <sup>d</sup>	4,4 <sup>b</sup>	5,47 <sup>bc</sup>	4,71 <sup>b</sup>	7,11 <sup>d</sup>	6,42 <sup>c</sup>	6,17 <sup>c</sup>	6,6 <sup>cd</sup>	6,42 <sup>c</sup>
<b>L*</b>	92,95 <sup>a</sup>	95,42 <sup>b</sup>	96,83 <sup>de</sup>	97,01 <sup>e</sup>	96,79 <sup>de</sup>	96,97 <sup>e</sup>	95,81 <sup>bc</sup>	96,30 <sup>cd</sup>	96,22 <sup>cd</sup>	96,92 <sup>e</sup>	96,30 <sup>cd</sup>	97,01 <sup>e</sup>	97,03 <sup>e</sup>	96,81 <sup>de</sup>
<b>a*</b>	-2,23 <sup>a</sup>	-1,36 <sup>c</sup>	-1,25 <sup>d</sup>	-1,25 <sup>d</sup>	-0,86 <sup>fg</sup>	-0,79 <sup>gh</sup>	-1,62 <sup>b</sup>	-1,42 <sup>c</sup>	-1,42 <sup>c</sup>	-0,95 <sup>e</sup>	-0,78 <sup>h</sup>	-0,97 <sup>e</sup>	-0,95 <sup>e</sup>	-0,90 <sup>ef</sup>
<b>b*</b>	13,44 <sup>h</sup>	7,51 <sup>fg</sup>	6,14 <sup>de</sup>	6,10 <sup>d</sup>	4,08 <sup>b</sup>	3,01 <sup>a</sup>	8,09 <sup>g</sup>	7,33 <sup>fg</sup>	7,1 <sup>ef</sup>	4,89 <sup>c</sup>	2,94 <sup>a</sup>	4,54 <sup>bc</sup>	4,36 <sup>bc</sup>	4,30 <sup>bc</sup>
<b>ΔE*</b>	-	6,49 <sup>ab</sup>	8,07 <sup>cd</sup>	8,45 <sup>d</sup>	10,21 <sup>ef</sup>	11,27 <sup>g</sup>	6,10 <sup>a</sup>	7,03 <sup>b</sup>	7,20 <sup>bc</sup>	9,52 <sup>e</sup>	11,12 <sup>fg</sup>	9,86 <sup>e</sup>	10,04 <sup>e</sup>	10,02 <sup>e</sup>

**Πίνακας 6.7 Συντελεστές συσχέτισης ιδιοτήτων αλεύρων κονιορτοποιημένων σε διαφορετικές συνθήκες άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.**

Παράμετροι	Πυκνότητα	Υγρασία	Υγρή γλουτένη	Ξηρή γλουτένη	OHC	WHC	LaSRC	SCSRC	SuSRC	DaS	Τέφρα	Πρωτεΐνη	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$	Κατανάλωση ενέργειας	Ρυθμός τροφοδοσίας α ύλης
D <sub>50</sub>	0,242	0,842**	0,188	0,457	-0,571*	-0,788**	-0,936**	-0,907**	-0,825**	-0,858**	0,432	-0,449	-0,662*	-0,935**	0,886**	-0,890**	-0,670*	0,621*
Πυκνότητα		0,453	0,835**	0,774**	0,274	-0,35	-0,406	-0,404	0,040	0,092	-0,364	-0,783**	-0,101	-0,466	0,49	-0,49	-0,605*	0,645
Υγρασία			0,507	0,693**	-0,434	-0,923**	-0,876**	-0,893**	-0,602*	-0,636*	0,216	-0,587*	-0,621*	-0,886	0,856**	-0,862**	-0,687*	0,785**
Υγρή Γλουτένη				0,936**	0,324	-0,432	-0,351	-0,425	0,084	0,102	-0,565*	-0,658*	-0,046	-0,327	0,286	-0,291	-0,372	0,502
Ξηρή γλουτένη					0,046	-0,624*	-0,599*	-0,654*	-0,198	-0,2	-0,331	-0,637*	-0,201	-0,555	0,494	-0,495	-0,463	0,544
OHC						0,376	0,558*	0,393	0,723**	0,834**	-0,834**	-0,144	0,321	0,544	-0,501	0,489	0,215	-0,189
WHC							0,817**	0,923**	0,450	0,609*	-0,173	0,421	0,736*	0,773	-0,728**	0,756**	0,471	-0,631*
LaSRC								0,941**	0,719**	0,810**	-0,33	0,492	0,604*	0,955	-0,899**	0,897**	0,696**	-0,649*
SCSRC									0,604*	0,701**	-0,161	0,445	0,660*	0,871	-0,809	0,822**	0,594*	-0,592*
SuSRC										0,793**	-0,576*	0,116	0,296	0,747	-0,707**	0,682	0,616*	-0,372
DaS											-0,658*	0,138	0,615*	0,783	-0,711**	0,714**	0,397	-0,402
Τέφρα												0,075	-0,24	-0,385	0,386	-0,371	-0,118	0,08
Πρωτεΐνη													0,347	0,595	-0,616*	0,620*	0,613*	-0,786**
$L^*$														0,637	-0,645*	0,700**	0,33	-0,621*
$a^*$															-0,984**	0,981**	0,826**	-0,798
$b^*$																-0,996	-0,871**	0,841**
$\Delta E^*$																	0,849**	-0,856**
Κατανάλωση ενέργειας																		-0,819**

Ένα αστεράκι \* δηλώνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο  $p < 0,05$ . Δύο αστεράκια \*\* δηλώνουν ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο  $p < 0,01$ .

Η αρχική τιμή ήταν 2,13%, ενώ μετά την άλεση έφτασε έως και 7,11% (8R70 και 4R70). Παρατηρείται ότι στα δείγματα με ανατροφοδότηση δεν υπάρχει σημαντική αύξηση στις τιμές του κατεστραμμένου αμύλου υποδεικνύοντας ότι η αύξηση που επιφέρει η διεργασία της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα έχει ένα ανώτατο όριο, πέραν του οποίου η αύξηση της έντασης της διεργασίας δεν επιδρά. Αυτό ακριβώς μπορεί να θεωρηθεί ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου άλεσης. Οι Hossen et al. (2011) ανέφεραν ότι ρυζάλευρο που κονιορτοποιήθηκε σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα, με  $D_{50}$  45  $\mu\text{m}$ , περιείχε μικρότερο ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου από αντίστοιχο ρυζάλευρο, με  $D_{50}$  53  $\mu\text{m}$ , που κονιορτοποιήθηκε σε σφυρόμυλο, παρά το παρόμοιο μέγεθος κοκκομετρίας.

Τα προφίλ συγκράτησης διαλυτών (SRC) είναι ένας σχετικά οικονομικός και εύκολος τρόπος ώστε να προσδιοριστεί το λειτουργικό προφίλ των αλεύρων και άρα των τελικών προϊόντων αρτοποιίας (Kweon et al., 2014). Η ικανότητα συγκράτησης γαλακτικού οξέος (LaSRC) σχετίζεται με την περιεχόμενη γλουτένη, η ικανότητα συγκράτησης ανθρακικού νατρίου (SCSRC) με το κατεστραμμένο άμυλο και η ικανότητα συγκράτησης της σουκρόζης (SuSRC) συσχετίζεται κυρίως με τη συγκέντρωση αραβινοξυλανών και γλιαδίνης. Οι Duyvejonck et al. (2012) μελέτησαν την καταλληλότητα των τεστ SRC για την ποιοτική αξιολόγηση αλεύρων σίτου που προορίζονται για την παραγωγή μπισκότων και άρτων και κατέληξαν στο ότι οι μέθοδοι αυτοί θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν δοκιμές που χρησιμοποιούνται ευρέως, όπως του αλβεογράφου και φαρινογράφου. Σε παρόμοιο πλαίσιο κινήθηκαν και οι Guzmán et al (2015), οι οποίοι προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν τις διαδικασίες συγκράτησης διαλυτών ώστε να καθορίσουν τις ιδιότητες του ζυμαριού κατά την ανάμιξη και την ποιότητα του παραγόμενου άρτου.

Στην παρούσα μελέτη, όλες οι απορροφήσεις, πλην εκείνης του ελαίου, αυξήθηκαν σημαντικά με την άλεση. Η απορρόφηση ελαίου ήταν μέγιστη στο αρχικό δείγμα 78,25%, ωστόσο, όσο η ένταση της διεργασίας αυξανόταν, η απορρόφηση ακολουθούσε την ίδια αυξητική τάση. Έτσι, το  $D_{50}$  συνδέθηκε σημαντικά αρνητικά με όλες τις απορροφήσεις στα αλέσματα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια ανά μονάδα βάρους, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ενυδάτωσης και η απορρόφηση νερού (Manley et al. 2011) και διαλυτών. Οι Berton et al. (2002) ανέφεραν ότι η ικανότητα συγκράτησης νερού εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό, τις συνθήκες και τη μέθοδο της άλεσης. Σύμφωνα με την έρευνά τους, όσο αυξανόταν η ένταση της διεργασίας άλεσης, τόσο αυξανόταν η ικανότητα ενυδάτωσης των παραγόμενων αλεύρων.

Το κατεστραμμένο άμυλο συνδέθηκε θετικά με όλες τις απορροφήσεις. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον Hosney (1994), ο οποίος αναφέρει ότι το κατεστραμμένο άμυλο συνεισφέρει στην απορρόφηση νερού. Οι Ram et al. (2005) βρήκαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ WHC και SCSRC και υπέθεσαν ότι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την απορρόφηση νερού στο άλευρο είναι το κατεστραμμένο άμυλο. Στην παρούσα μελέτη αυτός ο ισχυρισμός δεν μπορεί να υποστηριχτεί πλήρως, παρότι υπάρχει σημαντική

συσχέτιση μεταξύ τους ( $r=0,923$ ,  $P\leq 0,05$ ), αφού η WHC συσχετίζεται σημαντικά και με άλλες ιδιότητες (π.χ.  $D_{50}$  με  $r=-0,788$ , υγρασία με  $r=-0,923$ ,  $P\leq 0,05$ ).

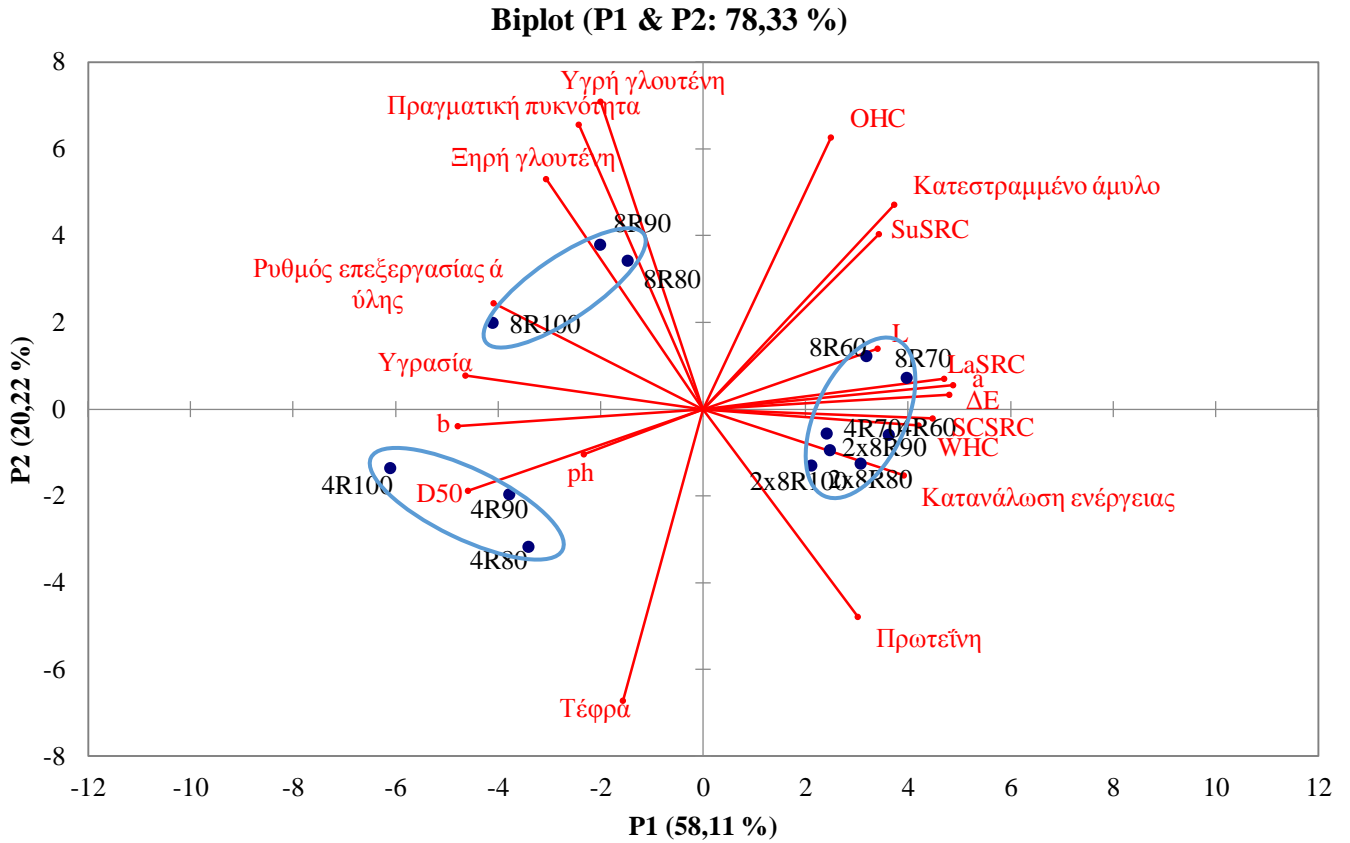
Το χρώμα αποτελεί ποιοτικό παράγοντα αξιολόγησης των αλεύρων και συνήθως καθορίζεται από τον συνδυασμό της φωτεινότητας και της κίτρινης απόχρωσης. Η φωτεινότητα επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε πίτυρο, ενώ η κίτρινη απόχρωση από τα καροτενοειδή που εδράζουν στο ενδοσπέρμιο (Hidalgo & Brandolini, 2008, Oliver et al., 1992). Η άλεση φαίνεται να βελτιώνει στο σύνολο το χρώμα του αλεύρου, αφού υπάρχει μια τάση αύξησης των συντελεστών  $L^*$  (φωτεινότητα) και  $a$  (κόκκινο χρώμα) με ταυτόχρονη μείωση του  $b$  (κίτρινο χρώμα) και συσχετίζονται σημαντικά με το  $D_{50}$  ( $r=-0,662$ ,  $-0,935$  και  $0,886$ ,  $P\leq 0,05$ , αντίστοιχα). Είναι σύνηθες ο συντελεστής  $L^*$  να συσχετίζεται με την τέφρα (Oliver et al., 1993) κάτι που δεν φάνηκε στην παρούσα μελέτη, καθώς οι διαφορές στην τέφρα των δειγμάτων δεν παρουσίασαν κάποια τάση και ουσιαστικά δεν πρόκειται για διαφορετικά κλάσματα άλεσης, ώστε να περιέχουν διαφορετικές ποσότητες πίτυρου.

#### 6.2.4. Επιλογή συνθηκών άλεσης

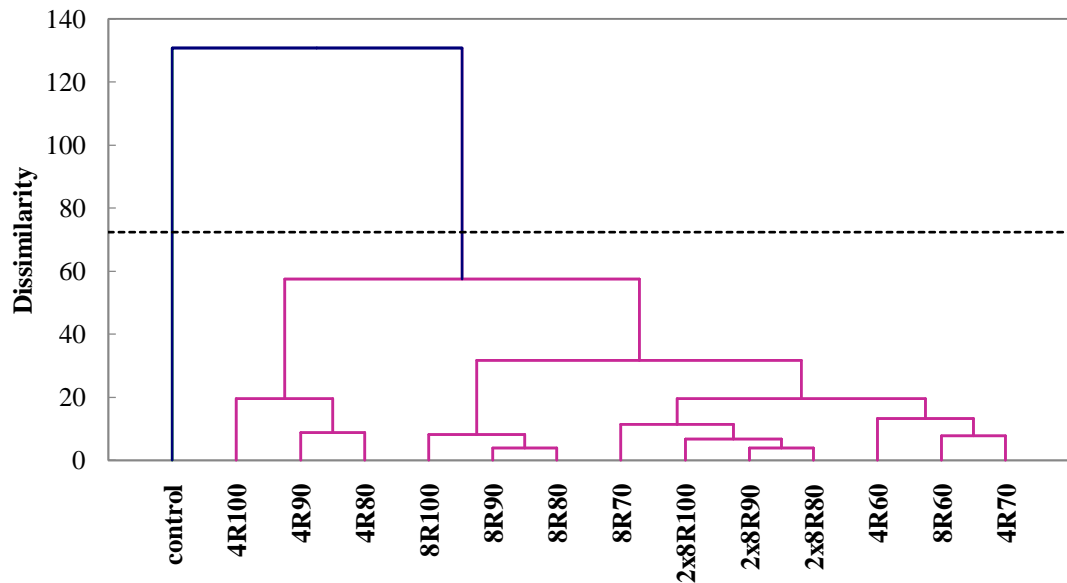
Η τελική επιλογή των συνθηκών άλεσης, πίεση, ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης και ανατροφοδότηση, καθορίστηκαν από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων αλεύρων, το κόστος παραγωγής και τις διαφοροποιήσεις που προέκυψαν κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Δεδομένου ότι οι μεταβλητές ήταν υψηλά συσχετισμένες, όπως φάνηκε στον Πίνακα 6.7, αποφασίστηκε η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA), η οποία χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά των προηγούμενων αναλύσεων για τη μοντελοποίηση της συσχέτισης μεταξύ των χαρακτηριστικών των παραγόμενων αλεύρων. Από τους 20 παράγοντες που μελετήθηκαν προέκυψαν συνολικά δώδεκα ιδιοδιανύσματα με τις δύο κύριες συνιστώσες να εξηγούν το 78,33% της παραλλακτικότητας των αποτελεσμάτων (Σχήμα 6.9). Η πρώτη κύρια συνιστώσα (P1) αντιπροσωπεύει το 58,11% της διακύμανσης και συνδέθηκε κυρίως με τις μεταβλητές:  $D_{50}$ , υγρασία, WHC, LaSRC, SCSRC, και χρώμα ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ), ενώ λιγότερο συνεισέφεραν το κατεστραμμένο άμυλο, η SuSRC, η πρωτεΐνη, η κατανάλωση ενέργειας και ο ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης. Η δεύτερη κύρια συνιστώσα (P2) εξήγησε το 20,22% της παραλλακτικότητας και συνδέθηκε κυρίως με την πραγματική πυκνότητα, την υγρή και την ξηρή γλουτένη, την OHC και την τέφρα. Η τρίτη κύρια συνιστώσα (P3) εξήγησε το 6,72% της παραλλακτικότητας συνεισφέροντας σε αυτό, κατά κύριο λόγο, το pH.

Στο Σχήμα 6.9 απεικονίζονται γραφικά οι μεταβλητές και οι παρατηρήσεις του παρόντος πειράματος σε σχέση με τις δύο κύριες συνιστώσες (P1 και P2). Οι μεταβλητές που βρίσκονται μακριά από το κέντρο, αλλά είναι κοντά η μία με την άλλη, συσχετίζονται θετικά, αυτές που βρίσκονται κάθετα η μία στην άλλη, δεν συσχετίζονται, ενώ αυτές που βρίσκονται σε αντίθετες από το κέντρο πλευρές συσχετίζονται σημαντικά αρνητικά.



Σχήμα 6.9 Ανάλυση κύριων συνιστωσών με βάση τις τιμές των δειγμάτων και τα παραγοντικά φορτία των μεταβλητών.



Σχήμα 6.10 Ανάλυση συστάδων, ομαδοποίηση δειγμάτων με τη μέθοδο της Τετραγωνικής Ευκλείδειας απόστασης (Squared Euclidean Method).



Παρατηρείται μια ισχυρή τάση ομαδοποίησης των παρατηρήσεων-δειγμάτων. Τα δείγματα που αλέστηκαν σε ρυθμούς 80, 90 και 100% και σε πίεση 4 και 8 bar τοποθετήθηκαν αριστερά της P1, τα μεν των 4 bar στο κάτω αριστερά και τα δε των 8 bar πάνω δεξιά. Τα υπόλοιπα δείγματα συγκεντρώθηκαν στο δεξί τμήμα του γραφήματος και πολύ κοντά στον άξονα της P1 τονίζοντας τη σημαντικότητα του χρώματος, των απορροφήσεων και της κατανάλωσης ενέργειας στο χαρακτηρισμό των δειγμάτων με πολύ χαμηλή κοκκομετρία ( $D_{50} \leq 12,22 \mu\text{m}$ ).

Η ανάλυση συστάδων (Σχήμα 6.10) επιβεβαιώνει τους παραπάνω διαχωρισμούς αφού ουσιαστικά δημιουργεί ομάδες από παρατηρήσεις που μοιάζουν μεταξύ τους. Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε και το δείγμα μάρτυρας (control) για να τονιστεί η σαφής διαφοροποίηση που επιφέρει η άλεση με πεπιεσμένο αέρα, ακόμα και με ήπιες συνθήκες άλεσης (π.χ. 4 bar). Έτσι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10 τα αποτελέσματα της ανάλυσης συστάδων έδωσαν 4 ομάδες οι οποίες επιβεβαίωσαν και ενίσχυσαν τα προηγούμενα αποτελέσματα. Το δείγμα control αποτελεί από μόνο του μία ομάδα, τα δείγματα 4R100, 4R90 και 4R80, που χαρακτηρίζονται από την ίδια χαμηλή πίεση 4 bar, και υψηλό ρυθμό τροφοδοσίας, σχηματίζουν μία ομάδα που συνδέεται με τα υπόλοιπα δείγματα. Μία μικρότερη ομάδα σχηματίζουν τα δείγματα 8R100, 8R90 και 8R80, που αλέστηκαν σε μεγάλη πίεση, 8 bar, και σχετικά υψηλό ρυθμό τροφοδοσίας, ενώ τα υπόλοιπα, που επεξεργάστηκαν σε πιο έντονες συνθήκες άλεσης και χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρά μεγέθη κοκκομετρίας ( $10,55 \leq D_{50} \leq 12,22 \mu\text{m}$ ), σχηματίζουν μία ομάδα μέσα στην οποία εντοπίζονται υποομάδες. Η ανάλυση κύριων συνιστωσών και η ανάλυση συστάδων είχαν ως αποτέλεσμα από τη μία την ομαδοποίηση των δειγμάτων και των υπό μελέτη χαρακτηριστικών και από την άλλη τον τελικό καθορισμό των συνθηκών άλεσης.

Με βάση όλη την παραπάνω ανάλυση επιλέχθηκαν οι συνθήκες άλεσης που χρησιμοποιήθηκαν στις επόμενες σειρές πειραμάτων. Οι επιλεγόμενες συνθήκες άλεσης αναδεικνυαν τη διαφορετικότητα των παραγόμενων αλεύρων και συνέφεραν οικονομικά. Επιλέχτηκε μία συνθήκη από κάθε μία ομάδα που υπέδειξε η ανάλυση συστάδων και το κριτήριο επιλογής ήταν η συνολική οικονομία της διεργασίας, από θέμα χρόνου και κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι από τις δύο πρώτες ομάδες επιλέχθηκαν το 8R100 και το 4R100. Όσον αφορά την τρίτη ομάδα, τη μεγαλύτερη που σχηματίστηκε, επιλέχθηκαν δύο δείγματα, το 8R70 και το 2x8R100. Το δείγμα 8R70 έφτασε στο μικρότερο μέγεθος κοκκομετρίας ( $D_{50} = 10,55 \mu\text{m}$ ) με το μικρότερο κόστος παραγωγής, ενώ το δείγμα 2x8R100 επιλέχτηκε ενδεικτικά για τη μελέτη της επίδρασης της ανατροφοδότησης.

### 6.2.5. Συμπέρασμα

Οι διαφορετικές συνθήκες άλεσης με πεπιεσμένο αέρα επίδρασαν σημαντικά στα περισσότερα από τα υπό μελέτη χαρακτηριστικά των παραγόμενων αλεύρων. Η ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας και η μείωση της πίεσης του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αλεύρων με μεγαλύτερο  $D_{50}$ . Αύξηση της έντασης της

διεργασίας (μικρός ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης, υψηλή πίεση αέρα και ανατροφοδότηση) είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή αλεύρων με μικρότερη υγρασία, μεγαλύτερο ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου, με μέγιστο 7,11%, αύξηση της απορρόφησης ενώ παρουσιάστηκε και βελτίωση στο χρώμα. Ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας και άρα το κόστος της διεργασίας άλεσης. Σύμφωνα με την ανάλυση PCA οι μεταβλητές  $D_{50}$ , υγρασία, WHC; LaSRC, SCSRC, και χρώμα ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) που κυρίως συνδέθηκαν με τη P1, εξήγησαν το 58,11% της διακύμανσης των αποτελεσμάτων, αναδεικνύοντας έτσι τη σημαντικότητά τους για την κατηγοριοποίηση των δειγμάτων.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων αλεύρων, η κατανάλωση ενέργειας που απαιτήθηκε και η διαφορετικότητα τους καθόρισαν την τελική επιλογή των συνθηκών άλεσης. Οι επιλεγμένες συνθήκες έχουν ως εξής:

- Πίεση αέρα 4 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 2,50 kWh/kg,  $D_{50}$  44,58  $\mu\text{m}$ )
- Πίεση αέρα 8 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 2,00 kWh/kg,  $D_{50}$  22,94  $\mu\text{m}$ )
- Πίεση αέρα 8 bar, με ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 8,68 kWh/kg,  $D_{50}$  11,41  $\mu\text{m}$ )
- Πίεση αέρα 8 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 70% (κατανάλωση ενέργειας 6,70 kWh/kg,  $D_{50}$  10,55  $\mu\text{m}$ ).

### **6.3. Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε άλευρο σίτου ολικής**

Το άλευρο ολικής άλεσης σίτου αποτελεί μια πρόκληση για τις βιομηχανίες αρτοποιίας και άλεσης. Ενώ οι διεργασίες άλεσης για τα συμβατικά άλευρα έχουν πλέον καθιερωθεί, τα άλευρα ολικής άλεσης παράγονται από μια μεγάλη ποικιλία διεργασιών. Αποτέλεσμα των οποίων είναι η παραγωγή αλεύρων ολικής άλεσης με μεγάλη ποικιλομορφία ως προς το μέγεθος της κοκκομετρίας και της λειτουργικότητάς τους (Kihlberg et al., 2004). Επιπρόσθετα τα άλευρα αυτά, σε σχέση με τα συμβατικά, περιέχουν περισσότερα ένζυμα (Every et al., 2006), λιπίδια (Chung et al., 2009) και αντιοξειδωτικά (Adom et al., 2005) επιδρώντας στα τελικά προϊόντα αρτοποιίας (Every et al., 2006, Galliard & Gallagher, 1988, Tait & Galliard, 1988, Wang et al., 2004) και στη διάρκεια αποθήκευσής τους (Bell et al., 1979, Hansen & Rose, 1996, Tait & Galliard, 1988). Η επιλογή λοιπόν της διεργασίας άλεσης αποτελεί το κλειδί για την παραγωγή αλεύρων ολικής άλεσης (Kihlberg et al., 2004).

Για την παραγωγή αυτών των αλεύρων χρησιμοποιούνται κυρίως πετρόμυλοι, κυλινδρόμυλοι, σφυρόμυλοι και μύλοι υπέρλεπτης άλεσης (Kent & Evers, 1994). Ο σφυρόμυλος προκαλεί υπερθέρμανση στο υπό άλεση υλικό και απώλεια υγρασίας (Posner & Hibbs, 2005). Ο πετρόμυλος εξαιτίας της τριβής αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την αύξηση του κατεστραμμένου αμύλου και την παραγωγή ακόρεστων λιπαρών οξέων (Prabhasankar & Rao, 2001). Η διεργασία με τον κυλινδρόμυλο περιλαμβάνει το διαχωρισμό του ενδοσπερμίου από το πίτυρο και το φύτρο, καθώς και τη σταδιακή μείωση του μεγέθους του ενδοσπερμίου (Ziegler & Greer, 1971).

Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αλεύρου ολικής άλεσης σίτου, ώστε σε επόμενη σειρά πειραμάτων τα άλευρα αυτά να ενσωματωθούν σε τελικά προϊόντα, άρτους και μπισκότα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι συνθήκες άλεσης που επιλέχτηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. κεφ. 6.2). Επιγραμματικά, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις συνθήκες άλεσης, η ένταση των οποίων καθόρισε και το μέγεθος της κοκκομετρίας των παραγόμενων αλεύρων. Χρησιμοποιήθηκε πίεση αέρα 8 και 4 bar. Στα 4 bar χρησιμοποιήθηκε ρυθμός τροφοδοσίας 100% και στα 8 bar 70 και 100%. Στα 8 bar και 100% ρυθμό τροφοδοσίας έγινε επίσης ανατροφοδότηση.

Στα παραγόμενα άλευρα προσδιορίστηκε η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων τους, η υγρασία, η πρωτεΐνη, η τέφρα, οι διαλυτές και οι αδιάλυτες ίνες, η ικανότητα συγκράτησης νερού (WHC), το χρώμα, η παρουσία πιτύρων και η μικροδομή τους (με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκόπιο φάσματος, SEM). Τέλος πραγματοποιήθηκε κινητική μελέτη υδρόλυσης του αμύλου και προσδιορισμός ελεύθερων σακχάρων, ανθεκτικού (RS) και αφομοιώσιμου αμύλου (DS).

### 6.3.1. Παραγόμενα άλευρα, κατανομές μεγέθους. Μακροσκοπική και μικροσκοπική παρατήρηση

Εφαρμόζοντας τις επιλεγμένες συνθήκες άλεσης, από προηγούμενη πειραματική σειρά, σε άλευρο ολικής άλεσης σίτου (τύπου T90) προέκυψαν τα άλευρα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8. Τα άλευρα JW3 και JW4 προήλθαν από δύο διαφορετικές διεργασίες, δίνοντας παρόμοια κοκκομετρία. Ωστόσο, η διεργασία παραγωγής του JW3 ήταν πιο οικονομική, αφού ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης ήταν σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερος σε σχέση με το JW4 (2,54 και 0,67 kg/h, αντίστοιχα). Δηλαδή για την παραγωγή ίδιας ποσότητας αλεύρου απαιτείται σχεδόν τετραπλάσιος χρόνος, οπότε αντίστοιχα και το κόστος παραγωγής του JW4 είναι πολλαπλάσιο σε σχέση με το αντίστοιχο του JW3.

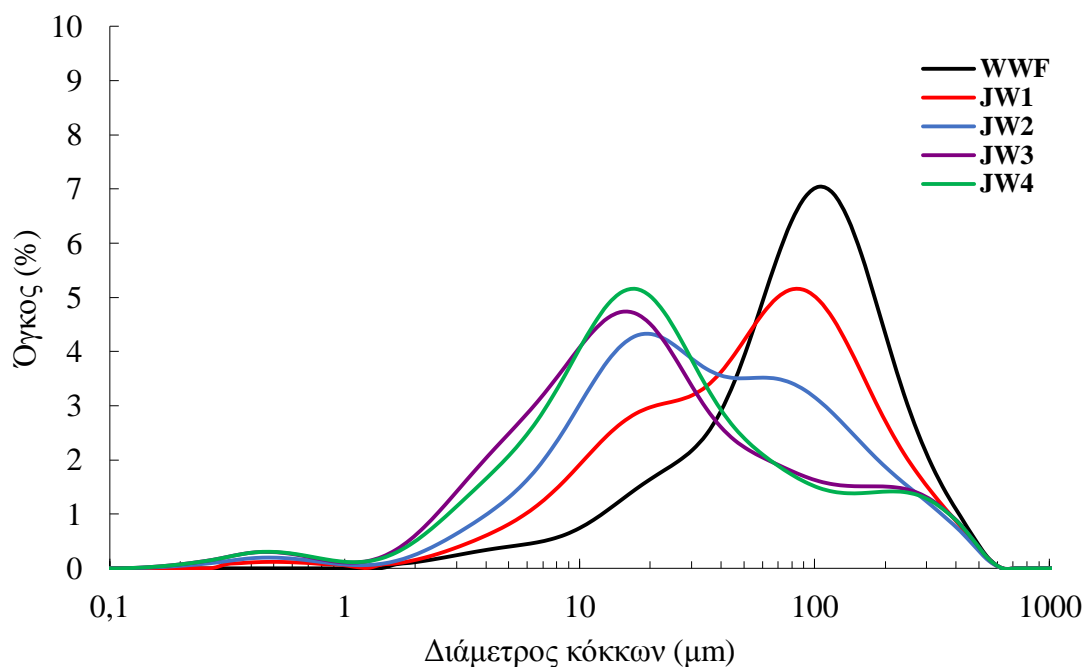
Πίνακας 6.8 Συνθήκες άλεσης και κοκκομετρίες παραγόμενων αλεύρων ολικής άλεσης.

Κωδικοποίηση Δειγμάτων	Πίεση αέρα (bar)	Δυναμικότητα μηχανήματος Ροή πρώτης ύλης (%)	Ανατροφοδότηση	Ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης (kg/h)	D <sub>50</sub> (μm)
WWF	-	-	-	-	84,15 <sup>a</sup> ± 2,45
JW1	4	100	OXI	4,51	53,49 <sup>b</sup> ± 3,38
JW2	8	100	OXI	5,18	29,10 <sup>c</sup> ± 1,73
JW3	8	100	NAI	2,54	17,02 <sup>d</sup> ± 3,09
JW4	8	70	OXI	0,67	18,11 <sup>d</sup> ± 1,38

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα οδήγησε στη μείωση του μεγέθους της κοκκομετρίας στα παραγόμενα άλευρα. Οι κατανομές των σωματιδίων για το αρχικό δείγμα (WWF) και τα μικροαλεσμένα άλευρα ολικής άλεσης (JW1, JW2, JW3, JW4) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11.

Σε αντίθεση με τα μικροαλεσμένα άλευρα η καμπύλη κατανομής του δείγματος WWF παρουσίασε μία μεγάλη κορυφή με την υψηλότερη τιμή μεγέθους σωματιδίων (D<sub>50</sub> 84,15 μm). Όταν το άλευρο υποβλήθηκε σε άλεση με αέρα, η κατανομή του άλλαξε σημαντικά. Το JW1 παρουσίασε μια κορυφή σε παρόμοια θέση με το WWF, αλλά με τάση δημιουργίας μιας επιπλέον κορυφής σε μικρότερα μεγέθη, περίπου 20 μm, υποδεικνύοντας την παρουσία και συνύπαρξη δύο διαφορετικών πληθυσμών κόκκων. Η καμπύλη του δείγματος JW2 ήταν μετατοπισμένη προς τα αριστερά, παρουσιάζοντας θετική ασυμμετρία, δηλαδή οι περισσότερες παρατηρήσεις βρίσκονταν δεξιά της κορυφής. Επίσης παρουσίασε τάση για δημιουργία δεύτερης κορυφής, άρα και τάση συνύπαρξης διαφορετικού μεγέθους κόκκων. Τα δείγματα JW3 και JW4 παρουσίασαν ακόμη μικρότερο μέγεθος με D<sub>50</sub> 17,02 και 18,11 μm αντίστοιχα, και καμπύλες κατανομής που συνέπιπταν, και παρουσίασαν μόνο ένα μικρό «ώμο» σε μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων (Σχήμα 6.11). Ο «ώμος» που παρουσιάστηκε στα δείγματα είναι αποτέλεσμα της

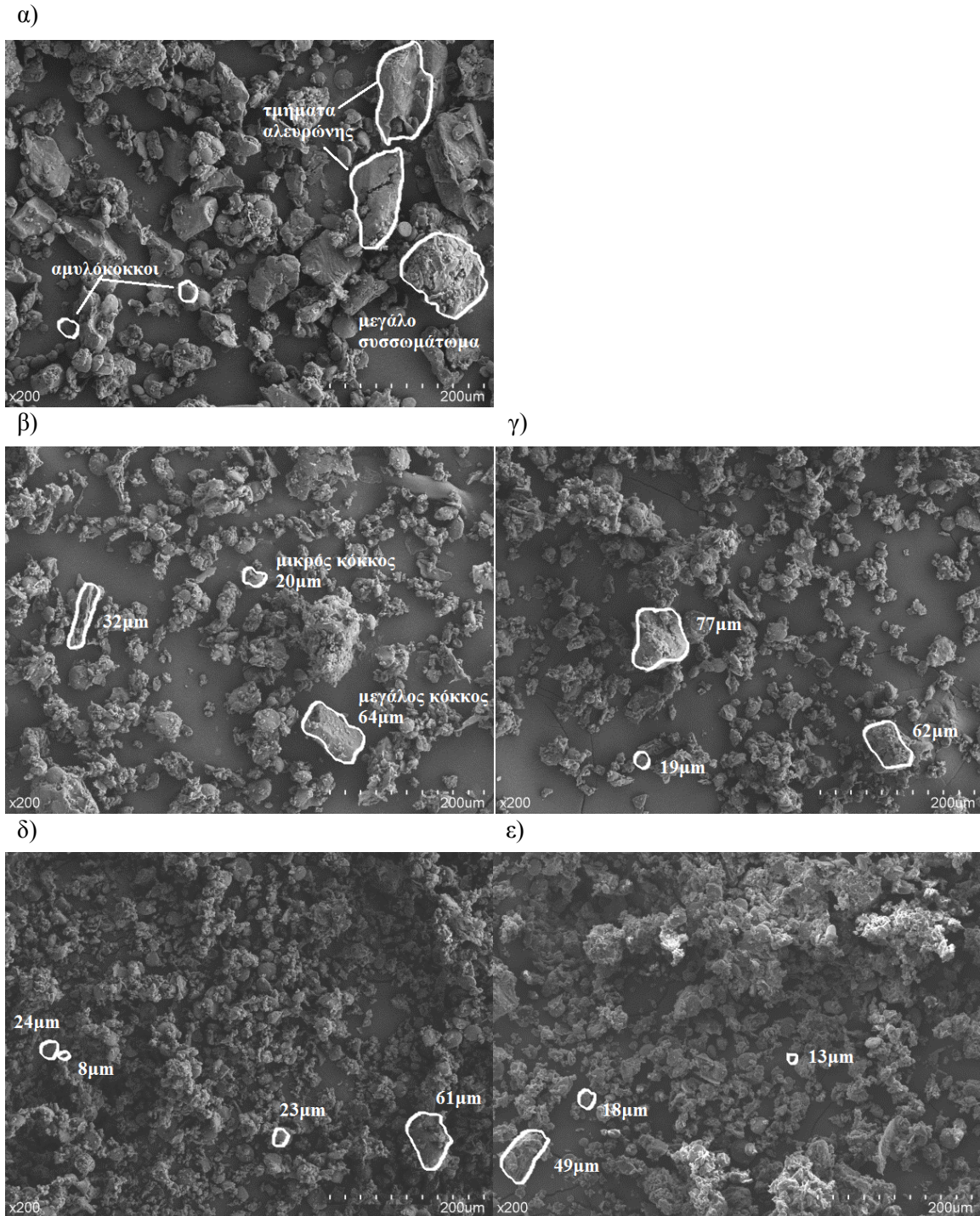
παρουσίας πληθυσμού κόκκων με διαφορετικό μέγεθος. Σύμφωνα με τον Posner (2009) οι κόκκοι με μέγεθος μεταξύ 25 και 110  $\mu\text{m}$  αντιπροσωπεύουν κυρίως τους κόκκους ελεύθερου αμύλου, δημιουργώντας μια ξεχωριστή κορυφή. Η παρουσία της διπλής κορυφής ή «ώμου» είναι χαρακτηριστική των μαλακών αλεύρων (Hareland, 1994, Pauly et al., 2013).



**Σχήμα 6.11** Καμπύλες κατανομής αλεύρου ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4.

Συμπερασματικά, μεγαλύτερης έντασης διεργασίες είχαν ως αποτέλεσμα μετατόπιση της καμπύλης κατανομής προς τα αριστερά με σειρά μεγέθους WWF > JW1 > JW2 > JW3  $\geq$  JW4.

Η ετερογένεια που χαρακτηρίζει το δείγμα WWF πιστοποιείται, όχι μόνο από την καμπύλη κατανομής του, που είχε ένα μεγάλο εύρος, αλλά και από την εικόνα του μικροσκοπίου (SEM) (Σχήμα 6.12). Στο WWF παρατηρήθηκαν μικροί και μεγάλοι κόκκοι αλεύρου, τμήματα της αλευρώνης και συσσωματώματα, μικρά και μεγάλα (20-180  $\mu\text{m}$ ), που περιλαμβάνουν έναν πρωτεϊνικό μανδύα μέσα στον οποίο εγκλωβίστηκαν κόκκοι αμύλου (Σχήμα 6.12 α). Όλα τα δείγματα παρουσίασαν αμυλόκοκκους τύπου A (φακοειδές σχήμα) και κάποιους μικρότερους τύπου B (σφαιρικό σχήμα), που πολλές φορές βρίσκονταν στην επιφάνεια των A. Στα μικροαλεσμένα άλευρα (Σχήμα 6.12 β-ε) παρατηρήθηκαν αρκετοί αμυλόκοκκοι διαχωρισμένοι από τον μανδύα πρωτεΐνης, όπου στο αρχικό δείγμα βρίσκονταν εγκλωβισμένοι. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί



Σχήμα 6.12 Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου φάσματος (SEM) για δείγματα αλεύρου ολικής άλεσης α) WWF, β) JW1, γ) JW2, δ) JW3, και ε) JW4. Μεγέθυνση 200x. Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF> JW1> JW2> JW3≥ JW4.

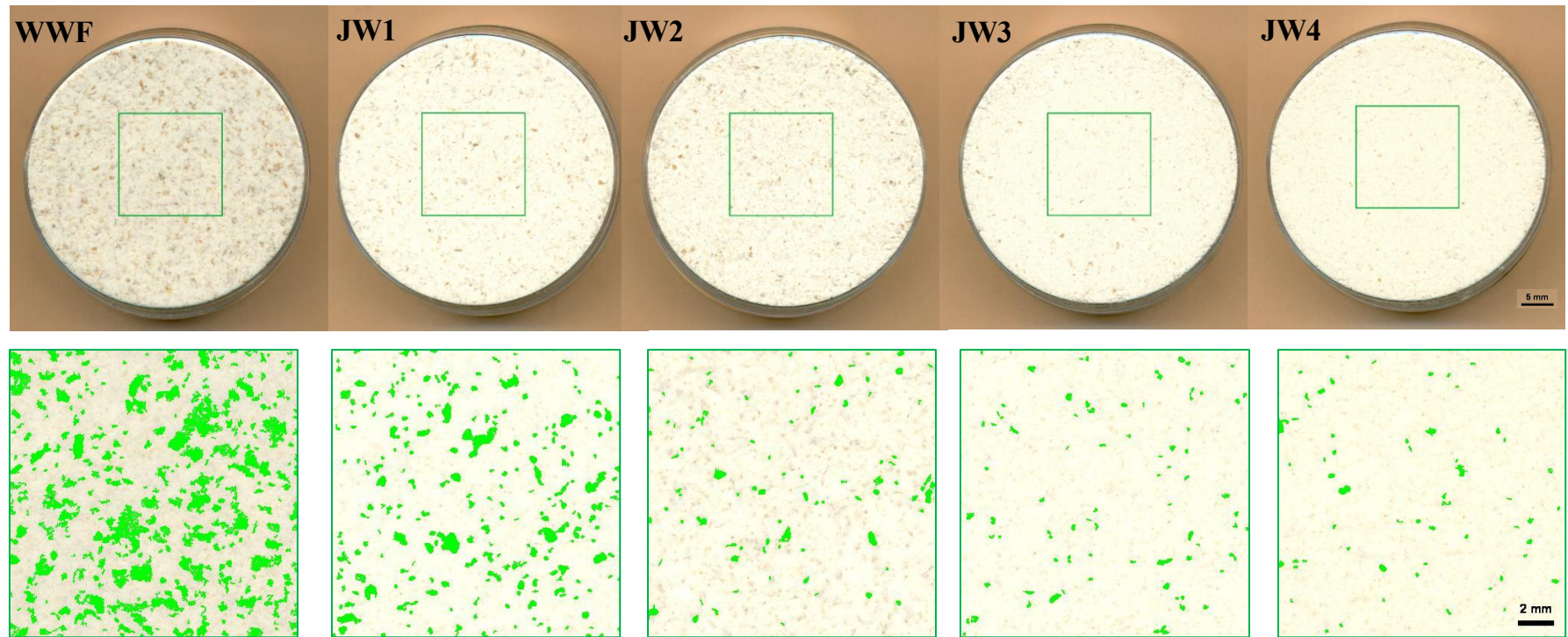
από τους Létang et al. (2002). Η αύξηση της έντασης της διεργασίας είχε ως αποτέλεσμα τη συχνότερη εμφάνιση ελεύθερων αμυλόκοκκων. Επιπρόσθετα το σχήμα των κόκκων φάνηκε να αλλάζει με την άλεση, καθώς οι κόκκοι έγιναν πιο σφαιρικοί και ομοιόμορφοι,

κάτι που επισημάνθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο όπου είχε μελετηθεί συμβατικό άλευρο σίτου (βλ. κεφ. 6.1).

Το δείγμα JW1, με τη μικρότερη επεξεργασία, παρουσίασε τόσο μεγάλους (περίπου 80  $\mu\text{m}$ ) όσο και μικρούς (περίπου 20  $\mu\text{m}$ ) κόκκους, διαφέροντας σημαντικά από τα υπόλοιπα μικροαλεσμένα δείγματα, πιθανότατα εξαιτίας της μικρής πίεσης αέρα (4 bar) που χρησιμοποιήθηκε στην άλεση. Τμήματα αλευρώνης ανιχνεύτηκαν σε αυτό το δείγμα, αλλά το μέγεθός τους ήταν μικρότερο από εκείνων του WWF.

Οι εικόνες των JW3 και JW4 ήταν παρόμοιες, με πιο ομοιόμορφη κατανομή των κόκκων (Σχήμα 6.12 δ και ε). Αν και πρόκειται για δύο διαφορετικές διεργασίες άλεσης, το αποτέλεσμα ήταν παρόμοιο. Τα δείγματα αυτά, περιείχαν μικρούς κόκκους (15–30  $\mu\text{m}$ ) με λείες επιφάνειες και κανονικό σχήμα. Οι Landillon et al. (2008) επίσης διαπίστωσαν ότι αυτά τα μεγέθη κοκκομετρίας σχετίζονται με την παρουσία ελεύθερων αμυλόκοκκων. Τα αποτελέσματα από τις καμπύλες κατανομής είναι σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις από τις εικόνες του μικροσκοπίου.

Πολλοί ερευνητές έχουν δοκιμάσει διάφορες φασματοφωτομετρικές μεθόδους και χρωματόμετρα για τον προσδιορισμό του χρώματος σε άλευρο σίτου (π.χ. Black & Panozzo, 2004, Dowell et al., 2006, Mares & Campbell 2001, McCaig 2002, Oliver et al., 1992), καταλήγοντας στο ότι τα όργανα με αισθητήρες σε ορατά μήκη κύματος, μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια το χρώμα στο άλευρο. Στο Σχήμα 6.13 φαίνονται εικόνες αλεύρων στις οποίες επισημαίνονται σε μεγέθυνση τα πίτυρα που υπάρχουν σε κάθε δείγμα. Είναι εμφανές ότι όσο η διεργασία γινόταν πιο έντονη, ο εμφανής αριθμός και το μέγεθος των πιτύρων μειωνόταν. Η επιβεβαίωση αυτού ήρθε με τη χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας και την καταμέτρηση του μεγέθους και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών των πιτύρων (Πίνακας 6.9). Στο αρχικό δείγμα WWF ήταν εμφανή τα περισσότερα πίτυρα (36,66% επιφάνεια), ενώ μειώθηκε το ποσοστό εμφάνισης τους μέχρι και 96% στο δείγμα JW1. Αντίστοιχα, εξαιτίας της άλεσης σημαντική μείωση επήλθε στο μέγεθος των πιτύρων, σε διάμετρο και περίμετρο, και όπως ήταν αναμενόμενο συσχετίστηκαν σημαντικά θετικά με το  $D_{50}$  ( $r=0,985$  και  $r=0,963$ , αντίστοιχα με  $P\leq 0,05$ ). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα δείγματα JW3 και JW4 παρότι δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στην κατανομή (Σχήμα 6.11), διέφεραν στατιστικά σημαντικά στην παρουσία πιτύρων, με το δείγμα JW4 να παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή. Όσον αφορά το χρώμα, η φωτεινότητα (L) αυξήθηκε σημαντικά με την άλεση ενώ οι άλλες παράμετροι, a και b, δεν παρουσίασαν κάποια τάση. Η συνολική αλλαγή στο χρώμα φάνηκε από τον παράγοντα  $\Delta E$  και αυξήθηκε σημαντικά στα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα JW3 και JW4 ( $r=-0,934$ ,  $P\leq 0,05$ ).



Σχήμα 6.13 Πάνω: Ενδεικτικές εικόνες αλεύρου ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4. Κάτω: επισήμανση μύκητων στα διάφορα δείγματα αλεύρου. Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4.

Πίνακας 6.9 Ιδιότητες χρώματος αλεύρων και χαρακτηριστικά μύκητων που υπάρχουν σε αυτά.

$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$	Μέση Διάμετρος(mm)	Μέση Περίμετρος(mm)	Παρουσία μύκητων (% έκταση)
WWF 83,93 <sup>a</sup> ± 0,15	1,91 <sup>b</sup> ± 0,05	9,64 <sup>b</sup> ± 0,27		0,38 <sup>c</sup> ± 0,26	1,66 <sup>a</sup> ± 1,93	36,66 <sup>a</sup> ± 2,34
JW1 85,97 <sup>b</sup> ± 0,36	1,76 <sup>a</sup> ± 0,10	9,27 <sup>a</sup> ± 0,16	2,08 <sup>a</sup> ± 0,36	0,30 <sup>b</sup> ± 0,13	0,98 <sup>b</sup> ± 0,61	15,50 <sup>b</sup> ± 0,71
JW2 86,13 <sup>bc</sup> ± 0,06	1,92 <sup>b</sup> ± 0,11	9,11 <sup>a</sup> ± 0,18	2,27 <sup>ab</sup> ± 0,03	0,26 <sup>ab</sup> ± 0,08	0,76 <sup>b</sup> ± 0,35	3,59 <sup>c</sup> ± 0,34
JW3 86,37 <sup>cd</sup> ± 0,06	2,16 <sup>c</sup> ± 0,03	9,95 <sup>c</sup> ± 0,05	2,52 <sup>b</sup> ± 0,07	0,25 <sup>ab</sup> ± 0,06	0,74 <sup>b</sup> ± 0,29	2,17 <sup>d</sup> ± 0,21
JW4 86,51 <sup>d</sup> ± 0,24	2,14 <sup>c</sup> ± 0,02	9,81 <sup>bc</sup> ± 0,07	2,61 <sup>b</sup> ± 0,23	0,24 <sup>a</sup> ± 0,06	0,67 <sup>b</sup> ± 0,22	1,40 <sup>e</sup> ± 0,21

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4. Οι τιμές που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύει στατιστική διαφορά ( $P \leq 0.05$ )



### 6.3.2. Σύσταση αλεύρων

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα, επέδρασε στις φυσικοχημικές ιδιότητες των αλεύρων ολικής άλεσης (Πίνακας 6.10), όπως αντίστοιχα είχε συμβεί και με το συμβατικό άλευρο σίτου (κεφ.6.2). Ως εκ τούτου, η περιεκτικότητα σε υγρασία μειώθηκε σημαντικά και προοδευτικά με την αύξηση της έντασης της διεργασίας άλεσης. Ο μειωμένος ρυθμός τροφοδοσίας, η αυξημένη πίεση του αέρα και η ανατροφοδότηση μείωσαν την υγρασία στα άλευρα, που παρέμειναν για περισσότερο χρόνο εκτεθειμένα στο ρεύμα αέρα. Επιπρόσθετα, η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων είχε ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια για αλληλεπίδραση. Έτσι, από τη μία έχαναν ευκολότερα υγρασία ( $r=0,979$ ,  $P\leq 0,05$ ) και από την άλλη είχαν μεγαλύτερη WHC ( $r=-0,963$ ,  $P\leq 0,05$ ). Η πρωτεΐνη και η τέφρα δεν παρουσίασαν κάποια τάση εξαιτίας της άλεσης και δεν συσχετίστηκαν σημαντικά με τις άλλες μεταβλητές. Η μειωμένη υγρασία στο άλευρο θεωρείται πλεονέκτημα, καθώς η υψηλή περιεχόμενη υγρασία συσχετίζεται με μικρό χρόνο ζωής των προϊόντων και ενθάρρυνση της μικροβιακής ανάπτυξης (Ezeama, 2007).

Από τη βαρυμετρική μέθοδο προσδιορισμού των ινών που χρησιμοποιήθηκε, βρέθηκε ότι το ποσοστό συνολικών ινών αυξήθηκε σημαντικά μετά την άλεση, αν και η ένταση της διεργασίας δεν επέδρασε σημαντικά σε αυτό. Μία εξήγηση για την ερμηνεία του φαινομένου αυτού θα μπορούσε να είναι οι πιθανές αλληλεπιδράσεις που υπάρχουν μεταξύ πρωτεϊνών και ημικυτταρινών κατά τη διάρκεια της άλεσης, διαμορφώνοντας έτσι υψηλότερες τιμές κατά τη βαρυμετρική ανάλυση των ινών.

Σε γενικές γραμμές, η περιεκτικότητα σε αδιάλυτες ίνες παρουσίασαν μία τάση μείωσης, αλλά δεν ήταν στατιστικά σημαντική, με εξαίρεση το δείγμα JW3. Οι Chau et al. (2007) παρατήρησαν ότι η μικρούλεση προκάλεσε μια ανακατανομή των ινών από αδιάλυτα σε διαλυτά κλάσματα. Παρόμοια αποτελέσματα έδειξε και η έρευνα των Zhu et al. (2010), οι οποίοι κονιορτοποίησαν πίτυρο σίτου, φτάνοντας σε μεγέθη μικρότερα της τάξεως των μικρών. Παρατήρησαν ότι μείωση του μεγέθους των σωματιδίων συνοδεύταν από ανακατανομή των συστατικών των ινών, από αδιάλυτα σε διαλυτά κλάσματα. Πέραν της διατροφικής τους αξίας οι ίνες επηρεάζουν σημαντικά και τη δομή των τροφίμων.

**Πίνακας 6.10** Φυσικές και χημικές ιδιότητες αλεύρου ολικής άλεσης (WWF) και αλεύρων που προέκυψαν από αυτό με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα σε διαφορετικές συνθήκες άλεσης.

Δείγμα	Υγρασία (%)	WHC (%)	Πρωτεΐνη (% ξ.β.)	Τέφρα (% ξ.β.)	Αδιάλυτες Ίνες (% ξ.β.)	Συνολικές Ίνες (% ξ.β.)
WWF	11,95 <sup>d</sup> ± 0,00	85,64 <sup>a</sup> ± 0,61	15,00 <sup>a</sup> ± 0,18	1,31 <sup>a</sup> ± 0,00	9,23 <sup>b</sup> ± 0,11	13,01 <sup>a</sup> ± 0,53
JW1	8,57 <sup>c</sup> ± 0,01	87,60 <sup>b</sup> ± 0,50	15,08 <sup>ab</sup> ± 0,32	1,31 <sup>a</sup> ± 0,01	8,39 <sup>ab</sup> ± 0,34	14,25 <sup>b</sup> ± 0,66
JW2	7,84 <sup>b</sup> ± 0,05	90,36 <sup>c</sup> ± 0,09	15,22 <sup>ab</sup> ± 0,09	1,33 <sup>a</sup> ± 0,02	8,39 <sup>ab</sup> ± 0,06	14,24 <sup>b</sup> ± 0,04
JW3	6,61 <sup>a</sup> ± 0,01	93,70 <sup>d</sup> ± 0,73	15,30 <sup>ab</sup> ± 0,02	1,33 <sup>a</sup> ± 0,00	7,82 <sup>a</sup> ± 0,79	14,30 <sup>b</sup> ± 0,10
JW4	6,64 <sup>a</sup> ± 0,08	92,21 <sup>d</sup> ± 0,26	15,51 <sup>b</sup> ± 0,01	1,42 <sup>b</sup> ± 0,00	8,89 <sup>ab</sup> ± 0,72	14,72 <sup>b</sup> ± 0,16

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4. Οι τιμές που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύει στατιστική διαφορά ( $P\leq 0.05$ ).

### 6.3.3. Ενζυματική υδρόλυση αμύλου

Αν και το άλευρο δεν καταναλώνεται απευθείας ως έχει, αλλά ως συστατικό σε τελικά προϊόντα, πραγματοποιήθηκε *in vitro* ενζυματική υδρόλυση για όλα τα άλευρα ολικής άλεσης, αρχικό αλλά και κονιορτοποιημένα, με σκοπό να προσδιοριστούν τυχόν διαφορές της επιδεκτικότητας του αμύλου στην ενζυματική υδρόλυση εξαιτίας της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα. Οι καμπύλες υδρόλυσης εμφανίζονται στο Σχήμα 6.14. Είναι προφανές ότι τα δείγματα που υπέστησαν έντονη άλεση με πεπιεσμένο αέρα παρουσίασαν σημαντικά αυξημένες τιμές σταθεράς υδρόλυσης ( $k$ ) (Πίνακας 6.11).

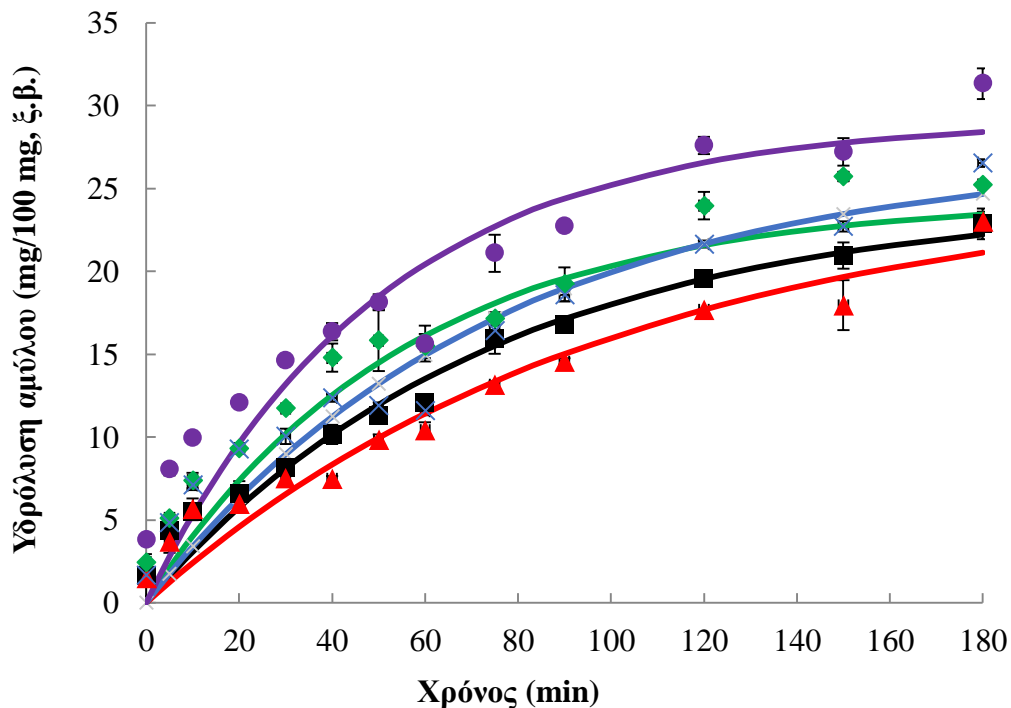
Χαμηλή ποσότητα ελεύθερων σακχάρων χωρίς διαφοροποίηση μεταξύ των δειγμάτων και χωρίς συσχετίσεις με άλλες μεταβλητές παρατηρήθηκε στα άλευρα ολικής άλεσης. Επίσης παρουσιάστηκε τάση σημαντικής αύξησης του αφομοιώσιμου αμύλου σε αντίθεση με το ανθεκτικό άμυλο που μειώθηκε κατά την άλεση. Καθώς η ένταση της διεργασίας άλεσης αυξανόταν, το μέγεθος της κοκκομετρίας μειωνόταν, οδηγώντας σε μεγαλύτερη επιφάνεια έκθεσης των κόκκων στην ενζυματική υδρόλυση. Επιπλέον, όπως φάνηκε και από την ανάλυση των εικόνων του μικροσκοπίου, στα δείγματα JW2, JW3 και JW4, οι αμυλόκοκκοι είχαν αποσπαστεί από τον πρωτεϊνικό μανδύα κάνοντας ακόμη ευκολότερη την υδρόλυση. Στην πραγματικότητα, ο γρηγορότερος ρυθμός υδρόλυσης παρουσιάστηκε στο δείγμα JW3. Τα ευρήματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τους de la Hera et al. (2013a) που παρατήρησαν μικρότερο ρυθμό υδρόλυσης σε δείγματα χονδρόκοκκου ρυζιού.

Συνολικά από την ανάλυση συστάδων (Σχήμα 6.15), τα δείγματα JW3 και JW4 σχημάτισαν μία ομάδα η οποία συνδέθηκε με το JW2. Το αρχικό δείγμα (WWF) συνδέθηκε άμεσα με το δείγμα JW1, που είχε υποστεί τη λιγότερο έντονη διεργασία. Τα δείγματα JW3 και JW4 είχαν παρόμοια κοκκομετρία 17,02 και 18,11  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα, υποδεικνύοντας ότι οι διαφορετικές διεργασίες άλεσης που έχουν παρόμοιο αποτέλεσμα σε μέγεθος κοκκομετρίας δεν δύναται να παράξουν άλευρα με σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά τους.

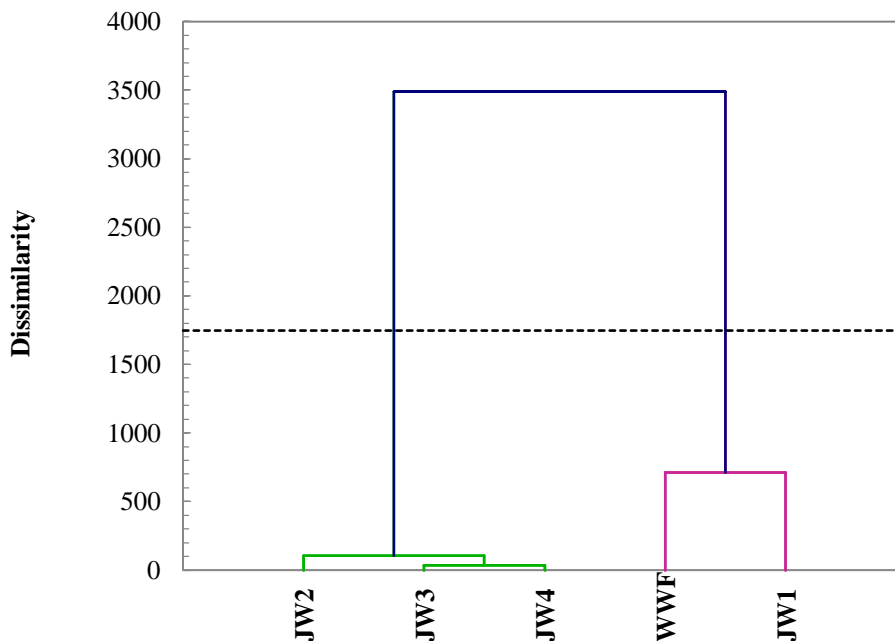
**Πίνακας 6.11** Παράμετροι κινητικής υδρόλυσης αμύλου αλεύρου ολικής άλεσης (WWF) και αλεύρων που προέκυψαν από αυτό με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα σε διαφορετικές συνθήκες άλεσης.

Δείγμα	Ελεύθερα Σάκχαρα (mg/100mg)	Ανθεκτικό άμυλο, RS (mg/100 mg)	Αφομοιώσιμο άμυλο DS (mg/100 mg)	$C_{\infty}$ (%)	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )
WWF	0,24 <sup>a</sup> ± 0,00	18,78 <sup>d</sup> ± 0,16	33,80 <sup>a</sup> ± 0,82	26,9 <sup>a</sup> ± 3,5	0,011 <sup>b</sup> ± 0,003
JW1	0,22 <sup>a</sup> ± 0,02	18,91 <sup>a</sup> ± 1,91	36,59 <sup>ab</sup> ± 1,43	28,4 <sup>a</sup> ± 4,3	0,009 <sup>a</sup> ± 0,001
JW2	0,24 <sup>a</sup> ± 0,02	16,53 <sup>bc</sup> ± 1,42	39,39 <sup>bc</sup> ± 0,74	27,5 <sup>a</sup> ± 0,6	0,013 <sup>bc</sup> ± 0,000
JW3	0,20 <sup>a</sup> ± 0,04	14,61 <sup>ab</sup> ± 1,41	43,23 <sup>d</sup> ± 1,28	31,3 <sup>a</sup> ± 3,0	0,018 <sup>cd</sup> ± 0,002
JW4	0,23 <sup>a</sup> ± 0,03	13,00 <sup>d</sup> ± 0,86	40,63 <sup>cd</sup> ± 1,08	24,1 <sup>a</sup> ± 2,2	0,021 <sup>d</sup> ± 0,002

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4. Οι τιμές που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύει στατιστική διαφορά ( $P \leq 0.05$ )



Σχήμα 6.14 Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στη κινητική υδρόλυση του αμύλου σε δείγματα αλεύρου ολικής άλεσης WWF (■), JW1 (▲), JW2 (×), JW3 (◆), JW4 (●). Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4.



Σχήμα 6.15 Ανάλυση συστάδων, ομαδοποίηση δειγμάτων αλεύρων ολικής άλεσης με τη μέθοδο της Τετραγωνικής Ευκλείδειας απόστασης (Squared Euclidean Method).

#### **6.3.4. Συμπέρασμα**

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της κοκκομετρίας αλεύρου ολικής άλεσης. Το μέγεθος της κοκκομετρίας μειώθηκε προοδευτικά με την αύξηση της έντασης της διεργασίας, όπως ακριβώς συνέβη με το μέγεθος και την εμφανή παρουσία των πιτύρων. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά των αλεύρων δεν παρουσίασαν σαφή τάση σε σχέση με την ένταση της διεργασίας. Ωστόσο, φάνηκε ότι το αρχικό δείγμα WWF είχε παρόμοια χαρακτηριστικά με το JW1 (4 bar, 4,51 kg/h), ενώ διέφεραν σημαντικά από τα δείγματα JW3 (8 bar, 2,54 kg/h) και JW4 (8 bar, 0,67 kg/h), που είχαν υποστεί τις πιο έντονες διεργασίες άλεσης. Το χρώμα βελτιώθηκε αφού αυξήθηκε η φωτεινότητά του, και η παρουσία πίτυρου ήταν λιγότερο εμφανής. Η διεργασία επηρέασε κυρίως την περιεκτικότητα σε υγρασία, που μειώθηκε σταδιακά, και τις ίνες όπου παρατηρήθηκε ανακατανομή και αύξηση των διαλυτών σε σχέση με τις αδιάλυτες ίνες. Η αύξηση του εμβαδού της επιφάνειας των κόκκων αλεύρου, εξαιτίας της μείωσης του μεγέθους τους, αύξησε την επιδεκτικότητα του αμύλου στην ενζυματική υδρόλυση, άρα είναι πιο εύπεπτο και δυνητικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ιδιαίτερες δίαιτες, όταν δηλαδή είναι ανεπιθύμητη η επιβάρυνση του πεπτικού συστήματος και ο οργανισμός απαιτεί άμεσα ενέργεια. Τα άλευρα που αξιολογήθηκαν σε αυτή την πειραματική σειρά, ενσωματώθηκαν σε επόμενη σειρά πειραμάτων σε τελικά προϊόντα αρτοποιίας, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της άλεσης σε άρτους και μπισκότα.

#### **6.4. Παραγωγή μπισκότων με άλευρο σίτου ολικής περασμένο από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα**

Τα μπισκότα τύπου short-dough είναι ένα δημοφιλές προϊόν, που χαρακτηρίζεται ως ένα απλό σύστημα αποτελούμενο από τρία κύρια συστατικά: το άλευρο, τη ζάχαρη και το λίπος. Διαφοροποιείται από τους άλλους τύπους μπισκότου στο ότι δεν είναι συνεκτικό και σπάει εύκολα (Baltsavias et al., 1997). Το μπισκότο τύπου digestive, υποκατηγορία των μπισκότων τύπου short-dough, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη αλεύρου ολικής άλεσης. Σύμφωνα με τους Cauvain & Young (2006), σε μία τυπική συνταγή μπισκότου τύπου digestive περιέχεται περίπου 22% άλευρο ολικής άλεσης, 31% φυτικό έλαιο, 24% ζάχαρη, 1,1% αλάτι, 1,6% διττανθρακική σόδα, 1,7% τρυγικό οξύ και 14,3% νερό σε βάση αλεύρου. Η περιεκτικότητα του αλεύρου ολικής άλεσης (WWF) στα μπισκότα αυτά θα μπορούσε να αυξηθεί αν γινόταν υποκατάσταση του αλεύρου μπισκοτοποιίας (BF) με κονιορτοποιημένο WWF, βελτιώνοντας έτσι τα οργανοληπτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων μπισκότων, αποφεύγοντας την αμμώδη υφή.

Μέχρι τώρα, πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην επίδραση της αύξησης της περιεκτικότητας διαιτητικών ινών στην ποιότητα των μπισκότων. Οι Vrataniina and Zabik (1978) μελέτησαν τη δυνατότητα παραγωγής μπισκότων πλούσιων σε φυτικές ίνες. Σύμφωνα με αυτούς, το πίτυρο δεν επέδρασε σημαντικά στην υφή, αλλά μείωσε το άπλωμα, μείωσε τη φωτεινότητα και έκανε τα μπισκότα λιγότερο τραγανά.

Τα δεδομένα από την οργανοληπτική αξιολόγηση μπισκότων με 10 και 20% υποκατάσταση, έδειξαν ότι το πίτυρο επέδρασε μόνο στο χρώμα των μπισκότων. Ομοίως οι Gujral et al. (2003) μελέτησαν την επίδραση της αντικατάστασης λευκού αλεύρου με πίτυρο (0-10%) και χονδρόκοκκο άλευρο (0-20%) στην ποιότητα των μπισκότων. Το πίτυρο αύξησε τη συνεκτικότητα και την κολλητικότητα της ζύμης, μειώνοντας το άπλωμα και αυξάνοντας τη σκληρότητα των μπισκότων. Επιπλέον, αυξάνοντας το ποσοστό πίτυρου μειώθηκε η συνολική αποδοχή των μπισκότων κατά την οργανοληπτική αξιολόγηση. Αντιθέτως, το χονδρόκοκκο άλευρο βελτίωσε όλα τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων μπισκότων συμπεριλαμβανόμενων των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών.

Σύμφωνα με τους Sudha et al. (2007), παρατηρήθηκε μείωση του απλώματος κατά την ενσωμάτωση κριθαριού, ρυζιού και πίτυρου σίτου σε μπισκότα. Οι Sozer et al. (2014) παρήγαγαν μπισκότα με 5-15% χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο πίτυρο σίτου. Η μείωση της κοκκομετρίας του πίτυρου αύξησε τη σκληρότητα των μπισκότων, τα οποία οπτικά είχαν μια πιο συμπαγή δομή σε σχέση με εκείνα που περιείχαν το χονδρόκοκκο πίτυρο. Επιπλέον, η οργανοληπτική αξιολόγηση έδειξε ότι η τραχύτητα και η κατάρρευση των μπισκότων ήταν σημαντική για τα μπισκότα με υψηλή περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκο πίτυρο. Υπάρχουν πολλά βιβλιογραφικά δεδομένα για την ενίσχυση των μπισκότων σε ίνες, αλλά τα αποτελέσματα διαφέρουν και τα ποσοστά αντικατάστασης είναι σχετικά χαμηλά. Υπάρχει ωστόσο ερευνητικό κενό στην επίδραση της ενσωμάτωσης κονιορτοποιημένου αλεύρου ολικής άλεσης στα μπισκότα, ειδικά σε υψηλά ποσοστά. Το

κύριο πρόβλημα από την ενσωμάτωση υψηλού ποσοστού ινών στα τρόφιμα είναι η αρνητική επίδραση τους στα φυσικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά όπως προκύπτει και από την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ένα σημαντικό μειονέκτημα που αναφέρεται από όλες τις πηγές είναι η μείωση του απλώματος με τη αύξηση των ινών.

Η λεπτή άλεση του πίτουρου σίτου είναι γνωστό ότι δύναται να βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργικότητα της ζύμης κατά το ψήσιμο (Lai et al., 1989). Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι αυτό το φαινόμενο οφείλεται από τη μία στην αυξημένη επιφάνειά του κονιορτοποιημένου πίτουρου και άρα στη γρηγορότερη ενυδάτωσή του και από την άλλη στη μειωμένη ικανότητα αλληλεπίδρασης του πίτουρου με το δίκτυο της γλουτένης (Awika, 2011). Ωστόσο, η άλεση του αλεύρου ολικής άλεσης ίσως έχει μια διαφορετική επίδραση στην ποιότητα των τελικών προϊόντων, επειδή η ταυτόχρονη άλεση όλων των συστατικών του (προτεΐνη, άμυλο, ίνες) θα μπορούσε να ευνοήσει τις αλληλεπιδράσεις τους.

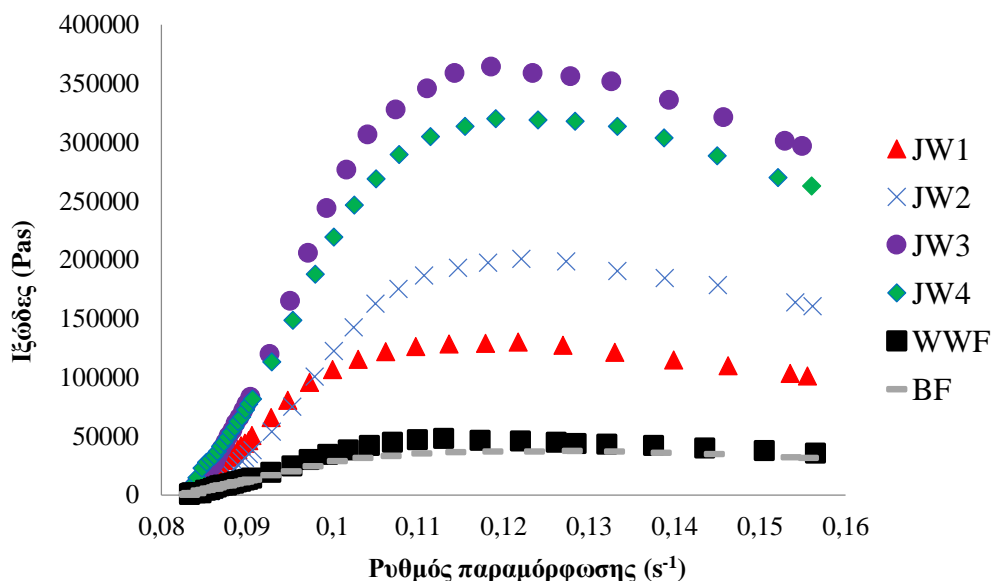
**Πίνακας 6.12 Κωδικοποίηση δειγμάτων και υποκαταστάσεις στο άλευρο μπισκοτοποιίας (BF).**

Κωδικός Δείγματος	Άλευρο Ολικής (%)	Άλευρο μπισκοτοποιίας BF (%)
Αρχικό άλευρο ολική άλεσης		
18 WWF	18,5	81,5
30 WWF	30	70
50 WWF	50	50
80 WWF	80	20
WWF	100	0
Συνθήκες άλεσης: πίεση 4 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 4,51 kg/h		
18 JW1	18,5	81,5
30 JW1	30	70
50 JW1	50	50
80 JW1	80	20
JW1	100	0
Συνθήκες άλεσης: πίεση 8 bar , ρυθμός τροφοδοσίας 5,18 kg/h		
18 JW2	18,5	81,5
30 JW2	30	70
50 JW2	50	50
80 JW2	80	20
JW2	100	0
Συνθήκες άλεσης: πίεση 8 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 2,54 kg/h		
18 JW3	18,5	81,5
30 JW3	30	70
50 JW3	50	50
80 JW3	80	20
JW3	100	0
Συνθήκες άλεσης: σε πίεση 8 bar, ρυθμός τροφοδοσίας 0,67 kg/h.		
18 JW4	18,5	81,5
30 JW4	30	70
50 JW4	50	50
80 JW4	80	20
JW4	100	0
Άλευρο μπισκοτοποιίας		
BF	0	100

Σκοπός της 4<sup>ης</sup> σειράς πειραμάτων ήταν η μελέτη της επίδρασης αλεύρου ολικής άλεσης, κονιοροποιημένου με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα (βλ. Πίνακα 6.8) στα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά μπισκότων τύπου digestive, ώστε να επιτευχθεί μια υψηλή υποκατάσταση αλεύρου μπισκοτοποιίας (BF) από κονιοροποιημένο άλευρο ολικής άλεσης. Το εύρος υποκατάστασης κυμάνθηκε από 0 έως 100% (Πίνακας 6.12) και συνολικά παρήχθησαν 23 διαφορετικές συνταγές. Αρχικά μετρήθηκε το ιξώδες των παραγόμενων ζυμαριών και στη συνέχεια αξιολογήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων μπισκότων. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η υγρασία, το άπλωμα (SF), η δύναμη σπασίματος και το χρώμα τους. Τέλος, πραγματοποιήθηκε οργανοληπτική αξιολόγηση.

#### 6.4.1. Φαινόμενο διαξονικό εκτατικό ιξώδες ζύμης (Apparent biaxial extensional viscosity)

Η συσχέτιση μεταξύ ρυθμού παραμόρφωσης και φαινομένου ιξώδους (ABEV) ζυμών με άλευρα WWF, JW1, JW2, JW3, JW4 και BF σε ποσοστό 100% (χωρίς υποκατάσταση) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16. Το προφίλ ιξώδους ήταν παρόμοιο για όλες τις ζύμες JW. Μια απότομη αρχική αύξηση ακολουθούμενη από μια βαθμιαία αύξηση έως το μέγιστο ιξώδες και στη συνέχεια μια περίοδος μικρής πτώσης του, ολοκληρώνει το προφίλ ιξώδους.



Σχήμα 6.16 Ιξώδες σε συνάρτηση με το ρυθμό παραμόρφωσης για ζυμάρια που παρήχθησαν με BF: άλευρο μπισκοτοποιίας, WWF: άλευρο ολικής άλεσης, JW1: άλευρο ολικής άλεσης κονιοροποιημένο σε πίεση 4 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 4,51 kg/h, JW2: άλευρο ολικής άλεσης κονιοροποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 5,18 kg/h, JW3: άλευρο ολικής άλεσης κονιοροποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 2,54 kg/h, JW4: άλευρο ολικής άλεσης κονιοροποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 0,67 kg/h και με 20% νερό.

Τα ζυμάρια WWF και BF παρουσίασαν παρόμοια προφίλ, με πολύ χαμηλότερο ιξώδες από τα υπόλοιπα δείγματα. Χρησιμοποιώντας μικροαλεσμένα άλευρα παράχθηκαν ζυμάρια με υψηλό φαινόμενο ιξώδες (ABEV). Όσο μικρότερο το μέγεθος της κοκκομετρίας, τόσο μεγαλύτερο το ιξώδες της ζύμης. Τα ιξώδη, που υπολογίστηκαν στη μέγιστη παραμόρφωση ( $0,155 \text{ s}^{-1}$ ) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.13, συσχετίστηκαν σημαντικά με το μέγεθος της κοκκομετρίας ( $r=-0,8966$ ,  $P \leq 0,05$ ) και την WHC ( $r=0,9899$ ,  $P \leq 0,05$ ). Στα παραγόμενα ζυμάρια χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποσότητα νερού ανεξαρτήτως των απαιτήσεων για περισσότερο νερό, σύμφωνα με τις τιμές του WHC. Εξαιτίας της μικροάλεσης, ίνες και άμυλο απεγκλωβίζονται από το πρωτεϊνικό δίκτυο και έτσι γίνονται πιο ικανά να απορροφούν το διαθέσιμο νερό. Όταν το νερό είναι περιορισμένο παράγονται πιο συνεκτικά ζυμάρια, με μεγαλύτερο ιξώδες. Σε αυτή την περίπτωση επίσης το πίτυρο μπορεί να εμποδίσει τη διόγκωση και τη ζελατινοποίηση του αμύλου (Awika, 2011). Οι Angelidis et al. (2016) μάλιστα αναφέρουν αντίθετα ότι το τελικό ιξώδες του ζυμαριού προοδευτικά μειώθηκε αναλογικά με την ένταση της διεργασίας άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.

**Πίνακας 6.13** Ικανότητα συγκράτησης νερού, ιξώδες ζύμης και μέγεθος κοκκομετρίας αλεύρου ( $D_{50}$ ).

Κωδικός δείγματος	Μέγεθος κοκκομετρίας $D_{50}(\mu\text{m})$	Ικανότητα συγκράτησης νερού (WHC) (%)	Ιξώδες ζυμαριού στο μέγιστο ρυθμό παραμόρφωσης ( $\times 10^4 \text{ Pa s}$ )
BF	67,42 <sup>b</sup> ±2,02	72,33 <sup>a</sup> ±0,48	3,12 <sup>a</sup> ±0,12
WWF	84,15 <sup>a</sup> ±2,45	85,64 <sup>b</sup> ±0,61	3,51 <sup>a</sup> ±0,07
JW1	53,49 <sup>c</sup> ±3,38	87,60 <sup>c</sup> ±0,50	10,09 <sup>b</sup> ±0,51
JW2	29,10 <sup>d</sup> ±3,09	90,36 <sup>d</sup> ±0,09	16,02 <sup>c</sup> ±0,16
JW3	17,02 <sup>e</sup> ±1,38	93,70 <sup>f</sup> ±0,73	29,66 <sup>e</sup> ±1,88
JW4	18,11 <sup>e</sup> ±1,73	92,21 <sup>e</sup> ±0,26	26,24 <sup>d</sup> ±0,19

*Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα στην ίδια στήλη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά ( $P \leq 0,05$ ), BF: άλευρο μπισκοτοποιίας, WWF: άλευρο ολικής άλεσης, JW1: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 4 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 4,51 kg/h, JW2: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 5,18 kg/h, JW3: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 2,54 kg/h, JW4: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 0,67 kg/h*

#### 6.4.2. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μπισκότων

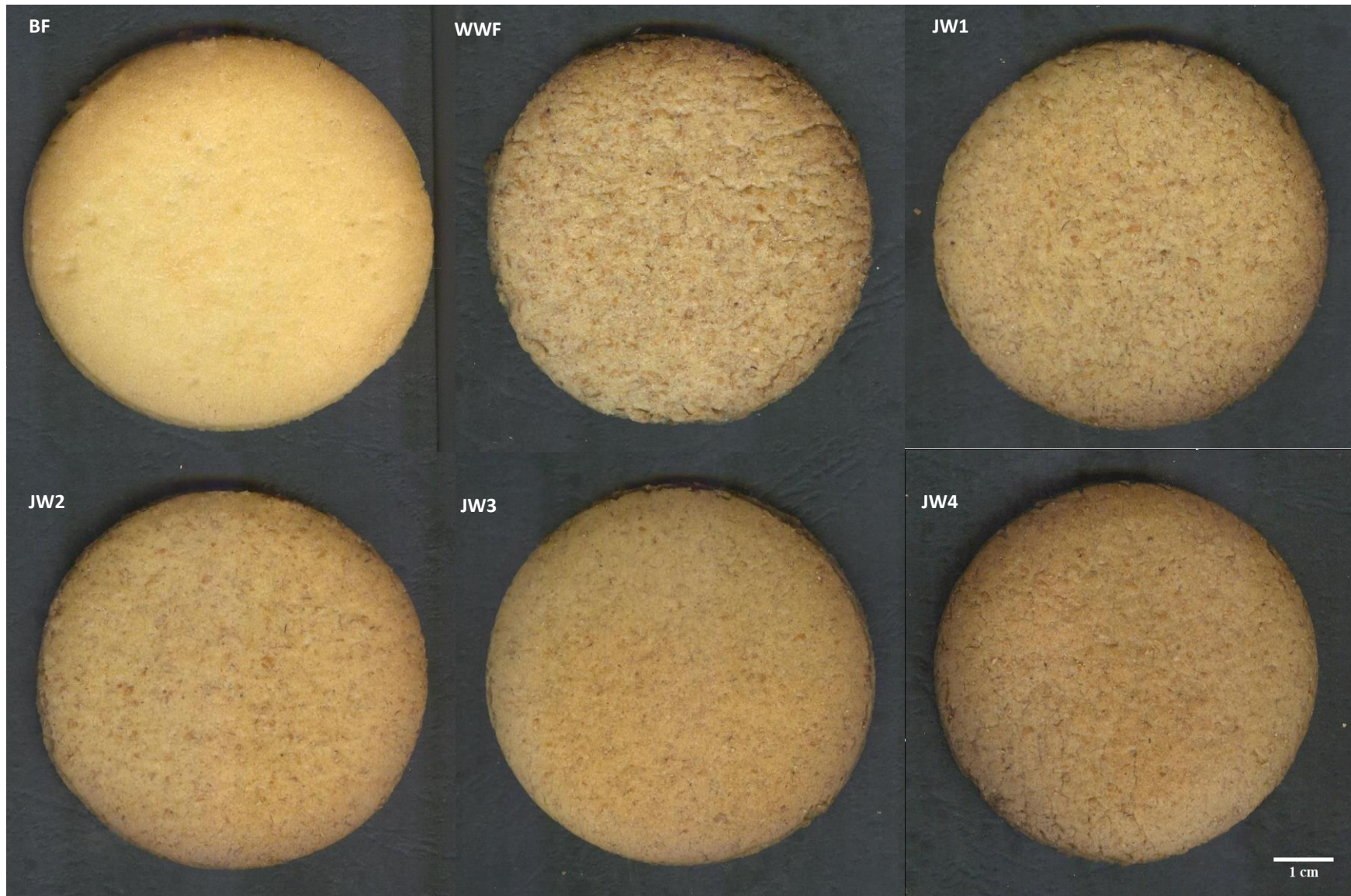
Ενδεικτικές εικόνες των παραγόμενων μπισκότων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.17. Η άλεση του WWF με πεπιεσμένο αέρα άλλαξε τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων μπισκότων όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.14. Αύξηση της υποκατάστασης, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους και την ταυτόχρονη μείωση του πλάτους των μπισκότων. Το πάχος κυμάνθηκε από 0,82 έως 0,99 cm και το πλάτος από 6,3 έως 7 cm. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση το πάχος επιδρά περισσότερο στο άπλωμα (SF) του



Πίνακας 6.14 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά μπισκότων.

Δείγμα	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Πλάτος (cm)	Πάχος (cm)	Άπλωμα	Υγρασία (%)	Δύναμη Σπασίματος (N)	L*	a*	b*
BF	0,47 <sup>a</sup> ±0,03	6,73 <sup>ghij</sup> ±0,21	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	8,08 <sup>ghijk</sup> ±0,25	1,89 <sup>d</sup> ±0,01	9,00 <sup>a</sup> ±0,35	77,19 <sup>o</sup> ±0,17	0,59 <sup>a</sup> ±0,09	37,82 <sup>r</sup> ±0,18
18 WWF	0,51 <sup>abc</sup> ±0,02	6,75 <sup>hijk</sup> ±0,00	0,82 <sup>a</sup> ±0,00	8,27 <sup>ijkl</sup> ±0,00	1,17 <sup>a</sup> ±0,05	15,69 <sup>bcd</sup> ±0,62	68,6 <sup>jk</sup> ±0,31	2,48 <sup>def</sup> ±0,15	33,9 <sup>pq</sup> ±0,11
30 WWF	0,53 <sup>abcd</sup> ±0,01	6,76 <sup>hijk</sup> ±0,01	0,82 <sup>a</sup> ±0,00	8,28 <sup>iklm</sup> ±0,01	1,46 <sup>bc</sup> ±0,12	15,38 <sup>bcd</sup> ±0,18	69,32 <sup>jk</sup> ±0,27	2,02 <sup>bcd</sup> ±0,37	32,44 <sup>lm</sup> ±0,30
50 WWF	0,52 <sup>abcd</sup> ±0,01	6,88 <sup>kl</sup> ±0,18	0,83 <sup>ab</sup> ±0,01	8,34 <sup>klm</sup> ±0,33	1,31 <sup>abc</sup> ±0,05	18,50 <sup>cdef</sup> ±0,71	69,64 <sup>kl</sup> ±0,22	2,53 <sup>def</sup> ±0,34	31,44 <sup>jk</sup> ±0,36
80 WWF	0,54 <sup>abcde</sup> ±0,01	6,70 <sup>ghi</sup> ±0,00	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	8,04 <sup>ghijk</sup> ±0,00	2,22 <sup>f</sup> ±0,19	17,75 <sup>bcd</sup> ±2,12	66,31 <sup>gh</sup> ±0,12	2,67 <sup>def</sup> ±0,05	29,81 <sup>f</sup> ±0,39
WWF	0,49 <sup>ab</sup> ±0,16	6,30 <sup>a</sup> ±0,00	0,99 <sup>e</sup> ±0,01	6,36 <sup>a</sup> ±0,08	3,07 <sup>ij</sup> ±0,16	24,38 <sup>ghi</sup> ±1,94	62,28 <sup>e</sup> ±0,83	3,25 <sup>gh</sup> ±0,87	25,63 <sup>d</sup> ±0,48
18 JW1	0,56 <sup>bcd</sup> ±0,01	6,89 <sup>k</sup> ±0,04	0,82 <sup>a</sup> ±0,02	8,44 <sup>lm</sup> ±0,20	1,27 <sup>abc</sup> ±0,00	16,69 <sup>bcd</sup> ±3,27	70,36 <sup>lm</sup> ±0,35	1,04 <sup>b</sup> ±0,23	32,07 <sup>kl</sup> ±0,30
30 JW1	0,56 <sup>bcd</sup> ±0,01	7,00 <sup>±0,00</sup>	0,82 <sup>a</sup> ±0,00	8,57 <sup>m</sup> ±0,00	2,94 <sup>hi</sup> ±0,02	14,50 <sup>b</sup> ±0,35	71,51 <sup>n</sup> ±0,76	1,51 <sup>b</sup> ±0,29	33,61 <sup>op</sup> ±0,47
50 JW1	0,62 <sup>ghij</sup> ±0,02	6,73 <sup>ghij</sup> ±0,02	0,84 <sup>abcd</sup> ±0,01	8,00 <sup>ghij</sup> ±0,14	3,45 <sup>kl</sup> ±0,20	31,50 <sup>i</sup> ±2,65	66,68 <sup>h</sup> ±0,23	2,64 <sup>ef</sup> ±0,78	30,41 <sup>gh</sup> ±0,25
80 JW1	0,59 <sup>cdef</sup> ±0,03	6,73 <sup>ghij</sup> ±0,02	0,91 <sup>f</sup> ±0,01	7,42 <sup>bcd</sup> ±0,12	3,42 <sup>ijkl</sup> ±0,26	31,81 <sup>j</sup> ±2,21	62,21 <sup>e</sup> ±0,66	3,56 <sup>h</sup> ±0,33	30,31 <sup>gh</sup> ±0,92
JW1	0,57 <sup>cdef</sup> ±0,01	6,51 <sup>bcd</sup> ±0,01	0,89 <sup>ef</sup> ±0,01	7,30 <sup>bc</sup> ±0,11	3,83 <sup>±0,28</sup>	32,60 <sup>±1,91</sup>	39,20 <sup>a</sup> ±0,40	5,67 <sup>lmn</sup> ±0,43	17,7 <sup>a</sup> ±0,47
18 JW2	0,56 <sup>bcd</sup> ±0,01	6,58 <sup>def</sup> ±0,12	0,83 <sup>ab</sup> ±0,01	7,98 <sup>fgh</sup> ±0,03	2,34 <sup>f</sup> ±0,05	19,00 <sup>def</sup> ±0,53	70,12 <sup>lm</sup> ±0,54	2,17 <sup>cde</sup> ±0,21	34,36 <sup>q</sup> ±0,12
30 JW2	0,54 <sup>abcde</sup> ±0,05	6,75 <sup>hijk</sup> ±0,00	0,84 <sup>abcd</sup> ±0,01	8,02 <sup>ghij</sup> ±0,11	2,02 <sup>de</sup> ±0,35	16,75 <sup>bcd</sup> ±0,88	68,33 <sup>ij</sup> ±0,33	2,94 <sup>fgh</sup> ±0,06	32,22 <sup>lm</sup> ±0,28
50 JW2	0,58 <sup>cdef</sup> ±0,04	6,54 <sup>cde</sup> ±0,06	0,85 <sup>bcd</sup> ±0,02	7,70 <sup>def</sup> ±0,28	2,15 <sup>def</sup> ±0,12	20,88 <sup>ef</sup> ±1,24	62,46 <sup>e</sup> ±0,22	4,43 <sup>ij</sup> ±0,24	30,14 <sup>fg</sup> ±0,38
80 JW2	0,60 <sup>def</sup> ±0,00	6,46 <sup>bcd</sup> ±0,06	0,87 <sup>de</sup> ±0,00	7,45 <sup>bcd</sup> ±0,07	2,2 <sup>ef</sup> ±0,21	28,06 <sup>ij</sup> ±2,21	59,83 <sup>d</sup> ±0,04	5,29 <sup>kl</sup> ±0,13	28,73 <sup>e</sup> ±0,19
JW2	0,60 <sup>def</sup> ±0,03	6,41 <sup>abc</sup> ±0,01	0,86 <sup>cd</sup> ±0,01	7,47 <sup>bcd</sup> ±0,12	3,15 <sup>ijh</sup> ±0,01	35,63 <sup>k</sup> ±0,18	54,71 <sup>c</sup> ±0,52	6,23 <sup>a</sup> ±0,45	24,72 <sup>c</sup> ±0,84
18 JW3	0,55 <sup>abcde</sup> ±0,01	6,83 <sup>ijk</sup> ±0,00	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	8,20 <sup>hijkl</sup> ±0,00	1,09 <sup>a</sup> ±0,05	15,63 <sup>bcd</sup> ±1,77	71,02 <sup>m</sup> ±0,00	1,58 <sup>bc</sup> ±0,15	33,6 <sup>op</sup> ±0,31
30 JW3	0,53 <sup>abcde</sup> ±0,05	6,67 <sup>fgh</sup> ±0,00	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	8,00 <sup>ghij</sup> ±0,00	1,51 <sup>c</sup> ±0,08	14,88 <sup>bc</sup> ±0,18	67,42 <sup>hi</sup> ±0,04	3,37 <sup>h</sup> ±0,06	33,44 <sup>nop</sup> ±0,15
50 JW3	0,61 <sup>efghij</sup> ±0,03	6,63 <sup>efgh</sup> ±0,18	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	8,00 <sup>fgh</sup> ±0,21	1,92 <sup>g</sup> ±0,08	22,06 <sup>fgh</sup> ±3,98	64,31 <sup>f</sup> ±0,26	4,18 <sup>i</sup> ±0,25	30,78 <sup>hi</sup> ±0,40
80 JW3	0,64 <sup>efghij</sup> ±0,00	6,52 <sup>bcd</sup> ±0,02	0,86 <sup>cd</sup> ±0,01	7,60 <sup>cde</sup> ±0,08	2,61 <sup>de</sup> ±0,02	24,00 <sup>gh</sup> ±3,01	61,35 <sup>e</sup> ±0,08	4,23 <sup>i</sup> ±0,13	28,75 <sup>e</sup> ±0,13
JW3	0,62 <sup>hij</sup> ±0,01	6,38 <sup>ab</sup> ±0,06	0,86 <sup>cd</sup> ±0,01	7,43 <sup>bcd</sup> ±0,03	3,02 <sup>gh</sup> ±0,28	39,70 <sup>±2,33</sup>	41,07 <sup>b</sup> ±0,17	4,71 <sup>ijk</sup> ±0,32	17,45 <sup>a</sup> ±0,40
18 JW4	0,57 <sup>cdef</sup> ±0,02	6,73 <sup>ghij</sup> ±0,02	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	8,08 <sup>ghijk</sup> ±0,03	2,61 <sup>g</sup> ±0,10	17,00 <sup>bcd</sup> ±0,18	68,53 <sup>jk</sup> ±0,48	3,53 <sup>h</sup> ±0,22	32,85 <sup>m</sup> ±0,40
30 JW4	0,57 <sup>cdef</sup> ±0,01	6,71 <sup>ghi</sup> ±0,06	0,85 <sup>bcd</sup> ±0,02	7,79 <sup>fg</sup> ±0,29	1,81 <sup>ab</sup> ±0,01	16,06 <sup>bcd</sup> ±0,09	65,33 <sup>g</sup> ±0,4	4,86 <sup>jk</sup> ±0,02	33,29 <sup>no</sup> ±0,17
50 JW4	0,59 <sup>def</sup> ±0,04	6,71 <sup>ghi</sup> ±0,06	0,85 <sup>bcd</sup> ±0,00	7,89 <sup>efg</sup> ±0,07	2,68 <sup>gh</sup> ±0,14	24,69 <sup>hi</sup> ±3,09	62,43 <sup>e</sup> ±0,48	5,14 <sup>k</sup> ±0,05	31,23 <sup>ij</sup> ±0,42
80 JW4	0,64 <sup>ij</sup> ±0,01	6,50 <sup>bcd</sup> ±0,12	0,89 <sup>ef</sup> ±0,04	7,29 <sup>b</sup> ±0,08	4,56 <sup>m</sup> ±0,29	44,19 <sup>m</sup> ±0,09	60,55 <sup>d</sup> ±0,62	5,62 <sup>lm</sup> ±0,07	30,62 <sup>gh</sup> ±0,55
JW4	0,67 <sup>±0,01</sup>	6,30 <sup>±0,05</sup>	0,83 <sup>abc</sup> ±0,00	7,56 <sup>bcd</sup> ±0,03	4,7 <sup>m</sup> ±0,19	46,50 <sup>m</sup> ±0,54	40,07 <sup>ab</sup> ±0,21	6,16 <sup>mn</sup> ±0,20	18,7 <sup>b</sup> ±0,30

Δείγματα με το ίδιο γράμμα στη στήλη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά ( $P \leq 0,05$ ), BF: άλευρο μπισκοτοποιίας, WWF: άλευρο ολικής άλεσης, JW1: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 4 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 4,51 kg/h, JW2: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 5,18 kg/h, JW3: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 2,54 kg/h, JW4: άλευρο ολικής άλεσης κονιορτοποιημένο σε πίεση 8 bar και ρυθμό τροφοδοσίας 0,67 kg/h



Σχήμα 6.17 Ενδεικτικές εικόνες από τα παραγόμενα μπισκότα.

μπισκότου από ότι αντίστοιχα επιδρά το πλάτος ( $r=-0,9122$  και  $r=0,8437$ ,  $P\leq 0,05$ , αντίστοιχα). Η μικρότερη τιμή απλώματος καταγράφηκε στο δείγμα WWF (6,36), ενώ μεγαλύτερη στο δείγμα 30JW1 (8,57). Στο 100% υποκατάσταση όλα τα μικροαλεσμένα άλευρα έδωσαν μπισκότα με υψηλότερες τιμές απλώματος από ότι το WWF. Στα δείγματα με JW και 80% υποκατάσταση, οι τιμές απλώματος δεν διαφοροποιήθηκαν σημαντικά σε σχέση με τα αντίστοιχα μπισκότα με 100% υποκατάσταση. Αντίθετα τα 80WWF και 50WWF παρουσίασαν σαφή βελτίωση σε σχέση με το WWF σημειώνοντας μέγιστες τιμές απλώματος για τις υποκαταστάσεις σε βαθμό 80 και 50%, 8,04 και 8,34 αντίστοιχα. Στο 50% υποκατάσταση τα δείγματα JW δεν διαφοροποιήθηκαν μεταξύ τους σημαντικά ως προς το άπλωμα.

Η πυκνότητα των μπισκότων αυξήθηκε στα δείγματα με μικροαλεσμένα άλευρα. Οι Sozer et al. (2014) παρατήρησαν μια παρόμοια τάση για μπισκότα που παράχθηκαν με κονιορτοποιημένο πίτυρο. Όσον αφορά την υγρασία, αυξήθηκε με την αύξηση της υποκατάστασης. Η πυκνότητα συσχετίστηκε σημαντικά με την υγρασία ( $r=0,6480$ ,  $P\leq 0,05$ ) και το επίπεδο υποκατάστασης ( $r=0,4472$ ,  $P\leq 0,05$ ), γεγονός που πιστοποιεί τα προηγούμενα αποτελέσματα για την αύξηση της πυκνότητας στα δείγματα με άλευρα μικρότερης κοκκομετρίας και υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία.

Επιπλέον, τα πίτυρα επανασυνδέονται με το άμυλο μετά το ψήσιμο, επιφέροντας περαιτέρω επιπτώσεις στην υφή, αφού οι φυτικές ίνες εμποδίζουν τη διόγκωση των αμυλόκοκκων και τη ζελατινοποίησή τους (Awika, 2011). Είναι γνωστό, στην επιστήμη των υλικών (Gibson & Ashby, 1997, Rush, 1970), ότι η αντοχή ενός πλέγματος εξαρτάται αναλογικά από την πυκνότητά του. Σύμφωνα με τον Ashby (2006), μπορεί να παρατηρηθεί συμπίεση ή εφελκυσμός όταν ένα πλέγμα με μορφή αφρού υποστεί μια τάση. Μία δομή όπου επικρατεί η κάμψη, υποδηλώνει ένα πλέγμα χαμηλής συνεκτικότητας χαρακτηριζόμενο από ένα αφρώδες υλικό (π.χ. 10% στερεών στον συνολικό όγκο), ενώ μία δομή όπου κυριαρχεί το τέντωμα θα μπορούσε να έχει την ίδια πυκνότητα σε ένα πιο πολύπλοκο πλέγμα όπως εκείνο που διασταυρώνεται πλήρως.

Η δύναμη κατάρρευσης είναι πολύ μεγαλύτερη, όταν η παραμόρφωση περιλαμβάνει «σκληρά» μέσα, τάση και συμπίεση. Σε τέτοιες δομές, σε μία ιδανική κατάσταση η δύναμη κατάρρευσης παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση με την πυκνότητα. Τα μπισκότα με λεπτόκοκκο άλευρο σε υψηλά επίπεδα υποκατάστασης μπορούν να χαρακτηριστούν ως εύθραυστες δομές πλησιάζοντας τη δομή όπου κυριαρχεί το τέντωμα. Η αύξηση της πυκνότητάς τους είναι ενδεικτική μιας συμπακνωμένης δομής που έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την απότομη αύξηση στη δύναμη κατάρρευσης, ανεξάρτητα από το ποσοστό υγρασίας τους.

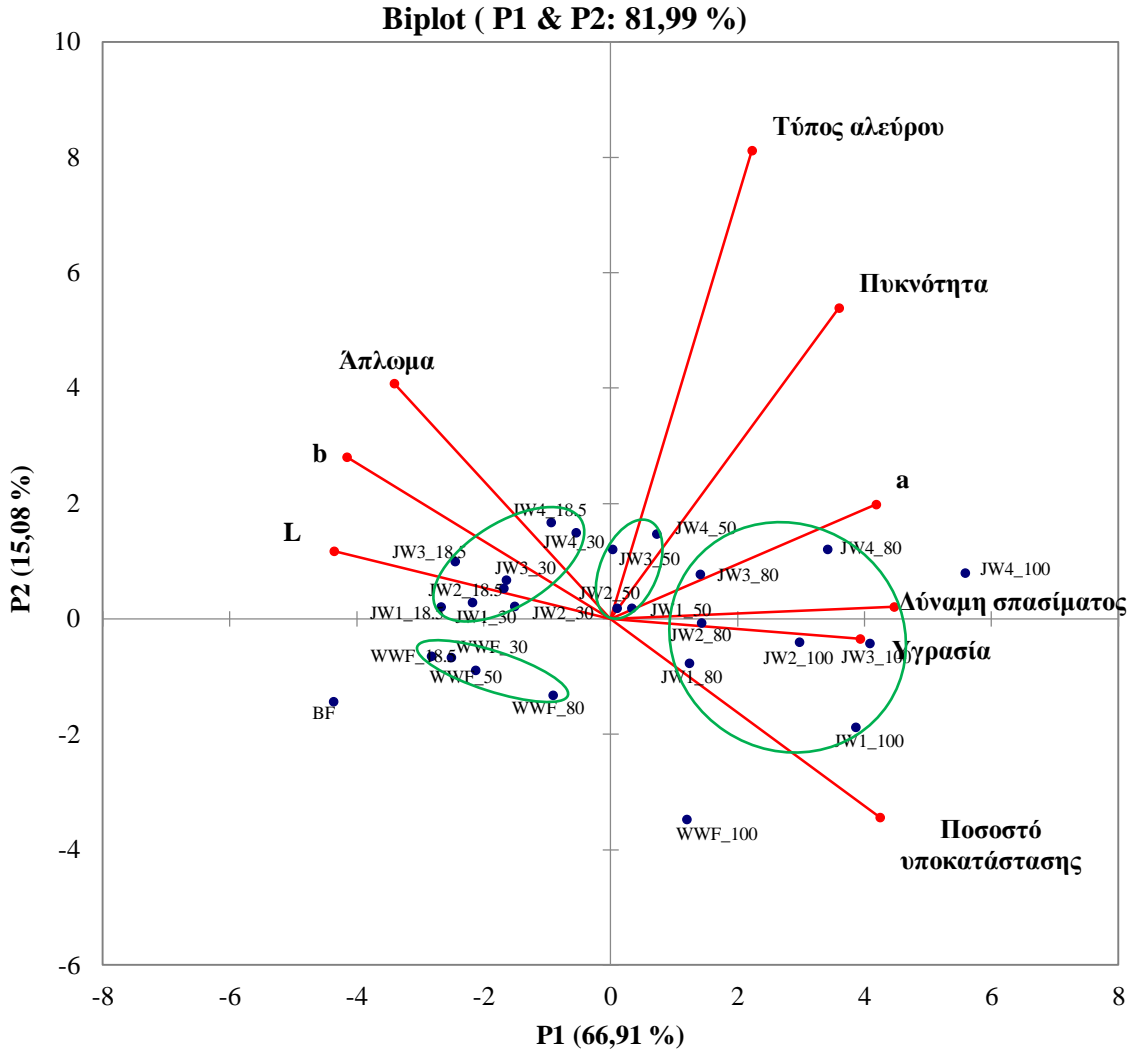
Η δύναμη σπασίματος συσχετίστηκε θετικά με την υγρασία ( $r=0,8540$ ,  $P\leq 0,05$ ) και αυξήθηκε με την υποκατάσταση του BF ( $r=0,7924$ ,  $P\leq 0,05$ ), κάτι που φαίνεται αντιφατικό αλλά δικαιολογείται από την αύξηση πυκνότητας, η οποία επίσης συσχετίστηκε σημαντικά θετικά με τη δύναμη σπασίματος ( $r=0,7443$ ,  $P\leq 0,05$ ) και συνεκτικότητας τόσο των ζυμαριών όσο και των παραγόμενων μπισκότων. Αυτή η αύξηση

θα μπορούσε να συσχετιστεί επίσης με την περιεκτικότητα σε ίνες. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν από τους Sudha et al. (2007), οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση των ινών διαφόρων δημητριακών στα ρεολογικά χαρακτηριστικά ζυμαριών με άλευρο σίτου και στην ποιότητα των μπισκότων.

Μεταξύ των δειγμάτων JW, το JW4 παρουσίασε τη μεγαλύτερη δύναμη σπασίματος στα υψηλά ποσοστά υποκατάστασης (44,19 και 46,5 N για τα δείγματα 80JW4 και JW4 αντίστοιχα), ενδεικτικό μια πυκνής δομής. Τα λεπτόκοκκα άλευρα, σε υψηλά ποσοστά υποκατάστασης, προκαλούν μείωση της πλήρους ενυδάτωσης του ζυμαριού, αφού υπάρχει μεγαλύτερος ανταγωνισμός για την πρόσληψη του περιορισμένου νερού από άλλα συστατικά όπως πρωτεΐνη και άμυλο. Οι Kuakpetoon et al. (2001) παρατήρησαν ότι μίγμα αλεύρου σίτου που περιείχε κόκκους με μικρότερο μέγεθος, πιο σφαιρικούς και λιγότερο ακανόνιστους απαιτούσε αυξημένους χρόνους ανάμιξης σε σχέση με το άλευρο που περιείχε μεγαλύτερους, πιο ακανόνιστους και τραχύτερους κόκκους.

Όσον αφορά το χρώμα, το δείγμα BF παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές  $L^*$  και  $b^*$  και τη χαμηλότερη  $a^*$ . Η υποκατάσταση μείωσε τη φωτεινότητα και το κίτρινο χρώμα, σε αντίθεση με το κόκκινο που αυξήθηκε. Το σκούρο χρώμα στα μπισκότα είναι αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης ινών, όπως αναφέρεται από τους Raymundo et al. (2014). Τα μπισκότα JW4 είχαν το πιο σκούρο χρώμα. Η πιο σημαντική παράμετρος του χρώματος ήταν το  $a$ , αφού συσχετίστηκε σημαντικά με την πλειοψηφία των υπολοίπων χαρακτηριστικών των μπισκότων. Η αντίδραση Maillard είναι κυρίως υπεύθυνη για την ανάπτυξη του χρώματος στην επιφάνεια των προϊόντων αρτοποιίας σε θερμοκρασίες μικρότερες των 150 °C, ενώ η καραμελοποίηση λαμβάνει χώρα όταν η επιφάνεια ξεπεράσει τους 150 °C (Hadiyant et al., 2007). Είναι γνωστό ότι τα άλευρα μπισκοτοποιίας χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη <9% (Edwards, 2007). Μεγαλύτερο ποσοστό σε άλευρο ολικής άλεσης –συμβατικό ή κονιορτοποιημένο– στα μπισκότα οδήγησε σε υψηλότερο ποσοστό πρωτεΐνης που συσχετίζεται με την αντίδραση Maillard στην οποία αποδίδεται το κόκκινο χρώμα στην επιφάνεια των μπισκότων (Sozer et al., 2014). Σύμφωνα με τους Broyart et al. (1998) αύξηση της συγκέντρωσης των αναγόντων σακχάρων προκαλούν την ανάπτυξη του χρώματος εξαιτίας της αντίδρασης Maillard ή της καραμελοποίησης των σακχάρων. Η πρόσφατη έρευνα των Wang et al. (2016) έδειξε ότι η αύξηση του κατεστραμμένου αμύλου συσχετίζεται θετικά με την αύξηση των αναγόντων σακχάρων, γεγονός που δικαιολογεί την ανάπτυξη του χρώματος στα JM δείγματα, αφού είναι δεδομένο ότι το κατεστραμμένο άμυλο είναι αυξημένο στα μικροαλεσμένα άλευρα σε σχέση με το αρχικό. Τέλος, αυξάνοντας το ποσοστό του JW η πυκνότητα των μπισκότων αυξήθηκε, όπως αναφέρεται παραπάνω, επιδρώντας επίσης στις χρωματικές παραμέτρους  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$  σε σημαντικό βαθμό  $r=-0,5471$ ,  $r=0,6216$  και  $r=-0,4344$ ,  $P\leq 0,05$ , αντίστοιχα.

Το υψηλό ιξώδες των ζυμαριών με τα πιο λεπτόκοκκα άλευρα υποδηλώνει περιορισμένη ποσότητα νερού. Πρακτικά ο χρόνος ψησίματος θα μπορούσε να μειωθεί, αυξάνοντας το κέρδος και πιθανότατα βελτιώνοντας το χρώμα των τελικών μπισκότων.



**Σχήμα 6.18** Ανάλυση κύριων συνιστωσών με βάση τις τιμές των φυσικών ιδιοτήτων μπισκότων που περιείχαν WWF ή κονιορτοποιημένα WWF με πεπιεσμένο αέρα και BF σε διάφορα ποσοστά υποκατάστασης.

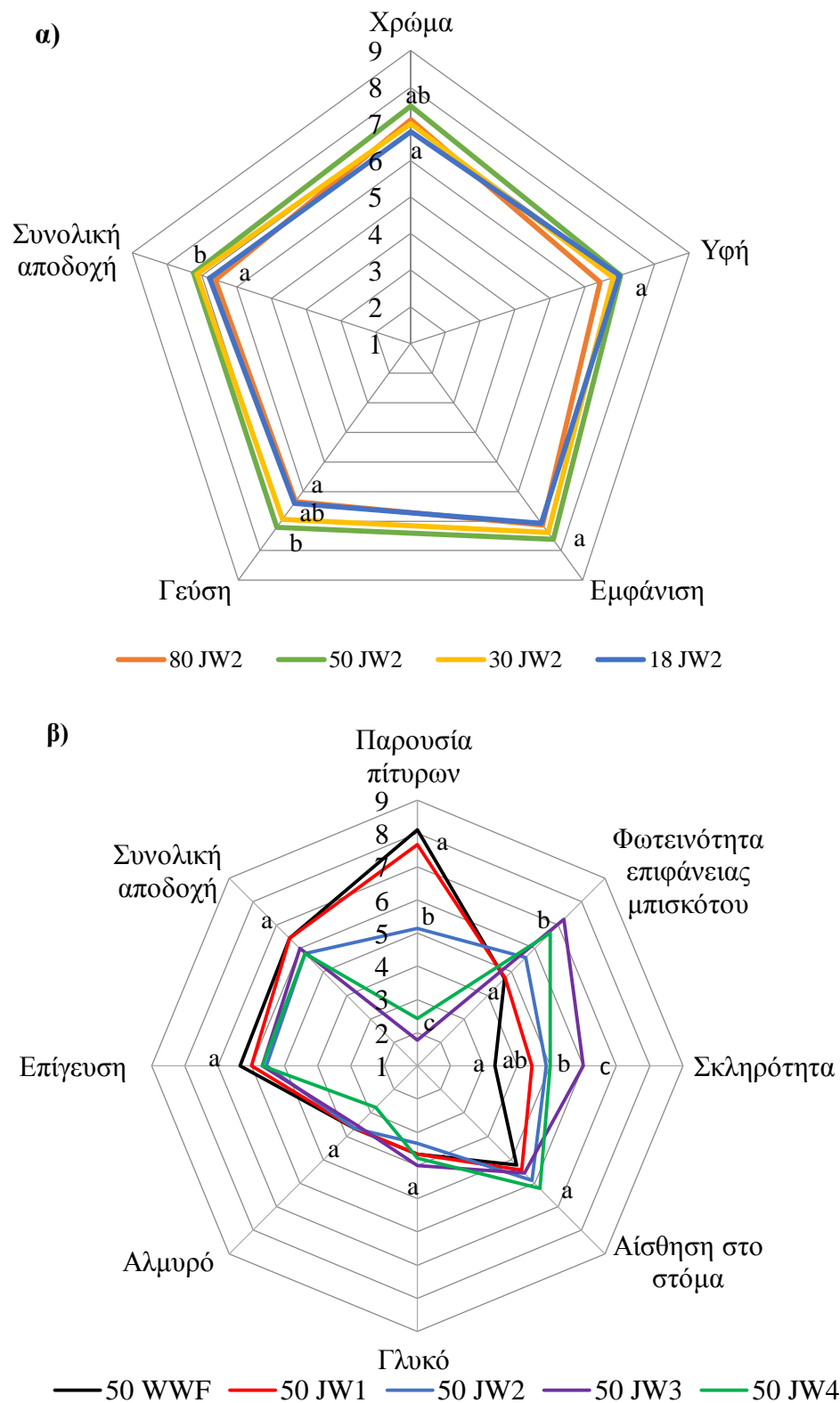
Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA) που πραγματοποιήθηκε για όλα τα δείγματα και εξήγησε το 81,99% της διακύμανσης του συνόλου των δεδομένων. Η πρώτη κύρια συνιστώσα (P1) διαχωρίζει εμφανώς τα μπισκότα με βάση το ποσοστό υποκατάστασης του BF. Ως εκ τούτου, η πρώτη συνιστώσα (66,91%) ορίστηκε κυρίως από το επίπεδο της υποκατάστασης, την περιεχόμενη υγρασία, τη δύναμη σπασίματος και το χρώμα, ενώ ο τύπος αλεύρου, η πυκνότητα και το άπλωμα συνεισέφεραν κυρίως στη δεύτερη συνιστώσα (15,08%). Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι τα μπισκότα με τα λεπτοαλεσμένα άλευρα διαχωρίστηκαν κυρίως βάσει του βαθμού υποκατάστασης, αφού τα δείγματα με 18,5 και 30% υποκατάσταση συγκεντρώθηκαν στα αριστερά του άξονα P1, τα δείγματα με 50% υποκατάσταση συγκεντρώθηκαν στο κέντρο

και πολύ κοντά στον άξονα P1 και τα δείγματα με 80 και 100% υποκατάσταση μετατοπίστηκαν προς το δεξί τμήμα του διαγράμματος. Το PCA φανέρωσε ότι τα δείγματα WWF και BF παρουσίασαν μια διαφορετική τάση. Σχεδόν όλα τα δείγματα με WWF (εκτός από το WWF, δηλαδή με 100% υποκατάσταση) δημιούργησαν μια ομάδα στο κάτω τμήμα του P1. Το δείγμα WWF παρουσιάστηκε στο κάτω δεξιά μέρος του διαγράμματος, συμβάλλοντας σημαντικά στο P2, υποδεικνύοντας ότι αυτό το ποσοστό υποκατάστασης άλλαξε σημαντικά τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων μπισκότων. Το δείγμα BF επίσης δημιούργησε μία ξεχωριστή ομάδα. Το JW4 συνέβαλε σημαντικά στο P1 και παρουσίασε διαφορετική τάση. Συμπερασματικά, για τα JW μπισκότα η υποκατάσταση έως 30% εξηγήθηκε καλύτερα από τους παράγοντες  $L^*$ ,  $b^*$  και άπλωμα, όσο αυξανόταν το ποσοστό υποκατάστασης και φτάνοντας στο 80-100% οι παράγοντες υγρασία και δύναμη σπασίματος έγιναν σημαντικότεροι.

#### 6.4.3. Οργανοληπτική αξιολόγηση μπισκότων

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι το άπλωμα είναι ένα σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό για την αξιολόγηση των μπισκότων και ότι δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τα διαφορετικά JW άλευρα, το JW2 επιλέχτηκε ενδεικτικά, ως ενδιάμεση κοκκομετρία, με σκοπό τον καθορισμό της βέλτιστης υποκατάστασης σε BF. Ως εκ τούτου, κατά το πρώτο στάδιο της οργανοληπτικής αξιολόγησης επιλέχτηκε το δείγμα 50JW2 (Σχήμα 6.19α). Τα δείγματα δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά στην υφή και την εμφάνιση. Ωστόσο, οι δοκιμαστές βρήκαν διαφορές στο χρώμα, στη γεύση και στη συνολική αποδοχή, τα οποία καθορίστηκαν από το ποσοστό υποκατάστασης.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου σταδίου της οργανοληπτικής αξιολόγησης φαίνονται στο Σχήμα 6.19β. Οι διαφορετικές συνθήκες άλεσης δεν επηρέασαν την επίγευση, την αίσθηση στο στόμα, την αλμυρότητα και τη γλυκύτητα των μπισκότων, ενώ αντίθετα επέδρασαν σημαντικά στο χρώμα, τη σκληρότητα και την παρουσία πίτυρου. Υψηλής έντασης άλεση (δείγματα 50JW3 και 50JW4) είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή πιο σκουρόχρωμων μπισκότων και τη λιγότερο εμφανή παρουσία πίτυρου (Σχήμα 6.19). Τα μπισκότα με 50JW2 παρουσίασαν σημαντική μείωση στην παρουσία πίτυρου χωρίς όμως να επηρεάζεται το χρώμα, το οποίο δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά από το 50WWF. Όσον αφορά τη σκληρότητα ήταν σημαντικά αυξημένη στο δείγμα 50JW3, ενώ το 50JW2 είχε παρόμοια σκληρότητα με το 50WWF. Συνοψίζοντας, το δείγμα 50JW2 παρουσίασε σημαντική μείωση των πιτύρων σε σχέση με το 50WWF (μη κονιορτοποιημένο άλευρο) και το 50JW1 (άλευρο που είχε υποστεί την πιο ήπια μικροάλεση) ενώ ταυτόχρονα η φωτεινότητά του δεν μειώθηκε σημαντικά και η σκληρότητά του δεν παρουσίασε σημαντική αύξηση, υποδεικνύοντας βελτιωμένο οργανοληπτικό προφίλ σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα.



Σχήμα 6.19 Οργανοληπτική αξιολόγηση μπισκότων α) με JW2 και διαφορετικές υποκαταστάσεις BF (18,5, 30, 50 και 80%) και β) με 50% υποκατάσταση BF από WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4.

#### 6.4.4. Συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης έδειξαν ότι το ιξώδες του ζυμαριού αυξήθηκε στα μικροαλεσμένα άλευρα ολικής άλεσης, κάτι που επίσης συνέβη με τη σκληρότητα των μπισκότων. Πιο συγκεκριμένα, δείγματα με 100% υποκατάσταση ήταν πολύ σκληρά. Μία αυξημένη αλληλεπίδραση του πίτυρου με το άμυλο και τη γλουτένη θα μπορούσε να δικαιολογήσει τις αλλαγές στην υφή, όπως και η αύξηση στο WHC. Επίσης η πυκνότητα των δειγμάτων αυτών είχε μία τάση αύξησης. Παρόλα αυτά, αποδεκτά προϊόντα μπόρεσαν να παραχθούν σε χαμηλότερα επίπεδα υποκατάστασης, έως 50% που είναι ένα υψηλό ποσοστό σε σχέση με τα εμπορικά μπισκότα όπου το ποσοστό αλεύρου ολικής άλεσης δεν ξεπερνά το 25%. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης των μικροαλεσμένων αλεύρων ολικής άλεσης είναι η βελτίωση της ιδιότητας του απλώματος των μπισκότων (100% υποκατάσταση). Η συγκεκριμένη ιδιότητα είναι βασικός ποιοτικός παράγοντας των μπισκότων και πολλοί ερευνητές στο παρελθόν παρατήρησαν σημαντική μείωση του απλώματος κατά την ενσωμάτωση ινών σε μπισκότα. Μία υψηλής έντασης διεργασία (χαμηλό ρυθμό τροφοδοσίας ή/ και ανατροφοδότηση), δείγματα JW3 και JW4, μπορεί να είναι δαπανηρή χωρίς τελικά να αποδεικνύεται ευεργετική για τη βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων μπισκότων. Τα μπισκότα στην παρούσα μελέτη παρήχθησαν με την ίδια ποσότητα νερού ανεξαρτήτως τις ανάγκες των διαφορετικών αλεύρων. Πιθανόν μια αύξηση στην περιεκτικότητα νερού στο ζυμάρι ή/ και βελτιστοποίηση της διεργασίας της ανάμιξης θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω την ποιότητα των μπισκότων που περιέχουν μικροαλεσμένο άλευρο ολικής άλεσης.



## 6.5. Παραγωγή άρτου με άλευρο σίτου ολικής περασμένο από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κατανάλωση προϊόντων ολικής άλεσης είναι ευεργετική για την ανθρώπινη υγεία. Παρόλο αυτά σε πολλές περιπτώσεις οι καταναλωτές δεν προτιμούν άρτους ολικής άλεσης εξαιτίας της μικρότερης διόγκωσής τους, της πιο τραχιάς υφής τους και του γρηγορότερου μπαγιατέματος (Gan et al., 1992, Zhang & Moore, 1999). Ως εκ τούτου, απαιτούνται κάποιες τεχνολογικές παρεμβάσεις, ώστε οι άρτοι ολικής άλεσης να ανταποκρίνονται στα κριτήρια των καταναλωτών.

Η διεργασία της άλεσης θεωρείται ζωτικής σημασίας για την παραγωγή αλεύρων ολικής άλεσης και είναι ένας από τους αποτελεσματικούς τρόπους για να μειωθεί η αρνητική επίδραση του πίτυρου και του εμβρύου στο τελικό προϊόν (Wang et al., 2002). Το μέγεθος του πίτυρου είναι ένας παράγοντας που επιδρά σημαντικά στο σχηματισμό του δικτύου γλουτένης και στην ποιότητα του άρτου (Noort et al., 2010). Τα πίτυρα μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το σχηματισμό του δικτύου γλουτένης, μειώνοντας την ανθεκτικότητά της, εξασθενώντας τα τοιχώματα των σχηματιζόμενων κελιών αέρα και κατά συνέπεια αποτρέποντας τον εγκλωβισμό των παραγόμενων αερίων. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν με τη σειρά τους να οδηγήσουν σε χαμηλό ειδικό όγκο άρτου και σε γενικά χαμηλής ποιότητας αρτοποιήση (Gan et al., 1992). Άλλες έρευνες έδειξαν ότι άρτοι που παρήχθησαν με χρήση λεπτόκοκκου πίτυρου είχαν μεγαλύτερο όγκο σε σχέση με εκείνα που περιείχαν χονδρό πίτυρο (Moder et al., 1984). Οι πιο παραδοσιακοί τρόποι άλεσης για τη μείωση της κοκκομετρίας επιτρέπουν την παραγωγή λεπτόκοκκου πίτυρου (278 μm) που απαιτεί λιγότερο χρόνο ανάμιξης σε σχέση με τα χονδρόκοκκα πίτυρα (609 μm) (Zhang & Moore, 1997). Οι Li et al. (2012) ανέφεραν ότι άρτος ολικής άλεσης που παρασκευάστηκε με άλευρο ενδιάμεσης κοκκομετρίας 96,99 μm, είχε καλύτερα αποτελέσματα, με μεγαλύτερο ειδικό όγκο από εκείνους που παρήχθησαν με αλεύρα μεγέθους 50,21 και 235,40 μm αντίστοιχα. Γενικά, δεν υπάρχει μια ταύτιση αποτελεσμάτων και ένα ασφαλές συμπέρασμα για το ρόλο που διαδραματίζει το μέγεθος του πίτυρου στην αρτοποιήση.

Άλευρα με διαφορετική απόδοση άλεσης δίνουν διαφορετικούς άρτους με χρώμα κόρας που κυμαίνεται από λευκό κρεμ σε ανοιχτό καφέ (Ziegler & Greer, 1971) και μειωμένο ειδικό όγκο όταν η περιεκτικότητα του αλεύρου σε πίτυρο είναι αυξημένη (Pomeranz et al., 1977, Salmenkallio-Martilla et al., 2001). Παρότι τελευταία πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στη ποιοτική βελτίωση των άρτων ολικής άλεσης (Rosell et al., 2009), υπάρχει περιορισμένη πληροφορία σχετικά με την επίδραση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στις ιδιότητες του αλεύρου και στη συμπεριφορά του αμύλου, όπως επίσης και στην ποιότητα των παραγόμενων άρτων.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας για την παραγωγή άρτων υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών είναι ο καθαρισμός της βέλτιστης περιεκτικότητας νερού. Η ικανότητα απορρόφησης νερού του αλεύρου συχνά ορίζει την ποιότητα και την ικανότητά

του να δημιουργεί ένα ιξωδοελαστικό ζυμαρί. Η ενυδάτωση του αλεύρου είναι κρίσιμη για τη βιομηχανία τροφίμων, επειδή επιδρά στις λειτουργικές ιδιότητες και στην τελική ποιότητα των προϊόντων αρτοποιίας. Επομένως, η συσχέτιση μεταξύ απορρόφησης νερού και ποιότητας τελικών προϊόντων έχει γίνει θέμα πολλών ερευνών στο παρελθόν (Daniels, 1975, Duyvejonck et al., 2012, Guzmán et al., 2015, Pühr & D' Appolonia, 1992).

Μείωση του μεγέθους του αλεύρου ολικής άλεσης αυξάνει την απορρόφηση νερού για τα πήγματα αραβινοξυλανών με αποτέλεσμα τη μετανάστευση νερού από το πλέγμα γλουτένης στα πήγματα αυτά οδηγώντας έτσι στην τελική μείωση της αρτοποιητικής ικανότητας των αλεύρων αυτών (Li et al., 2012). Άλευρα που έχουν υψηλά ποσοστά απορρόφησης νερού, για συγκεκριμένη συνοχή ζυμαριού, είναι επιθυμητά στην αρτοποίηση (Pühr & D' Appolonia, 1992). Από οικονομικής απόψεως, η υψηλή απορρόφηση νερού αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα, αφού το νερό είναι ένα από τα λιγότερο ακριβά συστατικά του άρτου και οι αρτοποιοί θα μπορούσαν να αυξήσουν την απόδοση και το κέρδος τους χρησιμοποιώντας τέτοιου τύπου άλευρα. Ωστόσο, μία αύξηση νερού στο ζυμαρί δεν συνεπάγεται απαραίτητα και αύξηση της απόδοσης του άρτου, αφού η περίσσεια νερού μπορεί να χαθεί κατά το ψήσιμο. Οι Tipples και Kilborn (1968) παρατήρησαν ότι η απόδοση του άρτου αυξήθηκε αναλογικά με την αύξηση των τιμών απορρόφησης που δίνει ο φαρινογράφος.

Η χαρακτηριστική μη γραμμική ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ζυμαριού με άλευρο σίτου οφείλεται κυρίως στο συνεχές δίκτυο γλουτένης όπου βρίσκονται εγκλωβισμένοι οι αμυλόκοκκοι (Agyare et al., 2004, Collar et al., 2007, Edwards et al., 2002, Tronsmo et al., 2003b). Το ζυμαρί αυτό έχει τα τυπικά χαρακτηριστικά τόσο των στερεών όσο και των υγρών σωμάτων. Ως εκ τούτου, ο ακριβής χαρακτηρισμός της ζύμης απαιτεί την εκτίμηση ρεολογικών παραμέτρων, όπως η ελαστικότητα, το ιξώδες, η χαλάρωση και ο ερπυσμός. Διάφορες εμπειρικές μέθοδοι όπως ο εξτενσιογράφος, ο αλβεογράφος, ο φαρινογράφος και το Mixolab εφαρμόζονται ευρέως, προσομοιώνοντας τα βήματα παραγωγής και ψησίματος των άρτων (Autio et al., 2001, Chiotelli et al., 2004, Chung et al., 2001, Collar et al., 2007).

Οι μέχρι τώρα έρευνες δεν έχουν δώσει ένα σαφές αποτέλεσμα για την αποτελεσματικότητα των δύο μηχανημάτων, Mixolab και Φαρινογράφο, για τα άλευρα ολικής. Επίσης δεν υπάρχει προηγούμενη έρευνα και χρήση των μηχανημάτων αυτών για άλευρα ολικής άλεσης που έχουν υποστεί άλεση με πεπιεσμένο αέρα. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμη η μελέτη άρτων που είχαν παραχθεί χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες ποσότητες νερού και από τα δύο (Mixolab και Φαρινογράφο), αλλά και ενδιάμεσες, τυχαίες ποσότητες νερού.

### 6.5.1. Παραγωγή άρτων με διαφορετικά ποσοστά νερού

Μηχανήματα όπως ο φαρινογράφος και το Mixolab χρησιμοποιούνται ευρέως για τον προσδιορισμό των βέλτιστων περιεκτικοτήτων νερού σε άρτο. Ωστόσο, πολύ συχνά, η εμπειρία και η μοναδικότητα των αλεύρων είναι αυτά που καθορίζουν το βέλτιστο ποσοστό νερού.

Σκοπός αυτής της ενότητας εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών ποσοτήτων νερού (65, 75 και 85%) στην παραγωγή άρτων ολικής άλεσης με άλευρα διαφορετικής κοκκομετρίας (βλ. Πίνακα 6.8) που παρήχθησαν με διαφορετικές συνθήκες άλεσης με χρήση μύλου με πεπιεσμένο αέρα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μελέτη διόγκωσης των ζυμαριών σε διαβαθμισμένους γυάλινους ογκομετρικούς κυλίνδρους. Στη συνέχεια, οι παραγόμενοι άρτοι αξιολογήθηκαν ως προς την απόδοση, τον ειδικό όγκο, την υγρασία, το χρώμα και το επιφανειακό πορώδες.

#### 6.5.1.1 Συνταγή

Στην παρούσα ενότητα εργασίας χρησιμοποιήθηκαν ποσότητες νερού 65, 75 και 85% για όλα τα άλευρα. Στον Πίνακα 6.15 παρουσιάζονται οι συνταγές και η κωδικοποίηση των δειγμάτων άρτου που παρασκευάστηκαν.

**Πίνακας 6.15 Συνταγές για την παραγωγή άρτων με διαφορετικά ποσοστά νερού επί του αλεύρου (65, 75 και 85%) με άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF ή επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4. Σε όλες τις συνταγές χρησιμοποιήθηκε 0,7% μαγιά και 1,5% αλάτι.**

Κωδικός Άρτου	Άλευρο	Νερό (%)
65WB	WWF	
65JB1	JW1	
65JB2	JW2	65
65JB3	JW3	
65JB4	JW4	
75WB	WWF	
75JB1	JW1	
75JB2	JW2	75
75JB3	JW3	
75JB4	JW4	
85WB	WWF	
85JB1	JW1	
85JB2	JW2	85
85JB3	JW3	
85JB4	JW4	

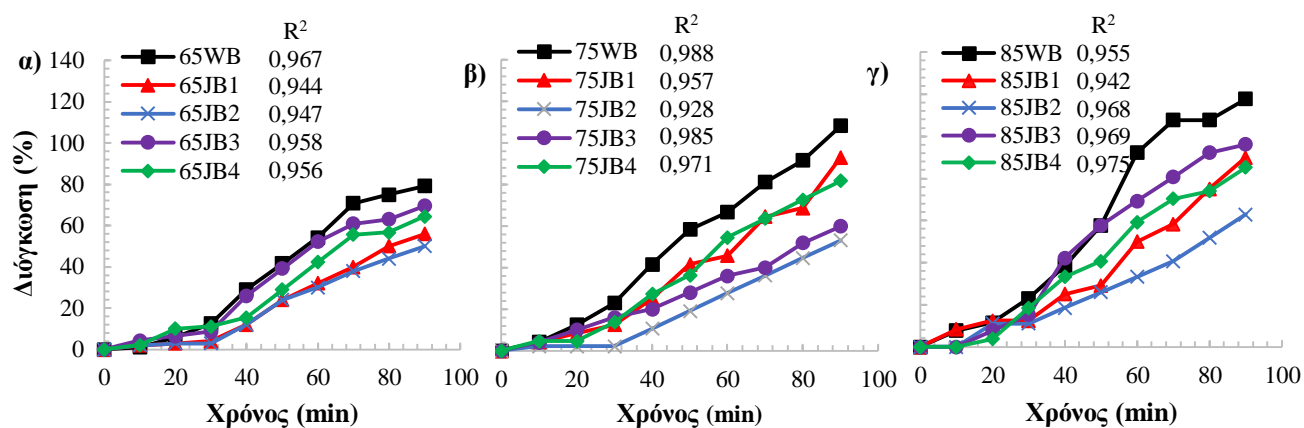
Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 > JW4

### 6.5.1.2 Διόγκωση ζυμαριών

Σύμφωνα με τους Færgestad et al. (2000), όσο ο χρόνος επώασης αυξάνεται, οι αναλογίες στις διαστάσεις του άρτου μεταβάλλονται ακανόνιστα, ενώ η διόγκωσή του αυξάνεται. Βέλτιστος χρόνος επώασης θεωρείται ο χρόνος που δίνει το μέγιστο δυνατό όγκο στον άρτο χωρίς να χαλάει το σχήμα του (Tronsmo et al., 2003a).

Σύμφωνα με τους Aamodt et al. (2005), ο χρόνος επώασης επιδρά σημαντικά στο πλάτος, το ύψος και τον όγκο των άρτων. Σε άρτους ελεύθερους διόγκωσης (δηλαδή δεν ψήνονται σε φόρμες) αύξηση του χρόνου επώασης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους των άρτων, αλλά ταυτόχρονα ο λόγος ύψος/ πλάτος μειώθηκε, υποβαθμίζοντας το προϊόν.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20, αύξηση του χρόνου επώασης είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη διόγκωση του ζυμαριού. Η διόγκωση των ζυμαριών συσχετίστηκε γραμμικά με το χρόνο επώασης. Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  κυμάνθηκε από 0,929-0,988 υποδεικνύοντας ότι το απλό γραμμικό μοντέλο εξηγεί επαρκώς την παραλλακτικότητα της διόγκωσης του ζυμαριού κατά την επώαση. Τα 70 min κρίθηκαν επαρκής χρόνος επώασης αφού στα περισσότερα ζυμάρια μετά από τα 70 min ο ρυθμός διόγκωση άρχισε να μειώνεται.



Σχήμα 6.20 Συσχέτιση χρόνου επώασης και διόγκωση ζυμαριών με άλευρα ολικής άλεσης σίτου WB και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JB1, JB2, JB3, JB4 με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού α) 65%, β) 75% και γ) 85%.

Αποτελέσματα & Συζήτηση

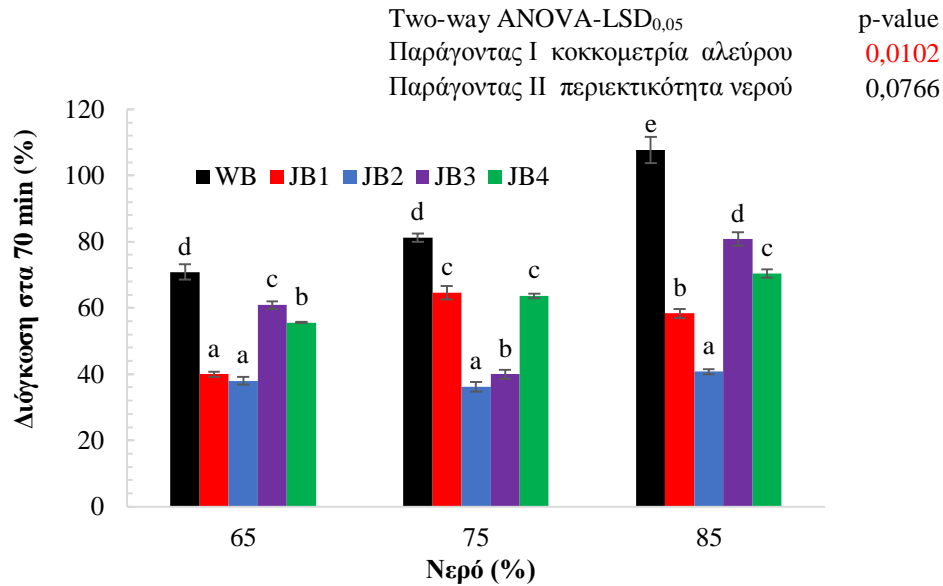
**Πίνακας 6.16 Φυσικές ιδιότητες άρτων παραγόμενων με άλευρο ολικής άλεσης σίτου WB και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε διάφορες συνθήκες JB1, JB2, JB3, JB4 και με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού (65, 75 και 85%).**

Κωδικός Άρτου	Ειδικός Όγκος	Απόδοση κατά το ψήσιμο	Υγρασία	Σκληρότητα	Ελαστικότητα	Επιφανειακό πορώδες	Μέση διάμετρος πόρων	Ποκνότητα πόρων	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$												
65WB	2,31	g	86,01	cd	35,89	fg	6,99	de	53,16	fgh	10%	a	1,36	bc	63,81	abc	46,43	def	12,07	cde	21,72	bcd		
65JB1	2,10	def	88,30	ef	33,42	e	9,57	efg	42,87	ab	18%	abc	1,44	bcd	54,62	ab	48,89	ef	12,48	def	21,99	bcdef	2,51	ab
65JB2	1,82	b	86,94	def	29,49	ab	8,49	efg	49,67	def	23%	bcd	1,47	bcde	82,01	bc	49,11	f	12,64	ef	22,90	fgh	2,99	cdef
65JB3	1,59	a	86,16	d	32,00	cd	12,48	h	52,95	fgh	24%	bcd	1,44	bcd	78,39	c	46,72	cde	14,00	h	24,45	i	3,36	defg
65JB4	1,89	bc	88,79	f	28,67	a	9,70	fg	38,51	a	17%	ab	1,36	abc	54,49	abc	44,32	bcd	14,04	h	23,30	gh	3,29	gh
75WB	2,28	g	84,13	bc	33,75	e	5,15	bcd	44,96	bc	24%	bcd	1,58	de	70,91	abc	46,73	cde	11,65	bcd	21,36	abc		
75JB1	2,21	fg	86,18	d	33,85	e	5,85	bcd	51,04	efg	22%	bcd	1,29	ab	84,26	bc	49,10	ef	11,63	bcd	21,85	bcdef	2,42	bcd
75JB2	1,94	bcd	87,34	def	32,84	de	6,69	de	45,96	bcd	23%	bcd	1,52	cde	75,96	abc	45,11	bc	13,01	fg	22,29	abc	2,31	bcde
75JB3	1,92	bc	86,49	de	30,70	bc	10,11	g	46,00	bcd	30%	d	1,34	abc	80,99	bc	47,16	cdef	12,83	f	22,80	efg	1,92	abc
75JB4	1,98	bcd	83,63	bc	31,02	c	9,61	fg	47,15	cde	22%	bcd	1,15	a	75,14	abc	45,71	cd	14,09	h	23,94	hi	3,69	efg
85WB	2,25	fg	79,53	a	36,53	fgh	2,82	a	56,25	h	23%	bcd	1,65	ef	55,94	ab	42,97	b	10,88	a	20,35	abc		
85JB1	2,00	cd	80,94	a	36,89	gh	4,37	abc	62,58	i	29%	d	1,82	f	52,20	a	39,51	a	12,06	cde	21,01	abc	3,72	fg
85JB2	2,20	efg	83,14	b	37,40	fgh	3,30	ab	56,04	h	26%	cd	1,64	ef	77,79	abc	43,32	b	11,21	ab	20,61	cdefg	0,55	ab
85JB3	1,61	a	83,38	b	36,65	h	5,98	cd	62,26	i	23%	bcd	1,37	bc	77,23	abc	39,45	a	13,90	h	22,90	efgh	5,29	h
85JB4	2,04	cde	83,47	b	35,31	f	7,92	ef	54,58	gh	25%	bcd	1,32	abc	83,37	bc	40,57	a	13,66	gh	22,62	defg	4,32	gh

**Πίνακας 6.17 Συντελεστές συσχέτισης των φυσικών και μορφολογικών ιδιοτήτων άρτων ολικής άλεσης**

Variables	Ειδικός Όγκος	Απόδοση κατά το ψήσιμο	Υγρασία	Σκληρότητα	Ελαστικότητα	Επιφανειακό πορώδες	Μέση διάμετρος πόρων	Πυκνότητα πόρων	L*	a*	b*	Νερό	D <sub>50</sub>
Διόγκωση	0,250	-0,651**	0,445	-0,412	0,391	-0,140	0,062	-0,219	-0,383	-0,197	-0,255	0,390	0,505
Ειδικός Όγκος		-0,241	0,391	-0,581*	-0,096	-0,232	0,203	-0,264	0,168	-0,777**	-0,760**	0,153	0,768**
Απόδοση κατά το ψήσιμο			-0,702**	0,680**	-0,746**	-0,411	-0,469	0,138	0,659**	0,390	0,511	-0,823**	-0,305
Υγρασία				-0,749**	0,779**	0,093	0,488	-0,151	-0,586*	-0,520*	-0,694**	0,700**	0,436
Σκληρότητα					-0,520*	-0,164	-0,619*	0,194	0,436	0,758**	0,890**	-0,701**	-0,556*
Ελαστικότητα						0,297	0,397	0,076	-0,660**	-0,215	-0,326	0,671**	0,084
Επιφανειακό πορώδες							0,345	0,344	-0,286	-0,077	-0,089	0,598*	-0,335
Μέση διάμετρος πόρων								-0,455	-0,345	-0,601*	-0,689**	0,363	0,418
Πυκνότητα πόρων									0,201	0,216	0,370	0,096	-0,481
L										-0,135	0,211	-0,766**	0,157
a											0,913**	-0,275	-0,767**
b												-0,496	-0,712**
Νερό													0,000

*Ένα αστεράκι \* δηλώνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο  $p < 0,05$ . Δύο αστεράκια \*\* δηλώνουν ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο  $p < 0,01$ .*



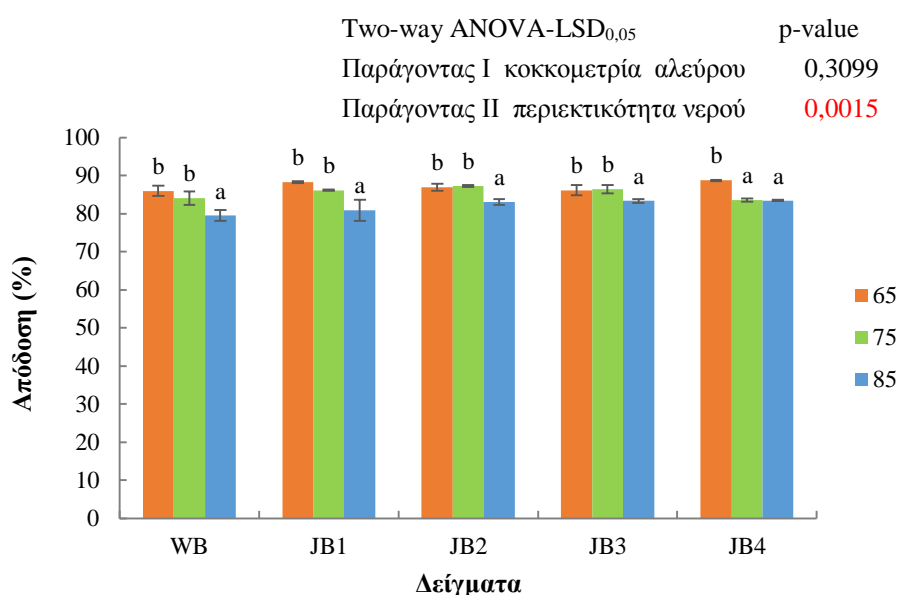
**Σχήμα 6.21** Επίδραση της κοκκομετρίας του αλεύρου και της περιεκτικότητας σε νερό στο ποσοστό διόγκωσης των ζυμαριών. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Δείγματα με το ίδιο γράμμα ανά περιεκτικότητα νερού, δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά ( $P \leq 0,05$ ).

Οι διαφορετικές περιεκτικότητες νερού φαίνεται να μην επιδρούν σημαντικά στη διαμόρφωση της διόγκωσης, ενώ σε μερικές περιπτώσεις παρουσιάστηκαν αυξομειώσεις (Σχήμα 6.21), σε αντίθεση με τις διαφορετικές κοκκομετρίες αλεύρου που σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης επηρέασε σημαντικά το ποσοστό διόγκωσης ( $p=0,0102$ ). Για όλες τις περιεκτικότητες νερού τα δείγματα WB είχαν τη μεγαλύτερη διόγκωση.

### 6.5.1.3 Ποιοτική αξιολόγηση άρτων

Στον Πίνακα 6.16 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των άρτων που αξιολογήθηκαν. Αρχικά μετρήθηκε η απόδοση ψήσιματος, ένα χαρακτηριστικό του άρτου που έχει ιδιαίτερο οικονομικό ενδιαφέρον (Σχήμα 6.22). Μόνο το δείγμα JB4 διαφοροποιήθηκε σημαντικά, όπου η μείωση της απόδοσης για ποσότητες νερού 75% και 85% ήταν παρόμοιες (83,63% και 83,47% αντίστοιχα) και σημαντικά μικρότερες από εκείνη του 65%. Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα 65JB4 παρουσίασε τη μέγιστη τιμή απόδοσης, 88,79%. Οι άρτοι δεν μπόρεσαν να συγκρατήσουν το επιπλέον νερό που προστέθηκε στη συνταγή, για τον λόγο αυτό κατά το ψήσιμο το νερό χάθηκε και η απόδοσή τους μειώθηκε σημαντικά όταν χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή νερού (85%) για όλα τα δείγματα αλεύρου. Ωστόσο, η αύξηση της περιεκτικότητάς νερού από 65 σε 75% έγινε επιτυχώς. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στη μέγιστη περιεκτικότητα νερού 85% υπήρξε μια τάση αύξησης της απόδοσης, όταν χρησιμοποιήθηκαν τα πιο λεπτόκοκκα άλευρα (JB2, JB3 και JB4) σε σχέση με το δείγμα αναφοράς WB.

Στον Πίνακα 6.17 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης των φυσικών και μορφολογικών ιδιοτήτων των παραγόμενων άρτων ολικής άλεσης. Όσον αφορά την υγρασία των άρτων αυξήθηκε σημαντικά με την αύξηση της περιεκτικότητας νερού στους άρτους ( $r=0,7003$ ,  $P\leq 0,05$ ), ενώ η διαφορετική κοκκομετρία την επηρέασε επίσης θετικά αλλά όχι σημαντικά. Η υγρασία συσχετίστηκε σημαντικά με τα χαρακτηριστικά της υφής της ψίχας, σκληρότητα ( $r=-0,7494$ ,  $P\leq 0,05$ ) και ελαστικότητα ( $r=0,7793$ ,  $P\leq 0,05$ ), την απόδοση κατά το ψήσιμο ( $r=-0,7025$ ,  $P\leq 0,05$ ), καθώς και με τα χαρακτηριστικά του χρώματος  $L^*$  ( $r=-0,5861$ ,  $P\leq 0,05$ ),  $a^*$  ( $r=-0,5198$ ,  $P\leq 0,05$ ),  $b^*$  ( $r=-0,6942$ ,  $P\leq 0,05$ ). Παλαιότερες μελέτες έχουν επίσης συσχετίσει την υγρασία με τη σκληρότητα των άρτων, με μαλακότερους άρτους να έχουν μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας (Baik & Chinachoti, 2003, Piazza & Masi, 1995).



**Σχήμα 6.22** Επίδραση της κοκκομετρίας του αλεύρου και της περιεκτικότητας νερού στην απόδοση του άρτου. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Δείγματα με το ίδιο γράμμα για άρτους που παράχθηκαν με ίδιο τύπο αλεύρου, δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά ( $P\leq 0,05$ ).

Όταν χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη ποσότητα νερού (65%), ο ειδικός όγκος ήταν σημαντικά μεγαλύτερος για το αρχικό δείγμα (65WB) και δεν μεταβλήθηκε σημαντικά με την περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας νερού (2,25-2,31 cm<sup>3</sup>/g). Η αύξηση της περιεκτικότητας νερού (85%) είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του ειδικού όγκου για το δείγμα JB2 (85JB2), που έφτασε στα επίπεδα του WB (2,20 cm<sup>3</sup>/g). Παρόμοια τιμή είχε και το δείγμα 75JB1 (2,21 cm<sup>3</sup>/g). Οι υπόλοιποι άρτοι είχαν μια τάση βελτίωσης με την προσθήκη νερού, αλλά χωρίς να προσεγγίζουν τη μεγαλύτερη τιμή (2,28 cm<sup>3</sup>/g). Ως εκ τούτου, παρατηρείται ότι ανά τύπο αλεύρου οι μέγιστες τιμές ειδικού όγκου σημειώθηκαν σε διαφορετικές περιεκτικότητες νερού. Υποδεικνύοντας την ανάγκη για βελτιστοποίηση της ποσότητας νερού που προστίθεται στη συνταγή των άρτων.

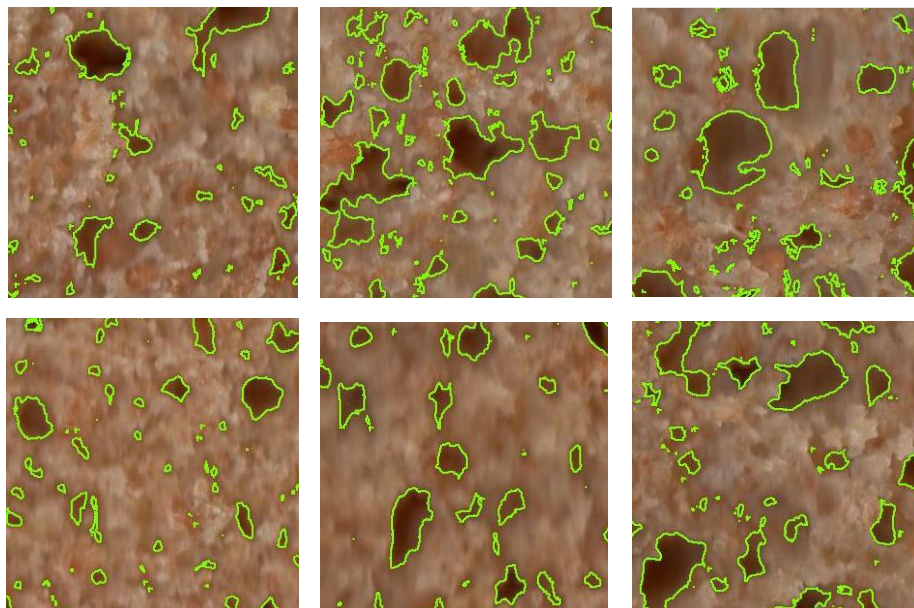
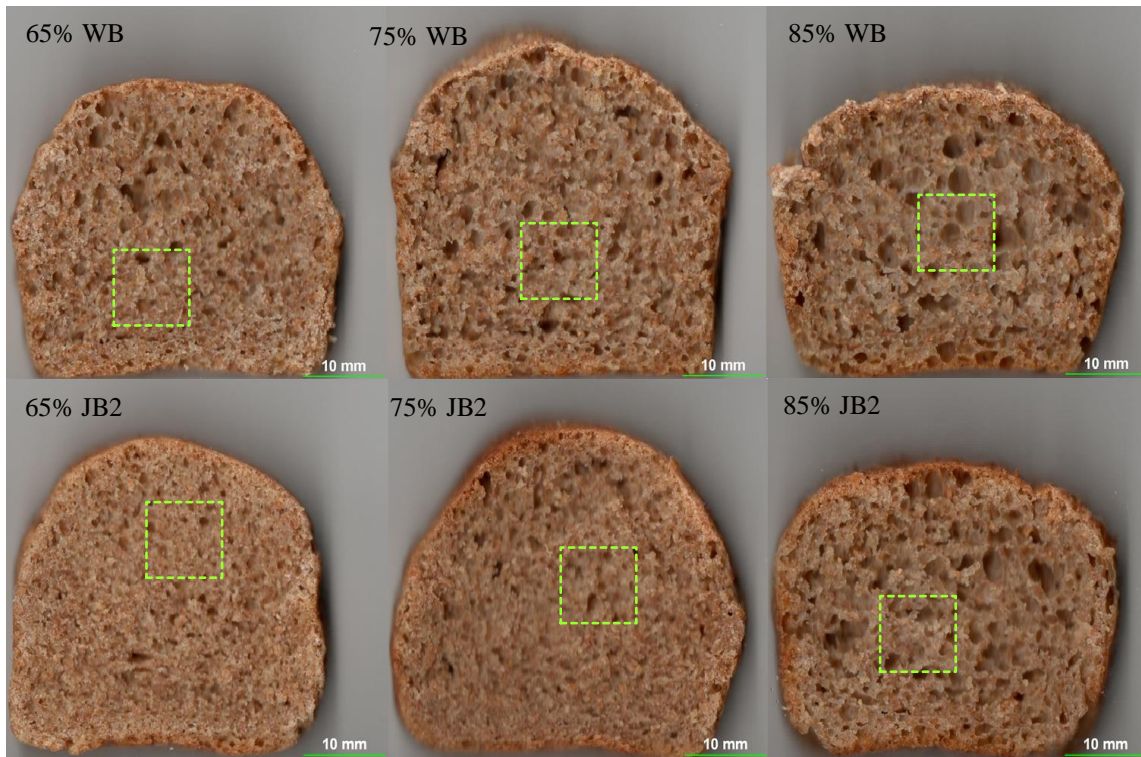


Το κατεστραμμένο άμυλο αυξάνεται με την αύξηση της έντασης της διεργασίας άλεσης και άρα τη μείωση της κοκκομετρίας. Σύμφωνα με τους Barrera et al. (2007), η αρτοποιητική ικανότητα μειώνεται εξαιτίας της παρουσίας του κατεστραμμένου αμύλου είτε επειδή απορροφά περισσότερο νερό και εμποδίζεται ο βέλτιστος σχηματισμός του δικτύου γλουτένης κατά την ανάμιξη είτε επειδή μειώνεται η συνοχή του ζυμαριού και χάνεται η ικανότητα διατήρησης των αερίων που παράγονται στη φάση της επώασης. Ίσως για τον λόγο αυτό τα δείγματα με λεπτόκοκκα άλευρα παρουσίασαν μικρότερη διόγκωση.

Συνήθως οι άρτοι παράγονται με νερό 40% (στο σύνολο του ζυμαριού), από το οποίο περίπου το 24% δεσμεύεται και το υπόλοιπο, 16%, είναι το «ελεύθερο» νερό (Daniels, 1975, Fretzdorf et al., 1982, Eliasson & Larsson, 1993). Μέρος του «ελεύθερου» νερού επικαλύπτει τους αμυλόκοκκους, ενώ το υπόλοιπο υπάρχει διεσπαρμένο στο ζυμάρι σε μορφή σταγονιδίων (Eliasson & Larsson, 1993). Αφού οι μικρότεροι κόκκοι αλεύρου έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τους μεγαλύτερους κόκκους αλεύρου, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού για την επικάλυψή τους. Αυτό το μέρος του «ελεύθερου» νερού πιθανότατα να είναι πιο εύκολο να απορροφηθεί από τους αμυλόκοκκους κατά τη ζελατινοποίηση. Έτσι, το νερό που υπάρχει σε μορφή σταγονιδίων είναι πιο επιρρεπές στην εξάτμιση και χάνεται κατά το ψήσιμο. Μια αύξηση της ταχύτητας ανάμιξης θα μπορούσε να καταναείμει το νερό πιο ομοιόμορφα στο ζυμάρι, μειώνοντας το μέγεθος των σταγονιδίων νερού και βελτιώνοντας την επικάλυψη των αμυλόκοκκων (Sahlström et al., 1998). Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απόδοση μετά το ψήσιμο και μειώνεται ο όγκος του άρτου. Πιθανόν μια βελτιστοποίηση της διεργασίας ως προς το χρόνο και την ταχύτητα ανάμιξης θα επέφεραν πολύ βελτιωμένα χαρακτηριστικά στους άρτους που περιείχαν τα μικροαλεσμένα άλευρα, JW, με το σημαντικά μικρότερο μέγεθος κοκκομετρίας.

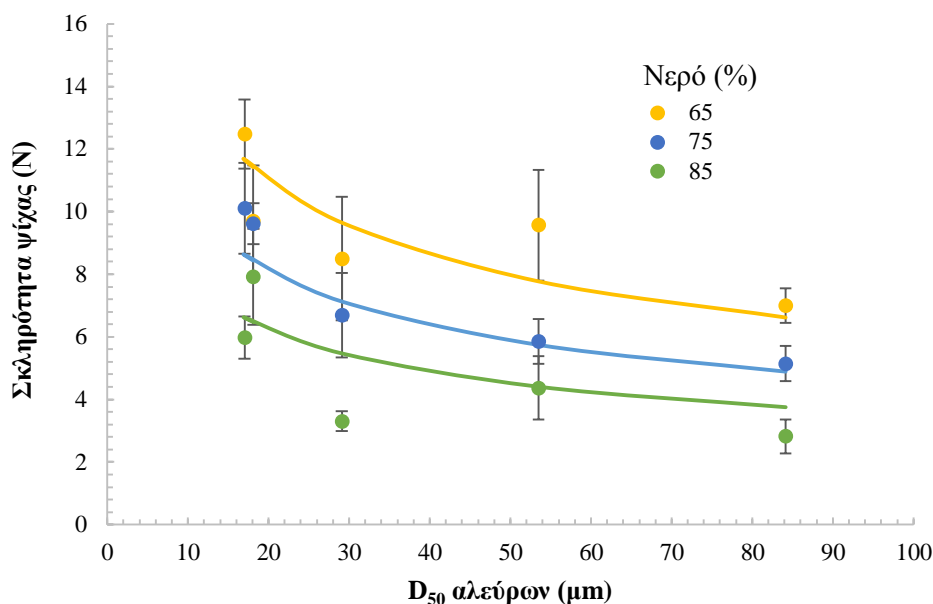
Στο σύνολό τους τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από την περιεκτικότητά τους σε νερό και τις διαφορετικές κοκκομετρίες αλεύρου. Για περιεκτικότητα νερού 65% η μέση διάμετρος των πόρων της ψίχας δεν διαφοροποιήθηκε στατιστικά σημαντικά στις διαφορετικές κοκκομετρίες. Στα 75% δεν υπήρχε κάποια τάση, ενώ στα 85% τα δείγματα με τη μικρότερη κοκκομετρία αλεύρου, JB3 και JB4, είχαν τη μικρότερη διάμετρο πόρων (1,37 και 1,32 mm, αντίστοιχα). Το αρχικό δείγμα WB παρουσίασε αύξηση της διαμέτρου των πόρων στα 75 και 85% νερό, το JB1 παρουσίασε αύξηση στα 85% νερό, ενώ στα δείγματα JB2, JB3 και JB4 η διάμετρος των πόρων δεν διαφοροποιήθηκαν σημαντικά λόγω των διαφορετικών περιεκτικοτήτων νερού. Όσον αφορά το επιφανειακό πορώδες, παρατηρήθηκε μια μικρή τάση αύξησής του με αύξηση του νερού και μείωση της κοκκομετρίας, χωρίς όμως να υπάρχει στατιστική διαφοροποίηση. Η πυκνότητα των πόρων δεν παρουσίασε κάποια τάση. Ενδεικτικές φωτογραφίες των παραγόμενων άρτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.23. Η αύξηση του νερού στους άρτους (85%) είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της φωτεινότητας της ψίχας για όλα τα άλευρα ( $r=-0,7656$ ,  $P\leq 0,05$ ). Επίσης σε αυτή την περιεκτικότητα νερού η απόχρωση του κόκκινου χρώματος φαίνεται να γίνεται λιγότερο έντονη. Οι τιμές των a και b συσχετίστηκαν σημαντικά αρνητικά με την κοκκομετρία των αλεύρων ( $r=-$

0,7668 και  $r=-0,7116$ ,  $P\leq 0,05$ , αντίστοιχα) παρουσιάζοντας σημαντικά μικρότερες τιμές στα δείγματα WB και JB1.



Σχήμα 6.23 Ενδεικτικές φωτογραφίες παραγόμενων άρτων (επάνω) και λεπτομέρεια από τη ψίχα για των υπολογισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους (κάτω).

Σε γενικές γραμμές η σκληρότητα της ψίχας είχε την τάση να αυξάνεται με τη μείωση του νερού και τη μείωση της κοκκομετρίας (Σχήμα 6.24). Το προτεινόμενο μοντέλο για τον υπολογισμό της σκληρότητας της ψίχας σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα νερού και την κοκκομετρία των αλεύρων έδωσε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα με  $R^2=0,810$  (Πίνακας 6.18). Η μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στο δείγμα 65JB3 (12,48 N) και η ελάχιστη στο 85WB (2,82 N). Για 85 και 75% νερό τα δείγματα με τη μικρότερη κοκκομετρία (JB3 και JB4) παρουσίασαν σημαντικά σκληρότερη ψίχα, ενώ στο 65% δεν διαμορφώθηκε ξεκάθαρη τάση.



Σχήμα 6.24 Σκληρότητα ψίχας άρτων σε σχέση με και την κοκκομετρία των αλεύρων για άρτους με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού 65, 75 και 85%.

Από τα δείγματα που περιείχαν JW άλευρα το πιο μαλακό ήταν το 85JB2 (3,3 N), παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη μείωση στη σκληρότητα της ψίχας του (61,13%) σε σχέση με την ψίχα του άρτου που είχε 65% νερό (85JB2). Η μικρότερη βελτίωση στην υφή με την αύξηση του νερού παρατηρήθηκε στα δείγματα που περιείχαν JW4, υποδεικνύοντας ότι για αυτόν τον τύπο αλεύρου η διαφορετική περιεκτικότητα νερού δεν ήταν τόσο σημαντική όσο για τα υπόλοιπα δείγματα.

Και οι δύο παράγοντες, νερό και κοκκομετρία, επέδρασαν σημαντικά στη σκληρότητα του άρτου. Ωστόσο, σημαντικότερα επέδρασε το νερό, αφού η τιμή του εκθετικού συντελεστή *a* είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του *b* (-2,14 και -0,35, αντίστοιχα). Η ελαστικότητα της ψίχας δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την κοκκομετρία, αλλά μόνο από την περιεκτικότητα σε νερό ( $r=-0,6711$   $P\leq 0,05$ ), χωρίς ωστόσο να παρουσιάζεται μία ξεκάθαρη τάση μεταξύ των δειγμάτων.

Πίνακας 6.18 Μαθηματικό μοντέλο για τη σκληρότητα της ψίχας του άρτου.

Μαθηματικό μοντέλο σκληρότητας άρτου	Fo	a	b	R <sup>2</sup>	S <sub>R</sub>	S <sub>E</sub>
$F = F_o \cdot (W/W_o)^a \cdot (ps/ps_o)^b$	14,53	-2,14	-0,35	0,810	0,960	1,297
<i>Asymptotic Standard Error</i>	1,85	0,42	0,08			

Συνομογραφίες:

$F_o, a, b$ $W_o=70, ps_o=6$	Σταθερές των μοντέλων
$W$	Νερό (%)
$ps$	Κοκκομετρία αλεύρου (μm)

#### 6.5.1.4 Συμπέρασμα

Διαφορετικές περιεκτικότητες νερού και διαφορετικές διεργασίες άλεσης με πεπιεσμένο αέρα καθόρισαν τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων άρτων. Η διόγκωση των ζυμαριών, η οποία επηρεάστηκε σημαντικά από το μέγεθος της κοκκομετρίας και όχι από τις διαφορετικές περιεκτικότητες νερού, εξηγήθηκε επαρκώς με απλό γραμμικό μοντέλο ( $R^2=0,929-0,988$ ). Η αύξηση του νερού στα 85% είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της απόδοσης ψισίματος έως και 8,3% (JB1), ενώ η υγρασία τους αυξήθηκε σημαντικά έως 26,8% (JB2) με αποτέλεσμα και τη μείωση της φωτεινότητας της ψίχας τους. Από την άλλη όταν χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη ποσότητα νερού (65%), ο ειδικός όγκος ήταν σημαντικά μεγαλύτερος για το αρχικό δείγμα (65WB) και δεν μεταβλήθηκε σημαντικά με την περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας νερού (2,25-2,31 cm<sup>3</sup>/g). Σε αντίθεση με το αρχικό άλευρο, όταν χρησιμοποιήθηκαν τα κονιορτοποιημένα, ο ειδικός όγκος των αντίστοιχων άρτων βελτιώθηκε σημαντικά με την αύξηση του νερού στη συνταγή. Η επεξεργασία των εικόνων έδειξε πως τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από την περιεκτικότητά τους σε νερό και τις διαφορετικές κοκκομετρίες αλεύρου, αν και υπήρχε μια τάση βελτίωσης με την αύξηση του νερού. Τέλος, όσον αφορά τη σκληρότητα των άρτων παρατηρήθηκε μια τάση μείωσης με την αύξηση του νερού και την αύξηση της κοκκομετρίας. Συνοψίζοντας, η περιεκτικότητα της συνταγής σε νερό φάνηκε να επιδρά σημαντικότερα στις φυσικοχημικές ιδιότητες των παραγόμενων άρτων σε σχέση με την κοκκομετρία των αλεύρων. Ένα ποσοστό νερού 75% φάνηκε να είναι ανεκτό για το σύνολο των αλεύρων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του συστήματος του άρτου και η μοναδικότητα των κονιορτοποιημένων αλεύρων εμποδίζουν τις σαφείς παραδοχές και υποδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω μελέτης.

### 6.5.2. Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει φαρινογραφήματος

Σκοπός αυτής της σειράς πειραμάτων ήταν η μελέτη άρτων ολικής άλεσης με άλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας (βλ. Πίνακα 6.8) που παρασκευάστηκαν με χρήση βέλτιστης περιεκτικότητας νερού. Στο πρώτο στάδιο έγινε προσδιορισμός της βέλτιστης απορρόφησης νερού με χρήση φαρινογράφου για την παραγωγή άρτων. Μετά το πέρας της αρτοποιίας οι παραγόμενοι άρτοι αξιολογήθηκαν ως προς τις φυσικές τους ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε η απόδοση ψησίματος, η υγρασία, το πορώδες και ο ειδικός όγκος των άρτων, η σκληρότητα και η ελαστικότητα της ψίχας, καθώς και η μορφολογία της. Επιπρόσθετα μελετήθηκε η επίδραση της παλαίωσης (5 ημέρες) στην υγρασία του άρτου και τη σκληρότητα της ψίχας. Τέλος έγινε οργανοληπτική αξιολόγηση των άρτων την ημέρα παραγωγής τους από ημικειμαιδευμένους δοκιμαστές.

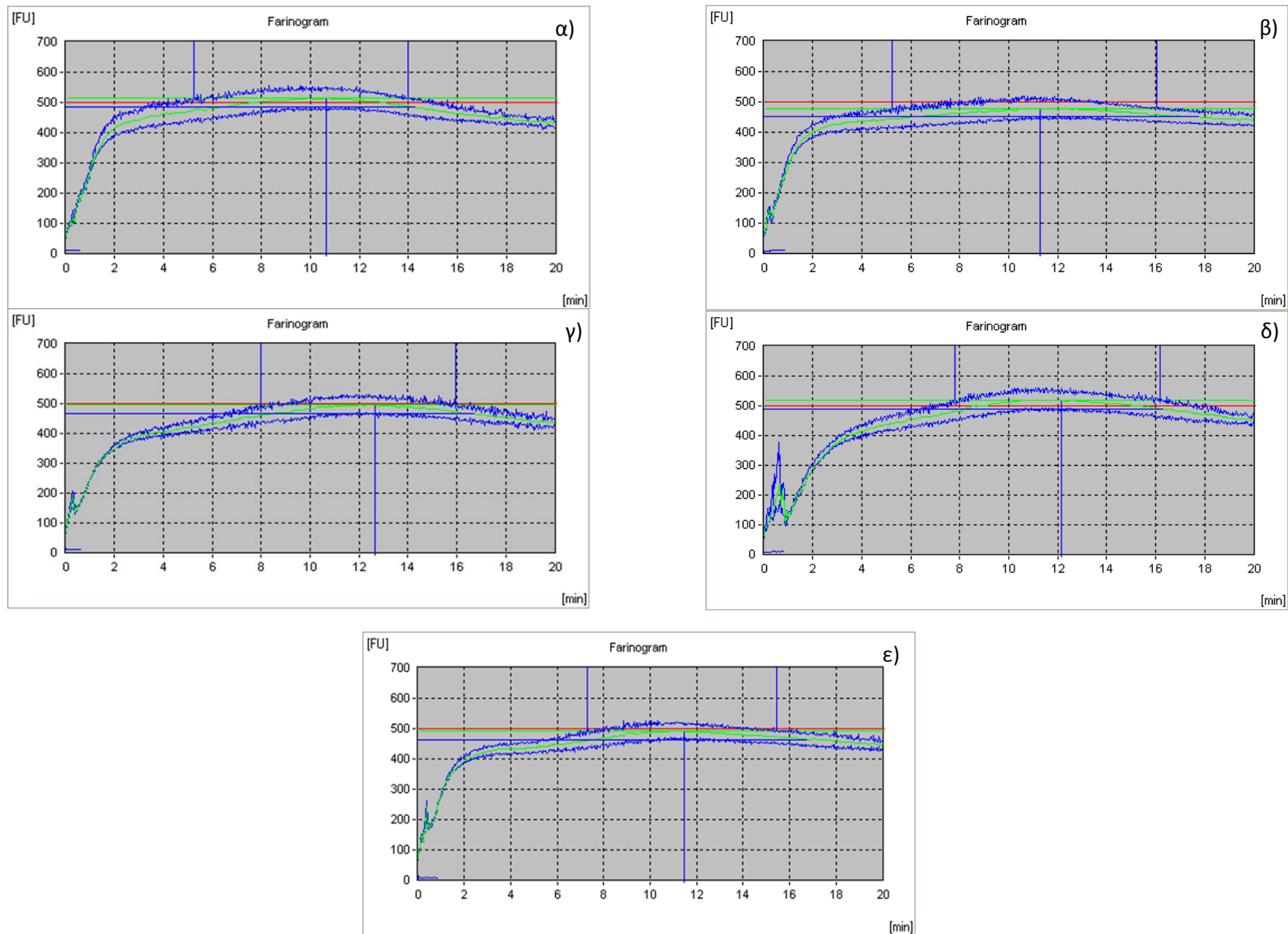
#### 6.5.2.1. Προσδιορισμός βέλτιστης απορρόφησης νερού και συνταγή

Οι ρεολογικές ιδιότητες του αλεύρου είναι ύψιστης σημασίας για τον καθορισμό της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Ο φαρινογράφος χρησιμοποιείται ευρέως στην αρτοποιία για τον προσδιορισμό της απορρόφησης νερού που απαιτείται, ώστε το ζυμάρι να έχει βέλτιστη συνεκτικότητα. Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε άλευρο ολικής άλεσης (WWF) και τα κονιορτοποιημένα άλευρα που προήλθαν από αυτό (JW1, JW2, JW3, JW4). Σκοπός ήταν η χρήση βέλτιστης περιεκτικότητας νερού – βάσει φαρινογραφήματος – για την παραγωγή άρτων, η αξιολόγησή τους και η μελέτη παλαίωσης αυτών. Στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζονται ενδεικτικά φαρινογραφήματα για όλα τα υπό εξέταση άλευρα, ενώ οι χαρακτηριστικές τους τιμές καταγράφονται στον Πίνακα 6.19.

**Πίνακας 6.19 Χαρακτηριστικές παράμετροι αλεύρων που υπολογίζονται με χρήση φαρινογράφου.**

Δείγμα αλεύρου	Μέγεθος κοκκομετρίας D <sub>50</sub> (μm)	Απορρόφηση (%) στα 500 FU	Χρόνος ανάπτυξης (min)	Σταθερότητα (min)	Δείκτης εξασθένησης (FU)	Ποιοτικός δείκτης
WWF	84,15 <sup>a</sup> ±2,45	73,70 <sup>a</sup> ±0,42	10,7	8,8	3	143
JW1	53,49 <sup>b</sup> ±3,38	77,75 <sup>b</sup> ±1,06	11,3	10,8	5	178
JW2	29,10 <sup>c</sup> ±3,09	79,45 <sup>bc</sup> ±2,05	12,2	8,4	8	163
JW3	17,02 <sup>d</sup> ±1,38	83,55 <sup>d</sup> ±0,78	12,7	7,9	13	167
JW4	18,11 <sup>d</sup> ±1,73	81,05 <sup>cd</sup> ±1,49	11,5	8,1	6	168

Όπως παρατηρείται, η απορρόφηση ήταν σημαντικά αυξημένη για τα δείγματα JW σε σχέση με το αρχικό (WWF) ενώ χρειάστηκαν μεγαλύτερο χρόνο ανάπτυξης, άρα τα άλευρα αυτά απαιτούν περισσότερο χρόνο ανάμιξης με το νερό ώστε να δώσουν ζυμάρι με μέγιστη συνεκτικότητα. Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός εξασθένησης του ζυμαριού



Σχήμα 6.25 Ενδεικτικά φαρινογραφήματα αλεύρων α) WWF, β) JW1, γ) JW2, δ) JW3 και ε) JW4.

τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του αλεύρου. Η συνταγή για την παραγωγή άρτων διαμορφώθηκε με βάση τη βέλτιστη απορρόφηση νερού σε ποσοστό (%) επί του βάρους του αλεύρου (Πίνακας 6.20).

Πιθανόν η υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη απορρόφηση νερού από το άλευρο ολικής άλεσης. Οι Hemery et al. (2011) υπολόγισαν ότι η απορρόφηση νερού σε συμβατικό άλευρο ήταν 59-64,5% ενώ για άλευρα ολικής άλεσης κυμάνθηκε από 70-80,2%, τιμές παρόμοιες με της παρούσας μελέτης (73,7-83,55%). Από την άλλη, οι Liu et al. (2015) χρησιμοποίησαν άλευρο ολικής άλεσης σίτου παραγόμενο από διάφορους τύπους μύλου για την παραγωγή παραδοσιακών ψωμιών στον ατμό (steamed bread). Σύμφωνα με την έρευνά τους, η σταθερότητα των αλεύρων ολικής άλεσης υπέρλεπτα αλεσμένων ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι κατάλληλη άλεση και οι διεργασίες μετά την άλεση μπορούν να βελτιώσουν τα φαινογραφικά χαρακτηριστικά του αλεύρου.

Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση (Πίνακας 6.23), η διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό δεν φάνηκε να επιδρά σημαντικά στο σύνολο των υπό εξέταση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων άρτων, παρά μόνο στον ειδικό όγκο ( $r=-0,9020$ ,  $P<0,05$ ).

Η απορρόφηση συσχετίστηκε επίσης σημαντικά με το μέγεθος της κοκκομετρίας των αλεύρων, το οποίο ήταν και αναμενόμενο. Όπως έχει ήδη επισημανθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. κεφ 6.1.2) μικρότερο μέγεθος κοκκομετρίας σημαίνει μεγαλύτερη επιφάνεια ως προς το συνολικό όγκο των σωματιδίων, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης νερού.

**Πίνακας 6.20 Συνταγές για την παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού και σε ποσοστό (%) επί του βάρους του αλεύρου.**

Συνταγές	Αλεύρι	Νερό(%)	Μαγιά(%)	Αλάτι(%)
WBF	WWF	73,70		
JF1	JW1	77,75		
JF2	JW2	79,45	0,7	1,5
JF3	JW3	83,55		
JF4	JW4	81,05		

### 6.5.2.2. Φυσικές ιδιότητες άρτων ολικής άλεσης με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού

Αρχικά υπολογίστηκε η απόδοση ψησίματος η οποία διέφερε σημαντικά μεταξύ του δείγματος αναφοράς και όλων των άλλων δειγμάτων (Πίνακας 6.21). Στα JW δείγματα προστέθηκε μεγαλύτερη ποσότητα νερού, μέρος του οποίου φαίνεται να εγκλωβίζεται στο εσωτερικό των άρτων με αποτέλεσμα στην περίπτωση των κονιορτοποιημένων αλεύρων, παράχθηκε περισσότερη ποσότητα άρτου για την ίδια ποσότητα αλεύρου. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ποσότητες νερού, παρόλα αυτά η τελική υγρασία των άρτων δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις. Οι Curti et al. (2013) υποστήριξαν ότι η διαφορετική τελική υγρασία των άρτων που περιείχαν πίτυρα με διαφορετικό μέγεθος μπορεί να οφείλεται στη διαφορετική αρχική ποσότητα νερού ή/και σε μια διαφοροποιημένη/ αποδυναμωμένη αλληλεπίδραση νερού-στερεών.

**Πίνακας 6.21 Φυσικές ιδιότητες άρτων παραγόμενων από άλευρο ολικής άλεσης (WWF) και λεπτόκοκκα αλεσμένα WWF.**

Δείγμα	Απόδοση Ψησίματος (%)	Υγρασία (%)	Ειδικός Όγκος (cm <sup>3</sup> /g)	Πορώδες (%)	Σκληρότητα (N)	Ελαστικότητα (%)
WBF	82,27 <sup>a</sup> ± 0,76	45,90 <sup>a</sup> ± 1,15	2,26 <sup>a</sup> ± 0,19	60,04 <sup>c</sup> ± 0,26	3,31 <sup>d</sup> ± 0,12	39,50 <sup>a</sup> ± 0,03
JF1	83,96 <sup>b</sup> ± 0,87	46,18 <sup>a</sup> ± 1,01	2,23 <sup>a</sup> ± 0,04	59,96 <sup>c</sup> ± 0,59	1,31 <sup>a</sup> ± 0,08	52,30 <sup>b</sup> ± 0,02
JF2	84,21 <sup>b</sup> ± 0,45	44,19 <sup>a</sup> ± 0,88	2,19 <sup>a</sup> ± 0,10	55,43 <sup>ab</sup> ± 2,78	2,26 <sup>c</sup> ± 0,12	53,07 <sup>b</sup> ± 0,02
JF3	84,62 <sup>b</sup> ± 0,23	45,24 <sup>a</sup> ± 0,64	2,09 <sup>a</sup> ± 0,02	54,26 <sup>a</sup> ± 2,92	1,80 <sup>b</sup> ± 0,18	54,78 <sup>b</sup> ± 0,04
JF4	83,64 <sup>b</sup> ± 0,35	43,69 <sup>a</sup> ± 2,37	2,20 <sup>a</sup> ± 0,06	58,24 <sup>bc</sup> ± 2,12	2,21 <sup>c</sup> ± 0,21	55,27 <sup>b</sup> ± 0,02

Η υγρασία συσχετίστηκε αρνητικά με το πορώδες ( $r=-0,8471$ ,  $P<0,05$ ) και τη φωτεινότητα της ψίχας ( $r=-0,9578$ ,  $P<0,05$ ). Μια πιο κλειστή δομή με μικρότερο πορώδες είχε ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές φωτεινότητας. Μικρότερο πορώδες (54,26%) βρέθηκε στο δείγμα JF3 και μεγαλύτερο (60,04%) στο δείγμα WBF. Οι Li et al. (2012) επίσης παρατήρησαν μικρότερο πορώδες σε άρτο με μικρότερο μέγεθος πίτυρου και το απέδωσαν στην αυξημένη διασπορά δραστικών ενώσεων με τη μείωση του μεγέθους του αλεύρου ολικής άλεσης. Ειδικά τα φερούλικα οξέα (συστατικό των πηκτών που σχηματίζονται από αραβινοξυλάνες) έχουν την ιδιότητα να ενισχύουν τα πήγματα αραβινοξυλανών (Cura et al., 2009) αυξάνοντας την ικανότητά τους για δέσμευση νερού με αποτέλεσμα να ανταγωνίζονται τη γλουτένη (Labat et al., 2002). Οι αραβινοξυλάνες που είναι οι κύριοι μη αμυλούχοι πολυσακχαρίτες στο πίτυρο σίτου ανταγωνίζονται για το νερό με τα κύρια πολυμερή της ζύμης από άλευρο ολικής άλεσης, γλουτένη και άμυλο, εμποδίζοντας τη διαδικασία συσσωμάτωσης πρωτεϊνών κατά τη διάρκεια της θέρμανσης (Rosell et al., 2010). Ως εκ τούτου, ο σχηματισμός του δικτύου γλουτένης αναστέλλεται, αφού η ποσότητα νερού δεν επαρκεί για την πλήρη ενυδάτωσή της, οδηγώντας σε μικρότερο πορώδες στο τελικό προϊόν (Li et al., 2012).



Όσον αφορά τον ειδικό όγκο, παρότι δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση, υπήρξε μια τάση μείωσής του στα JW δείγματα και συσχετίστηκε θετικά με το πορώδες ( $r=0,8941$ ,  $P<0,05$ ). Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατήρησαν οι Curti et al. (2013), οι οποίοι χρησιμοποίησαν πίτυρα με διαφορετική κοκκομετρία και βέλτιστη ποσότητα νερού για την παραγωγή άρτων. Ομοίως, οι De Kock et al. (1999) διαπίστωσαν ότι μείωση του μεγέθους του πίτυρου είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή άρτων με μειωμένο όγκο. Τέλος, η μελέτη των Zhang & Moore (1999), οι οποίοι χρησιμοποίησαν διαφορετικά μεγέθη από πίτυρα τα οποία αλέστηκαν και δεν κοσκινίστηκαν, όπως έγινε και στην παρούσα μελέτη, έρχεται σε συμφωνία με τις υπόλοιπες μελέτες αφού μείωση του μεγέθους των πιτύρων είχε ως αποτέλεσμα μείωση του όγκου των άρτων.

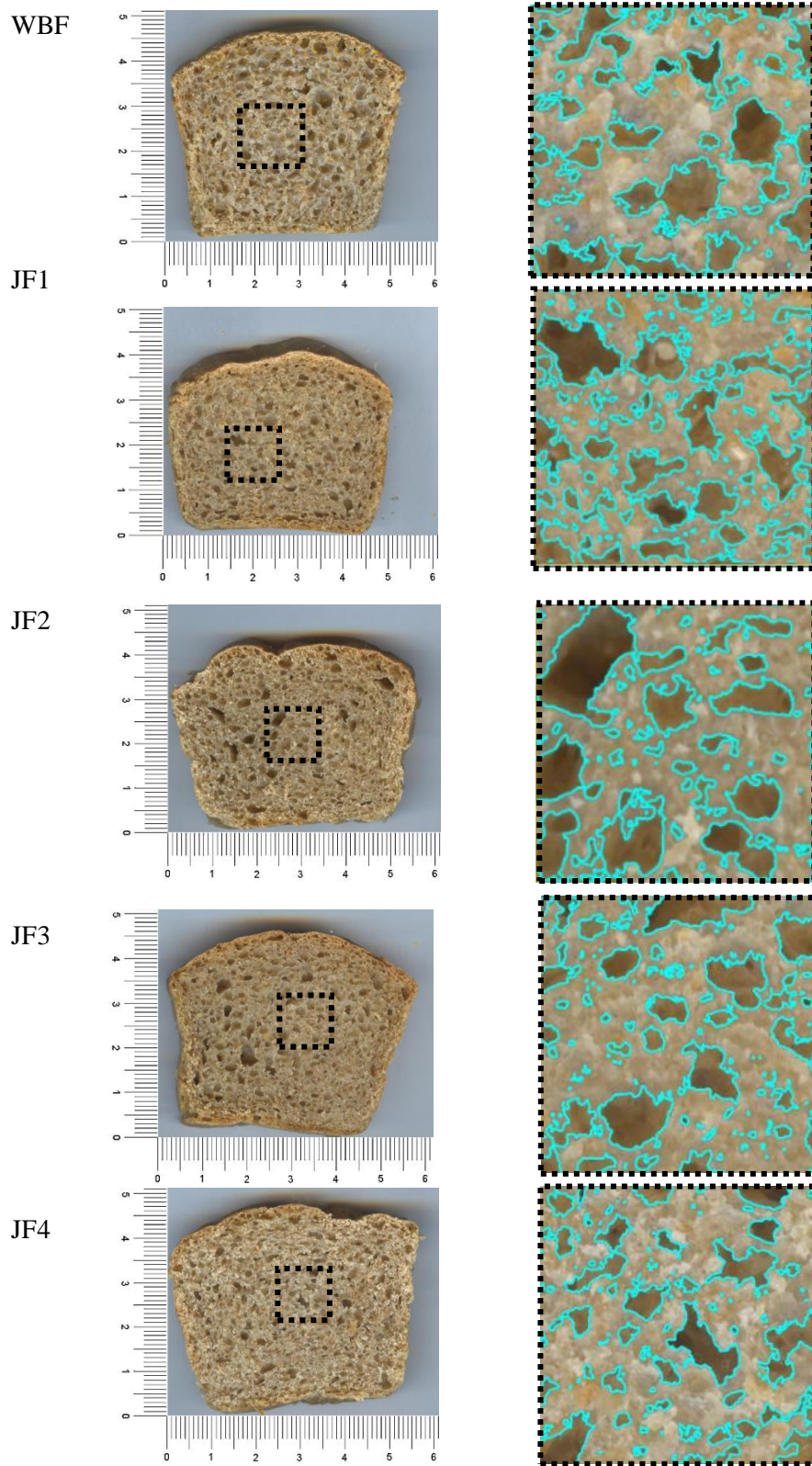
Η σκληρότητα του άρτου WBF ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από όλα τα άλλα δείγματα, ενώ αντίθετα η ελαστικότητά του ήταν η μικρότερη. Οι Liu et al. (2015) παρατήρησαν ότι ο άρτος στον ατμό (steam bread) από υπέρλεπτο άλευρο ολικής άλεσης ( $D_{50} < 69,13 \mu\text{m}$ ) ήταν πιο σκληρό σε σχέση με εκείνο που είχε παραχθεί από κοινό άλευρο ολικής άλεσης, ωστόσο οι διαφορές τους ήταν σχετικά μικρές.

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας είναι ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την τελική επιλογή των καταναλωτών οι οποίοι επιθυμούν μέτριου μεγέθους πόρους με ομοιόμορφη κατανομή. Οι Banu et al. (2012) ανέφεραν ότι για την παραγωγή άρτων υψηλής ποιότητας είναι επιθυμητός ένας μεγάλος αριθμός μικρών πόρων και η προσθήκη πίτυρου οδηγεί σε πιο τραχιά δομή. Οι Sullivan et al. (2011) εξήγησαν ότι ο μικρός αριθμός κελιών είναι αποτέλεσμα της διαφυγής αερίων κατά τη διάρκεια της επώασης, υποδεικνύοντας μια ασυνέχεια στο δίκτυο της γλουτένης. Στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες των δειγμάτων και σε μεγέθυνση λεπτομέρεια της ψίχας από όπου μετρήθηκαν τα διάφορα μορφολογικά της χαρακτηριστικά.

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 6.22 τα δείγματα JF παρουσίασαν σημαντικά αυξημένη πυκνότητα πόρων και σημαντικά μικρότερο επιφανειακό πορώδες, ενώ η διάμετρος των πόρων δεν παρουσίασε ξεκάθαρη τάση. Το επιφανειακό πορώδες συσχετίστηκε σημαντικά αρνητικά με την πυκνότητα των πόρων ( $r = -0,9787$ ,  $P < 0,05$ ), ενώ δεν συσχετίστηκε σημαντικά με το πορώδες.

**Πίνακας 6.22 Μορφολογικά χαρακτηριστικά άρτων παραγόμενων με άλευρα ολικής άλεσης και προσδιορισμός χρωματικών παραμέτρων ψίχας.**

Κωδικός Δείγματος	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm <sup>2</sup> )	Επιφανειακό πορώδες		Μέση διάμετρος πόρων (mm)		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$				
		(%)	(%)	(mm)	(mm)								
WBF	83,61 <sup>a</sup> ±	4,44	41,92 <sup>b</sup> ±	0,01	0,41 <sup>b</sup> ±	0,01	56,26 <sup>a</sup> ±	0,27	2,62 <sup>b</sup> ±	0,17	20,06 <sup>a</sup> ±	0,72	
JF1	106,80 <sup>b</sup> ±	6,86	37,45 <sup>a</sup> ±	0,02	0,39 <sup>ab</sup> ±	0,02	57,27 <sup>a</sup> ±	0,78	1,88 <sup>a</sup> ±	0,11	20,13 <sup>b</sup> ±	0,66	1,25
JF2	103,67 <sup>b</sup> ±	7,60	37,98 <sup>a</sup> ±	0,01	0,38 <sup>a</sup> ±	0,04	53,93 <sup>bc</sup> ±	0,48	3,75 <sup>e</sup> ±	0,21	22,50 <sup>c</sup> ±	1,06	3,56
JF3	107,00 <sup>b</sup> ±	9,38	38,14 <sup>a</sup> ±	0,04	0,38 <sup>a</sup> ±	0,02	53,22 <sup>c</sup> ±	0,35	3,14 <sup>d</sup> ±	0,15	21,79 <sup>c</sup> ±	0,61	3,54
JF4	102,40 <sup>b</sup> ±	0,57	38,11 <sup>a</sup> ±	0,02	0,39 <sup>ab</sup> ±	0,01	54,46 <sup>b</sup> ±	0,99	2,92 <sup>c</sup> ±	0,24	22,66 <sup>c</sup> ±	0,92	3,18



Σχήμα 6.26 Ενδεικτικές φωτογραφίες παραγόμενων άρτων (αριστερά) και λεπτομέρεια από τη ψίχα για τον υπολογισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους (δεξιά).

**Πίνακας 6.23 Συντελεστές συσχέτισης των φυσικών και μορφολογικών ιδιοτήτων άρτων ολικής άλεσης (με έντονο μαύρο σημειώνονται οι σημαντικές συσχετίσεις).**

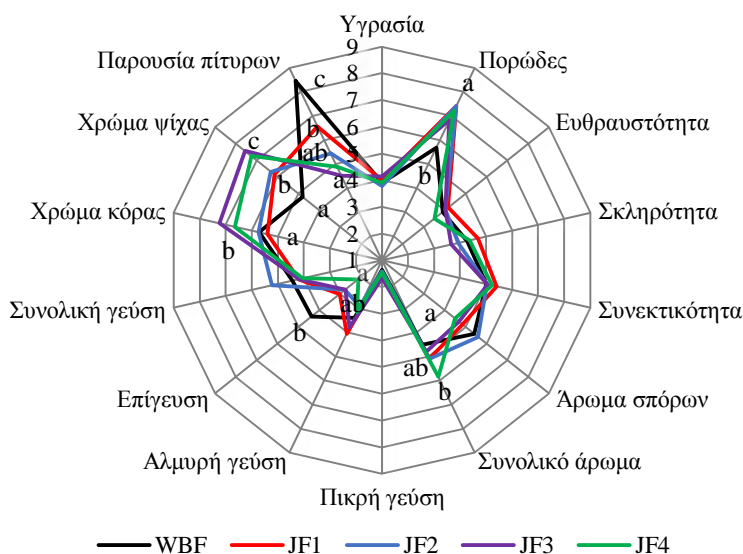
	Διάμετρος πόρων	Σκληρότητα	$L^*$	Υγρασία	Πυκνότητα πόρων	$D_{50}$	Επιφανειακό πορώδες	Πορώδες	Ελαστικότητα	Ειδικός όγκος	Απορρόφηση Νερού	Απόδοση
$a^*$	-0,4438	0,3301	-0,8657	0,6995	0,0981	-0,5257	0,0026	-0,7896	0,7426	-0,4720	0,4220	0,1893
$b^*$	-0,4470	0,7269	-0,8395	0,7586	0,4681	-0,8681	-0,4247	-0,6883	0,1741	-0,5295	0,7255	-0,0060
Διάμετρος πόρων		-0,2487	0,5468	-0,4374	-0,8205	0,6714	0,7279	0,8033	-0,1630	0,7340	-0,7077	-0,8799*
Σκληρότητα			-0,2478	0,1330	0,5019	-0,6007	-0,6029	-0,1370	-0,2705	0,0219	0,3682	-0,1791
$L^*$				-0,9578*	-0,3500	0,7836	0,2046	0,9211*	-0,4719	0,8110	-0,7715	-0,2539
Υγρασία					0,3411	-0,7835	-0,1865	-0,8471	0,3032	-0,8625	0,8214	0,1625
Πυκνότητα πόρων						-0,7963	-0,9787**	-0,5221	-0,4026	-0,6242	0,8068	0,5856
$D_{50}$							0,7281	0,7511	0,1204	0,7774	-0,9604**	-0,2723
Επιφανειακό πορώδες								0,3621	0,5153	0,4550	-0,7022	-0,4815
Πορώδες									-0,4879	0,8941*	-0,7882	-0,6102
Ελαστικότητα										-0,1563	-0,1345	0,2434
Ειδικός όγκος											-0,9020*	-0,5815
Απορρόφηση Νερού												0,3950

Ένα αστεράκι \* δηλώνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο  $p < 0,05$ . Δύο αστεράκια \*\* δηλώνουν ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο  $p < 0,01$ .

Όσον αφορά το χρώμα το δείγμα JF1 είχε τις περισσότερες ομοιότητες με το δείγμα WBF, αφού η συνολική διαφορά χρώματος ήταν πολύ μικρότερη (1,25) σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα WBF. Μικρότερη φωτεινότητα επέδειξαν όλα τα JW δείγματα πλην του JF1 που είχε παρόμοια τιμή με εκείνη του WBF. Οι θετικές τιμές του  $a^*$  που χαρακτηρίζουν το κόκκινο χρώμα και οι θετικές τιμές  $b^*$  που χαρακτηρίζουν το κίτρινο χρώμα αυξήθηκαν σημαντικά με τη μείωση της κοκκομετρίας.

### 6.5.2.3. Οργανοληπτική αξιολόγηση άρτων ολικής άλεσης

Τα αποτελέσματα της οργανοληπτικής αξιολόγησης των άρτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.27. Οι δοκιμαστές δεν βρήκαν διαφορές ανάμεσα στα δείγματα όσον αφορά την υγρασία, τη γεύση πικρού και αλμυρού, το άρωμα σπόρου, τη συνολική ένταση της γεύσης και τις ιδιότητες υφής (ευθραυστότητα, σκληρότητα, συνεκτικότητα). Στη συνολική αποδοχή η μεγαλύτερη τιμή σημειώθηκε στο δείγμα JF2 (3,11) και η μικρότερη στο WBF (2,40), ωστόσο δεν διέφεραν σημαντικά (Πίνακας 6.24) και όλα τα δείγματα παρόλο τις επιμέρους διαφορές τους έγιναν αποδεκτά. Για το πορώδες οι δοκιμαστές βρήκαν διαφορά μόνο στο δείγμα αναφοράς WBF το οποίο είχε τη μικρότερη τιμή (5,69).



Σχήμα 6.27 Οργανοληπτική αξιολόγηση άρτων ολικής άλεσης.

Πίνακας 6.24 Επίδραση κονιορτοποίησης αλεύρου ολικής άλεσης στη συνολική αποδοχή άρτων.

Δείγμα	Συνολική αποδοχή
WBF	2,40 <sup>a</sup> ± 0,70
JF1	2,80 <sup>a</sup> ± 1,03
JF2	3,11 <sup>a</sup> ± 1,05
JF3	2,64 <sup>a</sup> ± 0,81
JF4	2,50 <sup>a</sup> ± 0,53

Όσον αφορά την επίγευση, υπήρχε μια τάση μείωσης όσο η ένταση της διεργασίας αυξανόταν, ενώ η τάση ήταν αντίθετη για τη συνολική ένταση του αρώματος. Τα μεγαλύτερα σωματίδια υποβοηθούν λιγότερο τις διάφορες αντιδράσεις με πιθανό αποτέλεσμα την παραγωγή λιγότερο έντονων αρωμάτων επηρεάζοντας ταυτόχρονα και την ένταση της γεύσης (Kihlberg et al., 2004). Η παρουσία πίτυρου ήταν σαφώς αυξημένη στο αρχικό δείγμα (3,75) και μειώθηκε με την επεξεργασία φτάνοντας στην ελάχιστη τιμή

του στο δείγμα JW3 που ήταν και το πιο λεπτόκοκκο (2,00). Το χρώμα της ψίχας και της κόρας επίσης μεταβλήθηκαν σημαντικά και τα δείγματα με τα λεπτόκοκκα άλευρα παρουσίασαν πιο σκούρα ψίχα και κόρα, αποτέλεσμα που έρχεται σε συμφωνία με την παραπάνω ανάλυση χρώματος που έγινε με χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας.

Σύμφωνα με τους Kihlberg et al. (2004), διαφορετικές διεργασίες άλεσης, χρήση κυλινδρόμυλου ή πετρόμυλου, επιδρούν σημαντικά στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά άρτων ολικής άλεσης καθώς και στην απόδοση κατά το ψήσιμο, αποδίδοντας τις διαφορές κυρίως στο διαφορετικό μέγεθος κοκκομετρίας που προέκυψε από τις δύο αλέσεις. Η προσρόφηση και η απορρόφηση νερού αυξάνουν τον όγκο και το βάρος των μεγαλύτερων και λεπτότερων πίτουρων στη ζύμη με συνέπειες στην υφή της ψίχας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διεργασία της άλεσης που έδωσε μεγαλύτερα πίτυρα οδήγησε σε μια πιο συμπαγή δομή άρτου. Στην παρούσα μελέτη το δείγμα WBF με τα μεγαλύτερα πίτυρα είχε επίσης την πιο συμπαγή δομή, γεγονός που φαίνεται στο χαμηλό του πορώδες.

Η κόρα είναι το εξωτερικό τμήμα του άρτου και μπορεί να οριστεί ως «καταρρεύσαντα τοιχώματα πόρων ψίχας» (Eliasson & Larsson, 1993). Το χρώμα και το άρωμα της κόρας είναι αποτέλεσμα κυρίως της αντίδρασης Maillard και της καραμελοποίησης. Αμινοξέα και σάκχαρα εμπλέκονται σε αυτού του τύπου τις αντιδράσεις δίνοντας χαρακτηριστικό καφέ χρώμα, τραγανή υφή και πλούσια γεύση (Morris & Rose, 1996).

Σύμφωνα με τους Kihlberg et al. (2004), θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η επίδραση του μεγέθους και της μορφολογίας του πίτουρου στην αίσθηση της υγρασίας που έχει ο άρτος. Το πίτυρο περιέχει αραβινοξυλάνες που χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους ικανότητα να απορροφούν νερό, αν και ο ρόλος των διαλυτών και αδιάλυτων στο νερό πεντοζανών του πίτουρου δεν έχει διευκρινιστεί (Eliasson & Larsson, 1993, Izydorczyk & Biliaderis, 1995). Στην παρούσα μελέτη η διαφορετική κοκκομετρία δεν φάνηκε να επηρεάζει την αίσθηση της υγρασίας στο στόμα κατά την οργανοληπτική δοκιμή των άρτων.

#### 6.5.2.4. Μελέτη παλαιώσης

Τα προϊόντα αρτοποιίας είναι ευπαθή και υφίστανται πολλές φυσικοχημικές, οργανοληπτικές και μικροβιολογικές αλλαγές κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης (Robertson, 1993). Ως μαγατιάτεμα στο ψωμί περιγράφεται η χρονοεξαρτώμενη υποβάθμιση της γεύσης και της υφής του κατά την αποθήκευση. Κατά τη φάση αυτή η σκληρότητα της ψίχας αυξάνεται σημαντικά, η τραγανότητα της κόρας μειώνεται ως αποτέλεσμα της απώλειας υγρασίας και επανακρυστάλλωσης του αμύλου, και το ψωμί χάνει το αρχικό του άρωμα καταλήγοντας στο χαρακτηριστικό άρωμα του μαγατιάτικου. Αυτό το σύνολο των πολύπλοκων φυσικών και χημικών μεταβολών είναι αποτέλεσμα:

- της αναδιάταξης του αμύλου το οποίο είχε ζελατινοποιηθεί κατά το ψήσιμο,
- της κρυσταλλοποίησης της αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης,

- της ανταλλαγής υγρασίας μεταξύ αμύλου – πρωτεΐνης,
- της αύξησης των αλληλεπιδράσεων αμύλου – πρωτεΐνης,
- της ανακατανομής του νερού στο ψωμί και
- στην απομάκρυνση αρωματικών μορίων (Parker & Ring, 2001, Piazza & Masi, 1995, Schiraldi & Fessas, 2001).

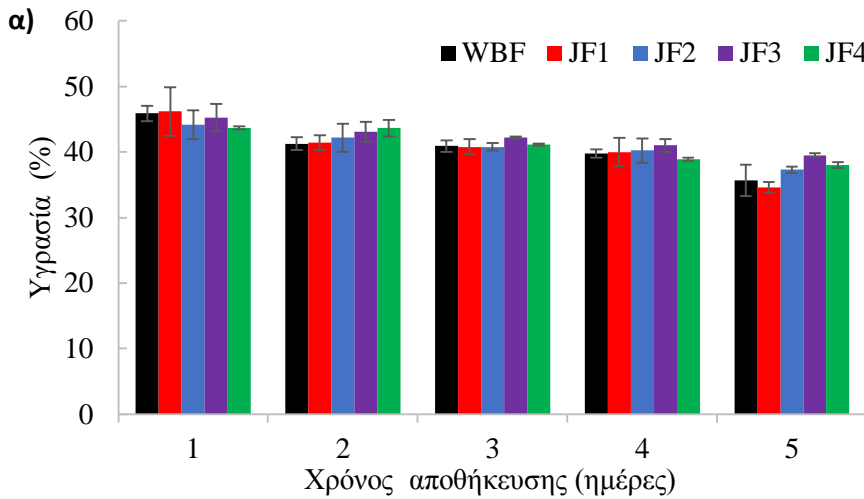
Στη παρούσα μελέτη ως δείκτης μπαγιατέματος χρησιμοποιήθηκε η υγρασία του άρτου και η σκληρότητα της ψίχας κατά την αποθήκευση (5 ημέρες, σε σακούλες πολυαιθυλενίου στους 25 °C και 60% RH). Τα δείγματα κατά την πλειοψηφία τους ακολούθησαν τον γενικό κανόνα και κατά την αποθήκευση έχασαν υγρασία, ενώ ταυτόχρονα η ψίχα τους έγινε πιο σκληρή. Η κλίση της καμπύλης της σκληρότητας ως προς το χρόνο αποθήκευσης καθώς και η συνολική απώλεια υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν ως δείκτες μπαγιατέματος των άρτων (Πίνακας 6.25). Αν και αρχικά (ημέρα 1) η σκληρότητα του δείγματος αναφοράς (WBF) ήταν η μεγαλύτερη (3,31N) κατά την αποθήκευση, η σκληρότητά του δεν μεταβλήθηκε σημαντικά, παρουσιάζοντας τον πιο χαμηλό ρυθμό μπαγιατέματος. Τα δείγματα που περιείχαν τα κονιορτοποιημένα άλευρα παρουσίασαν υψηλό ρυθμό μπαγιατέματος, έως και 2,4 φορές μεγαλύτερος από εκείνον του WBF. Από την άλλη πλευρά, η απώλεια υγρασίας ήταν μεγαλύτερη στο JF1 (25,15%) που περιείχε το άλευρο με τη λιγότερο έντονη επεξεργασία και ήταν πολύ κοντά με το αρχικό δείγμα (22,23%). Τα υπόλοιπα δείγματα είχαν ακόμη μικρότερη απώλεια υγρασίας και κυμάνθηκε από 12,63-15,56%. Σύμφωνα με τους León et al. (1997), ο δείκτης αναδιάταξης μειώνεται με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας και οι He & Hosenev (1990) αναφέρουν πως η μείωση της υγρασίας της ψίχας του άρτου ευνοεί τον σχηματισμό σταυροειδών δεσμών μεταξύ του αμύλου και των πρωτεϊνών αυξάνοντας την σκληρότητα του άρτου.

Παρότι οι διαφορές εδώ ήταν μεγάλες σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης (Two-way ANOVA), η διαφορετική κοκκομετρία των αλεύρων δεν επηρέασε σημαντικά την περιεχόμενη υγρασία ( $p=0,1906$ ) ενώ ο παράγοντας χρόνος ήταν καθοριστικός ( $p=0,0000$ ). Από την άλλη, στη σκληρότητα της ψίχας, και οι δύο παράγοντες, κοκκομετρία αλεύρου και χρόνος αποθήκευσης ( $p=0,0000$ ), επέδρασαν στατιστικά σημαντικά (Σχήμα 6.28).

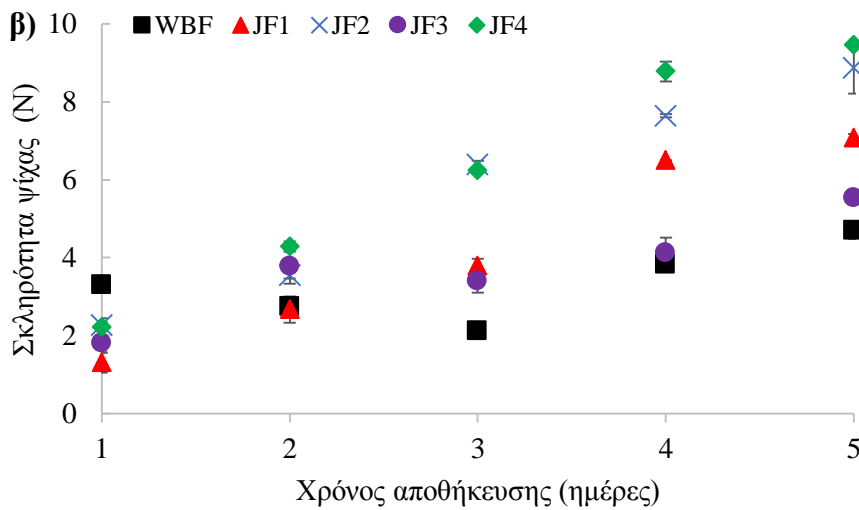
**Πίνακας 6.25 Δείκτης μπαγιατέματος παραγόμενων άρτων (αποθήκευση 5 ημερών).**

Δείγμα	Κλίση Ευθείας Σκληρότητα/ Χρόνο	Απώλεια υγρασίας (%)
WBF	0,74	22,23
JF1	1,17	25,15
JF2	1,61	15,56
JF3	0,88	12,63
JF4	1,76	12,99

Two-way ANOVA-LSD<sub>0,05</sub> p-value  
 Παράγοντας I χρόνος αποθήκευσης 0,0000  
 Παράγοντας II κοκκομετρία αλεύρου 0,1906



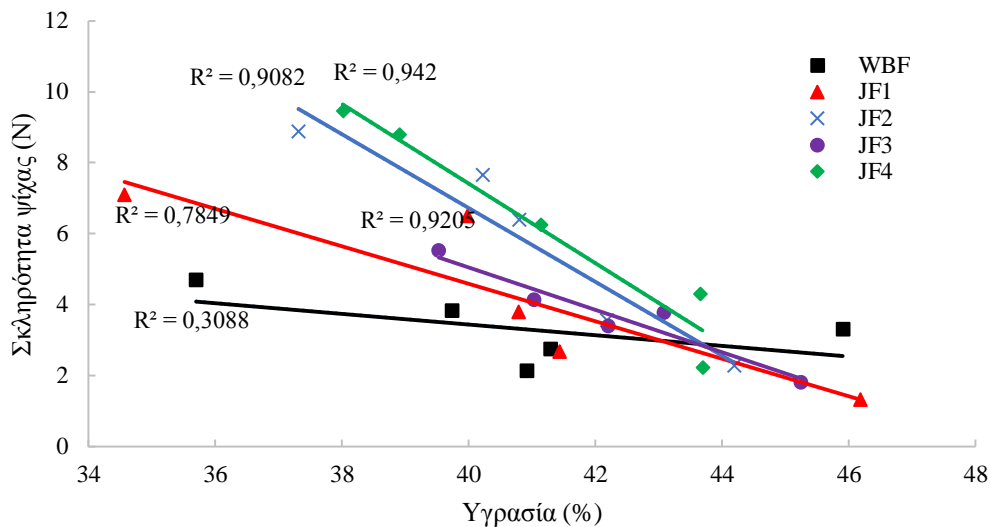
Two-way ANOVA-LSD<sub>0,05</sub> p-value  
 Παράγοντας I χρόνος αποθήκευσης 0,0000  
 Παράγοντας II κοκκομετρία αλεύρου 0,0049



Σχήμα 6.28 Επίδραση της κοκκομετρίας του αλεύρου και του χρόνου αποθήκευσης (α) στην υγρασία των άρτων και (β) στην σκληρότητα ψίχας. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.29 η σχέση μεταξύ υγρασίας και σκληρότητα ψίχας εξηγήθηκε επαρκώς με χρήση γραμμικού μοντέλου για τα δείγματα που περιείχαν τα πιο λεπτόκοκκα άλευρα ολικής άλεσης (JF2, JF3, JF4), καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) κυμάνθηκε από 0,908-0,942. Όσο η κοκκομετρία αυξανόταν το γραμμικό μοντέλο ερμήνευε όλο και λιγότερο την επίδραση της υγρασίας στη σκληρότητα αφού, ο  $R^2$  μειώθηκε και έφτασε στο 0,7849 και 0,3088 για το JF1 και WBF αντίστοιχα, υποδεικνύοντας μια διαφορετική συμπεριφορά που εξαρτάται από το μέγεθος της κοκκομετρίας. Πιθανόν οι συσχετίσεις να ήταν ακόμη καλύτερες αν είχε χρησιμοποιηθεί μόνο η υγρασία της ψίχας και όχι ολόκληρου του άρτου.

Παλαιότερες έρευνες αναφέρουν επίσης πιο μαλακή υφή σε ψίχα με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης (Baik & Chinachoti, 2003, Piazza & Masi, 1995). Αντίθετα, σύμφωνα με τους Curti et al (2013), μεγαλύτερη σκληρότητα και ταυτόχρονα μεγαλύτερη περιεκτικότητα νερού παρατηρήθηκε σε άρτους που είχαν ενισχυθεί σε πίτυρο, υποδεικνύοντας πως η υγρασία της ψίχας στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ήταν ο κύριος παράγοντας που καθόρισε τη σκληρότητά της.



Σχήμα 6.29 Συσχέτιση υγρασίας και σκληρότητας κατά την αποθήκευση (5 ημερών) σε άρτους ολικής άλεσης.

### 6.5.2.5. Συμπέρασμα

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων άρτων. Τα κονιορτοποιημένα άλευρα είχαν μεγαλύτερη απορρόφηση, άρα χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη ποσότητα νερού στη συνταγή. Η απόδοση αυτών των αλεύρων ήταν μεγαλύτερη, δηλαδή παράχθηκε μεγαλύτερη ποσότητα άρτου στην ίδια



ποσότητα αλεύρου, υποδεικνύοντας ένα μεγαλύτερο κέρδος κατά την αρτοποιήση. Το δείγμα αναφοράς είχε μικρότερη ελαστικότητα και μεγαλύτερη σκληρότητα, ενώ σε αυτό παρατηρήθηκαν πολλοί και μεγάλοι πόροι αφού είχε τη μικρότερη πυκνότητα πόρων με το μεγαλύτερο επιφανειακό πορώδες. Τα δείγματα JF παρουσίασαν σημαντικά αυξημένη πυκνότητα πόρων και σημαντικά μικρότερο επιφανειακό πορώδες, ενώ η διάμετρος των πόρων δεν παρουσίασε ξεκάθαρη τάση. Στις περισσότερες ιδιότητες δεν παρατηρήθηκε κάποια τάση με βάση την ένταση της άλεσης και, όπως φάνηκε και από τη στατιστική ανάλυση, η κοκκομετρία του αλεύρου συσχετίστηκε σημαντικά μόνο με την απορρόφηση νερού. Οι πιο έντονες διαφορές εμφανίστηκαν στο χρώμα, όπου πιο έντονη άλεση οδήγησε σε πιο σκουρόχρωμη ψίχα με μεγαλύτερη διαφοροποίηση από το δείγμα αναφοράς (ΔΕ). Στην οργανοληπτική αξιολόγηση οι δοκιμαστές αποδέχτηκαν εξίσου όλα τα δείγματα δίνοντας τη μεγαλύτερη βαθμολογία στο JF2 (3,11) και τη μικρότερη στο WBF (2,40). Σημαντικές διαφορές βρήκαν στο χρώμα με πιο σκούρο το JF4 και στην παρουσία πίτυρου με μια τάση μείωσης όσο η επεξεργασία άλεσης ήταν πιο έντονη (WBF>JF1> JF2 >JF3≈ JF4). Τέλος το άρωμα ήταν πιο έντονο στο JF4.

Συνοψίζοντας, η άλεση με πεπιεσμένο αέρα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή άρτων ολικής άλεσης, καθώς τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά. Πέραν της βέλτιστης ποσότητας νερού θα μπορούσε να μελετηθεί και ο βέλτιστος χρόνος ανάμιξης, ώστε τα χαρακτηριστικά της υφής των JF άρτων να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο.

### 6.5.3. Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει Mixolab

Τον τελευταίο καιρό αρκετές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση των άρτων που περιέχουν άλευρα ολικής άλεσης (Rosell et al., 2009). Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες για το πώς η άλεση με πεπιεσμένο αέρα επιδρά στην ποιότητα του άρτου και στην *in vitro* πέψη τους.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού ήταν η ενσωμάτωση αλεύρων ολικής άλεσης διαφορετικής κοκκομετρίας, που παρήχθησαν με μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. κεφ. 6.3), σε άρτους και η αξιολόγηση αυτών. Σε αντίθεση με τα κεφ. 6.5.1 και 6.5.2, για την παραγωγή των εν λόγω άρτων χρησιμοποιήθηκε ποσότητα νερού που προσδιορίστηκε με χρήση Mixolab. Ως εκ τούτου, στο πρώτο στάδιο έγινε προσδιορισμός βέλτιστης απορρόφησης νερού και μελέτη ρεολογικών χαρακτηριστικών ζυμαριών. Ακολούθησε μελέτη της κινητικής διόγκωσης των ζυμαριών. Όσον αφορά τους άρτους, αξιολογήθηκαν ως προς το χρώμα, τη διόγκωση, την υγρασία και τη σκληρότητα. Για τους άρτους πραγματοποιήθηκε *in vitro* διαδικασία υδρόλυσης αμύλου, υπολογισμός ελεύθερων σακχάρων (FS), ανθεκτικού αμύλου (RS), αφομοιώσιμου αμύλου (DS) και μελέτη του υπολογιζόμενου γλυκαιμικού δείκτη (*eGI*). Τέλος σημειωθήκαν συσχετίσεις μεταξύ ιδιοτήτων άρτων και αντίστοιχων αλεύρων ολικής άλεσης από την ενότητα 6.3.

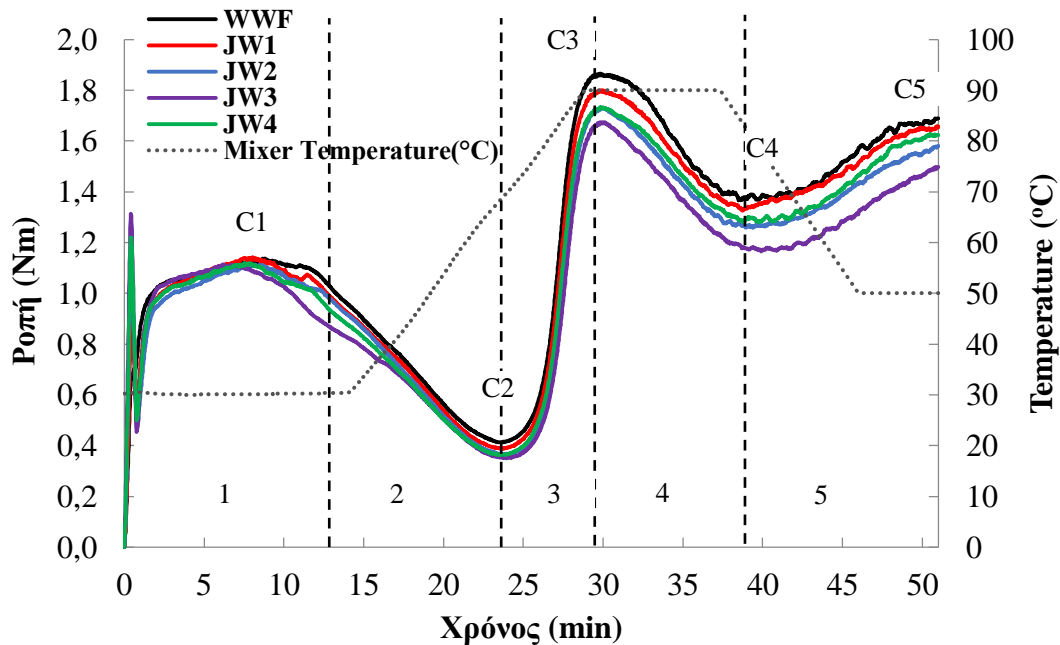
#### 6.5.3.1. Προσδιορισμός βέλτιστης απορρόφησης νερού με χρήση Mixolab και συνταγή άρτων

Η ανάμιξη της ζύμης είναι μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους για το χαρακτηρισμό της ποιότητας των αλεύρων. Το ρεολογικό προφίλ των ζυμαριών που δίνεται από το Mixolab παρουσιάζει τις αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτό εξαιτίας της ανάμιξης σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

Τα δείγματα αλεύρου WWF, JW1, JW2, JW3 και JW4 έδωσαν διαφορετικές καμπύλες Mixolab (Σχήμα 6.30). Οι καμπύλες στο αρχικό στάδιο ανάμιξης (1) ήταν παρόμοιες, αφού η ποσότητα νερού που προστέθηκε σε κάθε άλευρο ήταν τέτοια ώστε η αρχική συνοχή του ζυμαριού να είναι ίδια κατά την έναρξη της διεργασίας (1,1 Nm). Ωστόσο, στα επόμενα στάδια και υπό την επίδραση θέρμανσης – ψύξης, οι καμπύλες παρουσίασαν σημαντικές διαφορές. Η καμπύλη του JW3 παρουσίασε σημαντικά χαμηλότερες τιμές συνοχής, ενώ το WWF παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές.

Η μικροάλεση αύξησε την ικανότητα ενυδάτωσης των αλεύρων. Όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, η αύξηση της επιφάνειας ανά μονάδα βάρους, εξαιτίας της άλεσης, ευθύνεται για την αύξηση της απορρόφησης νερού. Ως εκ τούτου, προκειμένου όλα τα ζυμάρια να αποκτήσουν την ίδια συνοχή (1,1 Nm) η απορρόφηση νερού κυμάνθηκε από 64,1 έως 68%. Οι Gil-Humanes et al. (2012) ανέφεραν ότι άλευρα ολικής άλεσης είχαν περίπου 70% απορρόφηση ώστε τα αντίστοιχα ζυμάρια τους να φτάσουν σε συνοχή 1,1 Nm. Η συνταγή για την παραγωγή άρτων διαμορφώθηκε με βάση

την απορρόφηση νερού του κάθε αλεύρου που υπολογίστηκε με τη βοήθεια του Mixolab (Πίνακας 6.26). Οι κύριες παράμετροι που υπολογίστηκαν από τις καμπύλες Mixolab παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.27.



Σχήμα 6.30 Καμπύλες Mixolab για αλεύρο ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4 σε σχέση με τη θερμοκρασία. Φάση (1), ανάπτυξη ζύμης, φάση (2) αποδυνάμωση πρωτεΐνης, φάση (3) ζελατινοποίηση αμύλου, φάση (4) ενζυματική δραστηριότητα, φάση (5) αναδιάταξη αμύλου. C1 (Nm) μέγιστη ροπή κατά την ανάμιξη, C2 (Nm) μέτρο για την αποδυνάμωση των πρωτεϊνών βασισμένο στη μηχανική δράση και τη θερμοκρασία, C3 (Nm) εκφράζει τη ζελατινοποίηση του αμύλου, C4 (Nm) υποδεικνύει τη σταθερότητα της πηκτής που σχηματίζεται, C5 (Nm) μετρά την αναδιάταξη του αμύλου κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Πίνακας 6.26 Συνταγές για την παραγωγή άρτων με βάση την απορρόφηση νερού (%) από το Mixolab για το αλεύρο ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4.

Κωδικός Άρτου	Άλευρο	Νερό(%)	Μαγιά(%)	Αλάτι(%)
WBM	WWF	64,1		
JM1	JW1	65,0		
JM2	JW2	66,9	0,7	1,5
JM3	JW3	68,0		
JM4	JW4	66,6		

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF > JW1 > JW2 > JW3 ≥ JW4

Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει Mixolab

**Πίνακας 6.27** Παράμετροι που υπολογίστηκαν από τις καμπύλες του Mixolab για άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1, JW2, JW3, JW4.

Περιγραφή		WWF	JW1	JW2	JW3	JW4
Απορρόφηση (%)	Ποσότητα νερού ώστε ροπή=1,1 Nm (C1)	64,1	65	66,9	68	66,6
Σταθερότητα (min)	Χρόνος όπου το πάνω τμήμα> C1- 11%	8,0 <sup>b</sup> ± 0,8	6,7 <sup>ab</sup> ± 1,0	4,5 <sup>a</sup> ± 1,2	5,3 <sup>ab</sup> ± 1,0	4,9 <sup>ab</sup> ± 2,2
Amplitude (Nm)	Πλάτος καμπύλης στο C1, ελαστικότητα ζύμης	0,39 <sup>a</sup> ± 0,01	0,59 <sup>b</sup> ± 0,11	0,90 <sup>b</sup> ± 0,28	0,51 <sup>ab</sup> ± 0,22	0,56 <sup>ab</sup> ± 0,18
C2 (Nm)	Αποδυνάμωση ζύμης	0,42 <sup>d</sup> ± 0,01	0,39 <sup>c</sup> ± 0,00	0,37 <sup>b</sup> ± 0,01	0,35 <sup>a</sup> ± 0,00	0,37 <sup>b</sup> ± 0,01
α (Nm/min)	Κλίση μεταξύ περιόδου 30°C και C2- ρυθμός αποδυνάμωσης πρωτεΐνης	-0,08 <sup>b</sup> ± 0,01	-1,03 <sup>a</sup> ± 0,01	-1,01 <sup>a</sup> ± 0,01	-1,01 <sup>a</sup> ± 0,01	-1,01 <sup>a</sup> ± 0,01
	Αρχική θερμοκρασία ζελατινοποίησης(°C)	63,4 <sup>a</sup> ± 0,8	64,6 <sup>a</sup> <sub>b</sub> ± 0,1	64,7 <sup>b</sup> ± 0,6	66,1 <sup>c</sup> ± 0,2	64,0 <sup>ab</sup> ± 0,3
C3 (Nm)	Μέγιστο της θέρμανσης	1,87 <sup>d</sup> ± 0,01	1,80 <sup>c</sup> ± 0,00	1,74 <sup>b</sup> ± 0,00	1,68 <sup>a</sup> ± 0,01	1,74 <sup>b</sup> ± 0,01
C4 (Nm)	Τελευταίο μέγιστο της θέρμανσης-Σταθερότητα	1,36 <sup>e</sup> ± 0,01	1,33 <sup>d</sup> ± 0,01	1,26 <sup>b</sup> ± 0,01	1,17 <sup>a</sup> ± 0,01	1,28 <sup>c</sup> ± 0,01
C5 (Nm)	Αύξηση ιξώδους στη ψύξη- αναδιάταξη αμύλου	1,69 <sup>d</sup> ± 0,01	1,66 <sup>cd</sup> ± 0,01	1,58 <sup>b</sup> ± 0,04	1,50 <sup>a</sup> ± 0,05	1,63 <sup>bc</sup> ± 0,04
C3-C2 (Nm)	Εύρος ζελατινοποίησης αμύλου,	1,47 <sup>d</sup> ± 0,01	1,42 <sup>c</sup> ± 0,01	1,38 <sup>b</sup> ± 0,01	1,33 <sup>a</sup> ± 0,01	1,37 <sup>b</sup> ± 0,00
C4-C3 (Nm)	Εύρος σταθερότητα κατά το ψήσιμο	-0,51 <sup>a</sup> ± 0,01	-0,48 <sup>b</sup> ± 0,01	-0,49 <sup>ab</sup> ± 0,01	-0,51 <sup>a</sup> ± 0,01	-0,46 <sup>b</sup> ± 0,01
C5-C4 (Nm)	Αναδιάταξη αμύλου, έναρξη πτώσης θερμοκρασίας	0,34 <sup>a</sup> ± 0,01	0,34 <sup>a</sup> ± 0,02	0,33 <sup>a</sup> ± 0,01	0,34 <sup>a</sup> ± 0,01	0,35 <sup>a</sup> ± 0,04

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας WWF> JW1> JW2> JW3≥JW4. Οι τιμές που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύει στατιστική διαφορά (P≤ 0.05).

Η υψηλή σταθερότητα στο ζυμαρί συσχετίζεται συνήθως με τη δύναμη των αλεύρων (Marco & Rosell, 2008). Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος σταθερότητας τόσο πιο «δυνατό» είναι το άλευρο. Σε σύγκριση με το αρχικό άλευρο (WWF) τα μικροαλεσμένα (JW) παρουσίασαν μικρότερη σταθερότητα. Οι Moreira et al. (2010) μελέτησαν την επίδραση του μεγέθους της κοκκομετρίας αλεύρων κάστανου στο ρεολογικό τους προφίλ. Έχοντας την ίδια αρχική συνοχή, παρατήρησαν ότι λιγότερο σταθερά ήταν τα δείγματα με τη μικρότερη κοκκομετρία. Ο παράγοντας «Amplitude» που σχετίζεται με την ελαστικότητα του ζυμαριού δεν παρουσίασε ξεκάθαρη τάση στα JW δείγματα. Το δείγμα WWF παρουσίασε την ελάχιστη τιμή (0,39 Nm), ενώ το δείγμα JW2 παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή (0,90 Nm) υποδεικνύοντας ότι στο δείγμα αυτό αυξήθηκε η ελαστικότητα του ζυμαριού. Παρόλο που το ποσοστό πρωτεΐνης ήταν παρόμοιο σε όλα τα δείγματα (κυμάνθηκε από 15-15,51%, βλ. Πίνακα 6.10), ο παράγοντας C2, που σχετίζεται με την αποδυνάμωση της πρωτεΐνης, διέφερε σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, η άλεση συνετέλεσε στην αποδυνάμωση της πρωτεΐνης, καθότι ο παράγοντας C2 μειώθηκε έως και κατά 16,7% στο δείγμα JW3. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην αραίωση της πρωτεΐνης, εξαιτίας της ύπαρξης περισσώτερου νερού, είτε στην εμπλοκή άλλων παραγόντων στη μετουσίωση της πρωτεΐνης. Ο παράγοντας *a* δίνει την ταχύτητα αποδυνάμωσης της πρωτεΐνης η οποία ήταν σημαντικά αυξημένη στο δείγμα WWF (-0,08 Nm/min).

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα οδήγησε σε σημαντική μείωση του C3, που σχετίζεται με τη ζελατινοποίηση του αμύλου. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της αύξησης της απορρόφησης νερού υπάρχει αραίωση στα μικροαλεσμένα άλευρα, οδηγώντας σε μικρότερες τιμές συνοχής μετά τη θέρμανση. Περαιτέρω μείωση του ιξώδους (C4) είναι το αποτέλεσμα της φυσιολογικής κατάρρευσης των αμυλόκοκκων εξαιτίας της διαμητικής τάσης και της αύξησης της θερμοκρασίας.

Το C4 διαφοροποιήθηκε σημαντικά μεταξύ των δειγμάτων και μειώθηκε καθώς η ένταση της διεργασίας αυξήθηκε. Η μεγαλύτερη αλλαγή παρατηρήθηκε στο δείγμα JW3 με τη μείωση να φτάνει έως και 14% (από 1,36 σε 1,17 Nm). Η σταθερότητα του πηγματος αμύλου που δημιουργείται κατά τη θέρμανση εκφράζεται με τη διαφορά μεταξύ C3 και C4 και δεν μεταβλήθηκε εξαιτίας της άλεσης. Η ψύξη του πηγματος είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής στο στάδιο C4-C5 που σχετίζεται με την αναδιάταξη του αμύλου (Rosell et al., 2007) και κατ' επέκταση με το μπαγιατέμα των τελικών προϊόντων. Ούτε σε αυτό το στάδιο παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στα δείγματα και οι τιμές κυμάνθηκαν από 0,33-0,35 Nm. Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν στην τελική συνοχή των ζυμαριών (C5) που σχετίζεται με την ταχύτητα μπαγιατέματος. Η υψηλότερη τιμή παρατηρήθηκε στο WWF και μειώθηκε με την ένταση της διεργασίας άλεσης (JW1>JW4>JW2>JW3).

Οι Aprodu et al. (2010) πρότειναν ότι η συνοχή του ζυμαριού επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του αλεύρου σε τέφρα, αυξάνοντας τα C3, C4 και C5. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιήθηκε ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα, δεν παρατηρήθηκε κάποια

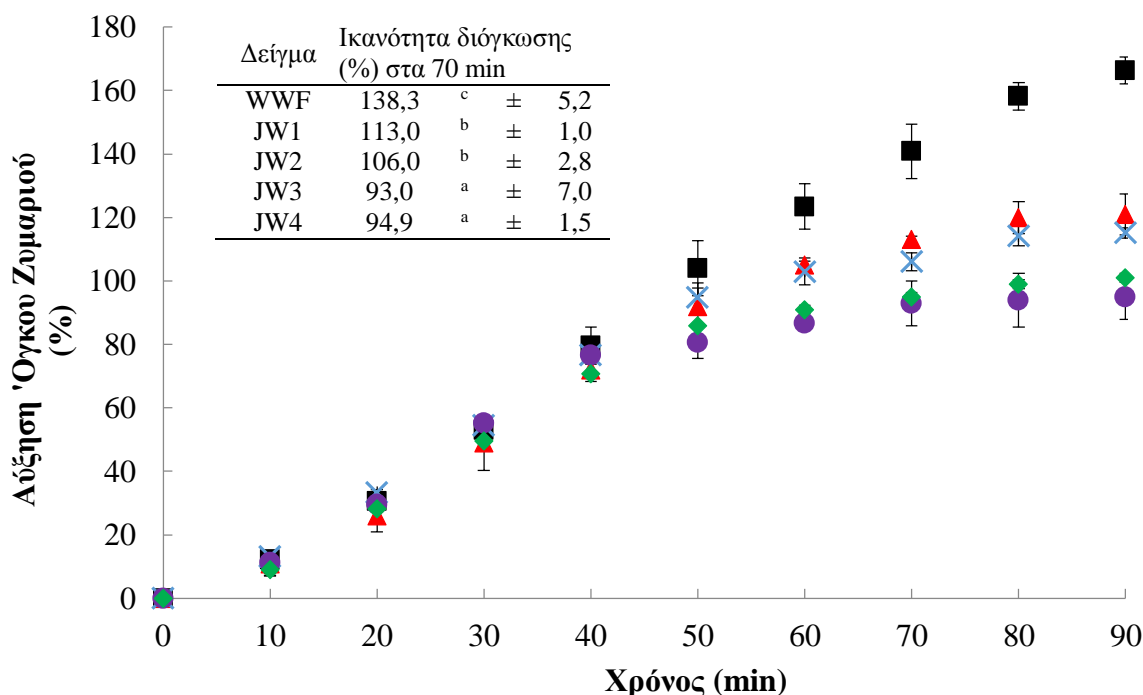
συσχέτιση των παραμέτρων του Mixolab με την τέφρα των αλεύρων, που ήταν παρόμοια για όλα τα δείγματα (βλ. Πίνακα 6.10). Συνοψίζοντας, τα διαφορετικά ρεολογικά προφίλ που παρατηρήθηκαν μπορούν να συσχετιστούν με τον υψηλό ανταγωνισμό για τη δέσμευση νερού από ίνες, πρωτεΐνες και άμυλο, που δρα συνεργιστικά με την αύξηση της επιφάνειας των κόκκων αλεύρου. Η απορρόφηση νερού αυξήθηκε με την άλεση με αποτέλεσμα η περιεκτικότητα νερού στα ζυμάρια επίσης να αυξηθεί, ώστε να επιτευχθεί η ίδια αρχική συνοχή, οδηγώντας τελικά σε αραίωση του αμύλου.

### 6.5.3.2. Διόγκωση ζυμαριών

Η διόγκωση της ζύμης οφείλεται στις φυσαλίδες αέρα που σχηματίζονται κατά την ανάμιξη και δημιουργία ζυμαριού. Σύμφωνα με τους Cauvain & Young (2003), οι φυσαλίδες αυτές δρουν ως πυρήνες για το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά τη ζύμωση της μαγιάς, με αποτέλεσμα τη διόγκωση του ζυμαριού.

Προκυμμένου να παραχθούν τα ζυμάρια και εν συνεχεία οι άρτοι, χρησιμοποιήθηκαν οι ποσότητες νερού που υπολογίστηκαν παραπάνω, με βάση την ίδια αρχική συνοχή των ζυμαριών (Πίνακας 6.27). Η διαφορετική ποσότητα νερού αλλά και η εν γένει διαφορετικότητα των αλεύρων είχαν ως αποτέλεσμα τη διαφορετική διόγκωση των ζυμαριών. Ως χρόνος επώασης επιλέχτηκε για όλα τα δείγματα ο ίδιος, τα 70 min, όπου παρατηρήθηκε διπλασιασμός του όγκου για όλα τα ζυμάρια και έναρξη της πτώσης του ρυθμού διόγκωσής τους (Σχήμα 6.31).

Η ικανότητα διόγκωσης, στα 70 min, μειώθηκε σημαντικά στα δείγματα που είχαν υποστεί την άλεση. Το ζυμάρι με το WWF παρουσίασε τη μεγαλύτερη διόγκωση (138,3%), ενώ τα JW3 και JW4 παρουσίασαν τη μικρότερη (93 και 94,9%, αντίστοιχα). Οι Sanz Penella et al. (2008) ισχυρίστηκαν ότι μεγάλη ενυδάτωση έδωσε ζυμάρια με φτωχά χαρακτηριστικά ανάπτυξης και μικρή ικανότητα διόγκωσης. Επίσης, το μέγεθος του πίτυρου επιδρά σημαντικά στη διόγκωση, με τα μικρότερα μεγέθη να ευνοούν λιγότερο τη συγκράτηση αερίων σε σχέση με τα μεγαλύτερα. (Stanley & Young 2006). Οι μικροί κόκκοι σχηματίζουν μια ασθενή δομή που πιθανότατα δεν είναι ικανή να συγκρατήσει τα αέρια που απελευθερώνονται κατά τη ζύμωση, οδηγώντας σε άρτους με μικρότερο όγκο (de la Hera et al., 2013b). Έτσι, η άλεση με πεπιεσμένο αέρα, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τάσης μείωσης της διόγκωσης των ζυμαριών. Αρκετές μελέτες καταλήγουν στο ότι το μέγεθος του πίτυρου επιδρά στη διόγκωση των άρτων. Ωστόσο τα ευρήματα είναι αμφιλεγόμενα και δεν υπάρχει σαφές συμπέρασμα για το πώς το μέγεθος του πίτυρου επιδρά στη διόγκωση, θετικά ή αρνητικά. Στη συγκεκριμένη μελέτη η λεπτόκοκκη άλεση οδήγησε σε μείωση της ικανότητας διόγκωσης.



Σχήμα 6.31 Καμπύλες συσχέτισης αύξησης όγκου ζυμαριών κατά την επώαση και χρόνου για άλευρο ολικής άλεσης σίτου WWF (■) και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα JW1 (▲), JW2 (X), JW3 (●), JW4 (◆). Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.

### 6.5.3.3. Ποιοτική αξιολόγηση άρτων

Στον Πίνακα 6.28 παρουσιάζονται οι μετρούμενες φυσικές ιδιότητες για τους άρτους ολικής άλεσης, συμβατικό WBM και με χρήση μικροαλεσμένων αλεύρων από μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε διαφορετικές συνθήκες (JM1, JM2, JM3, JM4).

Όπως παρατηρήθηκε στον Πίνακα 6.27 οι άρτοι που παρήχθησαν με τα κονιορτοποιημένα άλευρα περιείχαν μεγαλύτερη ποσότητα νερού σε σχέση με το WBM. Ωστόσο, η τελική υγρασία του WBM διέφερε στατιστικά σημαντικά μόνο με τα JM3 και JM4, τα άλευρα των οποίων είχαν υποστεί τις πιο έντονες διεργασίες άλεσης, υποδηλώνοντας ότι το νερό δεν συγκρατήθηκε αλλά χάθηκε κατά το ψήσιμο. Πιθανόν, το χαμηλότερο μέγεθος της κοκκομετρίας να ευνοεί την απελευθέρωση νερού κατά τη διάρκεια του ψησίματος.

Η σκληρότητα της ψίχας αυξήθηκε στους άρτους που περιείχαν μικροαλεσμένα άλευρα, και μία σταθερή αύξηση παρατηρήθηκε με την αύξηση της έντασης της διεργασίας άλεσης. Σύμφωνα με τους Gómez et al. 2011, η σκληρότητα του άρτου συσχετίζεται με τον όγκο του. Στην παρούσα μελέτη παρατηρήθηκε αρνητική συσχέτιση των δύο ( $r=-0,9698$ ,  $P<0,05$ ). Το μέγεθος του πίτυρου επίσης επιδρά στη σκληρότητα της ψίχας. Υψηλότερες τιμές σκληρότητας βρέθηκαν σε άρτους που περιείχαν λεπτόκοκκα άλευρα σε σχέση με εκείνους που περιείχαν χονδρόκοκκα (Martinez et al., 2014).

Πίνακας 6.28 Φυσικές ιδιότητες παραγόμενων άρτων.

Δείγμα άρτου	Υγρασία (%)	Σκληρότητα (g.)	Ειδικός όγκος (cm <sup>3</sup> /g)	L*	a*	b*	ΔΕ*
WBM	35,78 <sup>b</sup> ± 0,49	707 <sup>a</sup> ± 98	2,50 <sup>d</sup> ± 0,09	60,48 <sup>b</sup> ± 0,43	4,86 <sup>a</sup> ± 0,38	19,23 <sup>a</sup> ± 0,12	0
JM1	34,48 <sup>ab</sup> ± 0,09	1066 <sup>ab</sup> ± 0	2,25 <sup>c</sup> ± 0,04	55,87 <sup>a</sup> ± 3,15	5,25 <sup>ab</sup> ± 0,02	20,45 <sup>b</sup> ± 0,70	3,34 <sup>a</sup> ± 0,25
JM2	34,65 <sup>ab</sup> ± 0,21	1281 <sup>b</sup> ± 132	2,15 <sup>bc</sup> ± 0,07	56,56 <sup>ab</sup> ± 0,06	5,77 <sup>bc</sup> ± 0,08	21,91 <sup>c</sup> ± 0,44	5,11 <sup>b</sup> ± 0,71
JM3	33,49 <sup>a</sup> ± 1,16	1808 <sup>c</sup> ± 296	1,98 <sup>ab</sup> ± 0,04	56,06 <sup>a</sup> ± 1,87	6,35 <sup>c</sup> ± 0,36	22,91 <sup>d</sup> ± 0,02	5,07 <sup>b</sup> ± 0,42
JM4	33,80 <sup>a</sup> ± 0,51	1678 <sup>c</sup> ± 44	1,90 <sup>a</sup> ± 0,15	56,94 <sup>ab</sup> ± 0,00	5,96 <sup>c</sup> ± 0,13	22,26 <sup>cd</sup> ± 0,17	5,39 <sup>b</sup> ± 0,58

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας αντίστοιχων αλεύρων WBM> JM1> JM2> JM3≥ JM4. Οι τιμές που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύει στατιστική διαφορά (P≤ 0,05)

Πίνακας 6.29 Παράμετροι από την κινητική της in vitro υδρόλυσης αμύλου, υπολογιζόμενος γλυκαιμικός δείκτης, και in vitro πέψη άρτων ολικής άλεσης σίτου WBM και επεξεργασμένων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε διάφορες συνθήκες JM1, JM2, JM3, JM4.

Δείγμα Άρτου	WBM	JM1	JM2	JM3	JM4
C <sub>∞</sub> (%)	52,2 <sup>ab</sup> ± 1,9	56,2 <sup>b</sup> ± 0,9	52,0 <sup>ab</sup> ± 1,5	51,9 <sup>ab</sup> ± 3,4	49,4 <sup>a</sup> ± 0,5
k (min <sup>-1</sup> )	0,027 <sup>a</sup> ± 0,003	0,020 <sup>a</sup> ± 0,004	0,024 <sup>a</sup> ± 0,000	0,023 <sup>a</sup> ± 0,002	0,025 <sup>a</sup> ± 0,000
AUC	7411 <sup>a</sup> ± 44	7326 <sup>a</sup> ± 399	7213 <sup>a</sup> ± 146	7067 <sup>a</sup> ± 310	6930 <sup>a</sup> ± 105
HI	90 <sup>a</sup> ± 1	89 <sup>a</sup> ± 5	87 <sup>a</sup> ± 2	86 <sup>a</sup> ± 4	84 <sup>a</sup> ± 1
eGI	86 <sup>a</sup> ± 0	85 <sup>a</sup> ± 4	84 <sup>a</sup> ± 2	82 <sup>a</sup> ± 3	81 <sup>a</sup> ± 1
Ελεύθερα Σάκχαρα (mg/100mg)	0,12 <sup>a</sup> ± 0,00	0,15 <sup>ab</sup> ± 0,00	0,13 <sup>ab</sup> ± 0,01	0,13 <sup>ab</sup> ± 0,02	0,16 <sup>b</sup> ± 0,01
Ανθεκτικό Άμυλο (mg/100 mg)	1,62 <sup>a</sup> ± 0,53	1,61 <sup>a</sup> ± 0,28	1,96 <sup>a</sup> ± 0,00	1,89 <sup>a</sup> ± 0,05	1,83 <sup>a</sup> ± 0,12
Αφομοιώσιμο Άμυλο (mg/100 mg)	43,36 <sup>a</sup> ± 1,23	42,06 <sup>a</sup> ± 5,62	48,44 <sup>a</sup> ± 3,73	50,64 <sup>a</sup> ± 3,20	42,20 <sup>a</sup> ± 0,10

Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας αντίστοιχων αλεύρων WBM> JM1> JM2> JM3≥ JM4. Οι τιμές που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύει στατιστική διαφορά (P≤ 0,05). C<sub>∞</sub>, συγκέντρωση ισορροπίας, k, σταθερά κινητικής, HI, δείκτης υδρόλυσης, AUC, περιοχή κάτω από την καμπύλη, eGI, υπολογιζόμενος γλυκαιμικός δείκτης



Όσον αφορά τη δομή των σχηματιζόμενων άρτων, χαρακτηρίστηκε από μια κλειστή δομή με μικρά κελιά, που επηρέασε το χρώμα της ψίχας. Η φωτεινότητα μειώθηκε, ενώ οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν το κόκκινο και το κίτρινο χρώμα αυξήθηκαν με την άλεση. Η επίδραση της άλεσης στο σύνολο του χρώματος των άρτων φάνηκε από τη διαφορά του χρώματος ( $\Delta E^*$ ) που αυξήθηκε με την αύξηση της έντασης της διεργασίας. Ωστόσο, μόνο το δείγμα JM1, που είχε υποστεί την ηπιότερη άλεση, διέφερε σημαντικά από τα υπόλοιπα δείγματα JM, παρουσιάζοντας τη μικρότερη διαφορά σε σχέση με το δείγμα αναφοράς WBM (3,34).

#### 6.5.3.4. Πέψη αμύλου σε άρτους ολικής άλεσης

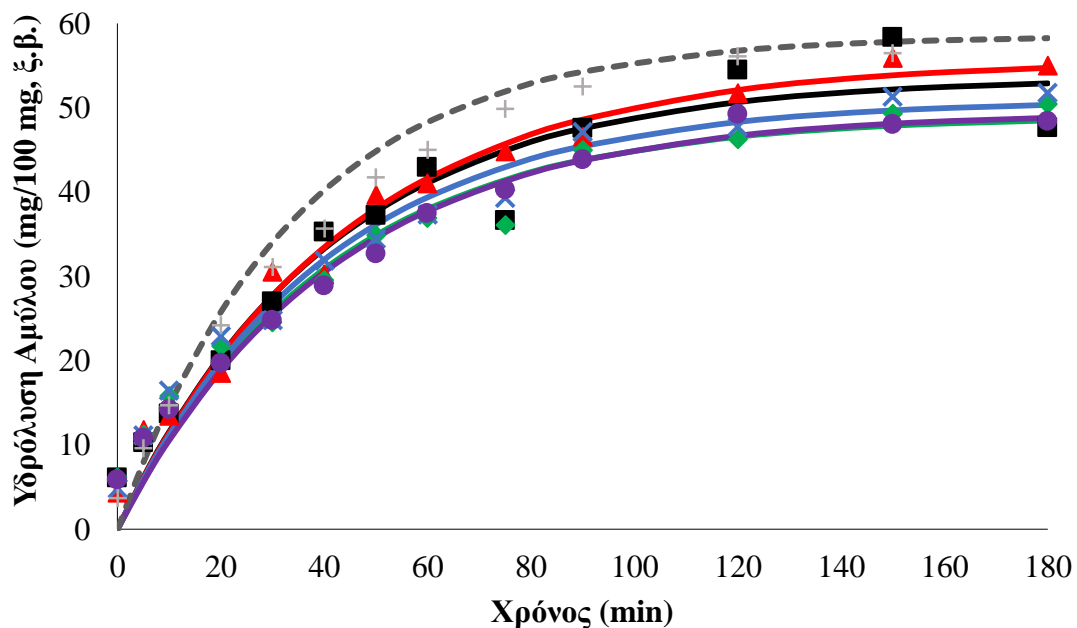
Οι παράμετροι που προέκυψαν από την *in vitro* πέψη των άρτων ολικής άλεσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.29. Το ανθεκτικό άμυλο (RS) ανήκει στις διαιτητικές ίνες αφού διαφεύγει της πέψης στο λεπτό έντερο και αποτελεί το σύνολο του αμύλου που περνά στο παχύ έντερο (Englyst & Cummings, 1990). Στην παρούσα μελέτη, τα δείγματα περιείχαν μικρό ποσοστό RS (1,61-1,96 mg/100 mg). Οι μέσες τιμές αυξήθηκαν εξαιτίας της άλεσης, αλλά δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων. Γενικά, τα αμυλούχα τρόφιμα, όπως οι άρτοι, έχουν σχεδόν όλο τους το άμυλο ζελατινοποιημένο με αποτέλεσμα τη γρήγορη αποικοδόμησή τους στο λεπτό έντερο (Parada & Aguilera, 2011). Έτσι, η περιεκτικότητα σε RS ήταν λογικό να είναι χαμηλή. Οι μηχανικές και οι θερμικές επεξεργασίες άλλαξαν τη δομή και την πεπτικότητα του αμύλου. Οι θερμικές επεξεργασίες, όπως το ψήσιμο, καταστρέφουν πλήρως την ημικρυσταλλική δομή των αμυλόκοκκων και προκαλούν την απώλεια του RS (Zhang et al., 2006). Σύμφωνα με τη μελέτη των Zhang et al. (2006), η περιεκτικότητα σε RS μειώθηκε μετά την αρτοποιήση. Το DS, δηλαδή το άμυλο που απορροφάται στο λεπτό έντερο του ανθρώπου, κυμάνθηκε από 42,06-50,64 mg/100 mg, αλλά δεν παρατηρήθηκαν στατιστικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων. Χαμηλές τιμές FS παρατηρήθηκαν με στατιστική διαφορά μόνο μεταξύ των WBM και JW4.

Οι καμπύλες ενζυματικής πέψης των άρτων ολικής άλεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.32. Οι άρτοι που παρήχθησαν από τα μικροαλεσμένα άλευρα παρουσίασαν μικρότερο ρυθμό υδρόλυσης από το WBM, αλλά δεν παρατηρήθηκε κάποια τάση στη σταθερά της κινητικής υδρόλυσης ( $k$ ) εξαιτίας των διαφορετικών συνθηκών άλεσης (Πίνακας 6.29). Η μέγιστη τιμή υδρόλυσης ( $C_\infty$ ) ήταν ελάχιστη στο δείγμα JW4 (49,4%).

Ο υπολογιζόμενος γλυκαιμικός δείκτης ( $eGI$ ) ορίζεται ως η περιοχή κάτω από την καμπύλη της γλυκόζης μετά την κατανάλωση μιας τροφής που περιέχει μία συγκεκριμένη ποσότητα υδατάνθρακα. Παρέχει έναν έμμεσο τρόπο μέτρησης της ικανότητας του τροφίμου να αυξάνει τη γλυκόζη στο αίμα. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο λευκός άρτος ως πρότυπο τρόφιμο. Τα προϊόντα λευκού αλεύρου είναι γνωστό ότι παρουσιάζουν υψηλές τιμές  $eGI$ , κοντά στο 100. Αντίστοιχα, οι άρτοι ολικής άλεσης αναμένεται να έχουν μικρότερη τιμή  $eGI$  από τους λευκούς άρτους. Τα δείγματα παρουσίασαν τιμές  $eGI$  που κυμάνθηκαν από 81-86. Η άλεση με πεπιεσμένο

αέρα φάνηκε να μειώνει ελαφρά το *eGI*, αλλά όχι σε σημαντικό βαθμό. Οι Fardet et al. (2006) πρότειναν ότι άρτοι με πιο συμπαγή δομή ή μεγαλύτερη πυκνότητα, στους οποίους υπάγονται άρτοι ολικής άλεσης με προζύμι ή άρτοι με ολόκληρους δημητριακούς καρπούς, θα μπορούσαν να μειώσουν το *eGI*. Ως εκ τούτου, η δομή των JW3 και JW4 που παρουσίασαν χαμηλότερο ειδικό όγκο και μεγαλύτερη σκληρότητα θα μπορούσε να είναι η αιτία της μικρότερης υδρόλυσης. Σημαντική συσχέτιση βρέθηκε μεταξύ *eGI* και ειδικού όγκου όπως και *eGI* με τη σκληρότητα της ψίχας ( $r=0,9711$  και  $r=-0,9537$ ,  $P<0,05$ , αντίστοιχα).

Οι Yamada et al. (2005) εξέτασαν την επίδραση του RS στην γλυκόζη του αίματος ενηλίκων και βρήκαν ότι συσχετίζονται αρνητικά. Κατέληξαν στο ότι άρτοι που περιέχουν RS θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την πρόληψη ασθενειών, όπως σακχαρώδης διαβήτης και συμπληρωματικά σε ειδικές δίαιτες. Στην παρούσα μελέτη, παρουσιάστηκαν διαφορές στην ενζυματική υδρόλυση των άρτων που πιθανότατα οφείλονται στις αλληλεπιδράσεις πρωτεϊνών και υδατανθράκων που συμβαίνουν κατά ψήσιμο, καθορίζοντας έτσι την ταχύτητα υδρόλυσης του αμύλου.



Σχήμα 6.32 Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με αέρα στην *in vitro* πέψη του αμύλου σε ολικής άλεσης άρτους: WBM (■), JM1 (▲), JM2 (X), JM3 (●), JM4 (◆) και λευκός άρτος (+). Σειρά μεγέθους κοκκομετρίας αντίστοιχων αλεύρων WBM> JM1> JM2> JM3≥ JM4.

### 6.5.3.5. Συμπέρασμα

Τα κονιοροποιημένα αλεύρα με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (JM) είχαν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό, ώστε τα αντίστοιχα ζυμάρια τους να φτάσουν σε συνοχή ίση με 1,1 Nm, σύμφωνα με τα ρεολογικά προφίλ του Mixolab. Επιπρόσθετα, τα ζυμάρια αυτά είχαν μικρότερη μηχανική σταθερότητα. Η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας νερού μπορεί να θεωρηθεί ως υπεύθυνη για τις διαφοροποιήσεις στα ρεολογικά προφίλ, καθώς είχε ως αποτέλεσμα την αραίωση των συστατικών των αλεύρων. Η διόγκωση του ζυμαριού στα 70 min ήταν μέγιστη για το WBM (138%) και μειώθηκε με την αύξηση της έντασης της διεργασίας της άλεσης. Ο ειδικός όγκος των παραγόμενων άρτων ακολούθησε την ίδια τάση με την ικανότητα διόγκωσης του ζυμαριού. Αν και χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ποσότητες νερού, η τελική υγρασία των άρτων δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά για τις πιο ήπιες συνθήκες άλεσης (JM1 και JM2). Οι άρτοι που παρήχθησαν με χρήση μικροαλεσμένων αλεύρων (JM) παρουσίασαν μια πιο συμπαγή δομή, η οποία φάνηκε να είναι υπεύθυνη για τις χαμηλές τιμές του *eGI*. Ως εκ τούτου, τα αλεύρα ολικής άλεσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή άρτων με μειωμένο *eGI*. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για βελτιστοποίηση των φυσικών ιδιοτήτων των JM άρτων, διότι οι άρτοι αυτοί παρουσίασαν σκληρότερη ψίχα και μειωμένο ειδικό όγκο και σκουρότερο χρώμα. Επιπρόσθετα πειράματα *in vino* θα ήταν χρήσιμα ώστε να επιβεβαιωθεί η μείωση της γλυκόζης στο αίμα από την κατανάλωση άρτων με αλεύρα ολικής άλεσης περασμένα από το μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.

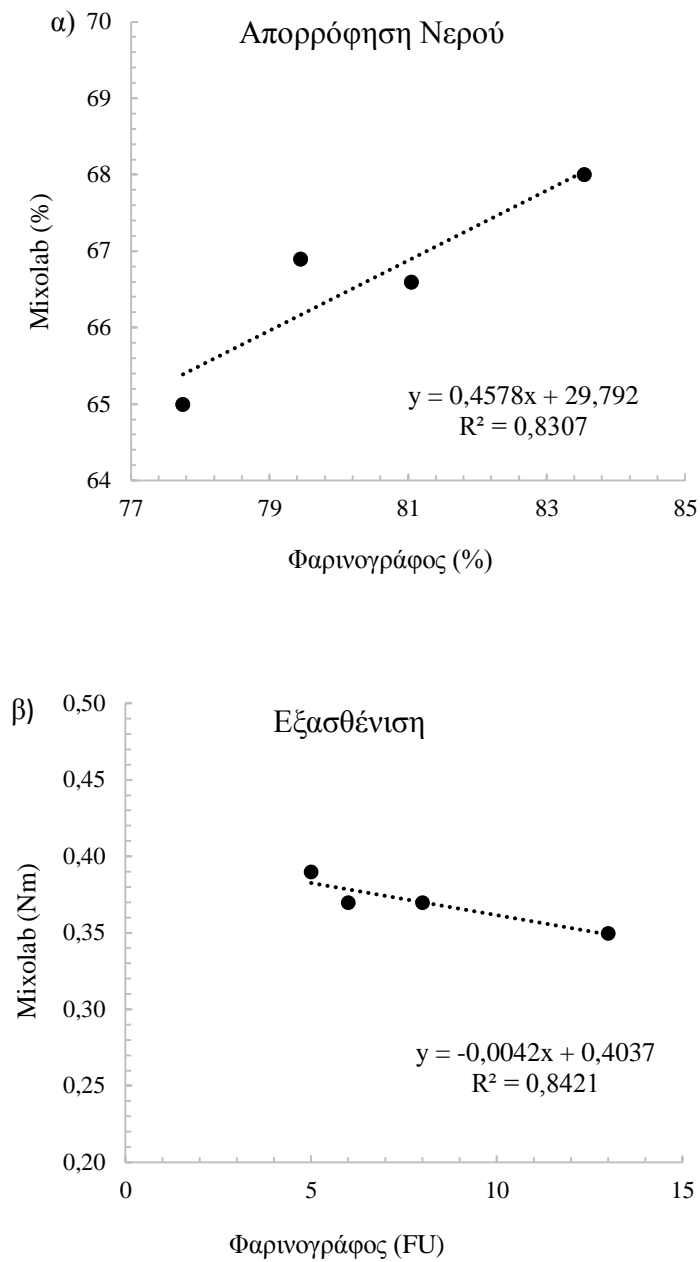
#### 6.5.4. Συσχέτιση χαρακτηριστικών Mixolab και φαρινογράφου σε άλευρα ολικής άλεσης κονιορτοποιημένα με χρήση jet mill

Ένα από τα πιο δημοφιλή και παραδοσιακά όργανα που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον προσδιορισμό των ρεολογικών χαρακτηριστικών ζυμαριών είναι ο φαρινογράφος, ο οποίος δίνει πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές που συμβαίνουν στο ζυμάρι κατά την ανάμιξή του (D' Appolonia, 1984).

Η τεχνική του Mixolab επιτρέπει τον πλήρη ποιοτικό χαρακτηρισμό του αλεύρου. Η ποιότητα των πρωτεϊνών προσδιορίζεται μέσω της απορρόφησης νερού, της σταθερότητας, της ελαστικότητας και της αποδυνάμωσής τους. Επίσης, φαίνεται η ζελατινοποίηση και η αναδιάταξη του αμύλου, η αλλαγή της συνοχής της ζύμης κατά την προσθήκη προσθέτων και τέλος η δραστηκότητα των ενζύμων, όπως πρωτεάσες και αμυλάσες (Collar et al. 2007, Kahraman et al. 2008). Το Mixolab αναπτύχθηκε με σκοπό τη δημιουργία ενός τεστ μέσω του οποίου θα γινόταν ταυτόχρονα ο πλήρης χαρακτηρισμός των αλεύρων: μηχανικές ιδιότητες εξαιτίας της ανάμιξης και της θέρμανσης, προσομοιάζοντας έτσι και τη διαδικασία ψησίματος (Rosell et al., 2007). Η πρώτη φάση της καμπύλης του Mixolab αντιστοιχεί στην καμπύλη του φαρινογράφου, προσδιορίζοντας την απορρόφηση, τη σταθερότητα και το βαθμό εξασθένησης του ζυμαριού. Οι διαφορετικές συνθήκες ανάμιξης και διαφορετικές μονάδες μέτρησης έχουν ως αποτέλεσμα τη δυσκολία της άμεσης συσχέτισης των δύο μεθόδων.

Οι Darcevic et al (2009) προσπάθησαν να συσχετίσουν τα αποτελέσματα χρήσης του Mixolab σε σχέση με τη χρήση της πιο κλασικής μεθόδου, εκείνης του φαρινογράφου. Υψηλή συσχέτιση παρουσίασαν η απορρόφηση νερού ( $r = 0,9816$ ,  $P < 0,0001$ ) και η ανάπτυξη της ζύμης ( $r = 0,9668$ ,  $P < 0,0001$ ). Από την άλλη λιγότερο καλή συσχέτιση υπήρξε στα αποτελέσματα για τη σταθερότητα της ζύμης ( $r = 0,7484$ ,  $P < 0,0001$ ). Οι Vizitiu & Danciu (2011) κατέληξαν στο ότι με χρήση φαρινογράφου μπορεί να προσδιοριστούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της ανάμιξης σε σχέση με το Mixolab.

Δεδομένου ότι δεν έχει γίνει αντίστοιχη μελέτη συσχέτισης αποτελεσμάτων Mixolab και φαρινογράφου για άλευρα ολικής άλεσης κονιορτοποιημένα με χρήση jet mill, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα τέσσερα άλευρα JW, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8. Στο Σχήμα 6.33 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις α) απορρόφησης νερού και β) εξασθένησης του ζυμαριού που προέκυψαν από μετρήσεις σε Mixolab και φαρινογράφο (Πίνακας 6.27 και Πίνακας 6.19, αντίστοιχα). Τα προτεινόμενα γραμμικά μοντέλα εξήγησαν την παραλλακτικότητα των αποτελεσμάτων για απορρόφηση νερού και εξασθένηση ζυμαριού σε ένα σχετικά υψηλό ποσοστό 83,07 και 84,21% αντίστοιχα, υποδεικνύοντας μία ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεταβλητών.



Σχήμα 6.33 Συσχέτιση αποτελεσμάτων φαρινογράφου και Mixolab ως προς α) την απορρόφηση νερού και β) την εξασθένηση του ζυμαριού αλεύρων ολικής άλεσης που κονιορτοποιήθηκαν με χρήση jet milling.

## 7. Συμπεράσματα και Προοπτικές

---

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η επίδραση της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (jet mill) στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αλεύρων σίτου και αξιολογήθηκε η δυνατότητα ενσωμάτωσης των κονιορτοποιημένων αλεύρων σε άρτους και μπισκότα. Η διαδικασία που προτείνεται θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την παραγωγή λεπτόκοκκων αλεσμάτων και τελικών προϊόντων αρτοποιίας πλούσια σε άλευρο ολικής άλεσης με βελτιωμένα χαρακτηριστικά.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη συνοψίζονται παρακάτω:

### ➤ Χαρακτηριστικά αλεύρων μετά από άλεση με αέρα (jet mill)

Τρία κλάσματα άλεσης ελήφθησαν από κυλινδρόμυλο χρησιμοποιώντας κοσκίνισμα: ένα χονδρόκοκκο (CF), ένα ενδιάμεσο (MF) και ένα λεπτόκοκκο κλάσμα άλεσης (FF). Το CF μικροαλέστηκε με χρήση jet mill και το τελικό μέγεθος του αλεύρου που προέκυψε (JCF) ήταν  $D_{50}=19,14 \mu\text{m}$ , σχεδόν τέσσερις φορές μικρότερο από το αρχικό δείγμα CF ( $63,18 \mu\text{m}$ ) και σχεδόν δύο φορές μικρότερο από το λεπτόκοκκο κλάσμα διαχωρισμού με κόσκινα FF ( $30,12 \mu\text{m}$ ). Η χρήση κοσκίνων διαφοροποίησε σημαντικά, όχι μόνο το μέγεθος της κοκκομετρίας, αλλά και τη σύσταση των παραγόμενων κλασμάτων CF, MF και FF, με το FF να παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές σε πρωτεΐνη και τέφρα (16,6 και 2,91% αντίστοιχα). Η μικροάλεση οδήγησε στην παραγωγή αλεύρου με φωτεινότερο χρώμα, με πιο ομοιόμορφους και στρογγυλούς κόκκους. Παρότι η κοκκομετρία του JCF ήταν σαφώς μικρότερη του FF, το κατεστραμμένο άμυλο ήταν λιγότερο, 4,73 και 7,27% αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, η σημαντική αύξηση της ικανότητας συγκράτησης νερού (WHC) στο JCF, που ήταν 40%, ενώ του FF ήταν 18% μεγαλύτερη από αυτή του CF, θεωρείται ότι οφείλεται κυρίως στο μικρό μέγεθος των κόκκων δηλαδή, στην αυξημένη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου και όχι στο κατεστραμμένο άμυλο ή στη διαφορετική σύσταση. Όσον αφορά το ρεολογικό προφίλ των δειγμάτων, παρατηρήθηκε μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης του ιξώδους χαρακτήρα στο δείγμα JCF με μεγαλύτερη μέγιστη τιμή  $G'$  που έφτασε στα 38,16 kPa, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το CF ήταν 19,09 kPa, υποδεικνύοντας μια γρηγορότερη δομική αλλαγή υπό θέρμανση που συμβαίνει για το μικροαλεσμένο άλευρο. Σημαντική καθυστέρηση στη ζελατινοποίηση παρουσίασε το δείγμα FF, εξαιτίας του αυξημένου κατεστραμμένου αμύλου και των διαλυτών πρωτεϊνών, και χαρακτηρίστηκε από το σχηματισμό πιο ασθενούς δομής.

### ➤ Βελτιστοποίηση διεργασίας άλεσης με jet mill και επιλογή συνθηκών

Αύξηση της έντασης της διεργασίας, δηλαδή μικρός ρυθμός τροφοδοσίας πρώτης ύλης (έως 0,41 kg/h), υψηλή πίεση αέρα (8 bar) και ανατροφοδότηση, είχε ως αποτέλεσμα

την παραγωγή αλεύρων με μικρότερο μέγεθος κοκκομετρίας ( $D_{50}$ ) έως και 92% σε σχέση με το αρχικό, με αυξημένη συγκράτηση νερού, έως και 35% (από 66,67 σε 89,99%), με μικρότερη υγρασία, έως και 57% (από 13,42 σε 5,76%) και με βελτιωμένα χαρακτηριστικά χρώματος σημειώνοντας σημαντική μείωση της κίτρινης απόχρωσης έως και 78%. Η αύξηση στο κατεστραμμένο άμυλο που επέφερε η διεργασία της άλεσης είχε ένα ανώτατο όριο, περίπου 7%, πέραν του οποίου η αύξηση της έντασης της διεργασίας δεν επέδρασε. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση παρουσιάστηκε μεταξύ του αρχικού δείγματος (2,13%) και των πιο λεπτόκοκκων αλεύρων όπου το ποσοστό κατεστραμμένου αμύλου τριπλασιάστηκε και κυμάνθηκε μεταξύ 4,4-7,11%. Η κατηγοριοποίηση των δειγμάτων επηρεάστηκε κυρίως από τις μεταβλητές  $D_{50}$ , υγρασία, συγκράτηση νερού και διαλυτών, και τα χαρακτηριστικά του χρώματος. Από τη μοντελοποίηση της διεργασίας ( $E = 7,08 * (FR/70)^{-4,80} * (P/6)^{-0,55}$ ) φάνηκε ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας ( $FR$ ) καθόρισε σε μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας ( $E$ ) και το τελικό  $D_{50}$  έναντι της πίεσης ( $P$ ) του αέρα ( $D_{50} = 13,41 * (FR/70)^{2,49} * (P/6)^{-0,75}$ ). Λαμβάνοντας υπόψιν την κατανάλωση ενέργειας (2,00-19,50 kWh/kg), την αποτελεσματικότητα και την παραλλακτικότητα των διεργασιών, επιλέχθηκαν οι παρακάτω συνδυασμοί άλεσης:

1. Πίεση αέρα 4 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 2,50 kWh/kg,  $D_{50}$  44,58  $\mu\text{m}$ )
2. Πίεση αέρα 8 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 2,00 kWh/kg,  $D_{50}$  22,94  $\mu\text{m}$ )
3. Πίεση αέρα 8 bar, με ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 100% (κατανάλωση ενέργειας 8,68 kWh/kg,  $D_{50}$  11,41  $\mu\text{m}$ )
4. Πίεση αέρα 8 bar, χωρίς ανατροφοδότηση με δυναμικότητα 70% (κατανάλωση ενέργειας 6,70 kWh/kg,  $D_{50}$  10,55  $\mu\text{m}$ ).

Δηλαδή, επιλέχτηκε μία συνθήκη με το μέγιστο (1) και μία με το ελάχιστο (4)  $D_{50}$ , μία με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας (2) και μία τελευταία (3) που είχε  $D_{50}$  κοντά στο ελάχιστο με σκοπό την μελέτη της επίδραση της ανατροφοδότησης.

➤ Επίδραση διαφορετικών συνθηκών άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε άλευρο σίτου ολικής

Οι συνθήκες άλεσης που επιλέχθηκαν παραπάνω εφαρμόστηκαν σε άλευρα τύπου T90 με αποτέλεσμα την παραγωγή τεσσάρων αλεύρων με σειρά μεγέθους WWF > JW1 (4 bar, με δυναμικότητα 100%) > JW2 (8 bar, με δυναμικότητα 100%) > JW3 (8 bar, με δυναμικότητα 100% και ανατροφοδότηση)  $\geq$  JW4 (8 bar, με δυναμικότητα 70%). Το μέγεθος της κοκκομετρίας, καθώς και το μέγεθος των πιτύρων, μειώθηκαν προοδευτικά με την αύξηση της έντασης της διεργασίας (84,15, 53,49, 29,10 17,02 και 18,11  $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα), με ταυτόχρονη βελτίωση του χρώματος και αύξηση της φωτεινότητας, μείωση της υγρασίας κατά 40% και αύξηση της ικανότητας συγκράτησης νερού κατά 9%. Σημαντική ήταν η ανακατανομή και αύξηση των διαλυτών ινών σε σχέση με τις αδιάλυτες, αφού οι αδιάλυτες ίνες μειώθηκαν έως και 15% με την άλεση (από 9,23 σε 7,82%). Τέλος, τα πιο λεπτόκοκκα άλευρα ήταν πιο

επιδεκτικά στην υδρόλυση και άρα πιο εύπεπτα. Ο γρηγορότερος ρυθμός υδρόλυσης παρατηρήθηκε στο δείγμα JW3, 0,021 έναντι 0,011 ( $\text{min}^{-1}$ ) που σημειώθηκε στο WWF. Τα δείγματα JW3 και JW4 που παρήχθησαν με χρήση διαφορετικών συνθηκών άλεσης, αλλά είχαν παρόμοιο μέγεθος κοκκομετρίας, παρουσίασαν στο σύνολό τους παρόμοια χαρακτηριστικά (όπως, υγρασία, χρώμα, WHC), υποδεικνύοντας πως το μέγεθος της κοκκομετρίας είναι ο κρίσιμος παράγοντας και όχι οι συνθήκες της διεργασίας με την οποία αυτό επιτεύχθηκε.

➤ Αύξηση περιεκτικότητας αλεύρου ολικής άλεσης σε μπισκότα τύπου digestive

Τα άλευρα ολικής άλεσης (T90) που παράχθηκαν με χρήση jet mill ενσωματώθηκαν σε μπισκότα με σκοπό τον εμπλουτισμό τους σε φυτικές ίνες. Το εύρος υποκατάστασης του αλεύρου μπισκοτοποιίας (BF) κυμάνθηκε από 0 έως 100 %. Η αξιολόγηση των ζυμαριών που παράχθηκαν με 100% άλευρο ολικής έδειξε ότι όσο μικρότερο ήταν το μέγεθος της κοκκομετρίας, τόσο μεγαλύτερο ήταν το ιξώδες του ζυμαριού, οδηγώντας επίσης σε σκληρότερα μπισκότα, με τη δύναμη σπασίματος να αυξάνεται από 9 N, δείγμα με 100% BF μέχρι 46,5 N, δείγμα με 100% JW4. Η δύναμη σπασίματος συσχετίστηκε θετικά με την υγρασία ( $r=0,8540$ ,  $P\leq 0,05$ ), την πυκνότητα ( $r=0,7443$ ,  $P\leq 0,05$ ) και την υποκατάσταση του BF ( $r=0,7924$ ,  $P\leq 0,05$ ). Τα μπισκότα που παρασκευάστηκαν με JW άλευρα είχαν πιο σκουρόχρωμη επιφάνεια με τη φωτεινότητά τους να φτάνει έως και 39,20, από 77,19 που είχε το μπισκότο με 100% BF.

Η ανάλυση PCA ανέδειξε ότι τα μπισκότα με τα JW άλευρα διαχωρίστηκαν κυρίως βάσει του βαθμού υποκατάστασης. Αύξηση της υποκατάστασης είχε ως αποτέλεσμα την διαφοροποίησή της σημαντικότητας των διαφόρων μεταβλητών. Ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί κατά γενικό κανόνα ότι α) τα δείγματα που είχαν έως 30% υποκατάσταση διαφοροποιήθηκαν ως προς τις τιμές  $L^*$ ,  $b^*$  και απλώματος που ήταν μεγαλύτερες (πλάτος/ύψος), β) τα δείγματα με 50% παρουσίασαν σημαντική αύξηση στην πυκνότητα σε σχέση με τις μικρότερες υποκαταστάσεις γ) εκείνα με 80 και 100% υποκατάσταση χαρακτηρίστηκαν από την υψηλή υγρασία και τη σκληρότητά τους.

Η οργανοληπτική αξιολόγηση ανέδειξε το δείγμα 50JW2 ( $D_{50}$  29,10  $\mu\text{m}$ , 50% υποκατάσταση), όπου φάνηκε η σημαντική μείωση στην παρουσία πίτυρου χωρίς να επηρεάζονται σημαντικά σκληρότητα και χρώμα. Το υψηλό ιξώδες που παρατηρήθηκε στα ζυμάρια με τα πιο λεπτόκοκκα άλευρα οφείλεται κυρίως στην περιορισμένη ποσότητα νερού και στον αυξημένο ανταγωνισμό για τη δέσμευσή του, άρα θα μπορούσε να περιοριστεί και ο χρόνος ψησίματος, αυξάνοντας το κέρδος και πιθανότατα βελτιώνοντας τους παράγοντες χρώματος, αφού το σκούρο χρώμα των μπισκότων οφείλεται στο ψήσιμο.



➤ Παραγωγή άρτων με άλευρα ολικής άλεσης περασμένα από jet mill και διαφορετικά ποσοστά νερού 65, 75 και 85%

Η διόγκωση των ζυμαριών εξηγήθηκε επαρκώς με απλό γραμμικό μοντέλο, από το οποία φάνηκε ότι η επίδραση του μεγέθους της κοκκομετρίας ήταν πιο καθοριστική από ότι οι διαφορετικές περιεκτικότητες νερού. Οι άρτοι δεν μπόρεσαν να συγκρατήσουν το επιπλέον νερό που προστέθηκε στη συνταγή. Για τον λόγο αυτό κατά το ψήσιμο το νερό χάθηκε και η απόδοσή τους μειώθηκε σημαντικά, έως και 8% στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε το άλευρο JW1 και η μέγιστη τιμή νερού 85%, έναντι του 65%. Αντίστοιχα στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε 85% νερό, η υγρασία της ψίχας αυξήθηκε έως και 27% (JW2). Ο άρτοι με 85% νερό είχαν επίσης τη λιγότερο φωτεινή ψίχα. Παρόλα αυτά, το δείγμα με 85% νερό και άλευρο JW2 είχε σημαντικά αυξημένο ειδικό όγκο που έφτασε στα επίπεδα του WB (2,20 cm<sup>3</sup>/g) και είχε την πιο μαλακή ψίχα από τα δείγματα που περιείχαν JW άλευρα (3,3 N). Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων, επιφανειακό πορώδες, μέση διάμετρος πόρων και πυκνότητα πόρων δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τις διαφορετικές κοκκομετρίες αλεύρου, ενώ μόνο το επιφανειακό πορώδες συσχετίστηκε σημαντικά θετικά με την περιεκτικότητα των άρτων σε νερό. Η σκληρότητα της ψίχας επηρεάστηκε αρνητικά από το νερό και το μέγεθος κοκκομετρίας, η περιεκτικότητα νερού ωστόσο ήταν σημαντικότερη. Η κοκκομετρία συσχετίστηκε σημαντικά θετικά με τον ειδικό όγκο και αρνητικά με τη σκληρότητα και τους παράγοντες χρώματος  $a^*$  και  $b^*$  ενώ, η περιεκτικότητα σε νερό συσχετίστηκε θετικά με την ελαστικότητα, την υγρασία και το επιφανειακό πορώδες και αρνητικά με την απόδοση κατά το ψήσιμο, τη φωτεινότητα και τη σκληρότητα της ψίχας. Η ποσότητα νερού ήταν αυτή που κυρίως καθόρισε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων και δευτερευόντως η κοκκομετρία των αλεύρων. Σε αντίθεση με το αρχικό άλευρο, όταν χρησιμοποιήθηκαν τα κονιοροποιημένα, ο ειδικός όγκος των αντίστοιχων άρτων βελτιώθηκε σημαντικά με την αύξηση του νερού στη συνταγή. Ως εκ τούτου, για τα JW άλευρα θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η υψηλή περιεκτικότητα νερού (85%) παρουσίασε άρτους με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (υψηλή διόγκωση, μαλακότερη ψίχα) σε σχέση με τους αντίστοιχους που περιείχαν 65% νερό.

➤ Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει φαρινογραφήματος

Από τα παραπάνω φάνηκε ότι τα άλευρα JW έδωσαν καλύτερους άρτους όταν χρησιμοποιήθηκε 85% νερό. Ωστόσο, κρίθηκε σκόπιμο να βρεθούν οι βέλτιστες περιεκτικότητες νερού για το κάθε ένα από τα JW άλευρα και να διερευνηθεί επίσης η εφαρμογή του φαρινογράφου (και παρακάτω του Mixolab) στα JW άλευρα. Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων περιεκτικοτήτων νερού βάσει των οποίων παρήχθησαν άρτοι ολικής άλεσης χρησιμοποιήθηκε το φαρινογράφημα. Τα άλευρα με τη μικρότερη κοκκομετρία παρουσίασαν σημαντικά μεγαλύτερες απορροφήσεις έως και 13% στο δείγμα JW3 (83,55%, ενώ για το WWF ήταν 73,70%), και ταυτόχρονα μεγαλύτερους χρόνους ανάπτυξης, υποδεικνύοντας την ανάγκη για μεγαλύτερους χρόνους ανάμιξης

για την επίτευξη της πλήρους ενυδάτωσης. Οι άρτοι που παρασκευάστηκαν με τα πιο λεπτόκοκκα αλεύρα και τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες νερού είχαν και τη μεγαλύτερη απόδοση στο ψήσιμο, δηλαδή παράχθηκε περισσότερη ποσότητα άρτου για την ίδια ποσότητα αλεύρου. Το δείγμα αναφοράς (WBF) είχε μεγαλύτερο πορώδες και σκληρότερη ψίχα. Σημαντικές διαφορές εμφανίστηκαν στο χρώμα, όπου μικρότερη κοκκομετρία οδήγησε σε πιο σκουρόχρωμη ψίχα. Η οργανοληπτική αξιολόγηση ανέδειξε ως πιο αποδεκτό άρτο αυτόν που είχε παραχθεί με άλευρο JW2 ( $D_{50}$  29,10  $\mu\text{m}$ ). Ο ίδιος τύπος αλεύρου είχε επιλεγεί και στην περίπτωση των μπισκότων. Κατά την αποθήκευση, η απώλεια υγρασίας στο WBF έφτασε έως και το 22,23%, όταν η μικρότερη απώλεια ήταν 12,63%, στο δείγμα JW3.

#### ➤ Παραγωγή άρτων με βέλτιστη περιεκτικότητα νερού βάσει Mixolab

Σε συνέχεια της διερεύνησης της βέλτιστης ποσότητας νερού για την παραγωγή άρτων με μικροαλεσμένα αλεύρα ολικής άλεσης χρησιμοποιήθηκε το Mixolab το οποίο επιβεβαίωσε την ανάγκη των αλεύρων JW για περισσότερο νερό. Ωστόσο, οι απορροφήσεις ήταν μικρότερες σε σχέση με τα αποτελέσματα του φαρινογράφου, αφού κυμάνθηκαν μεταξύ 64,1-68%, ενώ για το φαρινογράφο κυμάνθηκαν μεταξύ 73,7-83,6%. Σε σύγκριση με το αρχικό άλευρο (WWF), τα μικροαλεσμένα (JW) παρουσίασαν μικρότερη σταθερότητα έως και 44% στο δείγμα JW2 (από 8,0 σε 4,5 min) Ο υψηλός ανταγωνισμός για τη δέσμευση νερού από ίνες, πρωτεΐνες και άμυλο, έδρασε συνεργιστικά με την αύξηση της επιφάνειας των κόκκων αλεύρου με αποτέλεσμα τα διαφορετικά ρεολογικά προφίλ. Ο ειδικός όγκος μειώθηκε σημαντικά στα δείγματα που είχαν υποστεί την άλεση εξαιτίας της περιορισμένης ποσότητας νερού, κάτι που παρατηρήθηκε παραπάνω, στην περίπτωση που είχε χρησιμοποιηθεί το 65% νερού για όλα τα αλεύρα, υποδεικνύοντας πως η δομή που σχηματίζεται είναι ασθενής και πιθανότατα ο ανταγωνισμός για την απορρόφηση του περιορισμένου νερού δεν αφήνει το σχηματισμό ισχυρού πλέγματος γλουτένης. Η σκληρότητα της ψίχας αυξήθηκε στους άρτους που περιείχαν μικροαλεσμένα αλεύρα (από 707 g. έως και 1808 g. στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε το JW3). Η κλειστή και συμπαγής δομή που δημιουργήθηκε οδήγησε και στη μείωση της φωτεινότητας και πιθανότατα είναι υπεύθυνη για τη μείωση του *eGI*.

#### Συνοπτικά Συμπεράσματα

- Κατά την άλεση με πεπιεσμένο αέρα, ο ρυθμός τροφοδοσίας καθόρισε σε μεγαλύτερο βαθμό τα χαρακτηριστικά του αλέσματος σε σχέση με την πίεση του αέρα.
- Τα αλέσματα που παρήχθησαν με ανατροφοδότηση της πρώτης ύλης είχαν μέγεθος κοκκομετρίας, και λοιπά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, παρόμοια με αλέσματα που προέκυψαν από πολύ πιο οικονομικές διεργασίες άλεσης (μικρότερη κατανάλωση ενέργειας).
- Το άλευρο που παράχθει σε συνθήκες άλεσης πίεση αέρα 8 bar και δυναμικότητα 100% φάνηκε να δίνει τα πιο αποδεκτά τελικά προϊόντα.

- Με χρήση κονιορτοποιημένου αλεύρου ολικής άλεσης επιτεύχθηκε παραγωγή μπισκότων τύπου digestive με ποσοστό αλεύρου ολικής έως και 50% (τα εμπορικά έχουν έως 25%).
- Η ποσότητα νερού ήταν αυτή που κυρίως καθόρισε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων και δευτερευόντως η κοκκομετρία των αλεύρων.
- Τα κονιορτοποιημένα άλευρα δεν έδωσαν σε κάθε περίπτωση άρτους με σημαντικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά, υποδεικνύοντας την ανάγκη για ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της περιεκτικότητας νερού και του χρόνου ανάμιξης.
- Η παραγωγή άρτων με υπέρλεπτα άλευρα ολικής άλεσης ήταν πιο επιτυχημένη όταν χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες απορροφήσεις από το φαρινογράφο σε σχέση με εκείνες του Mixolab.

#### Προτάσεις – Μελέτες που θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά

- Επαναπροσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας νερού για παραγωγή άρτων με υπέρλεπτα άλευρα ολικής άλεσης. Θα ήταν σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν μικρότερα ποσοστά αλεύρου τέτοιου τύπου, γεγονός που θα βελτίωνε τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων άρτων, δεδομένου ότι οι εμπορικοί άρτοι δεν περιέχουν 100% άλευρο ολικής άλεσης.
- Το σύστημα του αλεύρου ολικής είναι ένα σχετικά πολύπλοκο σύστημα. Κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί μεμονωμένα η άλεση με πεπιεσμένο αέρα σε πίτυρο και άμυλο, ώστε να διευκρινιστεί η επίδραση της άλεσης σε καθένα από αυτά τα συστατικά ξεχωριστά.
- Πέραν της βέλτιστης ποσότητας νερού, θα μπορούσε να μελετηθεί και ο βέλτιστος χρόνος ανάμιξης ώστε τα χαρακτηριστικά της υφής των JW άρτων να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο. Ανάμιξη που δεν θα οδηγήσει στη μέγιστη ανάπτυξη του ζυμαριού (undermixing) έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή άρτων με μειωμένο όγκο, ενώ υπερβολική ανάμιξη (overmixing) μπορεί να οδηγήσει σε ζυμάρια που καταρρέουν ταχύτατα και είναι κολλώδη.
- Εφαρμογή της άλεσης με jet mill σε πίτυρα και φυτικές ίνες και ενσωμάτωσή τους σε προϊόντα αρτοποιίας.
- Η τάση που παρουσιάστηκε για μείωση του *eGI* και αύξηση του άπεπτου αμύλου με αύξηση της έντασης της διεργασίας άλεσης με jet mill υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη και πιστοποίηση του γεγονότος. Επιπρόσθετα πειράματα *in vivo* θα ήταν χρήσιμα ώστε να επιβεβαιωθεί η μείωση της γλυκόζης στο αίμα από την κατανάλωση άρτων με άλευρα ολικής άλεσης περασμένα από jet mill.

## 8. Βιβλιογραφία

---

### 8.1. Ελληνική Βιβλιογραφία

ΚΤΠ, 2014. Κώδικας Τροφίμων, Ποτών και Αντικειμένων Κοινής Χρήσης. Μέρος Α', Τρόφιμα και Ποτά, XII. Δημητριακά – Προϊόντα εξ αυτών, Άρθρα 104, 111, 142.

### 8.2. Ξένη Βιβλιογραφία

AACC, 2012. International approved methods of analysis, 11th Ed. Methods: 44-15.02, 38-10.01, 08-01.01, 46-13.01, 32-07.01, 56-11.02, 54-21.01, 10-50.05, 54-60.01, 76-33.01. *AACC International*, St. Paul, MN, U.S.A.

AACC, 1999. International approved methods of analysis, defines whole grain available at: <http://www.aaccnet.org/initiatives/definitions/Pages/WholeGrain.aspx> (last accessed 11.5.2014).

Aamodt A., Magnus E. M., Færgestad E. M., 2005. Hearth bread characteristics: effect of protein quality, protein content, whole meal flour, DATEM, proving time, and their interactions. *Cereal Chemistry*, 82(3), 290-301.

Adebowale K. O., Lawal O. S., 2003. Functional properties and retrogradation behaviour of native and chemically modified starch of mucuna bean (*Mucuna pruriens*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 1541-1546.

Adom K. K., Sorrells M. E., Liu R. H., 2005. Phytochemicals and antioxidant activity of milled fractions of different wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 2297-2306.

Agiriga A. N., 2014. Effect of whole wheat flour on the quality of wheat-baked bread. *Global Journal of Food Science and Technology*, 127-133.

Agyare K. K., Xiong Y. L., Addo K., Akoh C. C., 2004. Dynamic rheological and thermal properties of soft wheat flour dough containing structured lipid. *Food Engineering and Physical Properties*, 69, 297-302.

Ahmed J., Ramaswamy H. S., Ayad A., Alli I., 2008. Thermal and dynamic rheology of insoluble starch from basmati rice. *Food Hydrocolloids*, 22, 278-287.

Ahrné L., Chamayou A., Dewettinck K., Depypere F., Dumoulin E., Fitzpatrick J., Meesters G., 2008. Processing of food powders chapter. In: Aguilera M., Lillford P. (Eds.), *Food Materials Science: Principles and Practice*. J. Springer-Verlag New York, pp 341-368.

Albus F. E., 1964. The modern fluid energy mill. *Chemical Engineering Progress Progress*, 60 (6), 102-106.

Angelidis G., Protonotariou S., Mandala I., Rosell C. M., 2016. Jet milling effect on wheat flour characteristics and starch hydrolysis. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 784-791.

Angelo P. C., Subramanian R., 2008. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. PHI Learning, New Delhi, pp 22-23.

Apprich S., Tirpanalan O., Hell J., Reisinger M., Bohmdorfer S., Siebenhandl-Ehn S., Novalin S., Kneifel W., 2014. Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products. *LWT – Food Science and Technology*, 56(2), 222-231.

Aprodu I., Banu I., Stoenescu G., Ionescu V., 2010. Effect of the industrial milling process on the rheological behavior of different types of wheat flour. *Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 11(4), 429-437

Araki E., Ikeda T. M., Ashida K., Takata K., Yanaka M., Iida S., 2009. Technical paper effects of rice flour properties on specific loaf volume of one-loaf bread made from rice flour with wheat vital gluten. *Food Science and Technology Research*, 15 (4), 439-448.

Ashby M. F., 2006. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of Royal Society*, 364, 15-30

Ashida K., Araki E., Iida S., Yasui T., 2010. Flour properties of milky-white rice mutants in relation to specific loaf volume of rice bread. *Food Science and Technology. Research*, 16 (4), 305-312.

Atwell W. A., 1997. Wheat flour. American association of cereal chemists Inc. Eagan Press, St. Paul Minnesota, USA, *Milling*, pp 15-25.

Atwell W. A., Hood L. F., Lineback D. R., Varriano-Marston E., Zobel H. F., 1988. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*, 33, 306-311.

Autio K., Flander L., Kinnunen A., Heinonen R., 2001. Bread quality relationship with rheological measurements of wheat flour dough. *Cereal Chemistry*, 78, 654-657.

Awika M. J., 2011. Effect of bioactive components on dough rheology, baking and extrusion. In: Tokuşoğlu Ö., Hall C. A. (Eds.), *Fruit and Cereal Bioactives Sources, Chemistry, and Application Fruit and Cereal Bioactives Sources*. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, pp 337-346.

Baik M. Y., Chinachoti P., 2003. Water self-diffusion coefficient and staling of white bread as affected by glycerol. *Cereal Chemistry*, 80 (6), 740-744.

Baldino N., Gabriele D., Lupi F. R., de Cindio B., Cicerelli L., 2014. Modeling of baking behavior of semi-sweet short dough biscuits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 25, 40-52.

Baltsavias A., Jurgens A., Vliet T. van, 1997. Rheological properties of short doughs at small deformation. *Journal of Cereal Science*, 26, 289-300.

Banu I., Georgeta S., Violeta S.I., Luliana A., 2012. Effect of the addition of wheat bran stream on dough rheology and bread quality. *Food Technology*, 36(1), 39-42.

Barbosa-Cánovas G. V., Ortega-Rivas E., Juliano P., Yan H., 2005. Size reduction. particle properties. In: Barbosa- Cánovas G. V. (Ed.), *Food Powders-*

*Physical Properties, Processing, and Functionality*. Chapter 6 Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp 19-54, 157-174.

Barbosa-Canovas G. V., Yan H., 2003. Powder characteristics of preprocessed cereal flours. In: Kaletung G., Breslauer K. J. (Eds.), *Characterization of Cereals and Flours Properties, Analysis, and Applications*. Marcel Dekker Inc, New Jersey, U.S.A, pp 173-208.

Barrera G. N., Perez G. T., Ribotta P. D., Leon A. E., 2007. Influence of damaged starch on cookie and bread-making quality. *European Food Research & Technology*, 225, 1-7.

Behall K. M., Scholfield D. J., Hallfrisch J. G., Liljeberg-Elmståhl H., 2006. Consumption of both resistant starch and  $\beta$ -glucan improves postprandial plasma glucose and insulin in women. *Diabetes Care*, 29, 976-981.

Belderok B., Mesdag H., Donner D. A., 2000. The wheat grain. *Bread-Making Quality of Wheat*. Springer, New York, pp 5-20.

Belitz H.-D., Grosch W., Schieberle P., 2009. Cereals and cereal products. In: Belitz H.-D., Grosch W., Schieberle P. (Eds.), *Food chemistry*, (4<sup>th</sup> Ed.), Springer, Berlin, pp 670-675.

Bell B. M., Chamberlain N., Collins T. H., Daniels D. G., Fisher N., 1979. The composition, rheological properties and breadmaking behaviour of stored flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 30, 1111-1122.

Bermink M. R., 1994. Fiber analysis. In: Nielson S. S. (Ed.), *Introduction to the Chemical Analysis of Foods*. Jones and Bartlett Publishers, Boston, pp 169-180.

Berton B., Scher J., Villieras F., Hardy J., 2002. Measurement of hydration capacity of wheat flour: influence of composition and physical characteristics. *Powder Technology*, 128, 326-331.

Black C. K., Panozzo J. F., 2004. Accurate technique for measuring color values of grain and grain products using a visible-NIR instrument. *Cereal Chemistry*, 81, 469-474.

Blanchard C., Labouré H., Verel A., Champion D., 2012. Study of the impact of wheat flour type, flour particle size and protein content in a cake-like dough: Proton mobility and rheological properties assessment. *Journal of Cereal Science*, 56, 691-698.

Bond F. C., 1952. The third theory of comminution. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 193, 484-494.

Brown B., 2013. Jet milling technology 101. *Basics of Particle on particle milling*. Hosokawa micron powders systems. <https://www.youtube.com/watch?v=pevnLXzgyt8>.

Broyart B., Trystram G., Duquenoy A., 1998. Predicting color kinetics during cracker baking. *Journal of Food Engineering*, 35(3), 351-368.

Buléon A., Colonna P., Planchot V., Ball S., 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules* 23, 85-112.

Cauvain S. P., Young L. S., 2006. Characterisation of bakery products by formulation and the key functional roles; ingredients and their influences. *Baked*

*Products: Science, Technology and Practice*. Blackwell Publishing, UK, pp 35-71; pp 72-98.

Cauvain S. P., Young L. S., 2008. The role of water in the formation and processing of bread doughs. *Bakery Food Manufacture and Quality: Water Control and Effects*. Blackwell Science, Oxford, pp 32-69.

Cauvain S., 2003. Breadmaking: improving quality. *Breadmaking an overview*. Cambridge, UK: Woodhead, pp 9-29.

Cauvain S., Young L. 1999. Technology of breadmaking. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, Inc., pp 295.

Chamayou A., Dodds A. J., 2007. Air jet milling. In: Salman D. S., Ghadiri M., Hounslow J. M. (Ed.), *Handbook of Powder Technology, Particle Breakage* 12 (pp 421-435). Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12011-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12011-X) (last accessed 19/4/2014).

Chau C. F., Wen Y. L., Wang Y. T., 2006. Effects of micronisation on the characteristics and physicochemical properties of insoluble fibres. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 86(14), 1380-1386.

Chau C. F., Wang Y. T., Wen Y. L., 2007. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre. *Food Chemistry*, 100, 1402-1408.

Chiotelli E., Rolee A., Le Meste M., 2004. Rheological properties of soft wheat flour doughs: effect of salt and triglycerides. *Cereal Chemistry*, 81, 459-468.

Chung O. K., Ohm J. B., Caley S. M., Seabourn B. W., 2001. Prediction of baking characteristics of hard winter wheat flours using computer – Analyzed mixograph parameters. *Cereal Chemistry*, 78, 493-497.

Chung H., Shi, D., Lim S., 2008. In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Research International*, 41, 579-585.

Chung O. K., Ohm J., Ram M. S., Park S., 2009. Wheat lipids. In: Khan, K., Shewry, P.R. (Eds.), *Wheat Chemistry and Technology* (4<sup>th</sup> Ed.), AACC International, St. Paul, MN, pp 363-390.

Collado L. S., Corke H., 2003. Starch properties and functionalities. In: Kaletung G., Breslauer K. J. (Eds.), *Characterization of Cereals and Flours Properties, Analysis, and Applications*. Marcel Dekker Inc, New Jersey, U.S.A, pp 473-506.

Collar C., Bollain C., Rosell C. M., 2007. Rheological behaviour of formulated bread doughs during mixing and heating. *Food Science and Technology International*, 13, 99-107.

Cura D. E., Lantto R., Lille M., Andberg M., Kruus K., Buchert J., 2009. Laccase-aided protein modification: effects on the structural properties of acidified sodium caseinate gels. *International Dairy Journal*, 19, 737-745.

Curti E., Carini E., Bonacini G., Tribuzio G., Vittadini E., 2013. Effect of the addition of bran fractions on bread properties. *Journal of Cereal Science*, 57, 325-332.

- D'Appolonia B. I., 1984. Types of farinograph and factors affecting them. In: D'Appolonia B. I., Kuerth W. E. (Eds.), *The Farinograph handbook* (3<sup>rd</sup> Ed.), AACC, Inc., St. Paul, pp 13-20.
- Daniels N. W. R., 1975. Some effects of water in wheat flour dough. In: Duckforth R. B. (Ed.), *Water relations of Foods*, Academic Press, NY, pp 573-586.
- Dapcevic T., Hadnadev M., Pojic M., 2009. Evaluation of the possibility to replace conventional rheological wheat flour quality control instruments with the new measurement tool – Mixolab. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 74(3), 169-174.
- Davidson M. H., Mc Donald A., 1998. Fiber: forms and function. *Nutrition Research*, 18, 617-624.
- de Kock S., Taylor J., Taylor J. R. N., 1999. Effect of heat treatment and particle size of different brans on loaf volume of brown bread. *LWT – Food Science and Technology*, 32(6), 349-356.
- de la Hera E., Gómez M., Rosell C., 2013a. Particle size distribution affecting the starch enzymatic hydrolysis and hydration properties. *Carbohydrate Polymers*, 98, 421-427.
- de la Hera E., Martinez M., Gomez M., 2013b. Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *LWT – Food Science and Technology*, 54, 199-206.
- Delcour J. A., Hosney R. C., 2010. *Principles of cereal science and technology*, (3<sup>rd</sup> Ed.) AACC International, Inc, St. Paul, pp 40-85.
- Dobraszczyk B. J., 2001. Wheat and flour. In: Dendy D., Dobraszczyk B. J. (Eds.), *Cereals and Cereal Products: Chemistry and Technology*. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, pp 100-139.
- Doerry W. T., 1995. *Breadmaking Technology*, Manhattan, KS: American Institute of Baking, Chapters 4, 5, 6, pp 62-162.
- Dowell F. E., Maghirang E. B., Xie F., Lookhart G. L., Pierce R. O., Seabourn B. W., et al., 2006. Predicting wheat quality characteristics and functionality using near-infrared spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 83, 529-536.
- Duyvejonck A. E., Lagrain B., Dornez E., Delcour J. A., Courtin C. M., 2012. Suitability of solvent retention capacity tests to assess the cookie and bread making quality of European wheat flours. *LWT – Food Science and Technology*, 47, 56-63.
- Edwards N. M., Dexter J. E., Scanlon M. G., 2002. Starch participation in durum dough linear viscoelastic properties. *Cereal Chemistry*, 79, 850-856.
- Edwards W. P., 2007. Raw materials. *The Science of Bakery Products*. RSC Publishing, pp 36-134, 208-232.
- Eliasson A. C., Gudmundsson M., 1996. Starch: physicochemical and functional aspects. In: Eliasson A. C. (Ed.), *Carbohydrates in food*. Marcel Dekker, Inc, New York, pp 431-503.
- Eliasson A. C., Larsson K., 1993. Cereals in Breadmaking: A molecular colloidal approach. In: Fennema, O. R., Karel M., Sanderson G. W., Tannenbaum, S., R., Whitaker J. R. (Eds.), *Food Science and Technology*. Marcel Dekker, New York, pp 136-139, 346-347.



- Englyst H. N., Cummings J. H., 1990. Dietary fibre and starch: Definition, classification and measurement. In: Leeds A. R. (Ed.), *Dietary fibre perspectives: Reviews and bibliography*. John Libbey, London, pp 3-26.
- Englyst H. N., Kingman S. M., Hudson G. J., Cummings J. H., 1996. Measurement of resistant starch in vitro and in vivo. *British Journal Nutrition*, 75, 749-755.
- Evans L. G., Pearson A. M., Hooper G. R., 1981. Scanning electron microscopy of flour – water doughs treated with oxidizing and reducing agents. *Scanning Electron Microscopy*, 3, 583-592.
- Every D., Simmons L. D., Ross M. P., 2006. Distribution of redox enzymes in millstreams and relationships to chemical and baking properties of flour. *Cereal Chemistry*, 83, 62-68.
- Ezeama C. F., 2007. *Food Microbiology: Fundamentals and applications. Natural Prints, Lagos*, pp 51-52.
- Færgestad E. M., Molteberg E. L., Magnus E. M., 2000. Interrelationships of protein composition, protein level, baking process and the characteristics of hearth bread and pan bread. *Journal of Cereal Science*, 31, 309-320.
- Fardet A., Leenhardt F., Lioger D., Scalbert A., Rémésy C., 2006. Parameters controlling the glycaemic response to breads. *Nutrition Research Reviews*, 19, 18-25.
- Fassler C., Arrigoni E., Venema K., Hafner V., Brouns F., Amadò R., 2006. Digestibility of resistant starch containing preparations using two in vitro models. *European Journal of Nutrition*, 45, 445-453.
- Fitzpatrick J. J., Barringer S. A., Iqbal T., 2004. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. *Journal of Food Engineering*, 61, 399-405.
- Fretzdorf B., Bechtel D. B., Pomeranz Y., 1982. Freeze fracture ultrastructure of wheat flour ingredients, dough and bread. *Cereal Chemistry*, 59(2), 113-120.
- Galliard T., Gallagher D. M., 1988. The effects of wheat bran particle size and storage period on bran flavor and baking quality of bran flour blends. *Journal of Cereal Science*, 8, 147-154.
- Gan Z., Ellis P. R., Schofield J. D., 1995. Gas cell stabilization and gas retention in wheat bread dough. *Journal of Cereal Science*, 21, 215-230.
- Gan Z., Galliard T., Ellis P. R., Angold R. E., Vaughan J. G., 1992. Effect of the outer bran layers on the loaf volume of wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 15, 151-163.
- Geera B. P., Nelson J. E., Souza E., Huber K. C., 2006. Composition and properties of A- and B-type starch granules of wild-type, partial waxy, and waxy soft wheat. *Cereal Chemistry*, 83(5), 551-557.
- Gibson L. J., Ashby M. F., 1997. The mechanics of foams: basic results. *Cellular solids, structure and properties* (2<sup>nd</sup> Ed.), Cambridge University Press, UK, pp 175-231.

Gil-Humanes J., Pistón F., Rosell C. M., Barro F., 2012. Gluten and starch properties of transgenic wheat lines with reduced content of  $\gamma$ - gliadins. *Journal of Cereal Science*, 56, 161-170.

Goesaert H., Brijs C., Veraverbeke W. S., Courtin C. M., Gebruers K., Delcour J. A., 2005. Wheat constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 16, 12-30.

Goessling O. G., 1882. Apparatus for disintegrating vegetable substances. United States Patent Office, No 258,912.

Gómez M., Jiménez S., Ruiz E., Oliete B., 2011. Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality. *Food Science and Technology*, 44, 2231-2237.

Gommeren H. J. C., Heitzmann D. A., Kramer H. J. M., Heiskanen K., Scarlett B., 1996. Dynamic modelling of a closed loop jet mill. *International Journal of Mineral Processing*, 44-45, 497-506.

Goni I., Garcia-Alonso A., Saura-Calixto F., 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17, 427-437.

Granfeldt Y., Björck I., Drews A., Tovar J., 1992. An *in vitro* procedure based on chewing to predict metabolic responses to starch in cereal and legume products. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46, 649-660.

Graveland A., Henderson M. H., 1991. Improved flour, EP 0459551 A1.

Guillon F., Champ M., Thibault J. F., 2000. Dietary fibre functional products. In: Gibson G. R., Williams C. M. (Eds.), *Functional foods: Concept to Product*, Woodhead Publishing CRC Press LLC, UK, pp 315-365.

Gujral H. S., Mehta S., Samr I. S., Goyal P., 2003. Effect of wheat bran, coarse wheat flour, and rice flour on the instrumental texture of cookies. *International Journal of Food Properties*, 6 (2), 329-340.

Guarte M. A., Rosell C. M., 2011. Physicochemical properties and enzymatic hydrolysis of different starches in the presence of hydrocolloids. *Carbohydrate Polymers*, 85, 237-244.

Gupta M., Bawa A. S., Abu-Ghannam N., 2011. Effect of barley flour and freeze- Thaw cycles on textural nutritional and functional properties of cookies. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 520-527.

Guzmán C., Posadas-Romano G., Hernández-Espinosa N., Morales-Dorantes A., Peña R. J., 2015. A new standard water absorption criteria based on solvent retention capacity (SRC) to determine dough mixing properties, viscoelasticity, and bread-making quality. *Journal of Cereal Science*, 66, 59-65.

HadiNezhad M., Butler F., 2009. Effect of flour type and dough rheological properties on cookie spread measured dynamically during baking. *Journal of Cereal Science*, 49, 178-183.

Hadiyant H., Asselman A., van Straten G., Boom R. M., Esveld D. C., Bostel A. J. B., 2007. Quality prediction of bakery products in the initial phase of process design. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8 (2), 285-298.

Hansen L., Rose M., 1996. Sensory acceptability is inversely related to development of fat rancidity in bread made from stored flour. *Journal of the American Dietetic Association*, 96, 792-793.

Hareland G. A., 1994. Evaluation of flour particle size distribution by laser diffraction, sieve analysis and near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Cereal Science*, 20(2), 183-190.

Hayakawa I., Yamada Y., Fujio Y., 1993. Microparticulation by a jet mill grinding of protein powders and effects on hydrophobicity. *Journal of Food Science* 58, 1026-1029.

He H., Hosney R. C., 1990. Changes in bread firmness and moisture during long-term storage. *Cereal Chemistry*, 67(6), 603-605.

Hemery Y. M., Rouau X., Lullien-Pellerin V., Barron C., Abecassis J., 2007. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science*, 46, 327-347.

Hemery Y., Chaurand M., Holopainen U., Lampi A. M., Lehtinen P., Puronen V., et al., 2011. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part I: Influence of ultra-fine grinding. *Journal of Cereal Science*, 53, 1-8.

Heo S., Lee S. M., Shim J.-H., Yoo S.-H., Lee S., 2013. Effect of dry- and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles. *Journal of Food Engineering*, 116, 213-217.

Hidalgo A., Brandolini A., 2008. Protein, ash, lutein and tocopherols distribution in einkorn (*Triticum monococcum L. subsp. monococcum*) seed fractions. *Food Chemistry*, 107, 444-448.

Hizukuri S., 1996. Starch: analytical aspects. In: Eliasson A. C. (Ed.), *Carbohydrates in food*. Marcel Dekker, Inc. New York, pp 347-429.

Homco-Ryan C. L., Ryan K. J., Wicklund S. E., Nicolalde C. L., Lin S., McKeith F. K., Brewer M. S., 2004. Effects of modified corn gluten meal on quality characteristics of a model emulsified meat product. *Meat Science*, 67, 335-341.

Hosney R. C., 1994. *Principles of cereal science and technology* (2<sup>nd</sup> Ed.), AACC, St., Paul, pp 81-101, 229-273.

Hossen M. S., Sotome I., Takenaka M., Isobe S., Nakajima M., Okadome H., 2011. Starch damage and pasting properties of rice flours produced by dry jet grinding. *Cereal Chemistry*, 88(1), 6-11.

Hwang M. P., Hayakawa K. I. 1980. Bulk density of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science*, 45, 1400-1402.

Ishito K., Akiyama S., Tanaka Z., 2002. Improvement of grinding and classifying performance using a closed-circuit system. *Advanced Powder Technology*, 13(4), 363-375.

Izydorczyk M., Biliaderis C., 1995. Cereals arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers* 28, 33-48.

Kahraman K., Sakyyan O., Ozturk S., Koxsel H., Sumnu G., Dubat A., 2008. Utilization of Mixolab to predict the suitability of flours in terms of cake quality. *European Food Research Technology*, 227, 565-570.

Kalichevsky M. T., Ring S. G., 1987. Incompatibility of amylase and amylopectin in aqueous solution. *Carbohydrate Research*, 162, 323-328.

Kano J., Mio H., Saito F., Miyazaki M., 2001. Correlation of grinding rate of gibbsite with impact energy in tumbling mill with mono-size balls. *Minerals Engineering*, 14, 1213-1223.

Karlsson R., Olered R., Eliasson A.-C., 1983. Changes in starch granule size distribution and starch gelatinisation properties during development and maturation of wheat, barley and rye. *Starch/Stärke*, 35, 335-340.

Katikaneni P. R., Upadrasha S. M., Rowlings C. E., Neau S. H., Hileman G. A., 1995. Consolidation of ethylcellulose: Effect of particle size, press speed, and lubricants. *International Journal of Pharmaceutics*, 117, 13-21.

Kent N. L., Evers A. D., 1994. Dry milling technology. *Kent's Technology of Cereals* (4th Ed.), Oxford: Pergamon Press, pp 129-169.

Khoo U., Christianson D. D., Inglett G. E., 1975. Scanning and transmission microscopy of dough and bread. *Bakers Digest*, 49, 24-26.

Kick F., 1883. Contributions to the knowledge of the mechanics of soft bodies Dingers. *Polytechnical Journal*, 247, 1-5.

Kihlberg I., Johansson L., Kohler A., Risvik E., 2004. Sensory qualities of whole wheat pan bread – influence of farming system, milling and baking technique. *Journal of Cereal Science*, 39, 67-84.

Kim B. K., Cho A. R., Chun Y. G., Park D. J., 2013. Effect of microparticulated wheat bran on the physical properties of bread International. *Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64(1), 122-129.

Konik-Rose C., Thistleton J., Chanvrier H., Tan I., Halley P., Gidley M., Kosar-Hashemi B., Wang H., Larroque O., Ikea J., McMaugh S., Regina A., Rahman S., Morell M., Li Z., 2007. Effects of starch synthase II a gene dosage on grain, protein and starch in endosperm of wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 115, 1053-1065.

Koutinas A. A., Wang R., Campbell G. M., Webb C., 2006. A whole crop biorefinery system: a closed system for the manufacture of non-food products from cereals. In: Kamm B., Gruber P. R., Kamm M. (Eds.), *Biorefineries-industrial processes and products*. Wiley-VCH, pp 165-191.

Kuakpetoon D., Flores R. A., Milliken G. A., 2001. Dry mixing of wheat flours: effect of particle properties and blending ratio. *LWT – Food Science and Technology*, 34(3), 183-193.

Kweon M., Slade L., Levine H., Gannon D., 2014. Solvent retention capacity (SRC). Cookie- vs. cracker-baking-What's the difference? Flour functionality requirements explored by SRC and alveography. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54, 115-138.

Labat E., Rouau X., Morel M. H., 2002. Effect of flour water extractable pentosans on molecular associations in gluten during mixing. *LWT – Food Science and Technology*, 35 (2), 185-189.

Lai S. C., Hosney C. R., Davis B. A., 1989. Effects of wheat bran in breadmaking. *Cereal Chemistry*, 66 (3), 217-219.

- Lai H.-M., Lin T.-C., 2006. Bakery products. *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering*. CRC Taylor & Francis, Vol IV, Chapter 148.
- Laitone J. A., 1979. Aerodynamic effects in the erosion process. *Wear*, 56 (1), 239-246.
- Landillon V., Cassan D., Morel M., Cuq B., 2008. Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders. *Journal of Food Engineering*, 86, 178-193.
- Lee J. H., Cho A.-R., Hong J. Y., Park D.-J., Lim S.-T., 2012. Physical properties of wheat flour composites dry-coated with microparticulated soybean hulls and rice flour and their use for low-fat doughnut preparation. *Journal of Cereal Science*, 56, 636-643.
- León A., Durán E.; Benedito De Barber C., 1997. A new approach to study starch changes occurring in the dough-baking process and during bread storage. *Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 204(4), 116-120.
- Létang C., Samson M. F., Lasserre T. M., Chaurand M., Abecassis J., 2002. Production of starch with very low protein content from soft and hard wheat flours by jet milling and air classification. *Cereal Chemistry*, 79(4), 535-543.
- Li Z., Wang R., Chen Z., Hou G., 2012. Effect of water migration between arabinoxylans and gluten on baking quality of whole wheat bread detected by magnetic resonance imaging (MRI). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(26), 6507-6514.
- Limsangouan N., Isobe S., 2009. Effect of milling process on functional properties of legumes. *Kasetsart Journal: Natural Science*, 43, 745-751.
- Liu C., Liu L., Li L., Hao C., Zheng X., Bian K., Zhang J., Wang X., 2015. Effects of different milling processes on whole wheat flour quality and performance in steamed bread making. *LWT – Food Science and Technology*, 62(1), 310-318.
- Mandala I. G., Bayas E., 2004. Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of wheat starch dispersions. *Food Hydrocolloids*, 18(2), 191-201.
- Mandala I. G., 2012. Viscoelastic properties of starch and non-starch thickeners in simple mixtures or model food. In: de Vicente J. (Ed.), *Viscoelasticity - From Theory to Biological Applications*- open science, Chapter 10, pp 217-236.
- Manley D., 1991. Fats and oils. In: *Technology of biscuits, crackers and cookies* (2<sup>nd</sup> Ed.), Ellis Horwood, New York, pp 133-153.
- Manley D., Pareyt B., Delcour J.A., 2011. Wheat flour and vital wheat gluten as biscuit ingredient. In: Manley D. (Ed.), *Manley's technology of biscuits, crackers and cookies*. Cambridge, UK, pp 109-133.
- Marco C., Rosell C. M., 2008. Breadmaking performance of protein enriched, gluten free breads. *European Food Research and Technology*, 227, 1205-1213.
- Mares D. J., Campbell A. W., 2001. Mapping components of flour and noodle colour in Australian wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52, 1297-1309.
- Marin B. J., Deleu H., 2013. Grinding of vegetal fibers to micrometer size. *Chemical Engineering & Technology*, 37(5), 888-890.

- Martinez M., Oliete B., Román L., Gómez M., 2014. Influence of the addition of extruded flours on rice bread quality. *Journal of Food Quality*, 37(4), 83-94.
- Mc Caig T. N., 2002. Extending the use of visible/near-infrared reflectance spectrophotometers to measure colour of food and agricultural products. *Food Research International*, 35, 731-736.
- Meuser F., 1993. Types of mill and their uses. *Encyclopedia of Food Science, Food Technology and Nutrition*. Academic Press, pp 3987-3997.
- Midoux N., Hošek P., Pailleres L., Authelin J., 1999. Micronization of pharmaceutical substances in a spiral jet mill. *Powder Technology*, 104(2), 113-120.
- Miles M. J., Morris V. J., Orford P. D., Ring S. G., 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydrate Research*, 135, 271-281.
- Miller F., Polke R., Schadel G., 1996. Spiral jet mills: hold up and scale up, *International Journal of Mineral Processing*, 44-45, 315-326.
- Mintel, 2011. Mintel global new products database. As cited in: Whole grain statistics, Whole Grains Council. Available at: <http://www.wholegrainscouncil.org/newsroom/whole-grain-statistics> (last accessed 21.11.16).
- Moder G. J., Finney K. F., Bruinsma B. L., Ponte J. G., Bolte L. C., 1984. Breadmaking potential of straight-grade and whole wheat flours of Triumph and Eagleplainsman V hard red winter wheats. *Cereal Chemistry*, 61, 269-273.
- Moorthy S. N., Ramanujam T., 1986. Variation in properties of starch in cassava varieties in relation to age of the crop. *Starch – Stärke*, 38 (2), 58-61.
- Moreira R., Chenlo F., Torres M. D., Prieto D. M., 2010. Influence of the particle size on the rheological behaviour of chestnut flour doughs. *Journal of Food Engineering*, 100, 270-277.
- Morris C. F., Rose S. P., 1996. Wheat. In: Henry R. J., Kettlewell P. (Eds.), *Cereal Grain Quality*. Chapman & Hall, London, pp 6.
- Moss R., 1972. A study of the microstructure of bread doughs. CSIRO. *Food Research Quarterly*, 32, 50-56.
- Muttakin S., Kim M. S., Lee D.-U., 2015. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology. *Food Chemistry*, 187, 106-111.
- Neves M. A., Kimura T., Shimizu N., Shiiba K., 2006. Production of alcohol by simultaneous saccharification and fermentation of low-grade wheat flour. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 49(3), 481-490.
- Noort M. W. J., Haaster D., Hemery Y., Schols H. A., Hamer R. J., 2010. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality – Evidence for fibre-protein interactions. *Journal of Cereal Science*, 5, 259-264.
- Oladunmoye O., Akinoso R., Olapade A.A., 2010. Evaluation of some physical-chemical properties of wheat, cassava, maize and cowpea flours for bread making. *Journal of Food Quality*, 33, 693-708.

Oliver J. R., Blakeney A. B., Allen H. M., 1992. Measurement of flour color in color space parameters. *Cereal Chemistry*, 69, 546-551.

Oliver J. R., Blakeney A. B., Allen H. M., 1993. The colour of flour streams as related to ash and pigment contents. *Journal of Cereal Science*, 17, 169-182.

Owens G., 2001. Wheat, corn and coarse grains milling in cereals processing technology. Woodhead publishing in *Food Science and Technology*, CRC Press. USA, NW, pp 27-52.

Parada J., Aguilera J. M., 2011. Review: Starch matrices and the glycaemic response. *Food Science and Technology International*, 17, 187-204.

Park S. H., Chung K., Seib P. A., 2004. Size distribution and properties of wheat starch granules in relation to crumb grain score of pup-loaf bread. *Cereal Chemistry*, 81, 699-704.

Park S. H., Chung K., Seib P. A., 2005. Effects of varying weight ratios of large and small wheat starch granules on experimental straight – dough bread. *Cereal Chemistry*, 82, 166-172.

Parker R., Ring S. G., 2001. Macromolecular aspect of bread staling. In: Chinachoti P., Vodovotz Y. (Eds.), *Bread staling*. CRC Press LLC. Series in Contemporary Food Science, New York, pp 61-71.

Pauly A., Pareyt B, Fierens E., Delcour J. A., 2013. Wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. turgidum* L. ssp. *durum*) Kernel Hardness: II. Implications for end-product quality and role of puroindolines therein comprehensive. *Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(4), 427-438.

Pelgrom P. J. M., Vissers A. M., Boom R. M., Schutyser M. A. I., 2013. Dry fractionation for production of functional pea protein concentrates. *Food Research International*, 53, 232-239.

Persmark U., Melin K. A, Stahl P. O., 1976. Palm oil, its polymorphism and solidification properties. *Rivista italiana delle sostanze grasse*, 53, 301-306.

Phat C., Li H., Lee D.-U., Moon B., Yoo Y.-B., Lee C., 2015. Characterization of *Herichium erinaceum* powders prepared by conventional roll milling and jet milling. *Journal of Food Engineering*, 145, 19-24.

Piazza L., Masi P., 1995. Moisture redistribution throughout the bread loaf during staling and its effect on mechanical properties. *Cereal Chemistry*, 72, 320-325.

Poitrenaud B., 2006. Yeast. In: Hui Y. H. (Ed.), *Handbook of Food Science Technology and Engineering*. CRC Taylor & Francis, Vol II, Chapter 69.

Pomeranz Y., Shogren M. D., Finney K. F., Bechtel D. B., 1977. Fiber in breadmaking – effects on functional properties. *Cereal Chemistry*, 54, 25-41.

Posner E. S., 2009. Wheat flour milling. In: Khan K., Shewry P. R., (Eds.), *Wheat: chemistry and technology*. St. Paul, MN, USA: AACC International. pp 119-152.

Posner E. S., Hibbs A. N., 2005. *Wheat flour milling*. St. Paul, MN, American Association of Cereal Chemists, pp 125-153.

Prabhasankar P., Rao P. H., 2001. Effect of different milling methods on chemical composition of whole wheat flour. *European Journal of Food Research and Technology*, 213, 465-469.

Prior M. H., Prem H., Rhodes M. J., 1993. *Principles of powder technology. Size Reduction*, Chapter 10. Wiley, Chichester, pp 227-296.

Prückler M., Siebenhandl-Ehn S., Apprich S., Höltinger S., Haas C., Schmid E., Kneifel W., 2014. Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization. *LWT – Food Science and Technology*, 56, 211-221.

Puhr D. P., D' Appolonia B.L., 1992. Effect of baking absorption on bread yield, crumb moisture and crumb water activity. *Cereal Chemistry*, 69 (5), 582-586.

P Tyler E. J., 1988. Bakery ingredients. In *Baking Science and Technology*, Vol II (4<sup>th</sup> Ed.), Merriam: Sosland Publishing Company. pp 271-312.

Ram S., Dawar V., Singh R.P., Shoran J., 2005. Application of solvent retention capacity tests for the prediction of mixing properties of wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 42, 261-266.

Rave K., Roggen K., Dellweg S., Heise T., Dieck T. H., 2007. Improvement of insulin resistance after diet with a whole-grain based dietary product: results of a randomized, controlled cross-over study in obese subjects with elevated fasting blood glucose. *British Journal of Nutrition*, 98 (5), 929-936.

Raymundo A., Fradinho P., Nunesa M. C., 2014. Effect of psyllium M. content on the textural and rheological characteristics of biscuit and biscuit dough. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 3, 96-105.

Richardson J. F., Harker J. H., Backhurst J. R., 2002. Particle Size Reduction and enlargement particle. In Coulson J. M., Richardson J. F. (Eds.), *Particle Technology and Separation Processes*, Vol II (5<sup>th</sup> Ed.), Butterworth -Heinemann, pp 95-145.

Robertson G. L., 1993. *Food packaging – Principles and practice*, Marcel Dekker, New York, USA, pp 676.

Rosell C. M., 2011. The Science of doughs and bread quality. In: Preedy V. R., Watson R. R., Patel V. B. (Eds.), *Flour and Breads*. Academic Press, UK, pp 3-14.

Rosell C. M., Collar C., Haros M., 2007. Assessment of hydrocolloid effects on the thermo-mechanical properties of wheat using the mixolab. *Food Hydrocolloids*, 21(3), 452-462.

Rosell C. M., Santos E., Collar C., 2010. Physical characterization of fiber enriched bread doughs by dual mixing and temperature constraint using the Mixolab. *European Food Research and Technology*, 231, 535-544.

Rosell C. M., Santos E., Sanz-Penella J, Haros M., 2009. Wholemeal wheat bread: a comparison of different breadmaking processes and fungal phytase, *Journal of Cereal Science*, 50, 272-277.

Rosenqvist T., 2004. *Principles of Extractive Metallurgy*. Tapir Academic Press, Trondheim Norway, pp 506.

Rumpf H., 1954. Die Zerkleinerung unter besonderer Berücksichtigung Lebensmittel technologischer Fragen I: Aufgabestellungen. Zerkleinerungsaufgaben in



der Lebensmittel-Industrie. *Fette, Seifen, Anstrichm*, 56, 404-408. doi: 10.1002/lipi.19540560608.

Rush K. C., 1970. Energy-absorbing characteristics of foamed polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 14, 1133-1147.

Sadler L. Y., Stanley D. A., Brooks D. R., 1975. Attrition mill operating characteristics. *Powder Technology*, 12(1), 19-28.

Sahlström S., Bräthen E., Lea P., Autio K. 1998. Influence of starch granule size distribution on bread characteristics. *Journal of Cereal Science*, 28, 157-164.

Salmenkallio-Marttila M., Katina K., Autio K., 2001, Effects of bran fermentation on quality and microstructure of high-fiber wheat bread. *Cereal Chemistry*, 78, 429-435.

Sanguansri P., Augustin M. A., 2006. Nanoscale materials development – a food industry perspective. *Trends in Food Science & Technology Trends*, 17 (10), 547-556.

Sanz Penella J. M., Collar C., Haros M., 2008. Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread. *Journal of Cereal Science*, 48, 715-721.

Schirald A., Fessas D., 2001. Mechanism of staling: an overview. In: Chinachoti P., Vodovotz Y. (Eds.), Series in contemporary food science *Bread staling*, CRC Press, Marcel Dekker, Inc., New York, pp 61-71.

Schubert H., 1987. Food particle technology, Part 1: Properties of particles and particulated food systems. *Journal of Food Engineering*, 6, 1-32.

Shibanuma K., Takeda Y., Hizukuri S., Shibata S., 1994. Molecular structures of some wheat starches. *Carbohydrate Polymers*, 25, 111-116.

Sibakov J., Abecassis J., Barron C., Poutanen K., 2014. Electrostatic separation combined with ultra-fine grinding to produce  $\beta$ -glucan enriched ingredients from oat bran. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 445-455.

Singer S. N., Yamamoto S., Latella, J., 1988. Protein product base. U.S. patent 4, 734, 287.

Slavin J., 2003. Why whole grains are protective: biological mechanisms. *Proceedings of the Nutrition Society*, 61, 129-134.

Sliwinski E. L., Kolster P., Prins A., van Viet T., 2004. On the relationship between gluten protein composition of wheat flours and large- deformation properties of their doughs. *Journal of Cereal Science*, 39, 247-264.

Sozer N., Cicerelli L., Heiniö R.L., Poutanen K., 2014. Effect of wheat bran addition on in vitro starch digestibility, physicochemical and sensory properties of biscuits. *Journal of Cereal Science*, 60, 105-113.

Stanley P. C., Young L. S., 2006. Characterisation of bakery products by formulation and the key functional roles of the main ingredients used in baking; ingredients and their influences. *Baked Products: Science, Technology and Practice*. Blackwell Publishing, UK, pp 35-70; 72-98.

Sudha M. L., Vetrmani R., Leelavathi K., 2007. Influence of fiber from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food Chemistry*, 100 (4), 1365-1370.

Sullivan P., O'Flaherty J., Brunton N., Arendt E., Gallagher, E., 2011, The utilisation of barley middlings to add value and health benefits to white breads. *Journal of Food Engineering*, 105, 493-502.

Svarovsky L., 1987. Powder testing guide: methods of measuring the physical properties of bulk powders. NY, USA.

Tait S. P. C., Galliard T., 1988. Effect on baking quality of changes in lipid composition during wholemeal storage. *Journal of Cereal Science*, 8, 125-137.

Takahashi T., Shimizu N., Butron Fujii K. I., das Neves M. A., Ichikawa S., Nakajima M., 2013. Pulverization of rice by ultracentrifuge cryomilling and microstructure of various pulverized rice. *Japan Journal of Food Engineering*, 14(1), 59-67.

Tester R. F., Debon S. J., 2000. Annealing of starch – a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 27, 1-12.

Teunou E., Fitzpatrick J. J., 1999. Effect of relative humidity and temperature on food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 42, 109-116.

Teunou E., Fitzpatrick J. J., Synnott, E. C., 1999. Characterisation of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 39, 31-37.

Tipples K., Kilborn R. H., 1968. Effect of pin-milling on the baking quality of flour in various breadmaking methods. *Cereal Science Today*, 13(9), 331.

Tóth Á., Prokisch J., Sipos P., Széles É., Mars É., Györi Z., 2006. Effects of particle size on the quality of winter wheat flour, with a special focus on macro- and microelement concentration. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 2659-2672.

Tronsmo K. M., Faergestad E. M., Schofield J. D., Magnus E. M., 2003a. Wheat protein quality in relation to baking performance evaluated by the Chorleywood bread process and a hearth bread baking test. *Journal of Cereal Science*, 38, 205-215.

Tronsmo K. M., Magnus E. M., Baardseth P., Schofield J. D., Aamondt A., Faergestad E. M., 2003b. Comparison of small and large deformation rheological properties of wheat dough and gluten. *Cereal Chemistry*, 80, 587-595.

Tuunila R., Nystrom L., 1998. Technical note effects of grinding parameters on product fineness in jet mill grinding. *Minerals Engineering*, 11, 1089-1094.

Vizitiu D., Danciu I., 2011. Evaluation of Farinograph and Mixolab for prediction of mixing properties of industrial wheat flour. *Acta Universitatis Cibiniensis Series E: Food technology*, Vol. XV, 2, 31-38.

Vogel A., 1991. The Alpine fluidized bed opposed jet mill. *Powder Handling & Processing*, 3, 129-132.

Von Rittinger P. R., 1867. *Lehrbuch der Aufbereitungs Kunde*. Ernst and Korn, Berlin, pp 110.

Voropayev S., Eskin D., 2002. Optimal particle acceleration in a jet mill nozzle. *Minerals Engineering*, 15(6), 447-449.

Vratanina D. L., Zabik M. E., 1978. Dietary fiber sources for baked products. Bran in Sugar-Snap cookies. *Journal of Food Science*, 43 (5), 1590-1594.

Wachiraphansakul S., Devahastin S., 2007. Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles. *LWT – Food Science and Technology*, 40, 207-219.

Waigh T. A., Gidley M. J., Komanshek B. U., Donald A. M., 2000. The phase transformations in starch during gelatinisation: a liquid crystalline approach. *Carbohydrate Research*, 328, 165-176.

Wang L., Flores R. A., 2000. Effects of flour particle size on the textural properties of flour tortillas. *Journal of Cereal Chemistry*, 31, 263-272.

Wang M. W., van Vliet T., Hamer R. J., 2004. How gluten properties are affected by pentosans. *Journal of Cereal Science*, 39, 395-402.

Wang S., Yu J., Xin Q., Wang S., Copeland L., 2016. Effects of starch damage and yeast fermentation on acrylamide formation in bread. *Food Control*, 73, Part B, 230-236.

Wang J., Rosell C. M., Benedito C., 2002. Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. *Food Chemistry*, 79(2), 231-236.

Weaver G. L., 2001. A miller's perspective on the impact of health claims. *Nutrition Today*, 36, 115-118.

Weickert M. O., Pfeiffer A. F., 2008. Metabolic effects of dietary fiber consumption and prevention of diabetes. *Journal of Nutrition*, 138 (3), 439-442.

Wieser H., Bushuk W., Mac Ritchie F., 2006. The polymeric glutenins. In: Wrigley C., Bekes F., Bushuk W. (Eds.), *Gliadin and glutenin: the unique balance of wheat quality*. AACC International, St. Paul, pp 213-240.

Williams A., Pullen G., 1998. Functional ingredients. In: Cauvain S. P., Young L.S. (Eds.), *Technology of Breadmaking*. Blackie Academic & Professional, London, UK, pp 45-80.

Willoughby A., Andrews N., 1917. American Patent.

Wilson J. T., Donelson D. H., 1969. Comparison of flour particle size distribution measured by electrical resistivity and microscopy. *Flour Part. Size Distributions*, 47, 126-134.

Yamada Y., Hosoya S., Nishimura S., Tanaka T., Kajimoto Y., Nishimura A., et al., 2005. Effect of bread containing resistant starch on postprandial blood glucose levels in humans. *Bioscience Biotechnology Biochemistry*, 69(3), 559-566.

Yasui T., Sasaki T., Matsuki J., 1999. Milling and flour pasting properties of waxy endosperm mutant lines of bread wheat (*Triticum aestivum* L). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 687-692.

Yizhong C., Harold C., 2006. Cereals – Biology, Pre- and Post-Harvest Management. In: Hui Y. H. (Ed.), 2006. *Handbook of food science, technology and engineering*. CRC Taylor & Francis, Vol I., Chapter 17.

Zaidul S. M., Yamauchi H., Matsuura-Endo C., Takigawa S., Noda T., 2008. Thermal analysis of mixtures of wheat flour and potato starches. *Food Hydrocolloids*, 22, 499-504.

Zhang D., Moore W. R., 1997. Effect of wheat bran particle size on dough rheological properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 74(4), 490-496.

Zhang D., Moore W. R., 1999, Wheat bran particle size effects on bread baking performance and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 805-809.

Zhang G., Venkatachalam M., Hamaker B. R., 2006. Structural basis for the slow digestion property of native cereal starches. *Biomacromolecules*, 7, 3259–3266.

Zhu K., Huang S., Peng W., Qian H., Zhou H., 2010. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber. *Food Research International*, 43(4), 934-938.

Ziegler E., Greer E., N. 1971. Principles of milling. In: Pomeranz Y. (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, pp 134-135.

Zogg M., 1987. Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik (2<sup>nd</sup> Ed.), Stuttgart: BG Teubner., pp 13-76.

Zúñiga R. N., Skurtys O., Osorio F., José M., Aguilera J. M., Pedreschi F., 2013. Optical properties of emulsion-based hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) films: effect of their microstructure. In Proceedings of *Inside Food Symposium*, 9-12 April 2013, Leuven, Belgium.

<http://db2.datamonitor.com/product-launch-analytics> (last accessed 20.05.16).

<http://faostat.fao.org/desktopdefault.aspx?pageid=342&lang=en&country=84> (last accessed 11.09.16).

<http://faostat.fao.org/site/666/default.aspx> (last accessed 11.09.16).

<http://www.fao.org/docrep/x5738e/x5738e0j.htm> (last accessed 11.09.16).

<http://www.fluidenergype.com/jet-o-mizer-particle-size-reduction-systems-1-0-45-microns-features-benefits> (last accessed 01.06.16).

<http://www.hosokawamicron.co.jp/en/machines/126> (last accessed 01.06.16).

[http://www.igc.int/en/downloads/grainsupdate/IGC\\_5yearprojections2015.pdf](http://www.igc.int/en/downloads/grainsupdate/IGC_5yearprojections2015.pdf) (last accessed 20.05.16).

<http://faostat.fao.org/site/609/DesktopDefault.aspx?PageID=609#ancor> (last accessed 11.09.16).