



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

Επίδραση Πρωτεϊνών και
Διαιτητικών Ινών Φυτικής Προέλευσης
στην Ανάπτυξη Προϊόντων Ελεύθερων
Γλουτένης με Βελτιωμένα Ποιοτικά
Χαρακτηριστικά

Διδακτορική Διατριβή

Κλεοπάτρα Δ. Τσατσαράγκου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
Ιωάννα Μαντάλα, Επίκουρος Καθηγήτρια Γ.Π.Α.

Αθήνα, 2015

**Επίδραση Πρωτεϊνών και Διαιτητικών Ινών
Φυτικής Προέλευσης στην Ανάπτυξη Προϊόντων
Ελεύθερων Γλουτένης με Βελτιωμένα Ποιοτικά
Χαρακτηριστικά**

Διδακτορική Διατριβή

Κλεοπάτρα Δ. Τσατσαράγκου

Εξεταστική Επιτροπή

Επιβλέπουσα

Επίκουρος Καθηγήτρια Ι. Μαντάλα

Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας και Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Συμβουλευτική Επιτροπή

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Μ. Κροκίδα

Εργαστήριο Σχεδιασμού & Ανάλυσης Διεργασιών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αναπληρωτής Καθηγητής Ν. Στοφόρος

Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας και Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Λοιπά Μέλη

Καθηγητής Σ. Γιαννιώτης

Εργαστήριο Μηχανικής Τροφίμων, Επεξεργασίας και Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Καθηγητής Β. Καραθάνος

Εργαστήριο Χημείας, Βιοχημείας και Φυτικοχημείας Τροφίμων
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Καθηγήτρια Κ. Τζιά

Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Μ. Παπαγεωργίου

Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Σιτηρών
Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσ/νίκης - ΑΤΕΙΘ

*«Πρέπει να ζούμε σαν να πρόκειται να πεθάνουμε αύριο
και να μελετάμε σαν να πρόκειται να ζήσουμε για πάντα.»*

Μαχάτμα Γκάντι, 1869-1948, Ινδός ηγέτης

Πρόλογος

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.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επίκουρη καθηγήτρια Ι. Μαντάλα, για την καθοδήγηση, συμπαράσταση και βοήθεια που μου πρόσφερε όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για την υπομονή και επιμονή της για την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής. Ευχαριστώ, επίσης, θερμά τον αν. καθηγητή Ν. Στοφόρο και την αν. καθηγήτρια Μ. Κροκίδα, για την αποτελεσματική συνεργασία και τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον καθηγητή Β. Καραθάνο (Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο), την καθηγήτρια Κ. Τζιά (ΕΜΠ), τον καθηγητή Σ. Γιαννιώτη (Γ.Π.Α) και την αν. Καθηγήτρια Μ. Παπαγεωργίου (ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης).

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ε. Αναγνωσταρά και τις υποψήφιες διδάκτορες Ο. Καλτσά, Σ. Πρωτονοταρίου και Π. Παξιμαδά για την στενή συνεργασία και την βοήθεια τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω προς την οικογένειά μου, και κυρίως τους γονείς μου, Δημήτρη και Μαγδαληνή, τον αδερφό μου Κλήμη, και τον σύντροφο μου Δημήτρη για την διαχρονική υποστήριξή τους.

Περίληψη

Η νόσος της κοιλιοκάκης είναι μια αυτοάνοση διαταραχή του λεπτού εντέρου που εμφανίζεται σε γενετικά προδιατεθειμένα άτομα από μόνιμη δυσανεξία στη γλουτένη. Ο όρος γλουτένη χρησιμοποιείται από την επιστημονική κοινότητα για να περιγράψει το σύμπλεγμα των πρωτεϊνών (προλαμίνες και γλουτελίνες) ορισμένων δημητριακών (γλοιαδίνες σίτου, χορδεΐνες κριθαριού, σικαλίνες σίκαλης) (Thompson, 2000). Η μόνη θεραπεία της νόσου μέχρι στιγμής είναι η δια βίου δίαιτα ελεύθερη γλουτένης. Τα εμπορικά διαθέσιμα τρόφιμα ελεύθερα γλουτένης χαρακτηρίζονται από χαμηλή διατροφική αξία, λόγω των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τους, κυρίως εξευγενισμένα άμυλα και άλευρα από ρύζι ή αραβόσιτο. Ως εκ τούτου οι πάσχοντες από κοιλιοκάκη λαμβάνουν χαμηλά ποσοστά μακροσυστατικών (διαιτητικές ίνες, πρωτεΐνες) και μικροσυστατικών με την διατροφή τους. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης τροφίμων ελεύθερων γλουτένης εμπλουτισμένων με πρωτεΐνες και διαιτητικές ίνες, και ειδικότερα αρτοσκευασμάτων, τα οποία αποτελούν καθημερινό και βασικό είδος διατροφής.

Η τεχνολογία παρασκευής αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης αποτελεί πρόκληση λόγω της απουσίας της γλουτένης. Ο ρόλος της γλουτένης στην αρτοποιία είναι η δομική ενίσχυση των αρτοσκευασμάτων, καθώς προσδίδει στο ζυμάρι ιξωδοελαστικές ιδιότητες, συμβάλλοντας στην αύξηση του όγκου και τη διατήρηση του σχήματος του ζυμαριού, ενώ το τελικό προϊόν είναι μαλακό, αφράτο και εύγευστο. Οι πρώτες ύλες για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης είναι κυρίως άμυλα και άλευρα ρυζιού ή αραβόσιτου, οι πρωτεΐνες των οποίων δεν έχουν την ικανότητα σχηματισμού ιξωδοελαστικού δικτύου στο ζυμάρι. Το αποτέλεσμα είναι τα τελικά προϊόντα να χαρακτηρίζονται από μειωμένο όγκο, σκληρή και εύθρυπτη ψίχα και μικρή διάρκεια ζωής.

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης με βελτιωμένα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά. Από το σύνολο των αρτοσκευασμάτων επιλέχθηκαν να μελετηθούν ο άρτος και το κέικ. Ο άρτος επιλέχθηκε ως βασικό τρόφιμο της καθημερινής διατροφής, ενώ το κέικ επιλέχθηκε ως τρόφιμο αρεστό στους καταναλωτές για σνακ. Για τον διατροφικό εμπλουτισμό των αρτοσκευασμάτων επιλέχθηκε η προσθήκη αλεύρου από σπόρους χαρουπιού, ως χαμηλού κόστους πρώτη ύλη πλούσια σε διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνη. Επιπλέον, μελετήθηκε η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου, το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με τις διαλυτές φυτικές ίνες και ανήκει στην κατηγορία των πρεβιοτικών. Για την διατροφική ενίσχυση του άρτου χρησιμοποιήθηκε χαρουπάλευρο και ανθεκτικό άμυλο, ενώ στα κέικ έγινε ενσωμάτωση μόνο ανθεκτικού αμύλου. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η προσθήκη χαρουπάλευρου και ανθεκτικού αμύλου στα ρεολογικά χαρακτηριστικά της ζύμης/ζυμαριού, στα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά και στη διατηρησιμότητα των αρτοσκευασμάτων, ενώ ακολούθησε μελέτη βελτιστοποίησης για την παραγωγή εμπλουτισμένων προϊόντων με υψηλή διόγκωση και μαλακή ψίχα.

Το βασικό συστατικό που χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη των αρτοσκευασμάτων ήταν το ρυζάλευρο. Το χαρουπάλευρο παρελήφθηκε μετά από άλεση σπόρων χαρουπιού. Η κοκκομετρία του αλεύρου επηρεάζει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της ζύμης των αρτοσκευασμάτων και κατά συνέπεια τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Επομένως έγινε ενσωμάτωση διαφορετικής κοκκομετρίας χαρουπάλευρου σε άρτο και προσδιορίστηκε η επίδραση της κοκκομετρίας στην ποιότητα των τελικών άρτων. Για το λόγο αυτό, το χαρουπάλευρο κοσκινίστηκε και το κλάσμα με κοκκομετρία άνω των 500 μm απορρίφθηκε. Το υπόλοιπο άλευρο κοσκινίστηκε ξανά και προέκυψαν τρία κλάσματα που κωδικοποιήθηκαν ως κλάσμα A ($d_{50}= 258.55 \mu\text{m}$), B ($d_{50}= 174.73 \mu\text{m}$) και C ($d_{50}= 126.37 \mu\text{m}$). Εναλλακτικά το σύνολο του χαρουπαλευρου με κοκκομετρία μικρότερη των 500 μm αλέστηκε περαιτέρω σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα ώστε να παραχθεί πολύ χαμηλής κοκκομετρίας χαρουπάλευρο που κωδικοποιήθηκε ως κλάσμα D ($d_{50}= 80.36 \mu\text{m}$). Αρχικά προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες ενυδάτωσης των κλασμάτων του χαρουπάλευρου και η επίδραση του ποσοστού ενσωμάτωσης και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στα θερμορεολογικά χαρακτηριστικά του ρυζάλευρου. Τα θερμορεολογικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων ρυζάλευρου-χαρουπάλευρου προσδιορίστηκαν με χρήση ειδικού κελιού μέτρησης της μεταβολής του ιξώδους με την μεταβολή της θερμοκρασίας (κύκλος θέρμανσης και ψύξης). Επιπλέον, προσδιορίστηκαν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ζυμαριού (για την περίπτωση του άρτου) και της ζύμης (για την περίπτωση του κέικ) των αρτοσκευασμάτων με χρήση ρεομέτρου. Στην περίπτωση του άρτου μετρήθηκαν ο ελαστικός (G') και ο ιξώδης (G'') χαρακτήρας του ζυμαριού, ενώ το ζυμάρι υποβλήθηκε και σε δοκιμή ερπυσμού χαλάρωσης, όπου προσδιορίστηκε η ενδοτικότητα της ζύμης μετά την εφαρμογή διαμητικής τάσης. Στη ζύμη του κέικ προσδιορίστηκαν ο ελαστικός (G') και ο ιξώδης χαρακτήρας (G'') της ζύμης και η μεταβολή του ιξώδους ως προς την διαμητική τάση (συντελεστής συνεκτικότητας, δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς). Τα προσδιοριζόμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων περιελάμβαναν τον ειδικό όγκο, το πορώδες, το χρώμα, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και την υφή (σκληρότητα, ελαστικότητα) της ψίχας. Επιπροσθέτως διενεργήθηκε οργανοληπτική αξιολόγηση των αρτοσκευασμάτων, ενώ μετρήθηκε και ο ρυθμός παλαίωσής τους μέσω της απώλειας υγρασίας και της υποβάθμισης της υφής των αρτοσκευασμάτων.

Αντικείμενο των αρχικών πειραμάτων ήταν η μελέτη των ιδιοτήτων ενυδάτωσης των κλασμάτων του χαρουπάλευρου. Η γνώση των ιδιοτήτων ενυδάτωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων, όπου το νερό μετέχει στην ενεργοποίηση της μαγιάς, στη ζελατινοποίηση του αμύλου και στη μετουσίωση των πρωτεϊνών κατά τα στάδια της ανάμιξης και του ψησίματος. Η μείωση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου από τα 258.55 μm στα 126.37 μm οδήγησε σε μείωση της ικανότητας συγκράτησης νερού από τα 7.02 g νερού/ g αλεύρου στα 5.77 g νερού/ g αλεύρου αντίστοιχα, ακολουθούμενη ωστόσο από μία αύξηση της ικανότητας συγκράτησης νερού για την χαμηλότερη κοκκομετρία (κλάσμα D) στα 7.33 g νερού/ g αλεύρου. Όσον αφορά την επίδραση της προσθήκης χαρουπάλευρου (σε ποσοστό 15%) στα θερμορεολογικά χαρακτηριστικά του ρυζάλευρου, η κοκκομετρία του χαρουπάλευρου είχε σημαντική επίδραση. Η ενσωμάτωση χοντρόκοκκων

κλασμάτων χαρουπάλευρου αύξησε το μέγιστο και το τελικό ιξώδες των πηγμάτων, ενώ δεν μεταβλήθηκε η ισχύς των πηγμάτων κατά την ψύξη. Αντιθέτως η προσθήκη των λεπτόκοκκων κλασμάτων αύξησε την ισχύ του πήγματος σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (μόνο ρυζάλευρο). Η ενσωμάτωση χαρουπάλευρου, ανεξάρτητα της κοκκομετρίας σε ποσοστό 15% οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας των μιγμάτων (≈ 66 °C) σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (≈ 72 °C).

Σε άρτο ελεύθερο γλουτένης με αναλογία ρυζάλευρο/χαρουπάλευρο ίση προς 85/15 πραγματοποιήθηκε μελέτη προσθήκης πρωτεϊνών ορού γάλακτος και αλβουμίνης αυγού, γαλακτωματοποιητή και ενζύμων. Η ενσωμάτωση των πρωτεϊνικών πηγών (σε ποσοστό 8% επι του αλεύρου και σε αναλογία πρωτεϊνών 1:1) βελτίωσε τα δομικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων με ρυζάλευρο και χαρουπάλευρο, μειώνοντας την σκληρότητα της ψίχας (41.5 N) και αυξάνοντας το πορώδες (42.5%) σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (49.5 N σκληρότητα και 29.6 % πορώδες). Επιπλέον προσθήκη κόμμεος χαρουπιού ενίσχυσε την διόγκωση των άρτων (52.3% πορώδες). Η προσθήκη γαλακτωματοποιητή μείωσε περαιτέρω την σκληρότητα της ψίχας (32.4 N) δημιουργώντας ωστόσο κατάρρευση της δομής, η οποία αποκαταστάθηκε με την χρήση ενζύμων στην συνταγή. Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε η βασική συνταγή για την ανάπτυξη των άρτων ελεύθερων γλουτένης της παρούσας διατριβής.

Στην συνέχεια έγινε προσδιορισμός των ταυτόχρονων επιδράσεων τόσο της ποσότητας του χαρουπάλευρου (5-15%) όσο και της περιεκτικότητας σε νερό στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ζυμαριού και στις ιδιότητες των άρτων (πορώδες, μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας, σκληρότητα και ελαστικότητα ψίχας). Λόγω της υψηλής ικανότητας συγκράτησης νερού του χαρουπάλευρου είναι απαραίτητη η κατάλληλη ρύθμιση του νερού στην συνταγή των άρτων. Τα ζυμάρια που παρασκευάστηκαν εμφάνισαν ελαστικό – στερεό χαρακτήρα καθώς ο συντελεστής αποθήκευσης ήταν μεγαλύτερος από τον συντελεστή απωλειών σε όλο το πεδίο συχνοτήτων ($G' > G''$). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό οδήγησε σε μείωση και των δύο συντελεστών, ενώ η προσθήκη χαρουπάλευρου οδήγησε σε πιο ελαστική δομή των ζυμαριών (αύξηση του G'). Τα πειράματα ερπυσμού – ανάκτησης τόνισαν το ρόλο του νερού ως πλαστικοποιητή, το οποίο συμβάλλει στον ιξώδη χαρακτήρα των ζυμαριών, σε αντίθεση με την προσθήκη χαρουπάλευρου, το οποίο αύξησε την ελαστικότητα των ζυμαριών, αποτρέποντας την κατάρρευση της δομής τους. Αυξάνοντας την ποσότητα του χαρουπάλευρου, η επίδραση του περιεχόμενου νερού στον ιξώδη χαρακτήρα της ζύμης έγινε λιγότερο έντονη, καθώς τα ζυμάρια που περιέχουν 15% χαρουπάλευρο παρουσίασαν σημαντικό ελαστικό χαρακτήρα ακόμη και σε υψηλό περιεχόμενο νερό.

Ο κατάλληλος συνδυασμός περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο οδήγησε σε ισορροπία του ιξώδους και του ελαστικού χαρακτήρα των ζυμαριών, προϋπόθεση απαραίτητη για την παρασκευή υψηλής ποιότητας άρτου. Οι συνδυασμοί χαρουπάλευρο/νερό 10/110, 15/130 και 15/140 οδήγησαν στην παρασκευή ζυμαριών με ικανοποιητικές ιξωδοελαστικές ιδιότητες, ενώ και οι αντίστοιχοι άρτοι που παρήχθησαν σημείωσαν επαρκή διόγκωση, υψηλό πορώδες και μειωμένη σκληρότητα ψίχας. Επιπλέον τα αρτοσκευάσματα με 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο

μπορούν να θεωρηθούν υψηλής διατροφικής αξίας, καθώς είναι εμπλουτισμένα σε διαιτητικές ίνες, ενώ περιέχουν και υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών. Καθώς η προσθήκη χαρουπάλευρου σε ποσοστό 15% οδήγησε στην παραγωγή άρτου υψηλών διατροφικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών, αποφασίστηκε η μελέτη να προχωρήσει σε βελτιστοποίηση του προϊόντος με συνδυασμένη χρήση ανθεκτικού αμύλου και 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο. Επιπλέον, έγινε περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου σε σταθερό ποσοστό προσθήκης 15% και μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε νερό στην αρτοποιητική ικανότητα της ζύμης και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων. Από την μελέτη βελτιστοποίησης, η συνταγή που προέκυψε περιείχε 15% χαρουπάλευρο, 140% νερό, 15% ανθεκτικό άμυλο και 10% πρωτεΐνες (ορού γάλακτος και αλβουμίνης σε αναλογία 1:1) και το τελικό προϊόν χαρακτηρίστηκε από υψηλή διόγκωση (52.9% πορώδες) και μαλακή ψίχα (34.7 N).

Η ενσωμάτωση χαρουπάλευρου διαφορετικής κοκκομετρίας στο ζυμάρι των άρτων απαιτεί κατάλληλη ρύθμιση του περιεχόμενου νερού στο ζυμάρι, λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων ενυδάτωσης του χαρουπάλευρου με την κοκκομετρία, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη διόγκωση της ζύμης κατά την επώαση και τα τελικά προϊόντα να χαρακτηρίζονται από βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Στην διόγκωση των ζυμαριών των άρτων παρατηρήθηκε ένα βέλτιστο σημείο περιεκτικότητας σε νερό διαφορετικό για κάθε κοκκομετρία το οποίο οδήγησε στην υψηλότερη διόγκωση και ήταν αντίστοιχα 150%, 140%, 120% και 130% περιεκτικότητα σε νερό για κοκκομετρία χαρουπάλευρου 258.55, 174.73, 126.37 και 80.36 μm αντίστοιχα. Τα αρτοσκευάσματα αυτά συγκρίθηκαν ως προς τα δομικά χαρακτηριστικά και τον ρυθμό παλαίωσής τους. Οι άρτοι με προσθήκη χαρουπάλευρου της υψηλότερης (258.55 μm) και της χαμηλότερης κοκκομετρίας (80.36 μm) παρουσίασαν αυξημένο ειδικό όγκο (2.22 cm^3/g και 2.21 cm^3/g) αντίστοιχα σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (1.62 cm^3/g) και μικρούς ρυθμούς παλαίωσης κατά την αποθήκευση τους (1.54 N/ημέρα και 0.94 N/ημέρα) αντίστοιχα σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (7.51 N/ημέρα). Επομένως επιλέχθηκαν ως τα βέλτιστα δείγματα για συγκριτική μελέτη με εμπορικά διαθέσιμους άρτους χωρίς γλουτένη. Τα εμπορικά διαθέσιμα δείγματα εμφάνισαν υψηλότερη διόγκωση ($\geq 3 \text{ cm}^3/\text{g}$) αλλά σημείωσαν υψηλότερους ρυθμούς παλαίωσης ($\geq 2 \text{ N/ημέρα}$) έναντι των άρτων με χαρουπάλευρο κατά την αποθήκευση. Τέλος, στην οργανοληπτική αξιολόγηση που διεξήχθη με τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο και τα εμπορικά δείγματα, όλα βαθμολογήθηκαν ως αποδεκτά.

Στην περίπτωση των κέικ, έγινε ενσωμάτωση ανθεκτικού αμύλου σε ποσοστά μέχρι 20%. Η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου οδήγησε σε τελικά προϊόντα με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο προκάλεσε μείωση του ιξώδους της ζύμης του κέικ. Η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου οδήγησε σε αύξηση του ειδικού όγκου των κέικ, μείωση της σκληρότητας της ψίχας και μειωμένο ρυθμό παλαίωσης κατά την αποθήκευση των κέικ, ιδιαίτερα για το κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο. Σύμφωνα με την οργανοληπτική αξιολόγηση, η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου δεν επηρέασε τα περιγραφικά δεδομένα των κέικ, ενώ όλα τα κέικ θεωρήθηκαν αποδεκτά με τους δοκιμαστές να προτιμούν αυτό με 20% ανθεκτικό άμυλο.

Title of Dissertation:

Effect of protein and dietary fibre in the quality characteristics of gluten-free bakery products

Abstract

Celiac disease is an autoimmune disorder characterized by damage of the small intestinal mucosa caused by the gliadin fraction of wheat gluten and similar alcohol-soluble proteins (prolamines) of barley and rye in genetically susceptible subjects. The treatment of celiac disease is a lifelong elimination diet in which food products containing gluten are avoided. The commercially available gluten-free products are characterized by lower nutritional values compared to their wheat counterparts, since the raw materials used for their production are mainly refined starches, rice and maize flour. Concerns have been raised over the dietary intake of celiac patients, since gluten-free diet is considered to lack many important macronutrients (dietary fibres or proteins) and micronutrients (vitamins, minerals, iron, calcium etc). There is increasing interest for the development of gluten-free products enriched with proteins and dietary fibres mainly in the category of bakery products.

Production of gluten-free bakery products is a challenge for food technologists and bakery industries, due to the absence of gluten. In wheat based products, gluten is a structure forming protein, which imparts viscoelasticity in dough, contributing to the increase of volume, maintenance of the shape of the dough making the final product soft, fluffy and palatable. However, the raw materials used for gluten-free baked goods production are incapable of developing a network with properties similar to gluten, and the end-products are mainly characterized by low volume, increased crumb hardness with a coarse and crumbly texture and decreased storage stability.

The objective of this study was the development of gluten-free bakery products with enhanced nutritional value and quality characteristics. The bakery products studied were bread and cake, since bread is considered a staple food consumed daily and cakes are highly preferred from consumers as a healthy snack. Carob bean flour has been selected as a low cost raw material with increased amounts of dietary fibres and proteins for the nutritional enrichment of gluten-free breads.

Furthermore, the addition of resistant starch in the produced bakery products was studied. Resistant starch is considered a prebiotic with physiological benefits similar to soluble dietary fibres. Carob bean flour and resistant starch was incorporated in gluten-free bread formulations, while gluten-free cakes were developed using only resistant starch as a source of dietary fibre. More specifically, the effect of carob flour and resistant starch addition on the rheological properties of dough/batter and the quality characteristics and storage stability of bakery products was studied, thereafter the optimization of the fortified formulations followed.

The basic ingredient for the production of gluten-free bakery products was rice flour. The carob flour used in this study came from milling of carob seeds. Flour particle size was considered to affect the rheological properties of bread dough and the quality characteristics of end-products. Therefore, it was necessary to integrate carob flour of different particle sizes in bread formulations and to determine the effect of carob flour particle size on the quality of the final breads. Consequently, carob flour was sieved and fraction above 500 μm was discarded. The fractions obtained were named as fraction A ($d_{50}= 258.55 \mu\text{m}$), fraction B ($d_{50}= 174.73 \mu\text{m}$) and fraction C ($d_{50}= 126.37 \mu\text{m}$). Part of carob flour below 500 μm was also passed through a jet mill with air pressure at 8 bar, in order to obtain ultra-fine flour powder named as fraction D ($d_{50}= 80.36 \mu\text{m}$).

As a first step, the hydration properties of the carob fractions were identified and the effect of the substitution percentage and the particle size of the carob flour on the thermorheological properties of rice flour was determined. The thermorheological properties of carob and rice flour mixtures were studied using a starch pasting cell measuring the viscosity changes under heating and cooling. Furthermore, the rheological characteristics of bread dough and cake batter were determined using a rotational stress-controlled rheometer. Bread dough was subjected to oscillatory and creep-recovery testing, and the storage (G'), loss (G'') moduli and compliance value were measured. In cake batter the storage (G'), loss (G'') moduli and the viscosity over shear rate were determined. The produced bakery products (breads and cakes) were evaluated in terms of specific volume, porosity, crumb grain characteristics and crumb texture (firmness and relative elasticity). Additionally, sensory evaluation of the produced baked goods was performed and their staling rate was evaluated through moisture loss and texture evolution.

The first objective was to study the hydration properties of the carob fractions. Hydration properties are particularly important in the manufacture of bakery products, since water is involved in activation of yeast, starch gelatinization and denaturation of proteins during the stages of mixing and baking. Carob flour particle size reduction from 258.55 μm to 126.37 μm decreased water holding capacity from 7.02 g water/ g flour to 5.77 g water/ g flour, followed by an increase again for the finest fraction (Fraction D) at 7.33 g water/ g flour. Concerning the effect of added carob flour at 15% substitution level on the thermorheological properties of rice flour, carob particle size played a significant role. Incorporation of the coarser fractions increased the peak viscosity and the final viscosity, but exhibited no significant effect on the setback of the prepared gels. On the contrary, addition of the finest fractions increased setback values in relation to control gel (rice flour). Carob flour addition at 15% decreased the pasting temperature of the mixtures ($\approx 66 \text{ }^\circ\text{C}$) compared to control sample ($\approx 72 \text{ }^\circ\text{C}$).

Afterwards, the effect of adding proteins (whey protein and albumin), locust bean gum, emulsifier and enzyme on gluten-free bread physical properties was evaluated. Incorporation of proteins (at 8% flour weight and in a ratio 1:1) in bread formulations improved the structural properties, by decreasing crumb firmness (41.5 N) and increasing porosity (42.5%) in relation to the control bread (no proteins added) (49.5 N firmness and 29.6 % porosity). Further addition of locust bean gum enhanced bread

volume (52.3% porosity) and emulsifier addition decreased crumb firmness (32.4 N). However, a collapse of the bread structure was created, which was restored by the use of enzymes in the formulation. On this basis, the basic recipe for the production of the bakery products of this thesis was established.

Subsequently, the impact of carob flour incorporation percentage (5-15%) and water content on the rheological properties of dough and quality (porosity, crumb grain characteristics, crumb firmness and relative elasticity) of the produced breads was assessed. The prepared doughs presented a solid-elastic like character, since storage modulus was higher than loss modulus ($G' > G''$) in all frequency range. Increase in the water content led to a decrease in both moduli, while carob flour addition caused an increase in bread dough elastic character (increase of G'). The creep recovery experiments reveal the role of water as a plasticizer contracting to the viscous nature of doughs, whereas carob addition increased elasticity and prevented structure collapse. By increasing the amount of carob flour, the effect of water on the viscous character of the dough became less pronounced. In particular, formulations containing 15% carob flour presented, even at higher water content a significant elastic character. Appropriate combination of water content and carob flour led to a balance between the viscous and elastic nature of doughs, a prerequisite for making high quality bread. Doughs containing carob/water content ratio of 10/100, 15/130 and 15/140 exhibited satisfactory viscoelastic properties and the final bread products produced showed high quality attributes, such as high porosity and decreased crumb firmness. Furthermore, bread with 15% carob flour can be considered of high nutritional value, since it contained significant amount of both proteins and fibres. The optimization study allowed the determination of the optimum formulation for obtaining gluten-free baked product with low crumb firmness (37.4 N) and improved porosity values (52.9 %) by combining 15 % carob flour, 15 % resistant starch, 10% proteins (whey and albumin at 1:1 ratio) and water content of 140%.

The incorporation of carob flour of different particle sizes in bread dough required adjustment of the water content, due to changes in the hydration properties of the dough. The effect of carob flour particle size on the fermentative ability of doughs and the physical properties of breads with varying water content was evaluated. Dough height during fermentation was maximized at a specific water content level, different for each carob fraction used. Specifically, doughs containing 150%, 140%, 120% and 130% water content and carob flour particle size of 258.55, 174.73, 126.37 and 80.36 μm , respectively, presented maximum dough height during fermentation. Breads were prepared with the abovementioned combinations of water content and carob flour particle size, were compared in terms of structural properties and storage stability. Incorporation of the coarsest (258.55 μm) and the finest (80.36 μm) carob flour fraction led to breads with increased specific volume (2.22 cm^3/g and 2.21 cm^3/g) compared to control bread containing only rice flour (1.62 cm^3/g) and lower staling rates during storage (1.54 N/day and 0.94 N/day) compared to control bread (7.51 N/day). Therefore those breads were chosen as the best formulations for a comparative study with commercially available gluten-free breads. Although commercial samples exhibited increased volume ($\geq 3 \text{ cm}^3/\text{g}$), their staling rates during storage were considered higher

(≥ 2 N/day) compared to carob flour breads. Sensory evaluation of gluten-free carob breads and commercial breads was conducted and all samples tested were considered acceptable.

Concerning cake manufacturing, resistant starch was incorporated up to 20% (flour weight), in order to increase the nutritional value of cakes. Resistant starch inclusion gave end-products with acceptable quality characteristics even in the highest dosage of 20%. Rheological testing revealed the decrease of apparent viscosity with an increase in resistant starch content. Study of cakes physical properties revealed no significant differences in porosity values for cakes containing high amounts of resistant starch. Furthermore, an increase in resistant starch addition decreased staling rates of cake crumb during a 7-day storage period. According to the sensory evaluation data, resistant starch addition did not significantly affect the descriptive sensory parameters, but all cakes were considered acceptable and cake containing 20% resistant starch was mostly preferred by the panellists.

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

1. Tsatsaragkou K., Yiannopoulos S., Kontogiorgi A., Poulli E., Krokida M., Mandala I. 2012. Mathematical approach of structural and textural properties of gluten free bread enriched with carob flour. *Journal of Cereal Science*, 56 (3), 603-609.
2. Tsatsaragkou K., Yiannopoulos S., Kontogiorgi A., Poulli E., Krokida M., Mandala I. 2014. Effect of carob flour addition on the rheological properties of gluten-free breads. *Food and Bioprocess Technology*, 7 (3), 868-876.
3. Tsatsaragkou K., Gounaropoulos G., Mandala I. 2014. Development of gluten free bread containing carob flour and resistant starch. *LWT - Food Science and Technology*, 58 (1), 124-129.
4. Tsatsaragkou K., Papantoniou M., Mandala I. 2015. Rheological, physical, and sensory attributes of gluten-free rice cakes containing resistant starch. *Journal of Food Science*, 80 (2), 341-348.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Η νόσος της κοιλιοκάκης	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Μηχανισμός της νόσου	3
2.2.1 Πιθανές αιτίες	5
2.3 Κλινική μορφή της νόσου –Συμπτώματα	5
2.3.1 Τυπική μορφή (Classic)	6
2.3.2 Άτυπη μορφή (Atypical)	6
2.3.3 Ασυμπτωματική, σιωπηλή ή λανθάνουσα μορφή (Silent or latent)	6
2.4 Εμφάνιση της ασθένειας	7
2.4.1 Γενικός πληθυσμός χαμηλού κινδύνου.....	7
2.4.2 Πληθυσμός υψηλού κινδύνου.....	8
2.4.3 Η νόσος της κοιλιοκάκης στην Ελλάδα	9
2.4.4 Το μοντέλο του παγόβουνου (Iceberg model)	10
2.5 Διάγνωση	11
2.5.2 Εξέταση αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A ή G πεπτιδίων γλοιαδίνης που υφίστανται απαμίνωση (IgA–DGP και IgG-DGP).....	13
2.5.3 Εξέταση αντισωμάτων έναντι του ενδομυσίου ανοσοσφαιρίνης τύπου A (IgA- EMA)	13
2.5.4 Εξέταση αντισωμάτων ιστικής τρανσγλουταμινάσης ανοσοσφαιρίνης τύπου A (IgA –tTG).....	13
2.5.5 Βιοψία λεπτού εντέρου	14
2.6 Θεραπεία	15
3. Αρτοσκευάσματα Ελεύθερα Γλουτένης	17
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Η γλουτένη στην αρτοποιία	17
3.3 Άρτος και προϊόντα που έχουν υποστεί επώαση (fermented goods).....	18
3.3.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά άρτου και προϊόντων που έχουν υποστεί επώαση	18
3.3.2 Αρτοποιητική διαδικασία.....	18
3.3.3 Συστατικά του άρτου και λειτουργίες τους.....	20
3.3.3.1 Νερό	20
3.3.3.2 Μαγιά αρτοποιίας	21
3.3.3.3 Λιπαρά (shortening)	21
3.3.3.4 Αλάτι	22
3.3.3.5 Σάκχαρα	23
3.3.4 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ζύμης άρτου	23
3.4 Κέικ και γλυκά αρτοσκευάσματα	27
3.4.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά κέικ	27
3.4.2 Διαδικασία παραγωγής κέικ.....	28
3.4.3 Συστατικά του κέικ και λειτουργίες τους	29
3.4.3.1 Λιπαρά	29
3.4.3.2 Γλυκαντικές Ύλες – Σάκχαρα.....	30
3.4.3.3 Αυγά.....	31
3.4.3.4 Διογκωτικοί παράγοντες	31
3.4.4 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ζύμης κέικ.....	33
3.5 Μηχανικές ιδιότητες – υφή αρτοσκευασμάτων	33
3.6 Παλαίωση αρτοσκευασμάτων	36

3.7 Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης	39
3.8 Η αγορά των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης	40
3.9 Νομοθεσία αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης.....	41
3.10 Πρώτες ύλες για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης...	42
3.10.1 Άλευρα και άμυλα ελεύθερα γλουτένης	42
3.10.1.1 Άλευρο και άμυλο ρυζιού	43
3.10.1.2 Άλευρο και άμυλο αραβοσίτου	44
3.10.1.3 Άλευρο βρώμης.....	45
3.10.1.4 Άμυλο σίτου.....	45
3.10.1.5 Άλευρο σόργου και κεχριού	45
3.10.1.6 Άλευρα ψευδοδημητριακών	46
3.10.1.7 Άλευρα ψυχανθών	48
3.10.1.8 Άλλα άλευρα	49
3.10.2 Συστατικά για την αύξηση της διατροφικής αξίας προϊόντων χωρίς γλουτένη.....	51
3.10.2.1 Διαιτητικές ίνες	52
3.10.2.2 Λειτουργικά συστατικά.....	55
3.10.2.3 Μικροθρεπτικά συστατικά.....	60
3.10.2.4 Συστατικά φρούτων και λαχανικών	61
3.10.3 Συστατικά για την βελτίωση της ποιότητας αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης.....	63
3.10.4 Το χαρουπάλευρο ως συστατικό αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης	69
4. Πειραματικό μέρος.....	77
4.1 Σκοπός.....	77
4.2 Υλικά.....	81
4.2.1 Υλικά για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης.....	81
4.2.2 Υλικά για την παρασκευή κέικ ελεύθερου γλουτένης.....	82
4.2.3 Εμπορικά μίγματα αλεύρων για αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης....	82
4.3 Πειραματική διαδικασία	83
4.3.1 Πειραματική διαδικασία παρασκευής άρτου ελεύθερου γλουτένης.....	83
4.3.2 Πειραματική διαδικασία παρασκευής κέικ ελεύθερου γλουτένης.....	84
4.4 Μέθοδοι- Μετρήσεις-Αναλύσεις	85
4.4.1 Ικανότητα δέσμευσης νερού (WBC)	85
4.4.2 Θερμορρολογικές ιδιότητες μιγμάτων αλεύρων	85
4.4.3 Ικανότητα επώασης ζύμης άρτου χωρίς γλουτένη.....	86
4.4.4 Προσδιορισμός ρεολογικών χαρακτηριστικών.....	86
4.4.5 Μέτρηση υγρασίας.....	87
4.4.6 Μέτρηση ειδικού όγκου	87
4.4.7 Μέτρηση πορώδους	88
4.4.8 Προσδιορισμός επιφανειακών μορφολογικών χαρακτηριστικών ψίχας αρτοσκευασμάτων	88
4.4.9 Μέτρηση χαρακτηριστικών υφής	89
4.4.10 Μελέτη παλαίωσης	90
4.4.11 Εκτίμηση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών	90
4.4.12 Στατιστική επεξεργασία	91
5. Αποτελέσματα -Συζήτηση	93
5.1 Μελέτη των λειτουργικών ιδιοτήτων του χαρουπάλευρου	93
5.1.1 Παραλαβή χαρουπάλευρου	94
5.1.2 Λειτουργικές ιδιότητες κλασμάτων χαρουπάλευρου.....	94

5.1.3	Θερμορρολογικές ιδιότητες μιγμάτων ρυζάλευρου-χαρουπάλευρου	96
5.1.4	Συμπεράσματα	103
5.2	Ανάπτυξη βασικής συνταγής για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης	104
5.2.1	Δομικές ιδιότητες, ανάλυση υφής και μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας άρτων χωρίς γλουτένη	107
5.2.2	Συμπεράσματα	112
5.3	Ρεολογικές ιδιότητες ζυμαριών άρτων με προσθήκη χαρουπάλευρου	113
5.3.1	Ρεολογικές ιδιότητες ζυμαριών.....	115
5.3.2	Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στις παραμέτρους της δυναμικής ταλαντωτικής δοκιμής των ζυμαριών	116
5.3.3	Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στις παραμέτρους δοκιμής ερπυσμού – ανάκτησης (creep-recovery test) των ζυμαριών	119
5.3.4	Συμπεράσματα	128
5.4	Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με προσθήκη χαρουπάλευρου.....	129
5.4.1	Ικανότητα επώασης της ζύμης, υγρασία και χημική ανάλυση των τελικών αρτοσκευασμάτων.....	132
5.4.2	Δομικές ιδιότητες ψίχας.....	133
5.4.3	Ανάλυση υφής.....	139
5.4.4	Συμπεράσματα	141
5.5	Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με συνδυασμένη προσθήκη ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου	142
5.5.1	1 ^ο Στάδιο: Επίδραση της περιεκτικότητας του ανθεκτικού αμύλου σε πρότυπα αρτοσκευάσματα (MGFB)	143
5.5.2	2 ^ο Στάδιο: Βελτιστοποίηση άρτων ελεύθερων γλουτένης που περιέχουν χαρουπάλευρο και ανθεκτικό άμυλο RS.....	150
5.5.3	Συμπεράσματα	156
5.6	Ανάπτυξη κέικ ελεύθερου γλουτένης με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου.....	157
5.6.1	Ρεολογικές ιδιότητες ζύμης κέικ.....	159
5.6.2	Φυσικές ιδιότητες των κέικ.....	162
5.6.3	Μελέτη παλαίωσης	168
5.6.4	Οργανοληπτικός έλεγχος	170
5.6.5	Συμπεράσματα	172
5.7	Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας	173
5.7.1	Κινητική διόγκωσης στο στάδιο της επώασης.....	176
5.7.2	Φυσικές ιδιότητες των αρτοσκευασμάτων	182
5.7.3	Συμπεράσματα	188
5.8	Συγκριτική μελέτη άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη.....	189
5.8.1	1 ^ο στάδιο: Αξιολόγηση των φυσικών ιδιοτήτων άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας.	189
5.8.2	Μελέτη παλαίωσης άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας	192
5.8.3	2 ^ο στάδιο: Συγκριτική μελέτη αρτοσκευασμάτων με χαρουπάλευρο και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη. Αξιολόγηση των φυσικών ιδιοτήτων των αρτοσκευασμάτων.....	196
5.8.4	Μελέτη παλαίωσης άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη	199

5.8.5 Οργανοληπτική αξιολόγηση και διατροφική αξία άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη.	202
5.8.6 Συμπεράσματα	205
6. Συμπεράσματα – Προτάσεις	207
7. Βιβλιογραφία	212
8. Παράρτημα	237

Ευρετήριο Σχημάτων

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της παθοφυσιολογίας της νόσου	4
Σχήμα 2.2 Το ομοίωμα του παγόβουνου που αναπαριστά την διάδοση της κοιλιοκάκης.....	10
Σχήμα 2.3 Διαγνωστικός αλγόριθμος για την ύπαρξη ή μη της κοιλιοκάκης	12
Σχήμα 2.4 Μορφολογία λεπτού εντέρου υγιούς ατόμου (αριστερά) και ασθενούς με κοιλιοκάκη (δεξιά).	14

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστική εξέλιξη των φυσαλίδων αέρα ζύμης ψωμιού κατά τη διάρκεια του σταδίου της επώασης.....	19
Σχήμα 3.2 Κίνηση στρωμάτων ρευστού με την επιβολή δύναμης	24
Σχήμα 3.3 Κατηγορίες υλικών ανάλογα με τη συμπεριφορά τους	24
Σχήμα 3.4 Τυπικό διάγραμμα ερπυσμού- ανάκτησης για ιξωδοελαστικό υλικό.....	26
Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση των μοντέλων του Maxwell, Kelvin-Voigt και Burger	27
Σχήμα 3.6 Τυπικό διάγραμμα συμπίεσης ψίχας αρτοσκευασμάτων	35
Σχήμα 3.7 Τυπικό διάγραμμα για τεστ χαλάρωσης αρτοσκευασμάτων	36
Σχήμα 3.8 Τυπικό διάγραμμα μεταβολής του ιξώδους αμύλου με την θερμοκρασία και το χρόνο θέρμανσης.....	39
Σχήμα 3.9 Αναγνωριστικό σύμβολο των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης	42
Σχήμα 3.10 Λοβοί χαρουπιού με την χαρακτηριστική διάταξη των σπόρων (αριστερά), σπόροι χαρουπιού και χαρακτηριστικές διαστάσεις (δεξιά)	70
Σχήμα 3.11 Δομή του κόμμεος χαρουπιού.	71
Σχήμα 3.12 Διάγραμμα παραλαβής του κόμμεος χαρουπιού	72

Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1 Γεωμετρία μέτρησης θερμορεολογικών ιδιοτήτων	86
Σχήμα 4.2 Γραφική αναπαράσταση της γεωμετρίας παράλληλων πλακών.	87
Σχήμα 4.3 Ανάλυση χρωματικών παραμέτρων συστήματος CIE.....	89

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1 Άλευρα και άμυλα που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη προϊόντων ελεύθερων γλουτένη	43
Πίνακας 3.2 Συστατικά υψηλής διατροφικής αξίας για την ενίσχυση αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη	51
Πίνακας 3.3 Τύποι ανθεκτικού αμύλου	57
Πίνακας 3.4 Σύσταση (%) του αλεύρου του ενδοσπερμίου	73
Πίνακας 3.5 Σύθεση αμινοξέων του αλεύρου από φύτρο χαρουπιού	74
Πίνακας 3.6 Η σύσταση των λιπαρών οξέων του λίπους του φύτρου χαρουπιού	74

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1 Σειρές πειραμάτων	79
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των πρώτων υλών	82
Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά των εμπορικών μιγμάτων αλεύρων	83
Πίνακας 4.4 Βασική συνταγή για την ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης	84
Πίνακας 4.5 Βασική συνταγή για την ανάπτυξη κέικ ελεύθερου γλουτένης	84

1. Εισαγωγή

Η νόσος της κοιλιόκακης (Coeliac ή Celiac Disease) αποτελεί αυτοάνοση εντεροπάθεια σε άτομα με γενετική προδιάθεση, η οποία προκαλείται από δυσανεξία στη γλουτένη, πρωτεΐνη που περιέχεται στο σιτάρι, το κριθάρι και τη σίκαλη. Η κατανάλωση γλουτένης από τους πάσχοντες της κοιλιόκακης προκαλεί αλλοιώσεις στον βλεννογόνο του λεπτού εντέρου, προκαλώντας μεταξύ άλλων μερική ή ολική ατροφία (επιπέδωση) των λαχνών, εμποδίζοντας τη φυσιολογική πέψη και απορρόφηση του φαγητού. Υπολογίζεται πως ένα σημαντικό μέρος του πληθυσμού της γης (περίπου 1%) πάσχει από την νόσο της κοιλιόκακης. Η πρώτη περιγραφή της νόσου κοιλιόκακης σε παιδιά και ενήλικες αναφέρεται στο δεύτερο μισό του 2ου αι. μ.Χ. από τον Έλληνα Αρεταίο από την Καππαδοκία. Στον ορισμό που ο ίδιος δίνει: «Πρόκειται για άτομα που το στομάχι τους δεν μπορεί να συγκρατήσει την τροφή και την μεταφέρει αχώνευτη και σκληρή με αποτέλεσμα το σώμα τους να μην απορροφά τις θρεπτικές ουσίες». Η ονοματολογία της νόσου ξεκίνησε από την ελληνική λέξη «κοιλιακός» και χρησιμοποιήθηκε από τον Αρεταίο για να υποδηλώσει τα άτομα που υποφέρουν από πόνους στην εντερική περιοχή. Η πρώτη αναφορά στην θεραπεία της νόσου έγινε από τον Ολλανδό παιδίατρο Dicke (1950), ο οποίος ανέφερε τη σημαντική βελτίωση της υγείας παιδιών με κοιλιόκακη όταν άλευρα από σίτο και σίκαλη αφαιρέθηκαν από τη διαίτά τους και αντικαταστάθηκαν από καλαμποκάλευρο ή ρυζάλευρο. Από το 1950, η διαίτα ελεύθερης γλουτένης αποτελεί τη βάση της θεραπείας των ασθενών με κοιλιόκακη.

Η δια βίου προσήλωση σε διαίτα ελεύθερη γλουτένης αποκλείει τους πάσχοντες από την κατανάλωση τροφών όπως ψωμί, δημητριακά, μακαρόνια και άλλα προϊόντα που παρασκευάζονται από άλευρο σίτου, σίκαλης ή κριθαριού, τα οποία αποτελούν πηγές διαιτητικών ινών. Για το λόγο αυτό, η διαίτα χωρίς γλουτένη συχνά αναφέρεται ως υπερπρωτεϊνική και υπερλιπιδική με χαμηλά ποσοστά υδατανθράκων, σιδήρου, ασβεστίου και διαιτητικών ινών.

Τα αρτοσκευάσματα αποτελούν βασικά είδη διατροφής και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορείς λειτουργικών συστατικών, όπως οι διαιτητικές ίνες. Επιπλέον ο εμπλουτισμός τους με διαιτητικές ίνες, μπορεί να αποτελέσει το μέσο ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ημερήσια δόση διαιτητικών ινών που προβλέπεται για όλες τις ομάδες του πληθυσμού, η οποία έχει οριστεί στα 25 g σε μία διαίτα 2000 kcal σύμφωνα με τον FDA (2009).

Η ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης αποτελεί πρόκληση για της αρτοβιομηχανία και τους τεχνολόγους τροφίμων. Στην παρασκευή διογκούμενων αρτοσκευασμάτων (άρτος και κέικ) με βάση το σίτο, ο ρόλος της γλουτένης είναι να προσδίδει ελαστικότητα στο ζυμάρι, να συγκρατεί τα αέρια που παράγονται κατά την επώαση στην περίπτωση του άρτου και κατά τον κλιβανισμό στην περίπτωση του κέικ, συμβάλλοντας στην αύξηση του όγκου και τη διατήρηση του σχήματος του ζυμαριού, ενώ το τελικό προϊόν είναι μαλακό, αφράτο και εύγευστο. Για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες όπως άμυλα και άλευρα ρυζιού ή αραβόσιτου, οι πρωτεΐνες των οποίων δεν έχουν την ικανότητα σχηματισμού ιξωδοελαστικού δικτύου στο ζυμάρι. Ως εκ τούτου, τα τελικά προϊόντα

χαρακτηρίζονται από μειωμένο όγκο, αυξημένη σκληρότητα, εύθρυπτη ψίχα και μικρή διάρκεια ζωής. Η βελτίωση της ποιότητας των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη βασίζεται στην χρήση συστατικών-μιμητών της γλουτένης. Βασικά συστατικά που μπορούν να δράσουν ως μιμητές της γλουτένης είναι πρωτεΐνες φυτικής ή ζωικής προέλευσης, υδροκολλοειδή και διαιτητικές ίνες, που μπορούν να προσδώσουν ιξωδοελαστικές ιδιότητες στο ζυμαρί, βελτιώνοντας την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη διαιτητικών ινών στα αρτοσκευάσματα σίτου έχει συνδεθεί με την παραγωγή προϊόντων με υποδεέστερα ποιοτικά χαρακτηριστικά και μεταβολή της οργανοληπτικής τους αποδοχής. Ωστόσο στην τεχνολογία παρασκευής προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, η ενσωμάτωση διαιτητικών ινών στα αρτοσκευάσματα ενισχύει τις δομικές ιδιότητες του ζυμαριού εμποδίζοντας την κατάρρευση και βελτιώνοντας την υφή και την διάρκεια ζωής, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την διατροφική αξία των αρτοσκευασμάτων. Ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα ενσωμάτωσης διαιτητικών ινών χαμηλού κόστους (παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων), ώστε να μην αυξάνεται σημαντικά το κόστος παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα να διατηρούνται σε υψηλό επίπεδο τα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα διατριβή εστιάστηκε στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης υψηλής διατροφικής αξίας και ποιοτικών χαρακτηριστικών. Για τον διατροφικό εμπλουτισμό των αρτοσκευασμάτων επιλέχθηκε η προσθήκη αλεύρου από σπόρους χαρουπιού, ως χαμηλού κόστους πρώτη ύλη πλούσια σε διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνη. Οι σπόροι του χαρουπάλευρου χρησιμοποιούνται κυρίως για την εξαγωγή του κόμμεος χαρουπιού, από το ενδοσπέρμιο, ενώ ο υπόλοιπος καρπός απορρίπτεται ως παραπροϊόν. Ωστόσο, το αλεύρι από σπόρους χαρουπιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενναλακτικό άλευρο για τον εμπλουτισμό αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης. Επιπλέον, διερευνήθηκε η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου, το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με τις διαλυτές φυτικές ίνες και ανήκει στην κατηγορία των πρεβιοτικών. Τα αρτοσκευάσματα που αναπτύχθηκαν ήταν άρτος και κέικ. Ο άρτος αποτελεί βασικό τρόφιμο καθημερινής κατανάλωσης, ενώ το κέικ ανήκει στην κατηγορία των γλυκών αρτοσκευασμάτων και προτιμάται ευρέως από τους καταναλωτές ως σνακ. Ειδικότερα, το χαρουπάλευρο και το ανθεκτικό άμυλο προστέθηκαν σε άρτο, ενώ στο κέικ χρησιμοποιήθηκε μόνο ανθεκτικό άμυλο, ως πηγή εμπλουτισμού. Διερευνήθηκε η επίδραση του ποσοστού ενσωμάτωσης χαρουπάλευρου και ανθεκτικού αμύλου στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ζυμαριού/ζύμης των αρτοσκευασμάτων όπως και στα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, καθώς και στη διατηρησιμότητα αυτών. Τέλος, συγκρίθηκαν τα βέλτιστα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης της μελέτης, με εμπορικά διαθέσιμα, ώστε να διαπιστωθεί αν μπορούν να καλύψουν τις διατροφικές και οργανοληπτικές απαιτήσεις των καταναλωτών.

2. Η νόσος της κοιλιόκākης

2.1 Εισαγωγή

Η νόσος της κοιλιόκākης χαρακτηρίζεται ως αυτοάνοση εντεροπάθεια που προκαλείται σε άτομα με γενετική προδιάθεση από μόνιμη δυσανεξία στη γλουτένη. Ο όρος γλουτένη χρησιμοποιείται από την επιστημονική κοινότητα για να περιγράψει το σύμπλεγμα των πρωτεϊνών (προλαμίνες και γλουτελίνες) ορισμένων δημητριακών όπως ο σίτος, το κριθάρι και η σίκαλη (Thompson, 2000). Από τα δύο κλάσματα της γλουτένης, οι προλαμίνες θεωρούνται τοξικές στα άτομα που πάσχουν από κοιλιόκākη και συγκεκριμένα η γλοιαδίνη του σίτου, η χορδεΐνη του κριθαριού και η σικαλίνη της σίκαλης. Η κοιλιόκākη παρουσιάζει συμπτώματα δυσπεψίας και δυσαπορρόφησης θρεπτικών ουσιών, βιταμινών και μετάλλων στο γαστρεντερικό σωλήνα. Επιδημιολογικές μελέτες στην Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες έχουν δείξει ότι η κοιλιόκākη είναι μια διαδεδομένη νόσος με ποσοστό εμφάνισης περίπου 1% στο γενικό πληθυσμό. Επί του παρόντος, η μόνη γνωστή θεραπεία της νόσου είναι η δια βίου δίαιτα ελεύθερη γλουτένης (Fasano & Catassi, 2001).

2.2 Μηχανισμός της νόσου

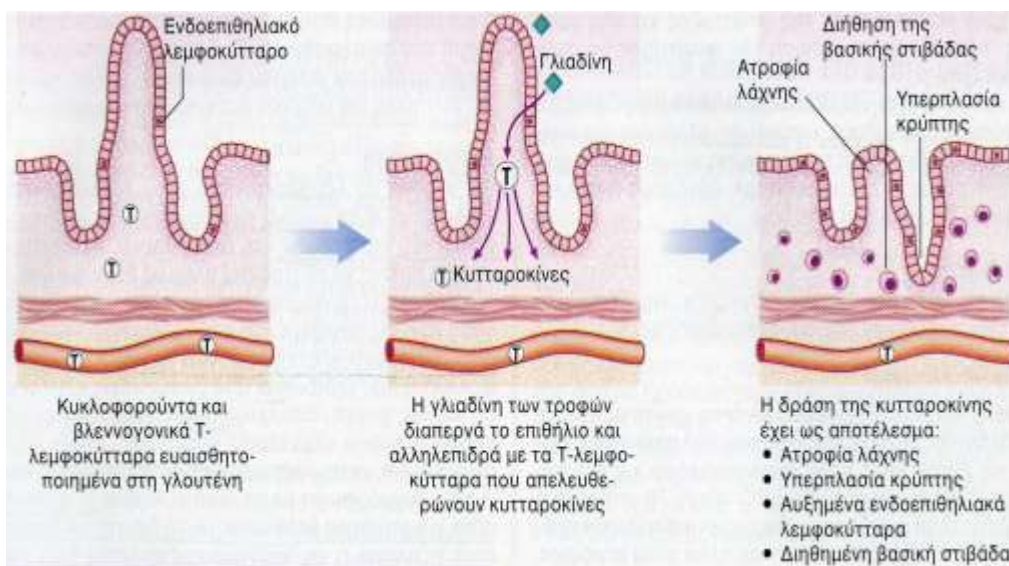
Τα κυριότερα γονίδια προδιάθεσης της νόσου βρίσκονται στο μείζον σύμπλεγμα ιστοσυμβατότητας (HLA system) στο χρωμόσωμα 6, και συγκεκριμένα στα γονίδια HLA-DQ2 και DQ8 τα οποία υπάρχουν τουλάχιστον στο 95% των ασθενών, αλλά και στο 20–30% υγιών ατόμων. Η παρουσία των HLA-DQ2 και DQ8 γονιδίων είναι αναγκαία αλλά όχι και απαραίτητη αιτία εμφάνισης της νόσου.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, το εντερικό επιθήλιο, με τις στενές ενδοκυτταρικές συνδέσεις του, χρησιμεύει ως το κύριο εμπόδιο στην διέλευση μακρομορίων, όπως είναι και οι πρωτεΐνες της γλουτένης. Η γλουτένη αποτελείται από δύο κύρια κλάσματα πρωτεϊνών ανάλογα με την διαλυτότητα τους σε αλκοολικά διαλύματα, τις διαλυτές γλοιαδίνες και τις μη διαλυτές γλουτελίνες. Οι γλοιαδίνες ανήκουν στην κατηγορία των προλαμινών και είναι πλούσιες σε προλίνη και γλουταμίνη. Οι γλοιαδίνες πέπτονται ατελώς στο λεπτό έντερο με αποτέλεσμα συσσώρευσης σχετικά μεγάλων πεπτιδικών θραυσμάτων, ως και 50 αμινοξέων σε μήκος (Shan et al., 2002, 2005). Στους ασθενείς με κοιλιόκākη παρουσιάζεται μεταβολή της λειτουργίας φραγμού του εντερικού επιθηλίου, λόγω της απορρύθμισης της ζωνουλίνης, μιας εντερικής πρωτεΐνης που διατηρεί τις στενές ενδοκυτταρικές συνδέσεις του εντερικού επιθηλίου (Drago et al., 2006). Ως αποτέλεσμα μεγάλα πεπτίδια γλοιαδίνης περνούν τον εντερικό επιθηλιακό φραγμό και φτάνουν στα αντιγονοπαρουσιαστικά κύτταρα, που βρίσκονται στις εντερικές λάχνες. Ορισμένα πεπτίδια της γλουτένης προκαλούν έμφυτη ανοσοαπόκριση, ενώ άλλα οδηγούν σε προσαρμοστική ανοσία. Η προσαρμοστική ανοσολογική απόκριση περιλαμβάνει την αναγνώριση συγκεκριμένων ανοσολογικών πεπτιδίων της γλουτένης από τα CD4⁺ T κύτταρα τα οποία βρίσκονται στις λάχνες του λεπτού εντέρου και την παρουσίασή τους στα αντιγονοπαρουσιαστικά κύτταρα (Sollid et al., 2000).

Η υψηλή περιεκτικότητα των πρωτεϊνών της γλουτένης σε γλουταμίνη την καθιστά ένα καλό υπόστρωμα για το ένζυμο της ιστικής τρανσγλουταμινάσης (tTG). Αυτό το ενδοκυτταρικό ένζυμο συμμετέχει σε διάφορες διεργασίες στην κοιλιοκάκη. Πιο συγκεκριμένα η ιστική τρανσγλουταμινάση (tTG), βρισκόμενη σε όξινο pH όπως όταν υπάρχει φλεγμονή, τροποποιεί ενζυμικά την γλοιαδίνη προκαλώντας απαμίνωση στα υπολείμματα γλουταμίνης και μετατρέποντάς τα σε αρνητικά φορτισμένο γλουταμινικό οξύ (Dieterich et al., 1997).

Τα πεπτίδια που υφίστανται απαμίνωση προσκολλώνται με μεγαλύτερη συγγένεια από τα φυσικά πεπτίδια της γλουτένης στα HLA-DQ2 και HLA-DQ8 γονίδια. Τα HLA-DQ γονίδια ενεργοποιούν φλεγμονώδη T -κύτταρα, τα οποία με τη σειρά τους διεγείρουν την παραγωγή αυτοαντισωμάτων, με τη μορφή αντισωμάτων αντι-tTG και αντισωμάτων έναντι του ενδομυσίου. Η παρουσία αυτών των αντισωμάτων αποτελεί ένδειξη της κοιλιοκάκης. Συνέπεια των ανωτέρω είναι τα CD4⁺ T λεμφοκύτταρα να παράγουν κυτταροκίνες, οι οποίες προάγουν τη φλεγμονή καθώς διηθούν τις εντερικές λάχνες προκαλώντας έτσι καταστροφή της επιφάνειας του επιθηλίου και επιπέδωση του βλεννογόνου (**Σχήμα 2.1**) (Sollid et al., 2000).

Μολονότι η σημασία της προσαρμοστικής ανοσοαπόκρισης στη γλουτένη έχει καθιερωθεί ως αιτία της κοιλιοκάκης, πρόσφατα αναφέρεται και η έμφυτη ανοσοαπόκριση στην γλουτένη ως αιτία παθογένειας της ασθένειας (Jabri et al 2006). Η έμφυτη ανοσοαπόκριση ξεκινά με την ενεργοποίηση από τα πεπτίδια της α-γλοιαδίνης των CD8⁺T κυττάρων, των εντεροκυττάρων, των μακροφάγων και των δενδριτικών κυττάρων. Τα κύτταρα αυτά προκαλούν την παραγωγή και τον πολλαπλασιασμό κυτταροκινών, όπως η ιντερλευκίνη-15, η οποία ενεργοποιεί το κυτταρολυτικό μονοπάτι NKG2D άμυνας του οργανισμού, το οποίο καταστρέφει τα επιθηλιακά εντερικά κύτταρα.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της παθοφυσιολογίας της νόσου (με τροποποίηση Villanacci et al., 2011; Μιμίδης, 2014).

2.2.1 Πιθανές αιτίες

Η εμφάνιση της κοιλιοκάκης εξαρτάται τόσο από γενετικούς παράγοντες, όσο και από περιβαλλοντικά ερεθίσματα (Fasano & Catassi, 2001). Όσον αφορά τους γενετικούς παράγοντες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω το 95% των ασθενών εμφανίζουν τα γονίδια HLA-DQ2 και DQ8. Επιπλέον η πιθανότητα εμφάνισης της γονιδιακής αλληλουχίας της ασθένειας σε μονοζυγωτικά δίδυμα είναι 86% ενώ σε διζυγωτικά μόνο 20%, υποδεικνύοντας την ισχυρή επίδραση των γενετικών παραγόντων (Greco et al., 2002).

Όσον αφορά την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων στην εμφάνιση της κοιλιοκάκης πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η βρεφική διατροφή που ακολουθείται μπορεί να παίζει κρίσιμο ρόλο. Ο θηλασμός μπορεί να καθυστερήσει ή να μειώσει τον κίνδυνο ανάπτυξης κοιλιοκάκης λόγω του μητρικού γάλακτος, το οποίο ενδυναμώνει την μικροβιακή χλωρίδα του εντέρου των νεογέννητων (Akobeng et al., 2006). Επιπλέον ο χρόνος εισαγωγής της γλουτένης στην διατροφή των νηπίων αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Η εισαγωγή τροφίμων που περιέχουν γλουτένη εντός των πρώτων τριών μηνών ή μετά τον έβδομο μήνα ηλικίας οδήγησε σε αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης της νόσου σε σύγκριση με την έκθεση σε γλουτένη βρεφών μεταξύ τεσσάρων και έξι μηνών (Norris et al., 2005). Επιπλέον η σταδιακή εισαγωγή γλουτένης στο διαιτολόγιο των βρεφών, ενώ εξακολουθούν να θηλάζουν είχε προστατευτική επίδραση, μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης κοιλιοκάκης στην πρώιμη παιδική ηλικία και πιθανώς, και στην μεταγενέστερη παιδική ηλικία (Ivarsson et al., 2013). Τέλος, παιδιά που θηλάζαν αποκλειστικά τους πρώτους 6 μήνες της ζωής τους σε σχέση με παιδιά που δεν θηλάζαν αποκλειστικά, παρουσίασαν σε μεγαλύτερη ηλικία και με διαφορετικό τρόπο συμπτώματα της νόσου, καθώς δεν είχαν μεγάλη καθυστέρηση στην ανάπτυξη ενώ εμφάνισαν λιγότερη διάρροια, εμετούς και κοιλιακό άλγος.

2.3 Κλινική μορφή της νόσου –Συμπτώματα

Τα συμπτώματα της κοιλιοκάκης ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με την ηλικία του ασθενούς, τη διάρκεια και την έκταση της νόσου, καθώς και την παρουσία εξωεντερικών παθήσεων. Η ασθένεια χαρακτηρίζεται από φλεγμονή και ισοπέδωση του βλεννογόνου του λεπτού εντέρου και συχνά καταλήγει σε δυσαπορρόφηση θρεπτικών συστατικών όπως βιταμινών και μετάλλων και διάρροια. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις το λεπτό έντερο καταφέρνει να διατηρεί την λειτουργική του επάρκεια και αυτό εξηγεί το γεγονός ότι πολλά άτομα εμφανίζουν λίγα ή καθόλου χαρακτηριστικά συμπτώματα της νόσου και συχνά καθόλου συμπτώματα δυσαπορρόφησης.

Ανάλογα με τα συμπτώματα τη στιγμή της εμφάνισης της νόσου, μαζί με τις ιστολογικές και ανοσολογικές ανωμαλίες κατά την διάγνωση, η κοιλιοκάκη μπορεί να εμφανιστεί με τις ακόλουθες κλινικές μορφές: α) τυπική μορφή, β) άτυπη μορφή και γ) ασυμπτωματική ή λανθάνουσα μορφή.

2.3.1 Τυπική μορφή (Classic)

Η έναρξη των συμπτωμάτων στην τυπική μορφή της νόσου ξεκινά συνήθως μεταξύ έκτου και δέκατου όγδοου ηλικιακού μήνα και χαρακτηρίζεται από χρόνια διάρροια, ανορεξία, υστέρηση σωματικής ανάπτυξης, κοιλιακούς πόνους και απώλεια μυϊκής μάζας. Παρόλο που η σωματική ανάπτυξη είναι φυσιολογική τους πρώτους μήνες ζωής, τα συμπτώματα ξεκινούν μερικές βδομάδες ή μήνες μετά την εισαγωγή προλαμινών στην διατροφή με αποτέλεσμα σταδιακή μείωση βάρους και καθυστέρηση ανάπτυξης. Οι παθολογικές αλλαγές είναι πιο εμφανείς στο δωδεκαδάκτυλο και στην εγγύς νήστιδα και η έκταση της βλάβης του βλεννογόνου μεταβάλλεται από μικρή επιπέδωση των λαχνών μέχρι και ολική ατροφία.

Τα σημάδια της δυσαπορρόφησης θρεπτικών συστατικών λόγω της ατροφίας των λαχνών του εντερικού βλεννογόνου περιλαμβάνουν σιδηροπενική αναιμία, υπολευκωματιναιμία, υπασβεστιαίμια, και ανεπάρκεια βιταμινών (Fasano & Catassi, 2001).

2.3.2 Άτυπη μορφή (Atypical)

Οι κλινικές εκδηλώσεις της άτυπης μορφής της νόσου χαρακτηρίζονται από λίγα ή καθόλου γαστρεντερικά συμπτώματα, αλλά από εξωεντερικά συμπτώματα όπως σιδηροπενική αναιμία, μειωμένη οστική πυκνότητα, χρόνια κόπωση, ευερέθιστο έντερο, δυσπεψία, στειρότητα, αποβολές κατά την εγκυμοσύνη, διαταραχή της πήκτικότητας του αίματος, καθυστερημένη ανάπτυξη και εφηβεία, αρθραλγία, αφθώδης στοματίτιδα, έλλειψη φυλλικού οξέος και ψευδαργύρου και νευρολογικές διαταραχές (περιφερική νευροπάθεια και αταξία) (Niewinski, 2008)

2.3.3 Ασυμπτωματική, σιωπηλή ή λανθάνουσα μορφή (Silent or latent)

Η κοιλιοκάκη χαρακτηρίζεται ως λανθάνουσα όταν ένα άτομο φαινομενικά υγιές παρουσιάσει περιστασιακή εντερική ευαισθησία στη γλουτένη. Οι ασθενείς που έχουν την λανθάνουσα μορφή της κοιλιοκάκης δεν το γνωρίζουν καθώς δεν παρουσιάζουν κανένα φυσικό σύμπτωμα αλλά βρίσκονται θετικοί σε ορολογική εξέταση για την νόσο ή παρουσιάζουν ατροφία των εντερικών λαχνών κατά την βιοψία εντέρου. Η λανθάνουσα μορφή της κοιλιοκάκης αναγνωρίζεται κατά τον έλεγχο ατόμων που ανήκουν στις ομάδες υψηλού κινδύνου (άτομα με ιστορικό εμφάνισης κοιλιοκάκης ή άτομα που πάσχουν από αυτοάνοσα νοσήματα) ή με αναγνώριση των ενδείξεων της νόσου από βιοψίες που ελήφθησαν για άλλες παθήσεις όπως π.χ. δυσπεψία ή γαστροοισοφαγική παλινδρόμηση (Green et al., 2000). Η ασυμπτωματική κοιλιοκάκη παρατηρείται επίσης σε παιδιά και ενήλικες με αυτοάνοση ηπατίτιδα και αυτοάνοσες ασθένειες του χοληδόχου πόρου. Η νόσος μπορεί να σχετίζεται με ασυμπτωματικές αυξήσεις στις τιμές των τρανσαμινασών. Επιπλέον άτομα με αυτοάνοση ηπατική νόσο θα πρέπει να εξετάζονται για ενδεχόμενη ύπαρξη κοιλιοκάκης (Freeman et al., 2011).

2.4 Εμφάνιση της ασθένειας

Οι περισσότερες έρευνες σχετικά με την διάδοση της κοιλιοκάκης αφορούν τον Ευρωπαϊκό πληθυσμό, καθώς στο παρελθόν, η νόσος της κοιλιοκάκης θεωρούνταν σπάνια διαταραχή, η οποία αφορούσε κυρίως παιδιά Ευρωπαϊκών χωρών. Πρόσφατες έρευνες στις Ηνωμένες Πολιτείες εκτιμούν ποσοστά περίπου στο 1% του πληθυσμού να πάσχουν από κοιλιοκάκη, με παρόμοια ποσοστά να αναφέρονται και σε Ευρωπαϊκές χώρες. Καθώς η αναγνώριση των συμπτωμάτων της ασθένειας έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω των βελτιωμένων ιατρικών τεχνικών διάγνωσης, έχουν αναφερθεί δεδομένα σχετικά με την διάδοση της νόσου και για χώρες της Ασίας, της Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής.

2.4.1 Γενικός πληθυσμός χαμηλού κινδύνου

Η εμφάνιση της κοιλιοκάκης στην Ευρώπη, σύμφωνα με πρόσφατα δημοσιευμένη πολυκεντρική έρευνα σε τέσσερις διαφορετικές χώρες κυμαίνεται κατά μέσο όρο στο 1% στον γενικό πληθυσμό με μεγάλες διαφοροποιήσεις ωστόσο μεταξύ των χωρών. Συγκεκριμένα για την Φιλανδία αναφέρονται ποσοστά 2.0%, για την Ιταλία 1.2%, για την Βόρεια Ιρλανδία 0.9% ενώ για την Γερμανία μόνο 0.3% (Mustalahti et al., 2010). Επιπλέον, η εμφάνιση της κοιλιοκάκης στις Ευρωπαϊκές χώρες είναι συνεχώς αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια. Στην Σκωτία αναφέρεται αύξηση της εμφάνισης της νόσου (με την τυπική μορφή) κατά 6.4 φορές μεταξύ των ετών 1990 έως 2009, κυρίως στην παιδική κοιλιοκάκη (White et al., 2013). Σε άλλη πρόσφατη έρευνα που έλαβε χώρα στο Ηνωμένο Βασίλειο, αναφέρονται ποσοστά εμφάνισης κοιλιοκάκης σε ποσοστό μόνο 0.2% την χρονιά 1975, με πενταπλάσια αύξηση εμφάνισης της νόσου τα επόμενα 25 χρόνια (Catassi et al., 2010). Οι πιθανές αιτίες αύξησης της εμφάνισης της νόσου δεν είναι σαφής, ωστόσο σχετίζονται με περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως αλλαγές στα διατροφικά πρότυπα (ποσότητα καταναλισκώμενης γλουτένης), στα πρότυπα θηλασμού των βρεφών, καθώς έχει αναφερθεί η προστατευτική επίδραση του θηλασμού των βρεφών στον κίνδυνο εμφάνισης της νόσου (Ivarsson et al., 2013) και στο φάσμα των εντερικών λοιμώξεων (Lionetti et al., 2015).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες (Η.Π.Α.) μια μεγάλη έρευνα που περιλάμβανε 4126 άτομα έδειξε το ποσοστό εμφάνισης κοιλιοκάκης να ανέρχεται σε 0.95% σε ενήλικους, 0.31% σε παιδιά και 0.75% συνολικά (1:133) (Fasano et al., 2003).

Επιπλέον, σε μια Ιταλική έρευνα σε 3188 παιδιά σχολικής ηλικίας βρέθηκε το ποσοστό εμφάνισης της κοιλιοκάκης να είναι 1:106 (Tommasini et al., 2004), παρόμοιο με αυτό που αναφέρεται για τον γενικό αμερικάνικο πληθυσμό (Fasano et al., 2003), αλλά σημαντικά υψηλότερο από το ποσοστό που αφορά τα παιδιά (Fasano et al., 2003).

Η εμφάνιση της κοιλιοκάκης δεν είναι συχνή μόνο στις αναπτυγμένες χώρες, αλλά εμφανίζεται όλο και περισσότερο στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Μέχρι την δεκαετία του 1990, τα ποσοστά εμφάνισης κοιλιοκάκης στην Βόρεια Αφρική και στην Μέση Ανατολή θεωρούνταν χαμηλά. Ωστόσο η εισαγωγή νέων μεθόδων διάγνωσης της νόσου όπως η ανίχνευση αντισωμάτων έναντι του ενδομυσίου τύπου ανοσοσφαιρίνης και αντιγλοιαδινικών αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης, έδειξε ποσοστά διάδοσης της

κοιλιόκακης παρόμοια με αυτά που αναφέρονται στις δυτικές χώρες. Το ποσοστό εμφάνισης κοιλιόκακης στον γενικό πληθυσμό της Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής κυμαίνεται από 0.14% μέχρι 1.3% υπολογιζόμενο με βάση ανοσολογικούς δείκτες και από 0.033% μέχρι 1.17% με βάση βιοψίες. Στις περισσότερες έρευνες οι υγιείς δότες ήταν πάνω από 70% άντρες (Tatar et al., 2004; Bdioui et al., 2006; Shahbazkhan et al., 2003; Shamir et al., 2002; Mankaï et al., 2006)

Έρευνα για την κοιλιόκακη σε υγιή άτομα στο Ιράν με 50% των συμμετεχόντων γυναίκες, έδειξε όμοια ποσοστά εμφάνισης της νόσου (1%) μεταξύ ανδρών και γυναικών. Στον αντίποδα, έρευνα των Green et al. (2007) έδειξε πως η νόσος εμφανίζεται 2-3 φορές συχνότερα στις γυναίκες. Ενώ και σε έρευνα των Mankaï et al. (2006) τα ποσοστά κοιλιόκακης κυμαίνονταν σε 0.4% για τις γυναίκες σε σχέση με τους άνδρες που ήταν χαμηλότερα στο 0.22%.

Η νόσος της κοιλιόκακης συμβάλει ουσιαστικά στην παιδική νοσηρότητα και θνησιμότητα σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες. Τα υψηλότερα ποσοστά εμφάνισης της νόσου στον κόσμο έχουν καταγραφεί στην φυλή Σαχράουι (Saharawi), αφρικανικό πληθυσμό με καταγωγή από Άραβες και Βερβερίνους. Το ποσοστό κοιλιόκακης της φυλής αυτής βρέθηκε στο 5.6%, όντας πέντε με δέκα φορές υψηλότερο σε σχέση με το ποσοστό που αναφέρετε στις Ευρωπαϊκές χώρες (Catassi et al., 1999). Οι λόγοι για το υψηλό ποσοστό κοιλιόκακης δεν είναι ξεκάθαροι, ωστόσο αποδίδεται σε γενετικούς παράγοντες, δεδομένου του υψηλού ποσοστού αιμομιξιών του πληθυσμού. Η νόσος της κοιλιόκακης σε παιδιά της φυλής Σαχράουι αποτελεί σοβαρή ασθένεια, με συμπτώματα χρόνιας διάρροιας, νανισμού, αναιμίας και αυξημένης θνησιμότητας (Rätsch & Catassi, 2001). Η θεραπεία της νόσου σε πολλές φτωχές χώρες, παρεμποδίζεται από την έλλειψη διαγνωστικών κέντρων και την ανεπάρκεια των διαθέσιμων εμπορικά τροφίμων χωρίς γλουτένη.

2.4.2 Πληθυσμός υψηλού κινδύνου

Έρευνες έχουν δείξει πως η εμφάνιση της κοιλιόκακης είναι αυξανόμενη σε ειδικές υποκατηγορίες του πληθυσμού. Συγκεκριμένα στον πληθυσμό υψηλού κινδύνου ανήκουν άτομα με ιστορικό εμφάνισης κοιλιόκακης (συγγενείς πρώτου και δευτέρου βαθμού), άτομα που πάσχουν από σακχαρώδη διαβήτη ή θυρεοειδίτιδα, άτομα με συμπτώματα δυσαπορρόφησης ή αναιμίας αλλά και άτομα που πάσχουν από άλλα αυτοάνοσα νοσήματα.

Στις Η.Π.Α. η εμφάνιση κοιλιόκακης ανέρχεται σε ποσοστά 4.5% και 2.5% για συγγενείς πρώτου και δευτέρου βαθμού αντίστοιχα ατόμων που πάσχουν από την νόσο (Fasano et al., 2003). Το Ινστιτούτο Υγείας των Η.Π.Α. αναφέρει ποσοστά επιπολασμού της νόσου εκτιμώμενα με βιοψία μεταξύ 4%-12% σε συγγενείς πρώτου βαθμού (Barada et al., 2010). Δύο μελέτες από την Αλγερία και την Τουρκία έδειξαν ποσοστά εμφάνισης της νόσου σε συγγενείς πρώτου βαθμού 3.4% και 1.7%, αντίστοιχα (Boudraa et al., 1996; Elsurer et al., 2005). Στην Φιλανδία, έρευνα σε 380 ασθενείς με κοιλιόκακη και 281 ασθενείς με ερπητοειδή δερματίτιδα, ο μέσος όρος εμφάνισης της νόσου συγγενείς πρώτου βαθμού βρέθηκε στο 5.5% (Hervonen et al., 2002).

Ποσοστά εμφάνισης της νόσου σε παιδιά που πάσχουν από διαβήτη τύπου Ι κυμαίνονται στο 4.5% (0.97–16.4%) σύμφωνα με την έρευνα του Holmes (2002).

Συνηθέστερα ο διαβήτης διαγιγνώσκεται πρώτος, ενώ η κοιλιόκākη είναι ανιχνεύσιμη μόνο κατόπιν ορολογικού ελέγχου. Έρευνες έχουν αποδείξει την υψηλή συχνότητα εμφάνισης κοιλιόκākης σε ασθενείς που πάσχουν από νόσους του θυρεοειδούς όπως η νόσος του Hashimoto, η νόσος του Graves και υποθυρεοειδισμό, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η μη κατανάλωση γλουτένης σε ασθενείς με υποθυρεοειδισμό μπορεί να ομαλοποιήσει τα κλινικά συμπτώματα των ασθενών. (Sategna-Guidetti et al., 2001).

Επιπλέον, υψηλά ποσοστά εμφάνισης κοιλιόκākης βρέθηκαν σε άτομα με γενετικές ασθένειες όπως τα σύνδρομα Down, Turner και William. Σύμφωνα με μια πολυκεντρική μελέτη στην Ιταλία με 1202 συμμετέχοντες που έπασχαν από σύνδρομο Down, ποσοστό 4.6% των συμμετεχόντων εμφάνισαν και την ασθένεια της κοιλιόκākης (Bonamico et al., 2001).

2.4.3 Η νόσος της κοιλιόκākης στην Ελλάδα

Οι δημοσιευμένες μελέτες σχετικά με την εμφάνιση της κοιλιόκākης στην Ελλάδα είναι περιορισμένες και σχετικά πρόσφατες. Σύμφωνα με μελέτη της Παιδολογικής κλινικής του νοσοκομείου Αγία Σοφία καταδεικνύονται αυξανόμενα ποσοστά κοιλιόκākης στην περιοχή της Αθήνας κατά το χρονικό διάστημα από το 1978 έως το 2007 σε παιδιά (Roma et al., 2009). Σύμφωνα με την ανωτέρω μελέτη παρατηρήθηκε διπλάσια αύξηση του ετήσιου ρυθμού νέων ασθενών με κοιλιόκākη μετά το 1998, καθώς τα πρώτα 20 έτη της μελέτης δεν εμπλέκονταν άλλες κλινικές στην διάγνωση ασθενών με κοιλιόκākη εκτός από το νοσοκομείο Αγία Σοφία της Αθήνας με αποτέλεσμα πολλά περιστατικά της ασθένειας να μην έχουν καταγραφεί. Επιπλέον αναφέρεται πως το ποσοστό κοριτσιών που νοσούν από την ασθένεια είναι το διπλάσιο σε σχέση με των αγοριών. Μεγάλο πρόβλημα στην καταγραφή ασθενών με κοιλιόκākη αποτελεί η απουσία των τυπικών συμπτωμάτων της νόσου, γεγονός που οδηγεί στην διάγνωσή της σε ηλικία μεγαλύτερη των πέντε ετών, παρόλο που τα πρώτα συμπτώματα κοιλιόκākης εμφανίζονται στα παιδιά σε ηλικίες μεταξύ 6 και 24 μηνών.

Δεδομένα σχετικά με την εμφάνιση της κοιλιόκākης σε ενήλικους στο γενικό πληθυσμό της Ελλάδας δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα με εξαίρεση μελέτη της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου της Θεσσαλίας σε μεγάλη ομάδα φαινομενικά υγιούς, ενήλικου πληθυσμού στην περιοχή της Θεσσαλίας. Η μελέτη εκπονήθηκε σε 2230 υγιείς ενήλικους (1004 άνδρες και 1226 γυναίκες) την χρονική περίοδο μεταξύ 2002-2006 (Roka et al., 2007). Αναφέρεται χαμηλότερο ποσοστό εμφάνισης κοιλιόκākης του ελληνικού ενήλικου γενικού πληθυσμού σε σχέση με τα ποσοστά που αναφέρονται για άλλες Ευρωπαϊκές βόρειες χώρες και συγκεκριμένα ποσοστό 0.18% (βασισμένο σε διάγνωση της νόσου με βιοψία). Τέλος, οι ερευνητές αναφέρουν πως η εμφάνιση της κοιλιόκākης είναι συχνότερη σε νεαρά άτομα, αλλά αφορά εξίσου και τα δύο φύλα.

2.4.4 Το μοντέλο του παγόβουνου (Iceberg model)

Το μοντέλο του παγόβουνου χρησιμοποιείται συνήθως για να εκφράσει την συχνότητα της κοιλιοκάκης (Σχήμα 2.2). Η πραγματική συχνότητα της νόσου εκφράζεται ως το συνολικό μέγεθος του παγόβουνου και επηρεάζεται από την συχνότητα των προδιαθεσικών γονότυπων στον πληθυσμό αλλά και από τα καταναλωτικά πρότυπα γλουτένης (Fasano & Catassi, 2001). Οι περιπτώσεις που έχουν διαγνωσθεί σωστά και επιβεβαιωθεί κλινικά μετά από βιοψία του λεπτού εντέρου συνθέτουν το ορατό τμήμα (Α) του παγόβουνου (Fasano & Catassi, 2001). Το τμήμα (Β) του παγόβουνου κάτω από την επιφάνεια του νερού εκφράζει τον αριθμό των πασχόντων που δεν έχουν ακόμα διαγνωστεί αλλά εμφανίζουν επίπεδο εντερικό βλεννογόνο. Οι περιπτώσεις αυτές σιωπηλής κοιλιοκάκης παραμένουν μη διαγνωσμένες είτε επειδή δεν εμφανίζουν συμπτώματα, είτε επειδή τα συμπτώματα που εμφανίζουν δεν έχουν συνδεθεί με την νόσο. Στο κάτω μέρος του παγόβουνου (C), υπάρχει μία ομάδα ασθενών με λανθάνουσα κοιλιοκάκη. Οι ασθενείς αυτοί παρόλο που καταναλώνουν γλουτένη εμφανίζουν κανονικό εντερικό βλεννογόνο, έχουν όμως την προδιάθεση να εμφανίσουν την ασθένεια (Feighery, 1999).

Το οριζόντιο επίπεδο στο ύψος της επιφάνειας του νερού εκφράζει το ποσοστό των διαγνωσμένων προς τις μη διαγνωσμένες περιπτώσεις της νόσου. Στις ανεπτυγμένες χώρες, για κάθε διαγνωσμένη περίπτωση, υπάρχουν 5-10 περιπτώσεις μη διαγνωσμένες, κυρίως λόγω της απουσίας των τυπικών συμπτωμάτων της νόσου. Επομένως το επίπεδο στην επιφάνεια του νερού μπορεί να μεταβληθεί όταν οι μη-διαγνωσμένες περιπτώσεις αναδυθούν λόγω κλινικής επιδείνωσης των ασθενών.



Σχήμα 2.2 Το ομοίωμα του παγόβουνου που αναπαριστά την διάδοση της κοιλιοκάκης (Feighery, 1999).

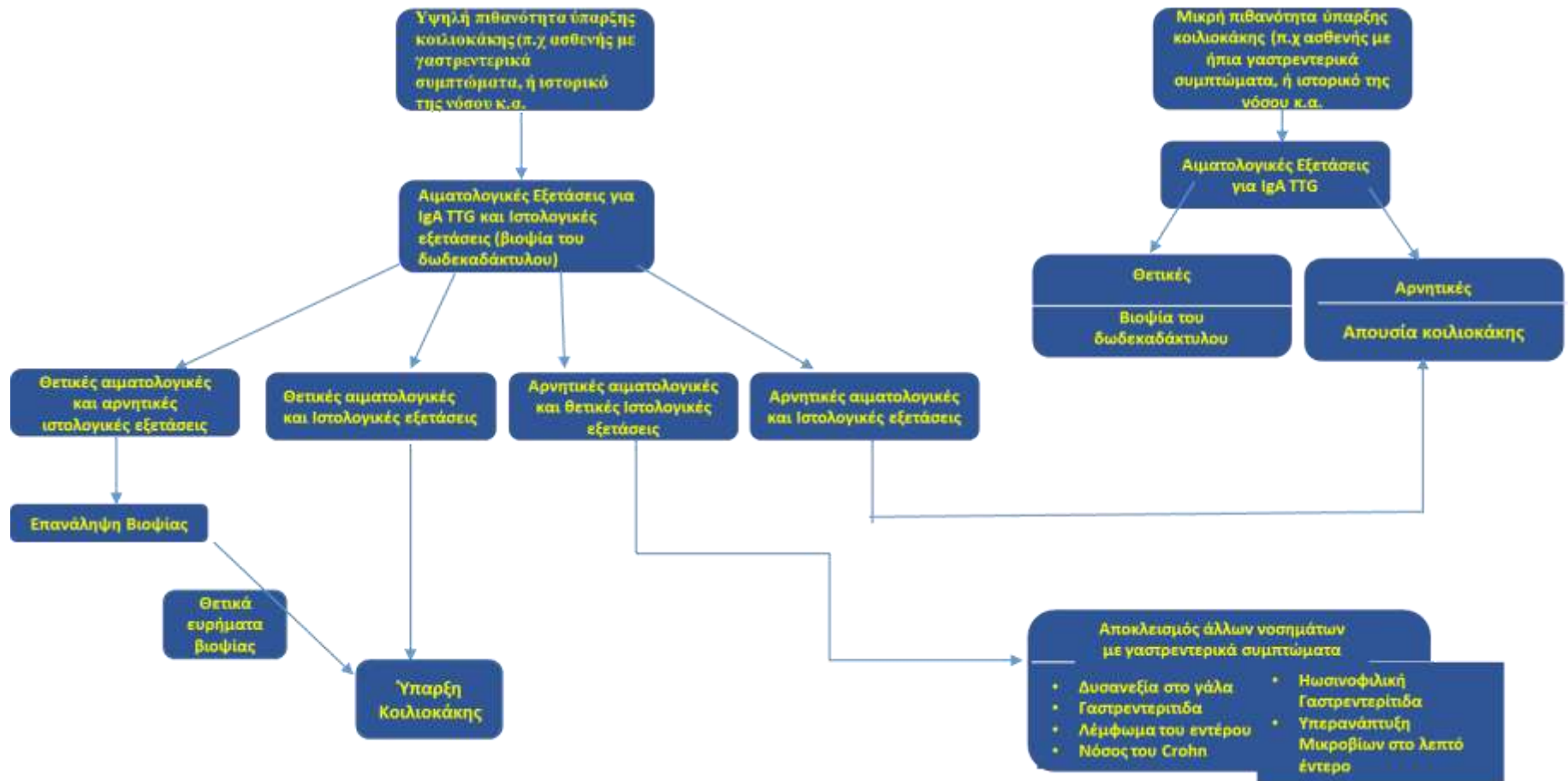
2.5 Διάγνωση

Η διάγνωση της κοιλιοκάκης βασίζεται στην αναγνώριση συμπτωμάτων που σχετίζονται με την νόσο και στην υποβολή του ασθενούς σε συνδυασμό ιατρικών εξετάσεων για την επιβεβαίωση ύπαρξής της.

Συγκεκριμένα, τα σύγχρονα διαθέσιμα εργαλεία για την διάγνωση της κοιλιοκάκης περιλαμβάνουν αρχικά αιματολογικό έλεγχο ως το πρώτο μη επεμβατικό βήμα για την διάγνωση της νόσου. Στα άτομα που έχουν βρεθεί θετικά στον αιματολογικό έλεγχο, η βιοψία του λεπτού εντέρου είναι απαραίτητη για την επιβεβαίωση ύπαρξής της νόσου (ιστολογικός έλεγχος) (Σχήμα 2.3).

Συγκεκριμένα, ευρέως διαθέσιμες αιματολογικές εξετάσεις που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ύπαρξης της κοιλιοκάκης περιλαμβάνουν την αντίχνευση στον ορό αίματος ασθενών αντιγλοιοαδινικών αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A ή G (IgA – AGA και IgG –AGA), αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A ή G πεπτιδίων γλοιοαδίνης που υφίστανται απαμίνωση (IgA–DGP και IgG-DGP), αντισωμάτων έναντι του ενδομυσίου τύπου ανοσοσφαιρίνης A (IgA-EMA) και αντισωμάτων ιστικής τρανσγλουταμινάσης ανοσοσφαιρίνης τύπου A (IgA -tTG) (Green et al., 2005).

Στην εξέταση βιοψίας, δείγμα μπορεί να ληφθεί εύκολα κατά τη συνήθη ενδοσκόπηση του ανώτερου γαστρεντερικού συστήματος. Επιπλέον θα πρέπει να γίνεται βιοψία του δωδεκαδάκτυλου σε όλους τους ασθενείς με ισχυρή υποψία ύπαρξης κοιλιοκάκης, αλλά και σε εκείνους που πιθανώς δεν πάσχουν από την νόσο, αλλά έχουν εμφανιστεί θετικοί στον πρώτο αιματολογικό έλεγχο. Η βιοψία δωδεκαδάκτυλου έχει υψηλή προγνωστική αξία (επιβεβαίωση ύπαρξης ή μη της νόσου) ενώ ο κίνδυνος κατά την εκτέλεση της εξέτασης είναι αμελητέος (Dewar & Ciclitira, 2005).



Σχήμα 2.3 Διαγνωστικός αλγόριθμος για την ύπαρξη ή μη της κοιλιοκάκης (με τροποποίηση, Celiac Disease, World Gastroenterology Organisation Global Guidelines, WHO, 2012).

2.5.1 Εξέταση αντιγλοιαδινικών αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A ή G (IgA-AGA και IgG-AGA)

Στην εξέταση χρησιμοποιείται καθαρή γλοιαδίνη ως το αντιγόνο στην ανοσοενζυμική μέθοδο της ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) με σκοπό την ανίχνευση αντιγλοιαδινικών αντισωμάτων στον ορό αίματος ασθενών. Τα επίπεδα των αντιγλοιαδινικών αντισωμάτων στον ορό αίματος αυξάνουν στις περιπτώσεις των ασθενών που παραμένουν χωρίς θεραπεία. Η εξέταση αντιγλοιαδινικών αντισωμάτων, δεν εφαρμόζεται πλέον ευρέως, λόγω της χαμηλής θετικής προγνωστικής της αξίας (ύπαρξη της νόσου) στον γενικό πληθυσμό (Roston et al., 2005).

2.5.2 Εξέταση αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A ή G πεπτιδίων γλοιαδίνης που υφίστανται απαμίνωση (IgA-DGP και IgG-DGP)

Η εξέταση ανίχνευσης αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A ή G πεπτιδίων γλοιαδίνης που υφίστανται απαμίνωση με την μέθοδο της ELISA, είναι μια νέα μέθοδος με υψηλά ποσοστά διαγνωστικής ικανότητας τόσο στον γενικό πληθυσμό χαμηλού κινδύνου, όσο και στον πληθυσμό υψηλού κινδύνου. Η ανίχνευση των IgG-DGP χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό ύπαρξης κοιλιοκάκης σε ασθενείς με αρνητικά αποτελέσματα σε εξετάσεις αίματος για αντισώματα ιστικής τρανσγλουταμινάσης αλλά και σε ασθενείς με έλλειψη αντισωμάτων ανοσοσφαιρίνης τύπου A.

2.5.3 Εξέταση αντισωμάτων έναντι του ενδομυσίου ανοσοσφαιρίνης τύπου A (IgA-EMA)

Τα αντισώματα έναντι του ενδομυσίου ανοσοσφαιρίνης τύπου A (IgA-EMA) προσδένονται στο ενδομύσιο (συνδετικός ιστός γύρω από λείους μυς όπως το έντερο) και παράγουν χαρακτηριστική χρώση, η οποία μπορεί να απεικονιστεί με έμμεσο ανοσοφθορισμό (Chorzelski et al., 1984). Το αποτέλεσμα της εξέτασης αναφέρεται απλά είτε ως θετικό, είτε ως αρνητικό, ενώ η εξέταση θεωρείται ακριβή και απαιτεί εμπειρογνωμοσύνη για την σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

2.5.4 Εξέταση αντισωμάτων ιστικής τρανσγλουταμινάσης ανοσοσφαιρίνης τύπου A (IgA-tTG)

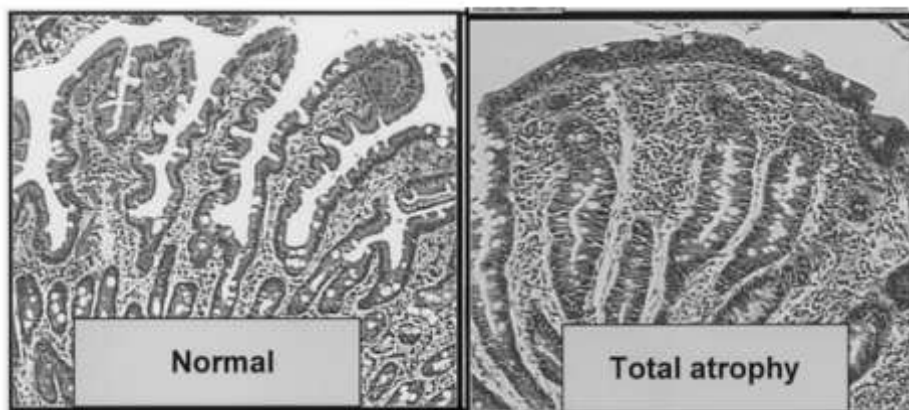
Το αντιγόνο έναντι του οποίου στρέφονται τα αντισώματα έναντι του ενδομυσίου τύπου ανοσοσφαιρίνης είναι της ιστικής τρανσγλουταμινάσης (tTG). Η εξέταση για την ανίχνευση αντισωμάτων ιστικής τρανσγλουταμινάσης ανοσοσφαιρίνης τύπου A εμφανίζει υψηλή ευαισθησία στην διάγνωση της κοιλιοκάκης, είναι γρήγορη, λιγότερο δαπανηρή και δεν απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρογνωμοσύνη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων όσο η εξέταση των αντισωμάτων έναντι του ενδομυσίου τύπου ανοσοσφαιρίνης A (Roston et al., 2005). Η διαγνωστική ακρίβεια της μεθόδου έχει βελτιωθεί με την χρήση ανθρώπινης ιστικής τρανσγλουταμινάσης ως αντιγόνο.

2.5.5 Βιοψία λεπτού εντέρου

Η βιοψία του λεπτού εντέρου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ενδοσκοπικά ή με κάψουλα βιοψίας.

Πολλοί ασθενείς με κοιλιοκάκη πιθανώς να μην εμφανίζουν την τυπική ιστολογική εικόνα των εντερικών λαχνών, ώστε να μην είναι δυνατή η επιβεβαίωση αναγνώρισης της νόσου με ενδοσκοπική βιοψία του λεπτού εντέρου. Στις περιπτώσεις αυτές βρίσκει εφαρμογή η κάψουλα βιοψίας, η οποία παρέχει υψηλής ευκρίνειας εικόνες του λεπτού εντέρου. Ουσιαστικά είναι μια ασύρματη κάψουλα ενδοσκόπιο με ενσωματωμένο σύστημα ψηφιακής καταγραφής εικόνων, ενώ είναι μικρού μεγέθους και κατάλληλου σχήματος ώστε να επιτρέπει την εύκολη κατάποσή του από τους ασθενείς. Η διαγνωστική ακρίβεια της κάψουλας βιοψίας στην νόσο της κοιλιοκάκης κυμαίνεται σε ποσοστά 56-100% (Chang et al., 2012).

Η διάγνωση της νόσου εξαρτάται από τη διαπίστωση των χαρακτηριστικών αλλαγών των ενδοεπιθηλιακών λεμφοκυττάρων, υπερπλασία των κρυπτών και μείωση του ύψους των εντερικών λαχνών (**Σχήμα 2.4**). Για την εξακρίβωση ύπαρξης της νόσου είναι απαραίτητο τα ανωτέρω συμπτώματα να υποχωρούν και ο ασθενής να βελτιώνεται ιστολογικά μετά την εξάλειψη κατανάλωσης γλουτένης από την καθημερινή διατροφή (Green et al., 2005). Πιο συγκεκριμένα, οι ασθενείς πρέπει να εξακολουθήσουν να καταναλώνουν γλουτένη μέχρι να βγουν τα αποτελέσματα της βιοψίας καθώς αν ακολουθήσουν δίαιτα με μειωμένη κατανάλωση γλουτένης μπορεί να βελτιωθούν ιστολογικά επηρεάζοντας την ορθότητα της διάγνωσης. Η οριστική διάγνωση της νόσου μπορεί να επικυρωθεί όταν τα συμπτώματα εξασθενήσουν σε ασθενείς που ακολουθούν δίαιτα ελεύθερη γλουτένης, αλλά υποτροπιάσουν ξανά με την εισαγωγή της γλουτένης στην διατροφή τους.



Σχήμα 2.4 Μορφολογία λεπτού εντέρου υγιούς ατόμου (αριστερά) και ασθενούς με κοιλιοκάκη (δεξιά). Στην δεξιά εικόνα διακρίνονται επίπεδες λάχνες, αύξηση του βάθους των κρυπτών και έντονη διήθηση του συνδετικού ιστού με πλασματοκύτταρα και λεμφοκύτταρα (Fasano & Catassi, 2001).

2.6 Θεραπεία

Οι ασθενείς με κοιλιόκακη εμφανίζουν μόνιμη δυσανεξία στην κατανάλωση γλουτένης με την μόνη θεραπεία της νόσου να είναι η τήρηση εφ' όρου ζωής δίαιτας χωρίς γλουτένη (Thompson, 2000).

Το σιτάρι, η σίκαλη, το κριθάρι και παράγωγά τους πρέπει να αποφεύγονται στην δίαιτα ελεύθερη γλουτένης. Όσον αφορά την κατανάλωση βρώμης στα πλαίσια δίαιτας ελεύθερη γλουτένης, κλινικές μελέτες έχουν δείξει ότι η παρατεταμένη κατανάλωση βρώμης δεν προκαλεί κλινική ή ιστολογική επιδείνωση ασθενών με κοιλιόκακη (Haboubi et al., 2006), ωστόσο, πολλά εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα βρώμης έχουν υποστεί επιμόλυνση από σίτο και πρέπει να αποκλείονται από τη διατροφή ατόμων με κοιλιόκακη. Στα δημητριακά που δεν περιέχουν γλουτένη και μπορούν να καταναλωθούν ανήκουν το ρύζι και το καλαμπόκι. Άλλες φυσικές τροφές, όπως λαχανικά, σαλάτες, όσπρια, φρούτα, ξηροί καρποί, κρέας, ψάρι, πουλερικά, τυρί, αυγό και το γάλα μπορούν επίσης να καταναλωθούν χωρίς περιορισμούς. Επιπλέον στις ανεπτυγμένες χώρες υπάρχει ένα ευρύ φάσμα προϊόντων χωρίς γλουτένη, που έχουν παραχθεί ειδικά για τους ασθενείς με κοιλιόκακη, υπάρχουν δυσκολίες, όμως, στην αυστηρή τήρηση δίαιτας ελεύθερη γλουτένης λόγω της «κρυφής γλουτένης» και της πιθανής επιμόλυνσης των τροφίμων. Η γλουτένη μπορεί να «κρύβεται» σε πολλά εμπορικά προϊόντα, όπως έτοιμα γεύματα, σουπες, λουκάνικα, αλοιφές, καρυκεύματα, πίτες αλλά και σε ιατρικά σκευάσματα και σκευάσματα βιταμινών με την μορφή αλεύρου σίτου, πρωτεϊνών σίτου ή αμύλου σίτου ως σταθεροποιητικών παραγόντων. Είναι πρακτικά αδύνατο να ακολουθηθεί δίαιτα με μηδενική κατανάλωση γλουτένης λόγω της επιμόλυνσης των τροφίμων από γλουτένη. Ακόμα και τα δημητριακά που προορίζονται για άτομα με κοιλιόκακη, μπορεί να επιμολυνθούν με σίτο κατά την επεξεργασία τους (άλεση, αποθήκευση).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ανωτέρω και το γεγονός ότι ο διατροφικός περιορισμός της γλουτένης είναι άβολος για τους ασθενείς, καθώς περιορίζει τις κοινωνικές τους δραστηριότητες, ενώ πολλά προϊόντα χωρίς γλουτένη είναι δαπανηρά, έχουν σχετικά δυσάρεστη γεύση, αλλά είναι και δύσκολο να βρεθούν σε πολλές χώρες, μπορεί να οδηγήσουν τους ασθενείς σε μη-συμμόρφωση με δίαιτα χωρίς γλουτένη ή ακούσια πρόσληψη γλουτένης. Επιπλέον, σε μερικούς ασθενείς δεν υπάρχει άμεση ή πλήρης βελτίωση των συμπτωμάτων της νόσου από τον διατροφικό περιορισμό της γλουτένης, απαιτώντας θεραπεία με ανοσοκατασταλτικούς παράγοντες (Schuppan et al., 2009).

Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη εναλλακτικών ή συμπληρωματικών θεραπειών είναι επιθυμητή και απαραίτητη. Τέτοιες θεραπείες θα πρέπει να είναι χαμηλού κινδύνου, με λογικό κόστος και μέτρια έως υψηλή απόδοση για την πλειονότητα των ασθενών.

Η κατανόηση της ανοσολογικής απόκρισης στη γλουτένη δίνει την ευκαιρία σε πιθανές μελλοντικές θεραπείες της κοιλιόκακης. Είναι γνωστό ότι τα πεπτίδια της γλουτένης δεν πέπτονται πλήρως στο λεπτό έντερο. Θεωρητικά η ενίσχυση του λεπτού εντέρου με πρωτεολυτικά ένζυμα θα μπορούσε να οδηγήσει στον τεμαχισμό των πεπτιδίων της γλουτένης αποτρέποντας μια ανοσολογική απόκριση. Έχει αναφερθεί ένα κατάλληλο βακτηριακό ένζυμο, ωστόσο υπάρχουν μεγάλες πρακτικές δυσκολίες

στην στοχευμένη διανομή αυτού του δραστικού συστατικού στο ανθρώπινο έντερο (Hausch et al., 2002; Shan et al., 2002).

Επιπλέον, η γνώση της αλληλουχίας των πεπτιδίων της γλουτένης μπορεί να παρέχει επαρκείς πληροφορίες για την ανάπτυξη ποικιλιών σίτου χωρίς αυτές τις τοξικές αλληλουχίες, διατηρώντας ωστόσο τις ιδιότητες του αλεύρου σίτου κατά την αρτοποιήση (Molberg et al., 2005). Βέβαια, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι τα τοξικά πεπτίδια της γλουτένης βρίσκονται διάσπαρτα σε όλο το γονιδίωμα της, η ανάπτυξη ποικιλίας με χαμηλή ανοσογονικότητα δεν μπορεί να επιτευχθεί με συμβατικές τεχνικές αναπαραγωγής αλλά με γενετική τροποποίηση, οδηγώντας την επιστημονική κοινότητα σε ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και την ηθική της γενετικής τροποποίησης. Ωστόσο αυτή η επιλογή εξετάζεται επί του παρόντος ως μια εναλλακτική θεραπεία της κοιλιοκάκης.

Η παρεμπόδιση της δραστηριότητας της ιστικής τρανσγλουταμινάσης έχει προταθεί ως μια θεραπευτική προοπτική. Ωστόσο, το ένζυμο αυτό έχει έναν ποικίλο βιολογικό ρόλο, ώστε ακόμη και τοπική αναστολή της δράσης του μπορεί να δημιουργήσει απρόβλεπτες δυσμενείς επιπτώσεις (Ciclitira et al., 2005).

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι οι τεχνικές για τη μέτρηση γλουτένης στα τρόφιμα έχουν βελτιωθεί, βοηθώντας στην επισήμανση των τροφίμων και στην αποφυγή ακούσιας κατανάλωσης γλουτένης από τους ασθενείς με κοιλιοκάκη. Επιπλέον, έχει γίνει πρόοδος στην κατανόηση της παθογένειας της κοιλιοκάκης και στην πιθανή ανάπτυξη νέων θεραπειών. Ωστόσο, η αυστηρή δίαιτα χωρίς γλουτένη αποτελεί την μέχρι στιγμιαία και αποτελεσματική θεραπεία της νόσου.

3. Αρτοσκευάσματα Ελεύθερα Γλουτένης

3.1 Εισαγωγή

Ο όρος αρτοσκευάσματα (baked products) χαρακτηρίζει μια κατηγορία προϊόντων, τα οποία περιέχουν ως βασικό υλικό άλευρο σίτου ή άλευρα δημητριακών, αναμειγμένα με άλλα συστατικά, μορφοποιούνται σε συγκεκριμένα σχήματα και η παραγωγή τους περιλαμβάνει θερμική επεξεργασία (κλιβανισμός) με σκοπό την απομάκρυνση υγρασίας. Ο ανωτέρω ορισμός περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος προϊόντων, όπως ο άρτος, το κέικ, τα μπισκότα, οι σφολιάτες και τα κράκερ, ενώ έχει διευρυνθεί ώστε να περιλαμβάνει και προϊόντα χωρίς γλουτένη (Cauvain & Young, 2006).

Κύρια συστατικά στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης (gluten-free) θεωρούνται άμυλα και άλευρα φυτικής προέλευσης όπως άμυλο/ άλευρο καλαμποκιού, πατάτας, ταπιόκας ή ρυζιού. Η διατροφική αξία των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης είναι συχνά χαμηλότερη από τα προϊόντα με βάση το σίτο, λόγω της χαμηλής διατροφικής αξίας των πρώτων υλών από τις οποίες παρασκευάζονται (Korus et al., 2006). Πολλά προϊόντα ελεύθερα γλουτένης περιέχουν μικρότερα ποσοστά διαιτητικών ινών, βιταμινών, όπως θειαμίνη, ριβοφλαβίνη, νιασίνη, αλλά και σιδήρου και φυλλικού οξέος σε σχέση με αντίστοιχα προϊόντα σίτου (Thompson, 2000).

Εκτός από την μειωμένη διατροφική αξία των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, η απουσία της γλουτένης δημιουργεί τεχνολογικά προβλήματα στην διαδικασία παρασκευής τους. Πολλά εμπορικά προϊόντα χωρίς γλουτένη είναι χαμηλής ποιότητας με μέτρια γεύση και υφή στο στόμα, καθώς η γλουτένη ως κύρια δομική πρωτεΐνη, προσδίδει ιξωδοελαστικότητα στο ζυμάρι, συμβάλλοντας στην εμφάνιση και την δομή της ψίχας πολλών ψημένων προϊόντων.

Επομένως είναι απαραίτητη η ανάπτυξη προϊόντων ελεύθερων γλουτένης με βελτιωμένα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά και κυρίως αρτοσκευασμάτων, τα οποία αποτελούν είδη καθημερινής διατροφής. Στη συνέχεια θα συζητηθούν τα υποκατάστατα γλουτένης, η τεχνολογία ανάπτυξης και τα τεχνολογικά προβλήματα, τα χαρακτηριστικά άρτου και κέικ και η νομοθεσία των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης.

3.2 Η γλουτένη στην αρτοποιία

Η γλουτένη αποτελεί μία σύνθεση πρωτεϊνών (την γλοιαδίνη και την γλουτενίνη) και ορίζεται ως η πλαστική και ελαστική μάζα που προκύπτει κατά την έκπλυση με νερό αλεύρου από σιτάρι, κριθάρι ή σίκαλη, όταν απομακρυνθεί το άμυλο και οι υδατοδιαλυτές πρωτεΐνες (Shwery & Halford, 2002). Το διακριτικό γνώρισμα της γλουτένης είναι οι ιξωδοελαστικές ιδιότητές της, με τις γλοιαδίνες να συνεισφέρουν στο ιξώδες και τις γλουτενίνες στην ελαστικότητα του ζυμαριού (Sluimer 2005; Lazaridou et al., 2007).

Ο ρόλος της γλουτένης στην αρτοποιητική διαδικασία διογκούμενων αρτοσκευασμάτων είναι να προσδίδει ελαστικότητα στο ζυμάρι, να συγκρατεί αέρια

κατά την επώαση, συμβάλλοντας στην αύξηση του όγκου και τη διατήρηση του σχήματος του ζυμαριού, ενώ το τελικό προϊόν είναι μαλακό, αφράτο και εύγευστο. Οι μοναδικές αυτές ιδιότητες της γλουτένης δικαιολογούν την σχεδόν αποκλειστική χρήση αλεύρου σίτου στα διογκούμενα αρτοσκευάσματα.

3.3 Άρτος και προϊόντα που έχουν υποστεί επώαση (fermented goods)

3.3.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά άρτου και προϊόντων που έχουν υποστεί επώαση

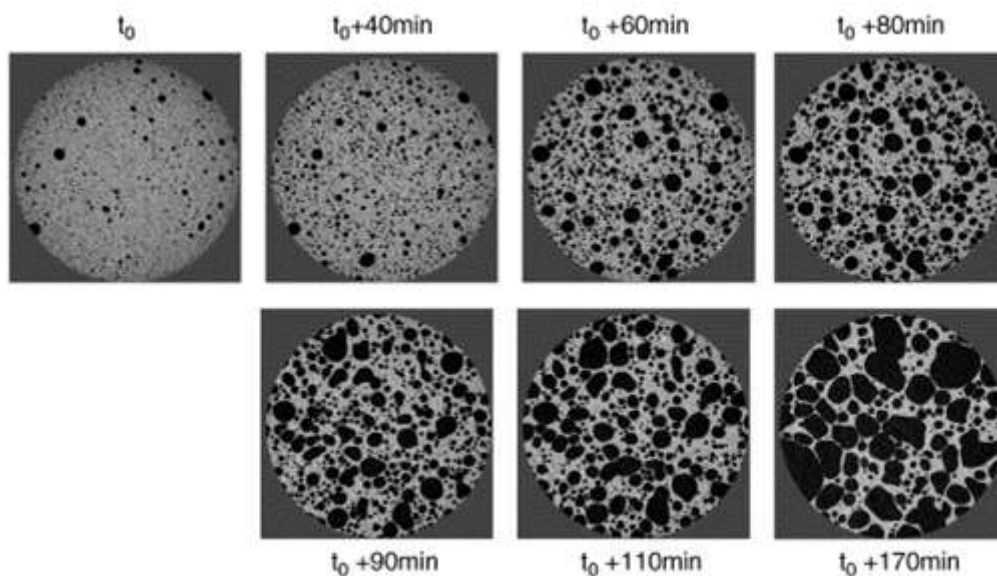
Ο άρτος χαρακτηρίζεται από την κόρα, ένα ξηρό και λεπτό στρώμα που περικλείει την ψίχα, μια μαλακή, σπογγώδη δομή. Η κόρα έχει συνήθως ελαφρύ χρυσό-καφέ χρώμα. Ωστόσο σε ορισμένα αρτοσκευάσματα το χρώμα μπορεί να είναι πιο σκούρο, όταν τα αλεύρα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους είναι ολικής άλεσης ή αλεύρα άλλων δημητριακών εκτός του σίτου. Ο άρτος χαρακτηρίζεται ως προϊόν ενδιάμεσης υγρασίας, με τυπικές τιμές υγρασίας της κόρας να κυμαίνονται στο 12-17% και της ψίχας μεταξύ 35-40%, ανάλογα με το είδος του άρτου. Η κόρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως σκληρή και εύθραυστη, λόγω του χαμηλού ποσοστού υγρασίας της αλλά και του μικρού πάχους της, συνήθως 1–3 mm.

Η ψίχα του άρτου χαρακτηρίζεται από σπογγώδη - αφρώδη δομή (foam), η οποία δημιουργείται λόγω του σχηματισμού διοξειδίου του άνθρακα από την μαγιά αρτοποιίας κατά την διαδικασία της επώασης. Η υφή της ψίχας, μπορεί να χαρακτηριστεί σχετικά μαλακή και ελαστική, ενώ τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζονται από το ποσοστό υγρασίας της ψίχας και την δομή της. Συγκεκριμένα, χαμηλά ποσοστά υγρασίας οδηγούν σε σκληρή και ανελαστική ψίχα. Η δομή της ψίχας χαρακτηρίζεται από τις κυψελίδες του αέρα και το πάχος των τοιχωμάτων των κυψελίδων αέρα. Η ιδανική δομή αποτελείται από μικρές κυψελίδες αέρα ομοιόμορφα κατανομημένες, ώστε να επιτυγχάνεται κατά την μάσηση μαλακή και σπογγώδης υφή. Όταν η δομή της ψίχας χαρακτηρίζεται από μεγάλες κυψελίδες αέρα με παχιά τοιχώματα και ανομοιόμορφη κατανομή τους στην φέτα του άρτου, αναφέρεται ως ανοικτή και η υφή της είναι τραχιά (Cauvain & Young, 2006).

3.3.2 Αρτοποιητική διαδικασία

Η αρτοποίηση είναι μια σύνθετη διαδικασία που αποτελείται από τα στάδια της ανάμιξης, της σχηματοποίησης (διαμόρφωσης) των τεμαχίων του ζυμαριού, της επώασης, του κλιβανισμού και της ψύξης, στα οποία λαμβάνουν χώρα φαινόμενα εξάτμισης του νερού, αύξησης του όγκου, απενεργοποίησης μαγιάς και ενζύμων, ζελατινοποίησης αμύλου, μετουσίωσης πρωτεϊνών και σχηματισμού ψίχας και κόρας (Sivam et al., 2010). Στο στάδιο της ανάμιξης το αλεύρι με το νερό και άλλα συστατικά μετατρέπεται σε ζυμάρι στο οποίο και ενσωματώνονται φυσαλίδες αέρα. Οι φυσαλίδες αυτές δρουν ως πυρήνες αερίου για το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από την ζύμωση της μαγιάς (Cauvain & Young 1999). Το στάδιο της επώασης αποτελείται από μία ή περισσότερες περιόδους ζύμωσης και διόγκωσης του ζυμαριού διάρκειας

λιγότερης από μια ώρα έως και αρκετών ωρών. Το αέριο διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται, διαχέεται στους πυρήνες αερίου αυξάνοντας τον όγκο τους και κατ' επέκταση τον όγκο του ζυμαριού. Στο ζυμάρι με αλεύρι σίτου δεν υπάρχει σχεδόν καμία διαρροή διοξειδίου του άνθρακα από τους πυρήνες αερίου και οι κυψελίδες αέρα που σχηματίζονται είναι ομοιόμορφες και σταθερές (Sluimer, 2005) (**Σχήμα 3.1**). Η ακεραιότητα των κυψελίδων αέρα (απουσία διάσπασης και συνένωσης) διατηρείται από μια μεμβράνη υγρού, η οποία σταθεροποιείται από επιφανειοδραστικούς παράγοντες στην διεπιφάνεια υγρού/αερίου και περιβάλλεται από το πλέγμα πρωτεΐνης-αμύλου. Ωστόσο, στα τελευταία στάδια της επώασης οι κυψελίδες αέρα υφίστανται ταχεία διαστολή, λόγω της αυξημένης παραγωγής CO₂, η μεμβράνη σταθεροποίησης αδυνατεί να συγκρατήσει τις κυψελίδες αέρα, με αποτέλεσμα αυτές να συνενώνονται σε μια πιο ετερογενή δομή (Mills et al., 2003).



Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστική εξέλιξη των φυσαλίδων αέρα ζύμης ψωμιού κατά τη διάρκεια του σταδίου της επώασης. Στην αρχή μπορούν να διακριθούν ομοιόμορφα κατανεμημένες σφαιρικές φυσαλίδες αέρα, οι οποίες σταδιακά διογκώνονται και προς το τέλος του σταδίου της επώασης συνενώνονται σε πιο ετερογενή δομή. (Babin et al., 2006).

Το στάδιο του κλιβανισμού περιλαμβάνει μεταφορά θερμότητας και μάζας, προκαλώντας την μεταβολή της ζύμης σε ψωμί. Αρχικά, η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της ψίχας αυξάνεται δημιουργώντας μια λεπτή επιφανειακή επιδερμίδα. Στην συνέχεια η θερμοκρασία στο κέντρο της ζύμης αυξάνεται, οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή αερίου και περαιτέρω αύξηση του όγκου του ψωμιού στο φούρνο (oven –spring rise). Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η δράση της μαγιάς, η οποία και απενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία φθάσει περίπου 55 °C. Η δομική σταθερότητα της ζύμης διατηρείται επειδή τα παγιδευμένα αέρια διαστέλλονται λόγω αύξησης θερμοκρασίας και διατηρούν θετική εσωτερική πίεση εντός των κυψελίδων του αέρα (Cauvain & Young 1999). Η ζελατινοποίηση του αμύλου σίτου ξεκινά περίπου στους 60 °C. Κατά τη διάρκεια του κλιβανισμού, οι

πρωτεΐνες υφίσταται μετουσίωση και πολυμερισμό με αποτέλεσμα να στερεοποιούνται, ενώ παρατηρείται και μεταφορά νερού από την γλουτένη προς τους κόκκους του αμύλου, οι οποίοι ζελατινοποιούνται. Συγκεκριμένα για τις πρωτεΐνες της γλουτένης, το θερμοκρασιακό εύρος της στερεοποίησης τους πρωτεϊνών κυμαίνεται μεταξύ 50° και 70° C, ανάλογα με το μοριακό βάρος και την κολλοειδή τους κατάσταση (Σαμπάνης, 2010).

Καθώς η θερμοκρασία συνεχίζει να ανεβαίνει, το ζυμάρι χάνει την πλαστικότητα του, σταματάει να διογκώνεται και μετατρέπεται στην γνωστή αφρώδη δομή του ψωμιού. Η εξωτερική επιφάνεια της ψίχας αφυδατώνεται και μετατρέπεται σε κόρα με την χαρακτηριστική χρωματική μεταβολή από ωχρή κίτρινη σε κεχριμπαρένια, καστανή και σκούρα καστανή. Η καστανίωση της κόρας λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίας υψηλότερες των 110 °C ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων Maillard και καραμελοποίησης. Οι αντιδράσεις Maillard και καραμελοποίησης συμβάλλουν επίσης στην γεύση και το άρωμα του ψωμιού. Με την αντίδραση της καραμελοποίησης σχηματίζεται σημαντικός αριθμός προϊόντων υποβάθμισης με όξινη ή ελαφρώς πικρή γεύση, καθώς και μια σειρά καρβονυλίων, αλδευδών και κετονών με ευχάριστη οσμή. Επιπλέον με την αντίδραση Maillard (αλληλεπίδραση των αμινοξέων των πρωτεϊνών με τα ελεύθερα αναγωγικά σάκχαρα) σχηματίζονται μελανοΐδινες, αλλά και πτητικές ενώσεις που συμβάλλουν στο άρωμα του άρτου (In Hee Cho & Peterson, 2010).

Η ψύξη του άρτου αρχίζει μόλις έχει τελειώσει το στάδιο του ψησίματος και ο ρυθμός με τον οποίο τα προϊόντα ψύχονται εξαρτάται από τις διαστάσεις τους και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του προϊόντος και του περιβάλλοντος. Κατά την ψύξη καθορίζεται η τελική δομή του άρτου, λόγω της κρυστάλλωσης του ζελατινοποιημένου αμύλου (αναδιάταξης της αμυλόζης), η οποία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αρχική σκληρότητα της ψίχας (Goesaert et al., 2005).

3.3.3 Συστατικά του άρτου και λειτουργίες τους

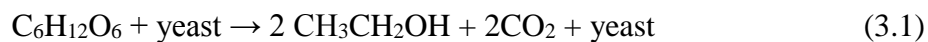
3.3.3.1 Νερό

Το πρωταρχικό στάδιο στην αρτοποιία είναι η προσθήκη νερού στο αλεύρι και με τη διαδικασία της ανάμιξης, σχηματίζεται ένα συνεκτικό, ιξωδοελαστικό ζυμάρι. Το νερό συμβάλλει στην διαλυτοποίηση και ομοιόμορφη διασπορά των συστατικών, στο σχηματισμό του πρωτεϊνικού δικτύου και δρα ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη της μαγιάς αρτοποιίας. Κατά την διάρκεια του ψησίματος συμβάλλει στην ζελατινοποίηση του αμύλου ενώ η περιεκτικότητα σε νερό του τελικού προϊόντος διαμορφώνει την υφή κατά την μάσηση και την διάρκεια ζωής του. Υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό προσθήκης νερού για κάθε είδος αλεύρου, το οποίο καθορίζεται με βάσει το ιξώδες και άλλα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ζυμαριού (αντοχή στην παραμόρφωση, ελαστικότητα, εκτατότητα και προσκολλησιμότητα), ώστε η διαμόρφωση του τελικού προϊόντος στα κατάλληλα σχήματα και μεγέθη να απαιτεί την ελάχιστη δυνατή προσπάθεια και το τελικό προϊόν να διαθέτει τα επιθυμητά ποιοτικά χαρακτηριστικά (Cauvain & Young, 2006). Αν η ποσότητα του νερού στο ζυμάρι είναι πολύ μικρή (υψηλό ιξώδες), συγκεκριμένα μικρότερη από 35% (επί του συνολικού βάρους του

ζυμαριού) θα είναι δύσκολος ο χειρισμός του κατά τα στάδια της ανάμιξης και της σχηματοποίησης των τεμαχίων του ζυμαριού ενώ και κατά τη διάρκεια του ψησίματος, η ζελατινοποίηση του αμύλου δεν θα είναι πλήρης και το τελικό προϊόν θα χαρακτηρίζεται από μειωμένη διόγκωση και σκληρή και εύθρυπτη ψίχα. Υψηλά ποσοστά νερού (>45% επί του συνολικού βάρους του ζυμαριού), οδηγούν σε μαλακό ζυμάρι, το οποίο μορφοποιείται μεν ευκολότερα, ωστόσο δεν διατηρεί το επιθυμητό σχήμα κατά το στάδιο της επώασης. Κατά την ζελατινοποίηση του αμύλου στον κλιβανισμό, το νερό δεν δεσμεύεται πλήρως από το άμυλο και το ελεύθερο νερό που παραμένει οδηγεί στον σχηματισμό κολλώδους και υγρής ψίχας (Gil et al., 1997).

3.3.3.2 Μαγιά αρτοποιίας

Η μαγιά αρτοποιίας αποτελείται από μύκητες του γένους *Saccharomyces cerevisiae*, και ο κύριος ρόλος της είναι η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα για την διόγκωση των αρτοσκευασμάτων. Η μαγιά μετατρέπει τα ζυμούμενα ζάχαρα (γλυκόζη και άλλα σάκχαρα) σε αιθανόλη και διοξείδιο του άνθρακα (Williams and Pullen, 1998).



Η αιθανόλη εξατμίζεται κατά την διάρκεια του ψησίματος και δεν επιδρά στην ποιότητα των αρτοσκευασμάτων. Όσο υψηλότερο το ποσοστό της μαγιάς στο ζυμάρι, τόσο γρηγορότερος ο ρυθμός παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο ο ρυθμός ανάπτυξης της μαγιάς εξαρτάται από την θερμοκρασία επώασης της ζύμης και είναι αυξανόμενος μέχρι τους 40–43 °C, μετά την θερμοκρασία αυτή επέρχεται μείωση του ρυθμού και αδρανοποίηση της μαγιάς στην θερμοκρασία των 55 °C. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της καλής μαγιάς αρτοποιίας για την παρασκευή άρτου είναι η υψηλή ικανότητα διόγκωσης, ενώ και άλλα χαρακτηριστικά της είναι υψηλή ωσμωτική αντοχή παρουσία σακχάρων και αλάτων, αντοχή στην κατάψυξη, στην παρουσία λιπών και συντηρητικών, μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος διόγκωσης, αντοχή σε μεταβαλλόμενο pH, και ικανότητα μη συσσωμάτωσης (Linko et al, 1997).

3.3.3.3 Λιπαρά (shortening)

Τα λιπαρά που χρησιμοποιούνται κυρίως στην αρτοποιητική διαδικασία είναι φυτικής ή ζωικής προέλευσης και χαρακτηρίζονται από ημι-πλαστική συμπεριφορά (Pareyt et al., 2011). Η μέση περιεκτικότητα των αρτοσκευασμάτων σε λιπαρά κυμαίνεται στο 2-5% επί του αλεύρου.

Τα λιπαρά δρουν ως πλαστικοποιητές του ζυμαριού και κυρίως της γλουτένης, καθώς η προσθήκη υψηλών ποσοστών λιπαρών στο ζυμάρι, απαιτεί μικρότερα ποσοστά νερού ώστε να επιτευχθεί ίδιος βαθμός συνεκτικότητας της ζύμης. Ωστόσο η πλαστικοποιητική ικανότητα των λιπαρών φαίνεται να σταματά σε ποσοστό 5% (Fu et al., 1997). Τα λιπαρά διαρρηγνύουν την συνοχή του δικτύου γλουτένης-αμύλου, παρέχουν λίπανση των μορίων της γλουτένης και μειώνουν την ικανότητα

απορρόφησης νερού του ζυμαριού. Ως εκ τούτου ενισχύουν την δομή του ζυμαριού, αυξάνοντας την ικανότητα συγκράτησης αερίου και τον τελικό όγκο του προϊόντος.

Η προσθήκη λιπαρών σε στερεή μορφή, κατανέμεται ομοιόμορφα στο πλέγμα της γλουτένης-αμύλου, μειώνοντας την τριβή μεταξύ των κόκκων του αμύλου και δημιουργώντας εύκολα επεκτάσιμες λεπτές πρωτεϊνικές στοιβάδες γλουτένης, οι οποίες δεν έχουν την τάση να συγκολλούνται κατά την διόγκωση του ζυμαριού. Αντιθέτως η προσθήκη λιπαρού σε υγρή μορφή (ελαίου) οδηγεί στην συσσωμάτωση των στοιβάδων της γλουτένης, μειώνοντας την διόγκωση του άρτου (Watanabe et al., 2003).

Οι κύριοι ρόλοι των στερεών λιπαρών στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω σημεία:

- Σταθεροποίηση των φυσαλίδων αερίου που ενσωματώνονται στο ζυμάρι, η οποία οδηγεί σε βελτίωση της ικανότητας συγκράτησης αερίου, η οποία συνήθως εκδηλώνεται ως αύξηση του όγκου κατά τον κλιβανισμό (η διαφορά στο ύψος του ζυμαριού που εισέρχεται στο φούρνο και το ύψος του ψημένου άρτου)
- Παρεμπόδιση της συνένωσης των φυσαλίδων αερίου στη ζύμη κατά το στάδιο της διόγκωσης και του ψησίματος, η οποία οδηγεί σε ομοιόμορφα κατανεμημένες και μικρού μεγέθους κυψελίδες αέρα στο τελικό προϊόν.
- Συμβολή στην απαλότητα και υφή της ψίχας, και μείωση του ρυθμού παλαίωσης των αρτοσκευασμάτων, λόγω μείωσης του ρυθμού μετανάστευσης της υγρασίας από το εσωτερικό της ψίχας του άρτου προς το περιβάλλον (Payret et al., 2011).

3.3.3.4 Αλάτι

Η κύρια λειτουργία του αλατιού είναι η ενίσχυση της γεύσης του προϊόντος. Λόγω της ιονικής του φύσης το αλάτι μειώνει την ενεργότητα του νερού και παρατείνει την διάρκεια ζωής του προϊόντος (Cauvain & Young, 2006). Κατά την αρτοποιητική διαδικασία, η παρουσία του αλατιού μειώνει την δραστικότητα της μαγιάς, ελέγχοντας τον ρυθμό παραγωγής αερίου διοξειδίου του άνθρακα. Η απουσία αλατιού, οδηγεί σε υψηλό ρυθμό παραγωγής αερίων από την δράση της μαγιάς στο στάδιο της επώασης και σε μειωμένη ικανότητα συγκράτησης τους από το ζυμάρι. Επιπλέον το αλάτι ισχυροποιεί το δίκτυο της γλουτένης, αυξάνοντας την ελαστικότητα και την εκτατότητα του ζυμαριού, ενώ πιθανή μείωση του, οδηγεί σε αδύναμο ζυμάρι με μειωμένη ικανότητα συγκράτησης αερίων (Hlynka, 1962). Η ενδεδειγμένη ποσότητα άλατος στα αρτοσκευάσματα είναι 2-2.5% καθώς μεγαλύτερες ποσότητες παρεμποδίζουν την δράση της μαγιάς και την ανάπτυξη της ζύμης.

3.3.3.5 Σάκχαρα

Στα αρτοσκευάσματα προστίθενται κυρίως σακχαρόζη αλλά μπορούν να προστεθούν και άλλα σάκχαρα, όπως σιρόπια δεξτρόζης, ιμβερτοποιημένων σακχάρων ή μέλι. Τα ποσοστά προσθήκης σακχάρων στα αρτοσκευάσματα είναι χαμηλά μεταξύ 0-3%, ωστόσο σε ορισμένες κατηγορίες γλυκών αρτοσκευασμάτων όπως τα ντόνατς (doughnuts), η προσθήκη σακχάρων μπορεί να φτάσει το 30% (επί του αλεύρου).

Η συνεισφορά των σακχάρων στην αρτοποιία είναι η πρόσδωση γλυκιάς γεύσης και χρώματος στα ψημένα προϊόντα, λόγω της αντίδρασης Maillard. Επιπλέον έχει βασικό ρόλο στον δομικό σχηματισμό των αρτοσκευασμάτων, καθώς λειτουργεί ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη της μαγιάς, ειδικά στα πρώτα στάδια της επώασης αλλά επηρεάζει και την ζελατινοποίηση του αμύλου. Η ύπαρξη σακχάρων στο ζυμάρι καθυστερεί την ζελατινοποίηση του αμύλου, οδηγώντας σε τελικό προϊόν με υψηλή διόγκωση ενώ ενισχύει και την διατήρηση της υγρασίας στην ψίχα, με αποτέλεσμα τα τελικά προϊόντα να παραμένουν φρέσκα για μεγαλύτερο διάστημα. Τέλος η παρουσία σακχάρων μειώνει την ενεργότητα του νερού στα τελικά προϊόντα, μειώνοντας την εμφάνιση μικροβιακή αλλοίωσης (ζύμες, μύκητες) (Cauvain & Young, 2006).

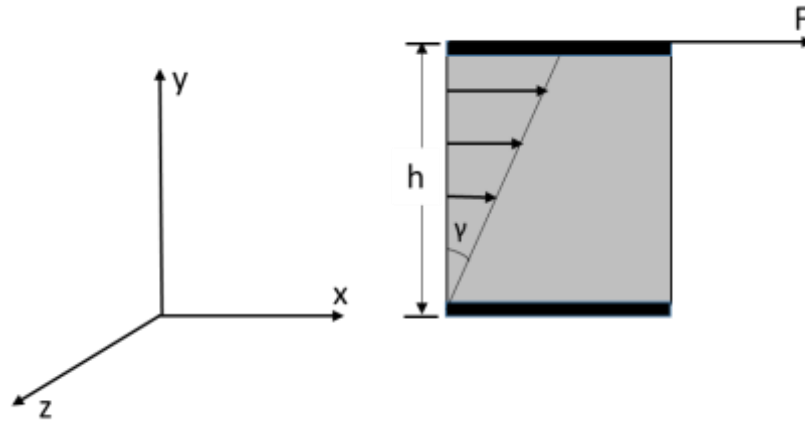
3.3.4 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ζύμης άρτου

Η ρεολογία μελετά την παραμόρφωση των αντικειμένων υπό την επίδραση δύναμης. Στην επιστήμη της ρεολογίας ανήκει η μελέτη της συμπεριφοράς της ροής των ρευστών και της παραμόρφωσης των στερεών.

Οι βασικοί τύποι δυνάμεων που μπορούν να ασκηθούν σε ένα υλικό είναι: δυνάμεις συμπίεσης, κάθετες στο επίπεδο παραμόρφωσης, εφελκυσμού επίσης κάθετες στο επίπεδο παραμόρφωσης με αντίθετη φορά και δυνάμεις διάτμησης που είναι εφαπτόμενες στο επίπεδο συμπίεσης.

Η τάση (σ) είναι το πηλίκο της δύναμης προς την παραμόρφωση και ανάλογα με το είδος του πειράματος η τάση αυτή μπορεί να είναι τάση συμπίεσης, τάση εφελκυσμού ή τάση διάτμησης.

Στο **Σχήμα 3.2** απεικονίζεται η ροή ενός υλικού με την επιβολή διατμητικής τάσης. Η δύναμη που κινεί το ρευστό είναι γνωστή ως διατμητική δύναμη (F) ενώ η κλίση της ταχύτητας διάτμησης ως παραμόρφωση (γ).



Σχήμα 3.2 Κίνηση στρωμάτων ρευστού με την επιβολή δύναμης (με τροποποίηση Steffe, 1996).

Ανάλογα με τη συμπεριφορά τους τα υλικά μπορούν να χωριστούν σε αυτά που παραμορφώνονται (στερεά) και σε αυτά που ρέουν (ρευστά). Οι διάφορες κατηγορίες στερεών και ρευστών με βάση την σχέση τάσης παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.3**.



Σχήμα 3.3 Κατηγορίες υλικών ανάλογα με τη συμπεριφορά τους (Mohsenin, 1970).

Πιο συγκεκριμένα στα ελαστικά υλικά η συμπεριφορά τους δεν εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης (ο λόγος τάση προς παραμόρφωση είναι σταθερός για δεδομένο ρυθμό παραμόρφωσης), ενώ στα μη-ελαστικά εξαρτάται. Τα ελαστικά υλικά χωρίζονται στα ιδανικά που ακολουθούν το νόμο του Hook (η τάση έχει γραμμική σχέση με την παραμόρφωση κατά την εφαρμογή μίας δύναμης και κατά την αποφόρτιση) και στα μη-ιδανικά, όπου κατά την αποφόρτιση τους υπάρχει μία υστέρηση. Αντίστοιχα τα ρευστά χωρίζονται στα ιξώδη ρευστά που είναι νευτώνικά (νευτώνια), γραμμική μεταβολή τάσης σε σχέση με το ρυθμό παραμόρφωσης και μη-νευτώνικά (θιξοτροπικά ή ρεοπηγνύομενα). Στην κατηγορία των πλαστικών ρευστών ανήκουν ρευστά, στα οποία απαιτείται η εφαρμογή αρχικής τάσης για να αρχίσει η ροή και αν μετά η σχέση τάσης-ρυθμού παραμόρφωσης είναι γραμμική ή όχι ονομάζονται Bingham ή μη-Bingham

Το ζυμάρι των άρτων ή κέικ ανήκει στην κατηγορία των ιξωδοελαστικών υλικών και συνδυάζει ταυτόχρονα ιδιότητες ρευστών και στερεών (ημι-στερεό).

Η ρεολογία αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην κατανόηση των φυσικών ιδιοτήτων των ζυμαριών. Οι βασικοί στόχοι των ρεολογικών μετρήσεων στα ζυμάρια είναι:

- Η ποσοτική περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων των ζυμαριών
- Η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με την μοριακή δομή και σύνθεση του ζυμαριού
- Ο χαρακτηρισμός και η πρόβλεψη της απόδοσης του ζυμαριού στα διάφορα στάδια επεξεργασίας του.

Οι βασικοί τύποι ρεολογικών δοκιμών που χρησιμοποιούνται για την μελέτη ζύμης των αρτοσκευασμάτων είναι: (i) δυναμικά ταλαντωτικά πειράματα (ii) πειράματα ερπυσμού χαλάρωσης (creep and stress relaxation), (iii) πειράματα εφελκυσμού, (iv) πειράματα μέτρησης ιξώδους (Dobraszczyk, 2004).

Τα κυριότερα όργανα για την μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων υγρών και ημιστερεών υλικών είναι περιστροφικού τύπου (rotational) ή τύπου σωλήνα (tube type).

Οι ρεολογικές ιδιότητες στην παρούσα διατριβή μετρήθηκαν με χρήση περιστροφικού ρεομέτρου.

Τα δυναμικά ταλαντωτικά πειράματα (oscillatory tests) αποτελούν ένα μη δομικά καταστροφικό πείραμα καθώς εκτελούνται εντός της ιξωδοελαστικής περιοχής των δειγμάτων και επιτρέπουν τη μέτρηση του ελαστικού και του ιξώδους χαρακτήρα του δείγματος. Στα ταλαντωτικά πειράματα, το δείγμα υπόκειται σε ημιτονοειδή ταλάντωση με μεταβολή της τάσης ή παραμόρφωσης αρμονικά με το χρόνο.

Επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την δομική συμπεριφορά του ζυμαριού μπορούν να ληφθούν από πειράματα ερπυσμού-ανάκτησης. Το δείγμα υφίσταται σταθερή τάση σ_0 , ενώ καταγράφεται η παραμόρφωσή του κατά την φάση του ερπυσμού αλλά και κατά την φάση ανάκτησης (απομάκρυνση της τάσης). Η παραμόρφωση αποτελεί χαρακτηριστικό του δείγματος. Τα ιδανικά ελαστικά υλικά θα ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα μετά την απομάκρυνση της τάσης, ενώ τα ιδανικά ιξώδη υλικά εμφανίζουν γραμμική παραμόρφωση με το χρόνο που φτάνει μία σταθερή τιμή.

Τα ιξωδοελαστικά υλικά όπως το ζυμάρι εμφανίζουν ένα συνδυασμό ιδανικά ελαστικού και ιξώδους υλικού, και μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις. Αρχικά με την εφαρμογή τάσης, σ_0 παρατηρείται μια ιδανική (ελαστική) συμπεριφορά, ακολουθούμενη από έναν μη-σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης (ιξωδοελαστικότητα) ($\gamma=f(\sigma_0, t)$). Τέλος επιτυγχάνεται σταθερή κατάσταση (ιξώδης συμπεριφορά) με μόνιμη παραμόρφωση εξαρτώμενη από την αρχική τάση ($\gamma=f(\sigma_0)$). Τυπικό διάγραμμα ερπυσμού- ανάκτησης για ένα ιξωδοελαστικό υλικό, όπως το ζυμάρι παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.4**. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με το μοντέλο του Burger. Το μοντέλο του Burger συνδυάζει στοιχεία των μοντέλων Maxwell και Kelvin/Voigt. Το μοντέλο του Maxwell αποτελείται από ένα 'ελατήριο' και ένα 'δοχείο' στην σειρά, ενώ το μοντέλο του Kelvin/Voigt αποτελείται από ένα δοχείο και ένα ελατήριο τοποθετημένα παράλληλα (**Σχήμα 3.5**). Το ελατήριο εκφράζει το ελαστικό υλικό (νόμος του Hook) και το δοχείο εκφράζει ένα νευτώνειο υγρό. Με το ελατήριο εκφράζεται μία συμπεριφορά ανεξάρτητη του χρόνου, ενώ με το δοχείο εξαρτώμενη

του χρόνου. Το μοντέλο του Burger αποτελεί άθροισμα των μοντέλων Maxwell και Kelvin/Voigt τοποθετημένα σε σειρά (Σχήμα 3.5).

Τα δεδομένα της δοκιμής ερπυσμού - ανάκτησης περιγράφονται με τον όρο της ενδοτικότητας $J = f(t) = \gamma/\sigma$, ως συνάρτηση της παραμόρφωσης (γ) και της τάσης (σ), η οποία είναι σταθερή κατά την φάση του ερπυσμού.

Η ενδοτικότητα περιγράφεται από το μοντέλο του Burger με τις παρακάτω εξισώσεις:

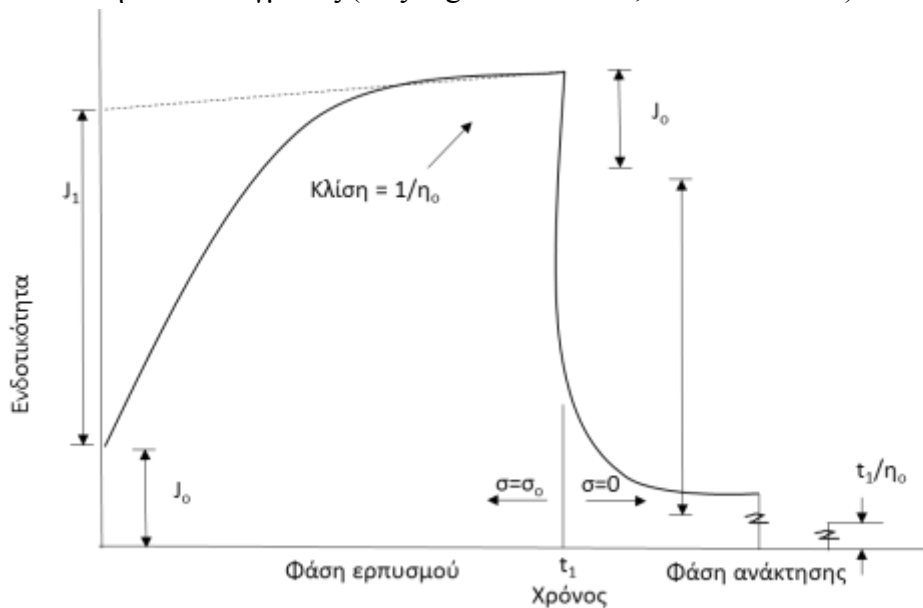
$$J(t) = J_0 + J_1 (1 - \exp(-t/\lambda)) + t/\eta_0 \text{ για την φάση του ερπυσμού} \quad (3.2)$$

και

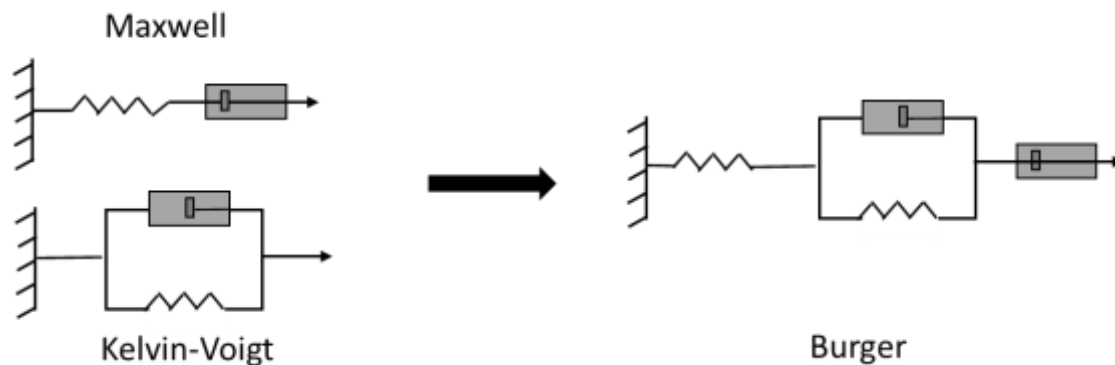
$$J(t) = J_{\max} - J_0 - J_1 (1 - \exp(-t/\lambda)) \text{ για την φάση ανάκτησης} \quad (3.3)$$

μέσω του οποίου μπορεί να υπολογιστεί η ελαστική ενδοτικότητα (J_0), η ιξωδοελαστική ενδοτικότητα (J_1), η μέγιστη ενδοτικότητα (J_{\max}), ο μέσος χρόνος υστέρησης (λ) και το ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης (η_0) (Mezger, 2006).

Η μέγιστη ενδοτικότητα περιλαμβάνει την σχετική ελαστική ενδοτικότητα (J_0/J_{\max}) και την σχετική ιξώδη ενδοτικότητα (J_1/J_{\max}). Η τιμή της σχετικής ελαστικής ενδοτικότητας μπορεί να υπολογιστεί με αφαίρεση από την μέγιστη ενδοτικότητα της τιμής της ενδοτικότητας στο τέλος της καμπύλης ανάκτησης, όπου το δείγμα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Η σχετική ελαστική ενδοτικότητα αντιπροσωπεύει την ελαστικότητα του δείγματος (Onyango et al. 2009a; Rao et al. 1987).



Σχήμα 3.4 Τυπικό διάγραμμα ερπυσμού- ανάκτησης για ιξωδοελαστικό υλικό. (Με τροποποίηση Steffe, 1996).



Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση των μοντέλων του Maxwell, Kelvin-Voigt και Burger. (Με τροποποίηση Steffe, 1996).

Η ανάλυση των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των ζυμαριών δίνει πληροφορίες σχετικά με την επίδραση και την λειτουργικότητα των επιμέρους συστατικών στις ρεολογικές ιδιότητες τους.

Για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, είναι απαραίτητη η ισορροπία μεταξύ του ιξώδους και του ελαστικού χαρακτήρα του ζυμαριού. Το ζυμάρι πρέπει να είναι αρκετά ιξώδες, για να συγκρατεί το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται κατά την επώαση της μαγιάς και ικανοποιητικά ελαστικό, ώστε να επιτρέπει στις φυσαλίδες του αέρα να διογκώνονται και να συσσωματώνονται με άλλες φυσαλίδες κατά τον κλιβανισμό (Onyango et al., 2009b).

3.4 Κέικ και γλυκά αρτοσκευάσματα

3.4.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά κέικ

Τα κέικ και τα παντεσπάνια, αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία από τον άρτο και τα προϊόντα που έχουν υποστεί επώαση, λόγω των διαφορετικών ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. Τα κέικ μπορούν να χαρακτηριστούν ως προϊόντα μεσαίας υγρασίας με τιμές μικρότερες κατά 10-20% από αυτές του άρτου και τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 22–30%. Η κόρα των κέικ έχει μικρότερο πάχος από το αντίστοιχο του άρτου, και ενώ η υγρασία της κόρας είναι μικρότερη από της ψίχας, επέρχεται ισορροπία μεταξύ τους, πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με τον άρτο. Θεωρείται ανεπιθύμητο ποιοτικό χαρακτηριστικό των κέικ, μια σκληρή, τραγανή και ξηρή κόρα. Το χρώμα των κέικ εξαρτάται από τα συστατικά, τα οποία προστίθενται (σοκολάτα, αποξηραμένα φρούτα, ξηροί καρποί), ωστόσο η συνηθέστερη απόχρωση είναι κεχριμπαρένια – καστανή. Η κατανομή των κυψελίδων αέρα στην δομή του κέικ δεν είναι τόσο ομοιόμορφα κατανομημένη, όσο στον άρτο, με εξαίρεση το παντεσπάνι, το οποίο έχει εξίσου καλά καθορισμένη δομή κυψελίδων αέρα. Η διόγκωση των κέικ προέρχεται από την χρήση διογκωτικών παραγόντων και όχι από την επώαση μαγιάς. Λόγω των υψηλών ποσοτήτων ζάχαρης και λιπαρών που περιέχουν τα κέικ, η ανάπτυξη του δικτύου της γλουτένης είναι περιορισμένη με αποτέλεσμα η υφή της ψίχας κατά την μάσηση να είναι μαλακή και εύθρυπτη. Η υφή της ψίχας του κέικ δεν πρέπει να έχει υψηλή ελαστικότητα και αίσθηση κομμωδούς κατά την μάσηση. Η υγρασία και η

πυκνότητα της ψίχας του κέικ, επηρεάζει το χαρακτηριστικά της υφής κατά τη μάσηση. Ιδιαίτερα χαμηλά ποσοστά υγρασίας, οδηγούν σε σκληρά και εύθρυπτα τελικά προϊόντα, ενώ αν η ψίχα του κέικ χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα, η υφή της τείνει να είναι κολλώδης. Το άρωμα των κέικ, εξαρτάται κατ' αποκλειστικότητα από τα συστατικά που προστίθενται κατά την παρασκευή τους με τα κυριότερα να είναι ξηρά φρούτα, σοκολάτα και ξηροί καρποί. Το κυριότερο χαρακτηριστικό, που διαχωρίζει τα κέικ από τον άρτο είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους, λόγω της χαμηλής τους υγρασίας και της υψηλής περιεκτικότητας σε σάκχαρα, τα οποία μειώνουν την ενεργότητα του νερού και την πιθανότητα ανάπτυξης μικροοργανισμών (Cauvain & Young, 2006).

3.4.2 Διαδικασία παραγωγής κέικ

Το πρώτο στάδιο στην παραγωγική διαδικασία του κέικ είναι η ανάμιξη των συστατικών. Χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι ανάμιξης που διαφέρουν ως προς τη σειρά προσθήκης των συστατικών, τη διάρκεια και το ρυθμό ανάμιξης. Οι δυο κυριότεροι μέθοδοι ανάμιξης είναι η μέθοδος ενός σταδίου και η μέθοδος κρεμοποίησης (sugar batter method) και διαφέρουν στον μηχανισμό ενσωμάτωσης αέρα στη ζύμη του κέικ (Wilderjans et al., 2013). Ο πρώτος στόχος του σταδίου ανάμιξης είναι η πλήρης διασπορά όλων των συστατικών σε μια ομοιόμορφη και λεία ζύμη κέικ και ο σχηματισμός σταθερού γαλακτώματος μεταξύ των δύο κύριων μη αναμίξιμων συστατικών, το λίπος και το νερό. Επιπλέον με την ανάμιξη επιτυγχάνεται ενσωμάτωση αέρα με την μορφή φυσαλίδων, οι οποίες διασπείρονται στη ζύμη του κέικ και θα δράσουν ως πυρήνες διόγκωσης συμβάλλοντας στην τελική δομή του κέικ (Conforti, 2006).

Η μέθοδος κρεμοποίησης έχει ως πρώτο στάδιο την ανάμιξη του λιπαρού με την ζάχαρη, ώστε να σχηματιστεί ένα ελαφρύ και αφράτο μίγμα που προσομοιάζει με κρέμα (κρεμοποίηση). Σε αυτό το στάδιο εισάγονται μικρές φυσαλίδες αέρα στα διάσπαρτα σωματίδια του λιπαρού. Μετά το στάδιο της κρεμοποίησης προστίθενται τα αυγά σε μικρές μερίδες ώστε να ενσωματωθούν στο γαλάκτωμα και να μην διασπαστούν. Τέλος προστίθενται το γάλα και το αλεύρο. Η ζύμη του κέικ είναι γαλάκτωμα ελαίου σε νερό (oil in water emulsion), στο οποίο οι φυσαλίδες αέρα είναι διεσπαρμένες στη λιπαρή φάση (λιπαρή ουσία και λιπαρά αυγού και γάλακτος) και τα υπόλοιπα υλικά διεσπαρμένα ή διαλυμένα στην υδατική φάση (νερό από το γάλα και τα αυγά) (Shepherd & Yoell, 1976).

Η μέθοδος ενός σταδίου περιλαμβάνει την ταυτόχρονη ανάμιξη όλων των συστατικών με αποτέλεσμα ο αέρας να εγκλωβίζεται στην υδατική φάση. Με την ανάμιξη η κρύσταλλοι του λιπαρού έρχονται σε επαφή με τις φυσαλίδες αέρα, απορροφώνται στην επιφάνειά τους αποτρέποντας την συνένωσή τους (Brooker, 1993).

Στο στάδιο του κλιβανισμού λαμβάνει χώρα η αύξηση του όγκου, ο σχηματισμός και η κασάνωση της κρούστας, πήξη πρωτεϊνών, ζελατινοποίηση του αμύλου και απώλεια υγρασίας. Αρχικά τα λιπαρά τήκονται λόγω θερμοκρασιακής αύξησης και το ιξώδες της ζύμης μειώνεται. Ως εκ τούτου το ιξώδες της ζύμης είναι καθοριστικός παράγοντας για την επίτευξη της μέγιστης διόγκωσης του κέικ, καθώς πρέπει να είναι

αρκετά υψηλό ώστε να ελαχιστοποιείται η συνένωση των φυσαλίδων και η διαφυγή του αερίου (Wilderjans, Pareyt, Goesaert et al., 2008). Παράλληλα προκαλείται διόγκωση των φυσαλίδων στη ζύμη λόγω του ατμού και του CO₂ που παράγεται από τους παράγοντες διόγκωσης. Καθώς η θερμοκρασία της ζύμης συνεχίζει να αυξάνεται επέρχεται ζελατινοποίηση του αμύλου και μετουσίωση των πρωτεϊνών αυξάνοντας το ιξώδες της ζύμης, ενώ η διόγκωση των φυσαλίδων συνεχίζεται λόγω των πιέσεων από τα αέρια διόγκωσης (Wilderjans et al., 2010). Η συνεχής αύξηση της πίεσης σε συνδυασμό με την ζελατινοποίηση του αμύλου διαρρηγνύουν τις διακριτές κυψελίδες αέρα της ζύμης σχηματίζονται ένα δίκτυο συνδεδεμένων κυψελίδων, το οποίο επιτρέπει την αποβολή του ατμού από την δομή του κέικ (Kiosseoglou & Paraskevoudou, 2006). Η τελική δομή του κέικ σταθεροποιείται με την πλήρη ζελατινοποίηση του αμύλου και την πήξη των πρωτεϊνών και μπορεί να χαρακτηριστεί ως σπογγώδης με συνεχές δίκτυο αλληλοσυνδεδεμένων κυψελίδων αέρα.

Με την απομάκρυνση του κέικ από τον κλίβανο, η δομή του είναι εύθραυστη και μπορεί να καταρρεύσει λόγω της συμπίκνωσης των περιεχόμενων αερίων από την μείωση της θερμοκρασίας. Η δομική αντοχή της ψίχας εξαρτάται από το βαθμό της ζελατινοποίησης του αμύλου και το βαθμό πήξης των πρωτεϊνών, καθώς μεγαλύτερος βαθμός πήξης των πρωτεϊνών οδηγεί στον σχηματισμό παχύτερων τοιχωμάτων των κυψελίδων αέρα (Gough et al., 1978); Wilderjans et al., 2008). Οι κύριοι μηχανισμοί που οδηγούν στην σταδιακή αύξηση της σκληρότητας της ψίχας του κέικ είναι η μετανάστευση του νερού προς το περιβάλλον και η αναδιάταξη του αμύλου.

3.4.3 Συστατικά του κέικ και λειτουργίες τους

3.4.3.1 Λιπαρά

Η ενσωμάτωση λιπαρών κατά την ανάπτυξη του κέικ επιτελεί τρεις σημαντικές λειτουργίες: α) βοηθά στην ενσωμάτωση αέρα κατά την ανάμιξη (αερισμός), β) επικαλύπτει την πρωτεΐνη και το άμυλο, διακόπτοντας τη συνέχεια του δικτύου της πρωτεΐνης-αμύλου δημιουργώντας μαλακή υφή και την μάσηση και γ) σταθεροποιεί την δομή του κέικ βοηθώντας στην διατήρησή του αέρα κατά τον κλιβανισμό (Pyle, 1988). Στα κέικ χρησιμοποιούνται κυρίως πλαστικά λιπαρά που περιέχουν κάποια ποσότητα νερού και γαλακτωματοποιητή (βοηθά στη διασπορά του νερού στο λιπαρό και στη διατήρηση της σταθερότητας του μίγματος κατά την αποθήκευση).

Κατά την κρεμοποίησης του λιπαρού (ανάμιξη του μίγματος σακχαρόζης-λιπαρού), επέρχεται αποσταθεροποίηση των λιποσφαιρίων, η οποία διευκολύνει την ενσωμάτωση φυσαλίδων αέρα. Ο εγκλωβισμένος αέρας παρέχει το πλαίσιο για την διόγκωση του κέικ από τα αέρια του διογκωτικού παράγοντα και από τους υδρατμούς που απελευθερώνονται κατά τον κλιβανισμό, καθώς επιπλέον φυσαλίδες αέρα δεν δημιουργούνται κατά τον κλιβανισμό (Brooker, 1996). Ο απαιτούμενος αερισμός του κέικ εξαρτάται από την αναλογία στερεών και την μορφή των κρυστάλλων του λιπαρού. Έτσι, ένα έλαιο δεν θα παγιδεύσει αέρα στον ίδιο βαθμό με ένα στερεό λιπαρό, αλλά και ένα λιπαρό με πολύ υψηλό επίπεδο στερεών θα δημιουργήσει ένα πολύ πυκνό κέικ. Τα στερεά του λιπαρού βοηθούν στον εγκλωβισμό του αέρα, ενώ η

πλαστικότητα του βοηθά στο διασκορπισμό του αέρα στο μίγμα, αφού λόγω αυτής μπορεί να περικλείονται (περικυκλώνονται) οι φυσαλίδες αέρα. (Bennion & Bamford, 1997). Τα λιπαρά προσδίδουν επίσης μαλακή υφή στο κέικ εμποδίζοντας το σχηματισμό συνεκτικής και ανθεκτικής μάζας, όπως του άρτου. Ουσιαστικά τα λιπαρά παρεμβάλλονται μεταξύ των πρωτεϊνών και του αμύλου του αλεύρου, επικαλύπτουν τα μόρια της πρωτεΐνης με μία λεπτή μεμβράνη, εμποδίζοντας τα να έρθουν σε επαφή με το νερό και να σχηματίσουν πλέγμα, ευνοώντας το σχηματισμό μη συνεκτικής μάζας. Τέλος μετά τον κλιβανισμό του κέικ, ένα μέρος των λιπαρών καλύπτει τις κυψελίδες του αέρα, εμποδίζοντας την απώλεια υγρασίας κατά την αποθήκευση και διατηρώντας την τρυφερή υφή του κέικ (Shepherd & Yoell, 1976).

3.4.3.2 Γλυκαντικές Ύλες – Σάκχαρα

Η σακχαρόζη ή ζάχαρη είναι η πιο συνήθης γλυκαντική ύλη που χρησιμοποιείται στην παρασκευή κέικ. Άλλες γλυκαντικές ύλες είναι η φρουκτόζη, η γλυκόζη (δεξτρόζη), το μέλι και η μελάσα, ενώ ως εναλλακτικά γλυκαντικά μπορούν να αναφερθούν πολυόλες (μαννιτόλη, μαλτιτόλη, σορβιτόλη, ερυθριτόλη, ξυλιτόλη κλπ.) και γλυκαντικά μεγάλης έντασης (ακετοσουλφαμικό κάλιο, σουκραλόζη, ασπαρτάμη, κυκλαμικό οξύ, σακχαρίνη κλπ.).

Παραδοσιακά στα κέικ χρησιμοποιείται η σακχαρόζη, η οποία εκτός από την συμβολή της στη γεύση, έχει και λειτουργικό ρόλο στην παρασκευή των κέικ, επηρεάζοντας τον όγκο, την υγρασία, την υφή, το χρώμα και την εμφάνισή τους. Τα εναλλακτικά γλυκαντικά χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατα της σακχαρόζης σε κέικ χαμηλού θερμιδικού περιεχομένου ή σε κέικ που απευθύνονται σε ειδικές ομάδες πληθυσμού (π.χ. διαβητικούς).

Η κοκκομετρία της σακχαρόζης (μέγεθος των κρυστάλλων) επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό με τον οποίο διαλύεται στην υγρή φάση της ζύμης του κέικ, μετά την προσθήκη του αυγού, και επομένως την λειτουργικότητά της. Επιπλέον η σακχαρόζη λόγω της υδροσκοπικότητάς της ανταγωνίζεται την πρωτεΐνη στην απορρόφηση νερού, περιορίζοντας τον σχηματισμό του πρωτεϊνικού πλέγματος κατά το στάδιο της ανάμιξης, συμβάλλοντας στην τρυφερή υφή του κέικ (Meiske et al., 1960).

Η παρουσία της σακχαρόζης καθυστερεί επίσης την ζελατινοποίηση του αμύλου και την μετουσίωση (πήξη) των πρωτεϊνών κατά τον κλιβανισμό επιτρέποντας στις φυσαλίδες αέρα να διογκωθούν σωστά λόγω του ατμού πριν από τη σταθεροποίηση της δομής του κέικ (structure setting). Για να επιτευχθεί η βέλτιστη διόγκωση του κέικ είναι σημαντικό η ζελατινοποίηση του αμύλου και η μετουσίωση των πρωτεϊνών να συμβαίνουν ταυτόχρονα (Donovan, 1977). Η αναλογία σακχαρόζης προς νερό μέχρι 50% προκαλεί αύξηση του όγκου του κέικ και δίνει ενιαία και ομοιόμορφη κατανομή των πόρων της ψίχας (Kim & Walker, 1992). Αντίθετα, υψηλότερα επίπεδα σακχαρόζης αυξάνουν τη θερμοκρασία ζελατινοποίησης του αμύλου σε σημείο όπου η δομή του κέικ καταρρέει κατά τον κλιβανισμό. Ως εκ τούτου η ποσότητα της σακχαρόζης μπορεί να ρυθμίσει την διόγκωση και σταθεροποίηση της δομής του κέικ. Εκτός από τη συμβολή της στη διόγκωση και στην υφή του κέικ, η σακχαρόζη λόγω

της υγροσκοπικής της φύσης συμβάλλει στη διατήρηση της υγρασίας του κέικ, με αποτέλεσμα την αύξηση της διατηρησιμότητάς του.

3.4.3.3 Αυγά

Τα κύρια συστατικά του αυγού είναι το λεύκωμα και ο κρόκος τα οποία διαχωρίζονται από τη μεμβράνη λεκιθίνης. Τα αυγά λόγω του υψηλού περιεχομένου τους σε νερό (75%) είναι μαζί με το γάλα τα κύρια συστατικά που προσδίδουν υγρασία στη ζύμη του κέικ.

Άλλες μορφές προσθήκης του αυγού στις συνταγές κέικ είναι υγρό αυγό ψυγμένο ή κατεψυγμένο για να αποφεύγονται μικροβιολογικές επιμολύνσεις, υγρό λεύκωμα (για προϊόντα που δεν είναι επιθυμητό το κιτρινωπό χρώμα), αφυδατωμένη σκόνη αυγού και αφυδατωμένη σκόνη αλβουμίνης. Τα αυγά συμβάλλουν στον σχηματισμό δομής του κέικ, μέσω της μετουσίωσης (λόγω της θερμότητας) και της πήξης των πρωτεϊνών τους. Οι πρωτεΐνες του λευκώματος του αυγού χάρη στις αφριστικές τους ιδιότητες συγκρατούν υψηλά ποσοστά αλεύρου και ζάχαρης, μέχρι την πήξη τους κατά τον κλιβανισμό, διαμορφώνοντας την τελική δομή και προσδίδοντας σκληρότητα στη ψίχα του κέικ. Επιπλέον, κατά την παρασκευή κέικ, τα αυγά προστίθενται σταδιακά σε μίγματα λίπους-ζάχαρης, ενισχύοντας τη διαμόρφωση ενός σταθερού γαλακτώματος. Αυτό γίνεται λόγω των λιποπρωτεϊνών. Οι λιποπρωτεΐνες του κρόκου μειώνουν την επιφανειακή τάση στην διεπιφάνεια λιπαρής- υδατικής φάσης κατά την γαλακτωματοποίηση του λιπαρού, συνεισφέροντας στην ενσωμάτωση και διατήρηση μεγάλων ποσοτήτων αέρα στην λιπαρή φάση. Επιπροσθέτως οι πρωτεϊνικές μεμβράνες των διεσπαρμένων στην ζύμη φυσαλίδων, διατηρούν τα αέρια διόγκωσης που παράγονται από τους διογκωτικούς παράγοντες, τον ατμό και τον εγκλωβισμένο αέρα, αυξάνοντας τον όγκο του κέικ και συνεισφέρουν σε μια ομοιόμορφη κατανομή των κυψελίδων αέρα στην ψίχα με το να ελαχιστοποιούν τη συνένωση των μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα σε μεγαλύτερες (Wilderjans et al., 2013).

Τα αυγά διαμορφώνουν και την υφή του κέικ λόγω των πρωτεϊνών τους που πηζουν σταθεροποιώντας τη δομή, αλλά και λόγω του περιεχόμενου νερού τους που συμβάλλει στην αύξηση του διαθέσιμου νερού για την ζελατινοποίηση του αμύλου, δημιουργώντας την χαρακτηριστική τρυφερή και μαλακή υφή. Ο κρόκος συμβάλλει κυρίως στη δημιουργία τρυφερής υφής, λόγω της περιεκτικότητάς του σε λιπίδια.

Τέλος, τα αυγά συμβάλλουν στην ανάπτυξη της γεύσης, του αρώματος και του χρώματος του κέικ (της ψίχας λόγω των χρωστικών του κρόκου και της κρούστας λόγω των σακχάρων του λευκώματος που συμμετέχουν στις αντιδράσεις καστανώσης) (Conforti, 2006).

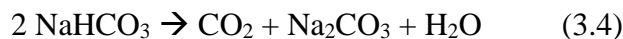
3.4.3.4 Διογκωτικοί παράγοντες

Οι διογκωτικοί παράγοντες (leavening agents) είναι ουσίες που προκαλούν αύξηση του όγκου του ζυμαριού των αρτοσκευασμάτων, δίνοντας πορώδη δομή στο τελικό προϊόν. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διογκωτικών παραγόντων όπως βιολογικοί (μαγιά αρτοποιίας-*Saccharomyces cerevisiae*), χημικοί (όξινο ανθρακικό νάτριο, όξινο

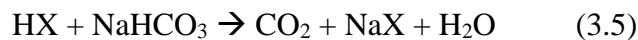
ανθρακικό αμμώνιο), αέρας (μηχανικά ενσωματωμένος) ή ατμός (από εξάτμιση νερού).

Για την αύξηση του όγκου του κέικ χρησιμοποιούνται χημικοί διογκωτικοί παράγοντες (baking powder, μαγειρική σόδα) που προκαλούν την έκλυση CO₂, το οποίο αυξάνει το μέγεθος των φυσαλίδων αερίου που δημιουργούνται κατά την ανάμιξη.

Στην παρασκευή του κέικ χρησιμοποιείται το όξινο ανθρακικό νάτριο (μαγειρική σόδα) σε συνδυασμό με διάφορα οξέα ή η σκόνη εμπορίου baking powder. Σύμφωνα με την αντίδραση 3.4, κατά τη θέρμανση, το όξινο ανθρακικό νάτριο δεν απαιτεί την ύπαρξη οξέος για το σχηματισμό CO₂ (Penfield et al., 1990).



Ωστόσο παράγεται ουδέτερο ανθρακικό νάτριο, το οποίο προσδίδει ανεπιθύμητη γεύση στο προϊόν ενώ μπορεί να μεταβάλει το χρώμα της κόρας λόγω της αλκαλικότητάς του. Για το λόγο αυτό η χρήση του όξινου ανθρακικού νατρίου γίνεται σε συνδυασμό με οξύ και παράγεται CO₂ και άλας νατρίου της όξινης ένωσης (3.5).



Τα οξέα που χρησιμοποιούνται μπορούν να αντιδρούν είτε σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος (ταχείας δράσης) κατά την ανάμιξη, είτε κατά τη διάρκεια του ψησίματος του κέικ (βραδείας δράσης).

Η σκόνη baking powder αποτελείται από ένα οξύ (π.χ. κρεμόριο – cream of tartar), μία βάση (π.χ. μαγειρική σόδα) και ένα αφυδατικό μέσο (π.χ. άμυλο). Το κρεμόριο (cream of tartar) από μόνο του δεν έχει διογκωτικές ιδιότητες παρουσία όμως υγρασίας, αντιδρά με το όξινο ανθρακικό νάτριο (μαγειρική σόδα) απελευθερώνοντας διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο διαχέεται στις εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα της ζύμης του κέικ, διογκώνοντάς τες. Το άμυλο δρα ως αντισυσσωματικός παράγοντας κρατώντας διαχωρισμένη τη μαγειρική σόδα από το κρεμόριο, απορροφώντας την υγρασία του περιβάλλοντος και εμποδίζοντας την έναρξη της αντίδρασης μεταξύ του κρεμορίου και της μαγειρικής σόδας.

Το επίπεδο προσθήκης του διογκωτικού παράγοντα κατά την παρασκευή του κέικ έχει σημαντική επίδραση στον τελικό όγκο και την ποιότητα του προϊόντος. Κέικ χωρίς προσθήκη διογκωτικών παραγόντων εμφανίζουν μειωμένη διόγκωση και πυκνή, συνεκτική και σκληρή υφή ψίχας. Η αύξηση των επιπέδων προσθήκης διογκωτικού παράγοντα αρχικά οδηγεί στην αύξηση της διόγκωσης του κέικ, ωστόσο υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό προσθήκης διογκωτικού παράγοντα για το οποίο σημειώνεται ο μέγιστος όγκος, συνήθως στο 2.5% επί του αλεύρου. Περαιτέρω αύξηση του περιεχόμενου διογκωτικού παράγοντα οδηγεί σε κατάρρευση της δομής και σε τραχιά υφή ψίχας (Cauvain & Young, 2006).

3.4.4 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ζύμης κέικ

Η γνώση των ρεολογικών ιδιοτήτων των ζυμαριών του κέικ είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της ποιότητας των τελικών σκευασμάτων. Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την διόγκωση των τελικών προϊόντων είναι το ιξώδες της ζύμης. Ο ρυθμός ανάδυσης των φυσαλίδων είναι αντιστρόφως ανάλογος με το ιξώδες της ζύμης. Ζύμη κέικ με χαμηλό ιξώδες επιτρέπει την διαφυγή του CO₂ και των υδρατμών που παράγονται κατά τον κλιβανισμό με αποτέλεσμα τον περιορισμό της διόγκωσης του κέικ ή ακόμα και πιθανή κατάρρευση της δομής του κέικ. Αντιθέτως το υψηλό ιξώδες εμποδίζει τη συνένωση των φυσαλίδων του παγιδευμένου αέρα μειώνοντας την διόγκωση του κέικ. Το βέλτιστο ιξώδες της ζύμης του κέικ δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ χαμηλό, ώστε να αδυνατεί να συγκρατήσει τα αέρια στο εσωτερικό της ζύμης, ούτε πολύ υψηλό ώστε να περιορίζει την διόγκωση της ζύμης κατά τον κλιβανισμό (μειωμένη επεκτασιμότητα) (Sahin, 2008).

3.5 Μηχανικές ιδιότητες – υφή αρτοσκευασμάτων

Η υφή των αρτοσκευασμάτων αποτελεί σημαντικό παράγοντα καταναλωτικής αποδοχής των προϊόντων. Η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των αρτοσκευασμάτων είναι σημαντική για:

- Την διασφάλιση της ποιότητας των αρτοσκευασμάτων στην βιομηχανία τροφίμων (αρτοποιίας)
- Στην εκτίμηση της επίδρασης των αλλαγών των συστατικών στη ζύμη του άρτου και στις συνθήκες επεξεργασίας του
- Στον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των αρτοσκευασμάτων με βάση την αποδοχή τους από τους καταναλωτές.

Οι μηχανικές ιδιότητες των αρτοσκευασμάτων είναι συνάρτηση της δομής της ψίχας. Η απαλότητα της ψίχας του άρτου μπορεί να αποδοθεί στην πορώδη δομή του. Υψηλής ποιότητας αρτοσκευάσματα χαρακτηρίζονται από υψηλό πορώδες με ομοιόμορφα κατανεμημένους και όμοιου μεγέθους μικρούς πόρους (Liu & Scanlon, 2003).

Τα βασικά είδη δοκιμών με τα οποία προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των αρτοσκευασμάτων είναι συμπίεσης, εφελκυσμού και διάτμησης.

Η δοκιμή συμπίεσης είναι η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των αρτοσκευασμάτων, από την οποία μπορούν να προσδιοριστούν η τάση διάρρηξης σ_c (collapse stress) και ο δείκτης ελαστικότητας του υλικού E (Young's modulus).

Η τάση διάρρηξης μετράται σε παραμόρφωση 40% και αποτελεί μια εμπειρική μέτρηση, η οποία φαίνεται να συσχετίζεται με την σκληρότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων. Αύξηση της παραμόρφωσης σε υψηλότερα ποσοστά οδηγεί σε αύξηση της τάσης, λόγω πύκνωσης «συμπίεση των κυτταρικών τοιχωμάτων των κυψελίδων αέρα). Ο δείκτης ελαστικότητας, E ορίζεται ως η κλίση του αρχικού

γραμμικού τμήματος και εκφράζει την ακαμψία (Liu & Scanlon, 2003). Τυπικό διάγραμμα συμπίεσης ψίχας αρτοσκευασμάτων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.6**.

Στην δοκιμή συμπίεσης, το δείγμα τοποθετείται μεταξύ παράλληλων πλακών και υφίσταται μονοαξονική συμπίεση. Η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων της ψίχας των άρτων μέσω της δοκιμής συμπίεσης έχει βρεθεί να συσχετίζεται ανάλογα με την οργανοληπτική αξιολόγηση των προϊόντων μέσω αφής και αίσθησης στο στόμα (Brady & Mayer, 1985).

Εκτός από την μέτρηση της σκληρότητας της ψίχας, με δοκιμή συμπίεσης μπορεί να μετρηθεί και η ελαστικότητα της ψίχας με βάση τεστ χαλάρωσης της τάσης (Stress relaxation test). Συγκεκριμένα το δείγμα υπόκειται σε σταθερή παραμόρφωση (εντός της ιξωδοελαστικής περιοχής) και καταγράφεται η δύναμη ή η τάση αντίστασης ως προς το χρόνο. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να αναλυθούν με βάση το κανονικοποιημένο και γραμμικοποιημένο μοντέλο του Peleg (1979):

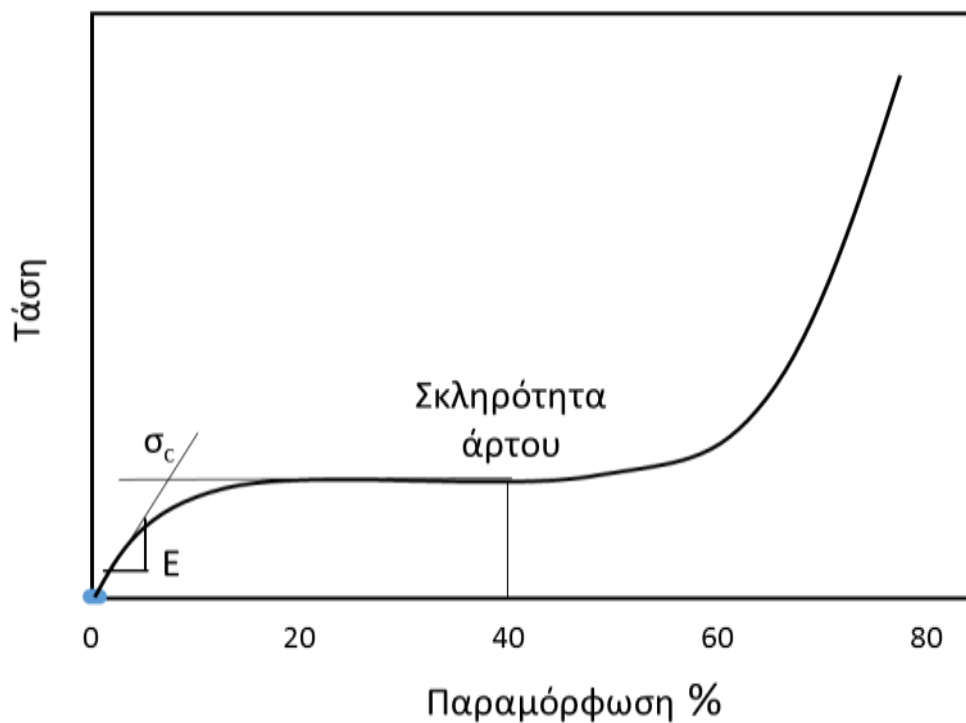
$$\frac{F_0 t}{F_0 - F(t)} = k_1 + k_2 t \quad (3.6)$$

Όπου F_0 είναι η αρχική δύναμη, $F(t)$ η στιγμιαία δύναμη σε χρόνο t και $k_1(s)$, k_2 σταθερές που σχετίζονται με τον ρυθμό απόσβεσης της τάσης και την εναπομένουσα τάση στο τέλος του πειράματος.

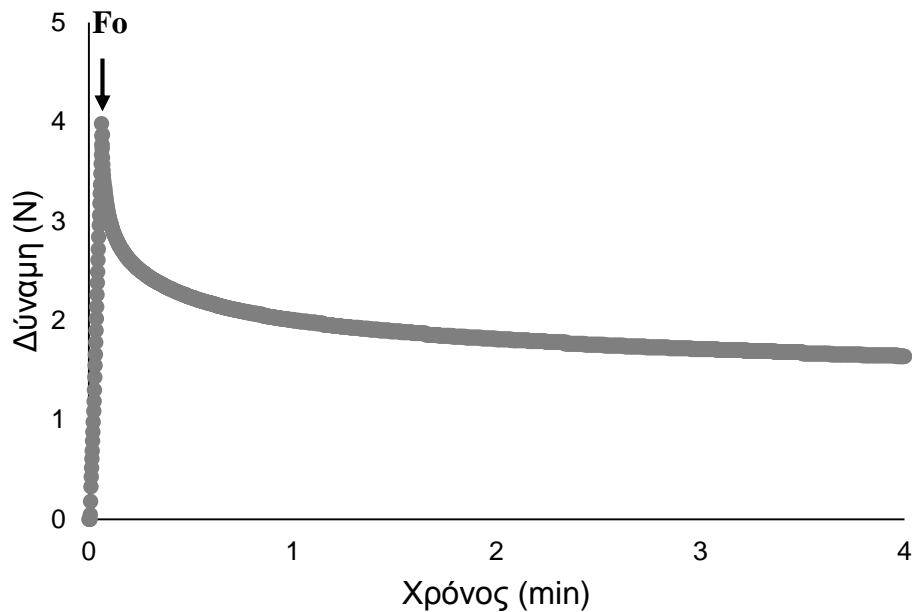
Υψηλές τιμές k_1 υποδεικνύουν χαμηλό ρυθμό απόσβεσης της τάσης και συνδέονται με έντονα ελαστικό χαρακτήρα. Η σταθερά k_2 σχετίζεται με την εναπομένουσα τάση και το ποσοστό απόσβεσης της τάσης κατά την φάση της χαλάρωσης, υποδεικνύοντας τον στερεό χαρακτήρα του δείγματος. Τέλος το ποσοστό χαλάρωσης της τάσης, το οποίο προκύπτει απευθείας από την καμπύλη χαλάρωσης περιγράφει την σχετική ελαστικότητα του δείγματος. Στα αρτοσκευάσματα οι χαμηλές τιμές ελαστικότητας της ψίχας συνδέονται με μειωμένη ικανότητα του δείγματος να ανακτήσει το αρχικό του σχήμα μετά την παραμόρφωση. Τυπικό διάγραμμα για τεστ χαλάρωσης αρτοσκευασμάτων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.7**.

Η δοκιμή εφελκυσμού δεν χρησιμοποιείται συχνά για την μέτρηση της υφής των αρτοσκευασμάτων, λόγω της δυσκολίας τοποθέτησης του δείγματος στις λαβές «δαγκάνες» εφελκυσμού, ενώ πρέπει να διασφαλίζεται και η απουσία ενδοτικότητας (παραμόρφωση) του δείγματος στις λαβές καθώς μπορεί να δημιουργηθεί κατάρρευση της δομής στα σημεία επαφής με τις λαβές (Chen et al., 1994; Luyten et al., 1992). Επιπλέον για την επαναληψιμότητα των μετρήσεων είναι απαραίτητη η τήρηση σταθερών διαστάσεων δείγματος, το οποίο είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε πολλά είδη τροφίμων (Goh, Charalambides, & Williams, 2000). Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η χρήση της δοκιμής εφελκυσμού υπερέχει σε σχέση με την δοκιμή συμπίεσης, στο ότι παρέχει παραμέτρους εύκολες στην ερμηνεία, ενώ αποδίδει καλύτερα τις θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (Nussinovitch, Roy, & Peleg, 1990). Στην περίπτωση των αρτοσκευασμάτων, το φορτίο του εφελκυσμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του απαιτούμενου φορτίου για την θραύση της ψίχας, προσδιορίζοντας την συνοχή και την αντίσταση στην θραύση (Scanlon, Fahloul, & Sapirstein, 1997).

Η δοκιμή της διάτμησης (δυναμική μέθοδος) έχει χρησιμοποιηθεί για την μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων της ψίχας αρτοσκευασμάτων. Οι Persaud et al., (1990) μελέτησαν το μαγιάτεμα της ψίχας αρτοσκευασμάτων με χρήση ρεομέτρου προσδιορίζοντας τους συντελεστές G' και G'' ως προς την θερμοκρασία αποθήκευσης και την θέση του δείγματος της ψίχας στην φρατζόλα του άρτου που παρασκευάστηκε. Πιο πρόσφατα οι Angioloni & Collar (2009b) μέτρησαν τις ρεολογικές ιδιότητες ψίχας αρτοσκευασμάτων ως προς το χρόνο αποθήκευσης με χρήση αναλυτή υφής και εφαρμογή ημιτονοειδούς διατμητικής τάσης. Επιπλέον βρήκαν σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης των αποτελεσμάτων υφής από τις στατικές μετρήσεις (δοκιμή συμπίεσης), τις δυναμικές μετρήσεις και την οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων.



Σχήμα 3.6 Τυπικό διάγραμμα συμπίεσης ψίχας αρτοσκευασμάτων. (Με τροποποίηση Liu & Scanlon, 2003).



Σχήμα 3.7 Τυπικό διάγραμμα για τεστ χαλάρωσης αρτοσκευασμάτων. (Χρησιμοποιήθηκε δείγμα ψίχας άρτου με λόγο ρυζάλευρο/χαρουπάλευρο 85/15 και 110% περιεκτικότητα σε νερό).

3.6 Παλαίωση αρτοσκευασμάτων

Ο όρος παλαίωση (staling) χρησιμοποιείται για να περιγράψει φυσικοχημικές αλλαγές που εμφανίζονται στα αρτοσκευάσματα κατά την αποθήκευσή τους μειώνοντας την καταναλωτική τους αποδοχή. Η παλαίωση είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει την απώλεια και την ανακατανομή υγρασίας σε συνδυασμό με την αναδιάταξη (retrogradation) του αμύλου, και οδηγεί σε υποβάθμιση κυρίως της υφής των αρτοσκευασμάτων. Οι σημαντικότερες αλλαγές κατά την παλαίωση των αρτοσκευασμάτων είναι η μειωμένη τραγανότητα της κόρας, η σκληρή και ανελαστική υφή της ψίχας και η απώλεια αρώματος (Hoseney, 1994). Ο ρυθμός παλαίωσης δεν είναι ο ίδιος για όλους του τύπους των αρτοσκευασμάτων, με την παλαίωση στα κέικ να συμβαίνει με βραδύτερο ρυθμό σε σχέση με τον άρτο λόγω του χαμηλότερου ποσοστού αλεύρου και του υψηλότερου ποσοστού λιπαρού που περιέχουν. Το χαμηλότερο ποσοστό αλεύρου συνεπάγεται χαμηλότερο ποσοστό αμύλου, οπότε και λιγότερου αναδιαταγμένου αμύλου που συμβάλλει καθοριστικά στην παλαίωση. Επιπλέον το υψηλό ποσοστό λιπαρού δημιουργεί περισσότερα σύμπλοκα αμυλόζης-λιπαρού κατά τον κλιβανισμό, μειώνοντας την αναδιάταξη του αμύλου.

Στην παλαίωση λαμβάνει χώρα ανακατανομή της υγρασίας και μεταφορά από την ψίχα προς την κόρα με αποτέλεσμα να μειώνεται η τραγανότητα της κόρας και η ψίχα να γίνεται σκληρή και εύθρυπτη (Eliasson & Larsson, 1993).

Επιπλέον η αναδιάταξη του αμύλου παίζει κυρίαρχο ρόλο στην ποιοτική υποβάθμιση των αρτοσκευασμάτων κατά την παλαίωση. Με τον όρο αναδιάταξη αναφέρεται η προοδευτική ένωση των ζελατινοποιημένων τμημάτων του αμύλου σε μια πιο οργανωμένη (ordered) δομή. Πιο αναλυτικά με την αύξηση της θερμοκρασίας

κατά τον κλιβανισμό των αρτοσκευασμάτων το άμυλο διογκώνεται και απορροφά νερό. Μέχρι μια χαρακτηριστική θερμοκρασία για κάθε τύπο αμύλου (θερμοκρασία ζελατινοποίησης) η μεταβολή διόγκωσης του αμύλου είναι αντιστρεπτή. Ωστόσο άνοδος της θερμοκρασίας πάνω από την θερμοκρασία ζελατινοποίησης οδηγεί στην αναντίστροφη καταστροφή της δομής του. Κατά την διαδικασία της ζελατινοποίησης επέρχεται διόγκωση και διάρρηξη των αμυλοκόκκων (λόγω αυξημένης απορρόφησης νερού) και διάχυση αμυλόζης εκτός του κόκκου. Θέρμανση του μίγματος αμύλου-νερού πάνω από τη θερμοκρασία ζελατινοποίησης προκαλεί περαιτέρω διόγκωση των κόκκων του αμύλου, απώλεια της κρυσταλλικότητας και δημιουργία ημιδιαφανούς πάστας υψηλού ιξώδους. Η πάστα αμύλου αποτελείται από τη συνεχή φάση της διαχυμένης διαλυτοποιημένης αμυλόζης και μια διεσπαρμένη φάση διογκωμένων και άμορφων αμυλοκόκκων. Με την ψύξη του μίγματος αμύλου σχηματίζεται πηκτή (gel) μέσω δημιουργίας τρισδιάστατου πλέγματος των μορίων της ευθύγραμμης αμυλόζης με εγκλεισμό νερού και των ευθύγραμμων τμημάτων της αμυλοπηκτίνης. Κατά την αποθήκευση της πηκτής, οι πολυσακχαρίτες του αμύλου (κυρίως η αμυλοπηκτίνη), επανασυνδέονται με δεσμούς υδρογόνου προς μία περισσότερο διατεταγμένη ή κρυσταλλική μορφή (αναδιάταξη αμύλου)

Η αναδιάταξη του αμύλου αποτελείται από δύο στάδια: την ταχεία αναδιάταξη της αμυλόζης (σχηματισμός πηκτής), η οποία καθορίζει και την αρχική σκληρότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων και την ανακρυστάλλωση της αμυλοπηκτίνης που θεωρείται υπεύθυνη για τις αλλαγές στη σκληρότητα με την αποθήκευση (Zobel & Kulp, 1996; Gray & BeMiller, 2003).

Τα πιο κοινά όργανα μέτρησης της ζελατινοποίησης, ζελοποίησης και αναδιάταξης του αμύλου ή των αλεύρων αλλά και προϊόντων με βάση το άμυλο αποτελούν ο αμυλογράφος και ο αναλυτής ιξώδους (Rapid Visco Analyser-RVA). Κατά την μέτρηση, το δείγμα υποβάλλεται σε θερμοκρασιακό κύκλο υπό την επίδραση ανάμιξης (διάτμηση), ενώ καταγράφεται η μεταβολή του ιξώδους ως συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας. Τυπικό διάγραμμα μεταβολής του ιξώδους αμύλου με την θερμοκρασία και το χρόνο θέρμανσης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.8**. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της καμπύλης μεταβολής του ιξώδους του αμύλου με την θερμοκρασία και το χρόνο, τα οποία είναι σημαντικά για την ποιότητα των αρτοσκευασμάτων είναι:

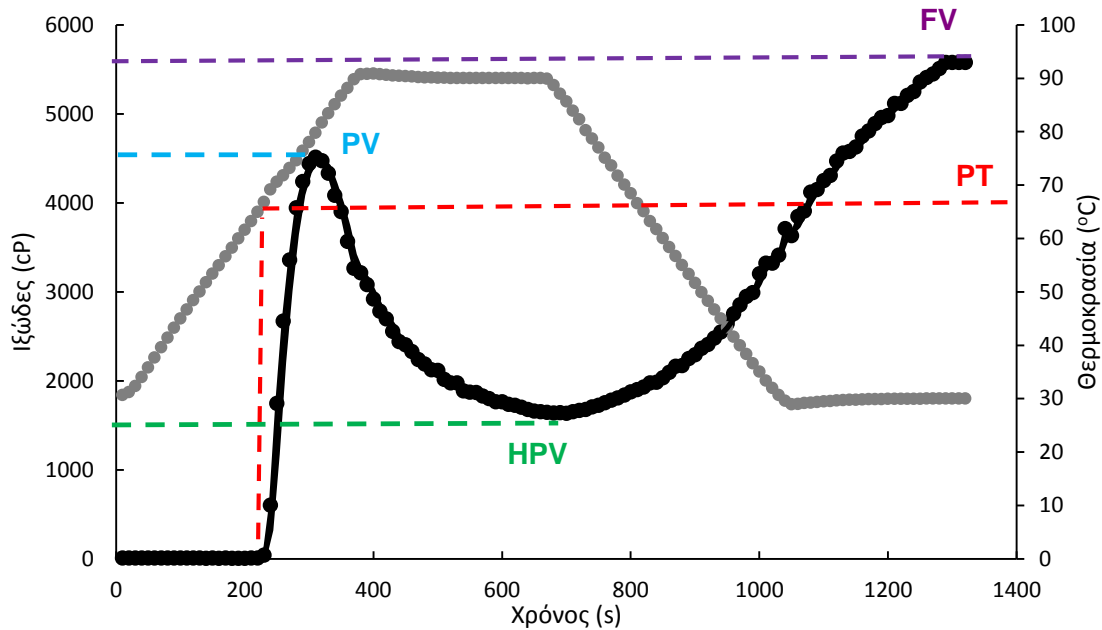
- Η θερμοκρασία σχηματισμού πάστας (Pasting temperature-PT): Οι αμυλόκοκκοι δεν θα πρέπει να ζελατινοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες (με την έναρξη του κύκλου ψήσιματος των αρτοσκευασμάτων), καθώς προκαλείται πρόωμη σταθεροποίηση της δομής του άρτου, η οποία θα παρεμποδίσει την περαιτέρω διόγκωσή του κατά τον κλιβανισμό (oven-spring).
- Το μέγιστο ιξώδες (Peak viscosity-PV): υποδηλώνει την ικανότητα συγκράτησης νερού του αμύλου και την ικανότητα των αμυλόκοκκων να διογκώνονται. Χαμηλές τιμές μέγιστου ιξώδους συνδέονται με μειωμένα ποσοστά εκλυόμενης αμυλόζης, η οποία δημιουργεί ισχυρή πηκτή μέσω δεσμών υδρογόνου κατά την ψύξη.

- Το ιξώδες θερμής πάστας (Hot paste viscosity-HPV): χαρακτηρίζει το ιξώδες του δείγματος στο τέλος της ισοθερμοκρασιακής περιόδου θέρμανσης.

- Ο βαθμός κατάρρευσης (breakdown): υποδηλώνει την ισχύ του πηγματος του αμύλου σε διατμητική και θερμοκρασιακή καταπόνηση και υπολογίζεται ως η διαφορά του μέγιστου ιξώδους από το ιξώδες θερμής πάστας (PV-HPV). Με την διάρρηξη των αμυλόκοκκων λόγω διόγκωσης επέρχεται έκλυση της αμυλόζης και με την εφαρμογή διατμητικών τάσεων σε υψηλή θερμοκρασία προκαλείται μείωση του ιξώδους του δείγματος λόγω ευθυγράμμισης των μορίων της αμυλόζης στο πηγμα. Ο βαθμός κατάρρευσης, είναι μια σημαντική παράμετρος, στον σχεδιασμό προϊόντων που περιλαμβάνουν ταυτόχρονη θέρμανση και εφαρμογή διατμητικών τάσεων (ανάμιξη), όπως σάλτσες με βάση το άμυλο, ωστόσο στην αρτοποιητική διαδικασία, δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, λόγω απουσίας διατμητικών τάσεων, στην φάση του ψησίματος.

- Το τελικό ιξώδες (Final viscosity-FV): υποδηλώνει την ικανότητα του αμύλου να σχηματίσει ισχυρή πηκτή με την ψύξη. Χαμηλό τελικό ιξώδες συμβολίζει τον σχηματισμό αδύναμης πηκτής και συνδέεται με μειωμένη σκληρότητα στα αρτοσκευάσματα (Collar et al., 2006).

- Ο δείκτης αναδιάταξης του αμύλου (setback): υπολογίζεται ως η διαφορά του τελικού ιξώδους από το ιξώδες θερμής πάστας (FV-HPV). Με την μείωση της θερμοκρασίας επέρχεται ο σχηματισμός πηκτής, μέσω δημιουργίας τρισδιάστατου πλέγματος των μορίων της ευθύγραμμης αμυλόζης με εγκλεισμό νερού και των ευθύγραμμων τμημάτων της αμυλοπηκτίνης. Η δημιουργία πηκτής επηρεάζει τα δομικά χαρακτηριστικά (σκληρότητα) των αρτοσκευασμάτων και αποτελεί δείκτη του ρυθμού παλαίωσης τους. Έχει αναφερθεί συσχέτιση μειωμένων τιμών αναδιάταξης του αμύλου (setback) με αύξηση της διάρκειας ζωής των αρτοσκευασμάτων (Collar et al., 2006)



Σχήμα 3.8 Τυπικό διάγραμμα μεταβολής του ιξώδους αμύλου με την θερμοκρασία και το χρόνο θέρμανσης. (Χρησιμοποιήθηκε διασπορά αμύλου ταπιόκας σε νερό 6% w/w).

3.7 Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης

Η παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης αποτελεί τεχνολογική πρόκληση για τον κλάδο των αρτοποιιών και των τεχνολόγων τροφίμων, καθώς λόγω της απουσίας της γλουτένης, το ζυμάρι που παράγεται δεν έχει τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ζυμαριού από αλεύρι σίτου. Επιπλέον η παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης απαιτεί σημαντικά υψηλότερα ποσοστά νερού σε σχέση με τον συμβατικό άρτο, ώστε να επιτευχθεί τελικό προϊόν με ποιοτικά αποδεκτή υφή ψίχας. Λόγω της απαίτησης υψηλού ποσοστού νερού για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης, η ζύμη που δημιουργείται είναι λιγότερο ελαστική από την ζύμη από αλεύρι σίτου, καθώς μοιάζει με ζύμη για κέικ ενώ είναι και δύσκολη στο χειρισμό (Moore et al., 2004; Onyango et al., 2009a; Hager et al., 2012). Κατόπιν, η ζύμη τοποθετείται σε σκεύος ψησίματος, για το στάδιο της επάσης και του κλιβανισμού, ώστε να ελέγχεται η μορφή και η εμφάνιση του τελικού προϊόντος (Onyango et al., 2011a). Η ζύμη ελεύθερη γλουτένης προκύπτει ως ένα μίγμα νερού, μαγιάς και αλεύρων ελεύθερων γλουτένης, η οποία δεν έχει την δυνατότητα να διατηρήσει το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται κατά την ζύμωση της μαγιάς σε μια συνεκτική δομή, η οποία στην συνέχεια θα διογκωθεί, με αποτέλεσμα το αέριο που παράγεται είτε να διαφεύγει, είτε όσο συγκρατείται να δημιουργεί ασταθείς και ανομοιόμορφες κυψελίδες αέρα (Onyango et al., 2009b).

Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι ο τελικός άρτος να εμφανίζει ποιοτικά ελαττώματα, όπως μειωμένο όγκο, απουσία αφρώδους δομής, εύθρυπτη, ξηρή και κοκκώδη υφή ψίχας, κακή αίσθηση και γεύση στο στόμα αλλά και γρήγορο μπαγιάτεμα.

Σημαντικό πρόβλημα των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης πέραν των υποβαθμισμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών τους είναι και η σημαντικά χαμηλότερη διατροφική τους αξία σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα σίτου.

Για την αντιμετώπιση της ποιοτικής και διατροφικής υποβάθμισης των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης, συνίσταται η χρήση προσθέτων, τα οποία θα δράσουν ως μιμητές της γλουτένης, δίνοντας στη ζύμη ιξωδοελαστικές ιδιότητες, αλλά και η προσθήκη πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά εναλλακτικών αλεύρων ή και συστατικών υψηλής διατροφικής αξίας.

3.8 Η αγορά των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για τα τρόφιμα ελεύθερα γλουτένης. Η αγορά των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης αναμένεται να φτάσει τα 6.2 δις. δολάρια με ετήσιο ποσοστό αύξησης 10.2% μέχρι το 2019. Το 2014, η Βόρεια Αμερική αποτέλεσε την μεγαλύτερη αγορά προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, ακολουθούμενη από την Ευρώπη και την Ασία (στην πλευρά του Ειρηνικού), ενώ αναμένεται και αύξηση της ζήτησης προϊόντων ελεύθερων γλουτένης στις αναπτυσσόμενες χώρες (Marketsandmarkets, 2013).

Αξίζει να σημειωθεί, πως τα τρόφιμα ελεύθερα γλουτένης θεωρούνται πιο υγιεινά από τα συμβατικά τρόφιμα και πως βοηθούν στον έλεγχο του βάρους. Για τους λόγους αυτούς έχει αυξηθεί η κατανάλωσή τόσο από άτομα με κοιλιοκάκη ή δυσανεξία στην γλουτένη, αλλά και από τον γενικό πληθυσμό. Ωστόσο, η αντίληψη αυτή είναι λανθασμένη και εγείρει ανησυχία σχετικά με την διατροφική ισορροπία τόσο των πασχόντων αλλά και των υγιών ατόμων.

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες σχετικά με την διατροφική αξία των εμπορικά διαθέσιμων αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης παγκοσμίως, μπορεί να παρατηρηθεί πως τα διαθέσιμα προϊόντα χαρακτηρίζονται από μειωμένη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, διαιτητικές ίνες και μικροσυστατικά (βιταμίνες, μέταλλα), ενώ περιέχουν υψηλά ποσοστά λίπους και σακχάρων σε σχέση με τα συμβατικά αρτοσκευάσματα σίτου. Πιο συγκεκριμένα, έρευνα εμπορικά διαθέσιμων αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης στην Ισπανία, αναφέρει μειωμένα ποσοστά πρωτεΐνης και αυξημένα κορεσμένα λιπαρά σε άρτο ελεύθερο γλουτένης σε σχέση με άρτο με βάση το σίτο. Η διατροφική σύσταση των εμπορικών αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης προκάλεσε μείωση των ποσοστών κατανάλωσης πρωτεΐνης και διαιτητικών ινών και αύξηση της κατανάλωσης λίπους σε άτομα που ακολουθούσαν δίαιτα ελευθερη γλουτένης και κυρίως στις γυναίκες (Miranda et al., 2014). Επιπλέον, σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο σχετικά με τον εμπλουτισμό αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης σε σίδηρο, θειαμίνη, νιασίνη και ασβέστιο, αναφέρεται πως μόνο τέσσερις από τις δεκατρείς εμπορικές μάρκες αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης προχώρησαν σε εμπλουτισμό των προϊόντων και όχι και στα τέσσερα μικροσυστατικά μαζί, ενώ για τα αρτοσκευάσματα σίτου είναι υποχρεωτικός ο εμπλουτισμός με μικροσυστατικά (Anderson & Holdoway, 2011). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί και για τον Καναδά. Τα εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα ελεύθερα γλουτένης, παρουσίασαν παρόμοια θερμιδική αξία με τα συμβατικά προϊόντα

σίτου, αλλά χαρακτηρίζονται από υψηλότερα ποσοστά λίπους και υδατανθράκων και μικρότερα ποσοστά πρωτεΐνης, σιδήρου και φυλλικού οξέος, ενώ έχουν υψηλότερη τιμή κατά 242% (Stevens & Rashid, 2008; Kulai & Rashid, 2014). Τέλος, μελέτες σχετικά με την διατροφική αξία των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης στην Βραζιλία, αναφέρουν μειωμένα ποσοστά πρωτεΐνης και διαιτητικών ινών στα αρτοσκευάσματα σε σχέση με αντίστοιχα προϊόντα σίτου. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές αναφέρουν ως κύριες πηγές πρώτων υλών των εμπορικών αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης άλευρα ή άμυλα ρυζιού, κασάβας, αραβοσίτου, και πατάτας και την απουσία χρήσης εναλλακτικών αλεύρων υψηλής διατροφικής αξίας, τα οποία βελτιώνουν την οργανοληπτική και διατροφική αξία των προϊόντων (do Nascimento et al., 2013).

3.9 Νομοθεσία αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης

Για αρκετά χρόνια υπήρχε διαφωνία παγκοσμίως σχετικά με το ποιά προϊόντα μπορούν να θεωρηθούν ελεύθερα γλουτένης. Η επιμόλυνση από γλουτένη των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης δεν μπορεί να αποφευχθεί πλήρως, επομένως οι διάφορες έρευνες καθόριζαν διαφορετικό ασφαλές όριο κατανάλωσης γλουτένης από άτομα με κοιλιοκάκη: 100 ppm την ημέρα (30 mg γλουτένης); μεταξύ 10-100 mg γλουτένης ημερησίως ή <50 mg την ημέρα (Collin et al., 2004; Hischenhuber et al., 2006; Catassi et al., 2007).

Πρόσφατα η διαχειριστική αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (FDA, 2013) εξέδωσε κανονισμό που ορίζει τον όρο «χωρίς γλουτένη» για την επισήμανση των τροφίμων. Ο νέος ορισμός παρέχει στους καταναλωτές - ειδικά εκείνους που πάσχουν από κοιλιοκάκη - τη διαβεβαίωση ότι τα προϊόντα με την επισήμανση «χωρίς γλουτένη» είναι αξιόπιστα. Σύμφωνα με τον ορισμό, τα τρόφιμα ελεύθερα γλουτένης, δεν πρέπει να περιέχουν: i) συστατικά από καρπούς που περιέχουν γλουτένη (π.χ. σιτάρι και όλα τα είδη Triticum, όπως σπέλτ, καμούτ, σίκαλη, κριθάρι και τα παράγωγά τους) και δεν έχουν επεξεργαστεί ώστε να αφαιρεθεί η γλουτένη, ii) συστατικά προερχόμενα από καρπούς που περιέχουν γλουτένη (π.χ. άμυλο σίτου), έχουν επεξεργαστεί ώστε να αφαιρεθεί η γλουτένη, αλλά η προσθήκη τους στο τελικό προϊόν οδηγεί στην παρουσία περισσότερων από 20 ppm (ή 20 mg/kg τροφίμου) γλουτένης και iii) συστατικά, τα οποία δεν περιέχουν ενδογενώς γλουτένη, αλλά έχουν επιμολυνθεί από γλουτένη και η ενσωμάτωσή τους στο τελικό προϊόν οδηγεί στην παρουσία περισσότερων από 20 ppm γλουτένης.

Ο FDA έθεσε το περιεχόμενο όριο γλουτένης των τροφίμων που φέρουν την ένδειξη «χωρίς γλουτένη» στα 20 ppm (mg γλουτένης /kg τελικού προϊόντος), καθώς το όριο αυτό είναι το κατώτερο που μπορεί να ανιχνευθεί με αξιόπιστο τρόπο στα τρόφιμα, χρησιμοποιώντας επιστημονικά επικυρωμένες μεθόδους ανάλυσης.

Οι περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες ακολουθούν τον κανονισμό της Επιτροπής Codex Alimentarius (2009a) για την επισήμανση των τροφίμων ελεύθερων γλουτένης (Gluten Regulation EC 41/2009). Σύμφωνα με την οδηγία της Επιτροπής, για να καθοριστεί ένα τρόφιμο ως ελεύθερο γλουτένης πρέπει να αποτελείται αποκλειστικά από: i) συστατικά που δεν περιέχουν προλαμίνες από σιτάρι και όλα τα είδη Triticum, όπως σπέλτ, καμούτ, σίκαλη, κριθάρι και τα παράγωγά τους (π.χ. τριτικάλε) αλλά και

να περιέχει λιγότερο από 20 ppm γλουτένης, ii) να περιέχει συστατικά από σιτάρι και όλα τα είδη Triticum, όπως σπέλτ, καμούτ, σίκαλη, κριθάρι και τα παράγωγά τους (π.χ. τριτικάλε), τα οποία έχουν επεξεργαστεί ώστε να αφαιρεθεί η γλουτένη και το τελικό προϊόν να περιέχει λιγότερο από 20 ppm γλουτένης. Στην ανωτέρω οδηγία αναφέρεται επίσης ότι αν στο τελικό προϊόν περιέχεται από 21 έως 100 ppm γλουτένης, τότε τα προϊόντα μπορούν να αναφέρονται ως « πολύ χαμηλής γλουτένης ».

Τα προϊόντα που πληρούν τις προϋποθέσεις για να θεωρούνται ελεύθερα γλουτένης πρέπει να φέρουν το αναγνωριστικό σύμβολο ενός διαγραμμένου μίσχου δημητριακών (Σχήμα 3.9). Το σύμβολο αυτό είναι σήμα κατατεθέν σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο, καθώς και στις Ηνωμένες Πολιτείες και μπορεί εύκολα να αναγνωριστεί από τα άτομα που ακολουθούν δίαιτα ελεύθερη γλουτένης.



Σχήμα 3.9 Αναγνωριστικό σύμβολο των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης.

3.10 Πρώτες ύλες για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης

3.10.1 Άλευρα και άμυλα ελεύθερα γλουτένης

Παραδοσιακά, τα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης παράγονταν με βάση άλευρα συνήθως αραβόσιτου (καλαμποκιού) και ρυζιού, φυτικών αμύλων (πατάτας, αραβόσιτου ή κασάβας) και με την προσθήκη πρωτεϊνών και υδροκολλοειδών ως δομικών παραγόντων- υποκατάστατων της γλουτένης (Sanchez et al., 2002; Lopez et al., 2004). Ως εκ τούτου, η χρήση εξευγενισμένων αμύλων και αλεύρων οδηγεί στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης χαμηλής διατροφικής αξίας. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες εμπλουτισμού με χρήση εναλλακτικών αλεύρων υψηλής διατροφικής αξίας (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1 Άλευρα και άμυλα που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη προϊόντων ελεύθερων γλουτένης (με τροποποίηση, Capriles & Aréas, 2014).

Συμβατικά άλευρα	Εναλλακτικά άλευρα			
	Άλευρα Ψευδοδημητριακών	Άλευρα Ριζών και Κονδύλων	Άλευρα Ψυχανθών	Άλλα άλευρα
Άλευρο και άμυλο ρυζιού	Αμάρανθος	Κασάβα	Σόγια	Σπόροι κίας
Άλευρο και άμυλο αραβόσιτου	Φαγόπυρο	Γλυκοπατάτα	Ρεβίθι	Σπόροι λιναρόσπορου
Άμυλο πατάτας	Κινόα		Χαρούπι	Άλευρο κάστανου
Άμυλο κασάβας			Φασόλια	Σόργο
Άμυλο σίτου*			Φακές Μπιζέλια	Κεχρί Βρώμη*

* Η ενσωμάτωση αμύλου σίτου και βρώμης στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης πρέπει να εξασφαλίζει το όριο των 20 ppm γλουτένης στο τελικό προϊόν

3.10.1.1 Άλευρο και άμυλο ρυζιού

Το άλευρο ρυζιού (*Oryza sativa*) θεωρείται το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο συστατικό για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης καθώς έχει λευκό χρώμα, ήπια γεύση, είναι εύπεπτο και υποαλλεργικό (Gujral and Rosell, 2004).

Ωστόσο, το ρυζάλευρο παρουσιάζει τεχνολογικούς περιορισμούς στην αρτοποιητική διαδικασία, καθώς οι λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνών του δεν μπορούν να δημιουργήσουν δίκτυο παρόμοιο με αυτό της γλουτένης. Το ρυζάλευρο έχει διαφορετικό ποσοστό αποθηκευτικών πρωτεϊνών σε σχέση με το αλεύρι σίτου. Στο ρυζάλευρο οι κυριότερες αποθηκευτικές πρωτεΐνες είναι οι γλουτελίνες (65–85%), ενώ οι προλαμίνες είναι το μικρότερο κλάσμα (Huebner et al., 1990). Με σκοπό την επίλυση της έλλειψης ιξωδοελαστικότητας ζύμης και την παρασκευή αρτοσκευασμάτων με βελτιωμένο όγκο, υφή ψίχας και διάρκειας ζωής με βάση το ρυζάλευρο χρησιμοποιούνται υδροκολλοειδή, όπως η υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνη (HPMC), κόμμεα χαρουπιού, γκουάρ, ξανθάνης, άγαρ ή καραγεννάνης (Lazaridou et al., 2007).

Η προσθήκη αμύλου ρυζιού σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης βελτίωσε τον όγκο των παραγόμενων αρτοσκευασμάτων και την οργανοληπτική αποδοχή τους από ομάδα μη εκπαιδευμένων δοκιμαστών (Gallagher et al., 2003a). Επιπλέον έχει μελετηθεί η αντικατάσταση του αμύλου σίτου από άμυλο ρυζιού σε ποσοστά 3-9% σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης. Η προσθήκη αμύλου ρυζιού μείωσε την

σκληρότητα της ψίχας και τον ρυθμό παλαίωσης των αρτοσκευασμάτων με τη βέλτιστη αναλογία προσθήκης αμύλου ρυζιού να είναι 6% και με το ποσοστό των διαιτητικών ινών του τελικού προϊόντος να διπλασιάζονται (Gallagher et al., 2003b). Επιπλέον έχει μελετηθεί η προσθήκη καστανού ρυζάλευρου (Renzetti et al., 2008), πίτυρου ρυζιού (Kadan et al., 2001) ή ρυζάλευρου ζελατινοποιημένου σε εξωθητήρα για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης. Συγκεκριμένα η προσθήκη ζελατινοποιημένου ρυζάλευρου στην βασική συνταγή άρτου ελεύθερου γλουτένης με βάση κανονικό ρυζάλευρο μείωσε τον όγκο του τελικού προϊόντος, ωστόσο βελτίωσε το χρώμα της κόρας και την υφή της ψίχας, όντας παρόμοια με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για άρτο με βάση τον σίτο (Clerici et al., 2009).

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως το είδος και η κοκκομετρία του ρυζάλευρου παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα των τελικών αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης. Η χρήση ρυζάλευρου χαμηλής κοκκομετρίας έδωσε αρτοσκευάσματα με μικρό όγκο, ανίκανα να συγκρατήσουν το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται κατά την επώαση της ζύμης ενώ και η ποικιλία του ρυζάλευρου φαίνεται να επηρεάζει το τελικό προϊόν με το μακρύκοκκο ρυζάλευρο (long-grain) να οδηγεί σε τελικά προϊόντα με υψηλή διόγκωση (de la Hera et al., 2013a).

3.10.1.2 Άλευρο και άμυλο αραβοσίτου

Η χρήση του αλεύρου αραβοσίτου (*Zea mays*) είναι περιορισμένη στην αρτοποιία λόγω του αρώματός του και του χαρακτηριστικού κίτρινου χρώματος (Hager et al., 2012). Είναι γνωστό, ότι η προλαμίνη του αραβοσίτου- ζείνη (zein) αν αναμιχθεί με άμυλο αραβοσίτου και νερό μπορεί να σχηματίσει ζυμάρι με παρόμοιες ιξωδοελαστικές ιδιότητες με αυτές του σίτου ωστόσο η θερμοκρασία ανάμιξης τους πρέπει να είναι πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης της ενυδατωμένης προλαμίνης είναι κοντά στους 25 °C (Lawton, 1992).

Το άλευρο αραβοσίτου χρησιμοποιείται για την παρασκευή του άρτου broa, ενός είδους πορτογαλικού ψωμιού βασισμένο σε άλευρο σίτου και αραβοσίτου. Πρόσφατα υπήρξε επιτυχημένη προσπάθεια για την παρασκευή ψωμιού broa ελεύθερου γλουτένης με αποκλειστική βάση το άλευρο αραβοσίτου (Brites et al., 2010). Επιπλέον τα χαρακτηριστικά άρτου ελεύθερου γλουτένης που παρασκευάστηκε από άμυλο αραβοσίτου, και ζείνη με την προσθήκη υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνης προσομοίασαν τα χαρακτηριστικά άρτου με βάση τον σίτο, παρουσιάζοντας ομοιόμορφη δομή ψίχας και αφράτη διογκωμένη δομή (Schober et al., 2008). Όπως και στην περίπτωση του ρυζάλευρου, η κοκκομετρία του αλεύρου αραβοσίτου επηρεάζει την ποιότητα των τελικών προϊόντων, καθώς αρτοσκευάσματα με βάση χοντρόκοκκο άλευρο αραβοσίτου παρουσίασαν υψηλότερο όγκο και πιο μαλακή ψίχα σε σχέση με αυτά που παρασκευάστηκαν από λεπτόκοκκο άλευρο αραβοσίτου (de la Hera et al., 2013b).

3.10.1.3 Άλευρο βρώμης

Η βρώμη (*Avena sativa*) θεωρείται δημητριακός καρπός υψηλής διατροφικής αξίας, καθώς περιέχει φυτοχημικές ουσίες με κυριότερη τη β- γλυκάνη, στην κατανάλωση της οποίας αποδίδεται μείωση των επιπέδων χοληστερόλης και έλεγχος του σακχάρου στο αίμα (Huttner & Arendt, 2010a). Κλινικές έρευνες έχουν δείξει πως η κατανάλωση βρώμης από ασθενείς με κοιλιοκάκη ως μέρος της διατροφής χωρίς γλουτένη είναι ασφαλής (Janatuinen et al., 2002; Peräaho et al., 2004). Ωστόσο η αιτία που η βρώμη δεν έχει καθιερωθεί ως συστατικό ελεύθερο γλουτένης είναι η ανησυχία για πιθανή επιμόλυνσή της από σίτο, σίκαλη ή κριθάρι κατά την παραγωγή, την συγκομιδή, την μεταφορά και την αποθήκευση του καρπού (Kagnoff, 2005).

Ολικής άλεσης αλεύρι βρώμης έχει χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης με τα τελικά προϊόντα να χαρακτηρίζονται από μεγάλη διόγκωση, αυξημένο πορώδες και χαμηλή σκληρότητα ψίχας (Huttner et al., 2010b). Ωστόσο και στην περίπτωση του αλεύρου βρώμης, η κοκκομετρία του αλεύρου και η χημική του σύσταση επιδρούν στην ποιότητα των τελικών αρτοσκευασμάτων. Η χρήση χοντρόκοκκου αλεύρου βρώμη με χαμηλά ποσοστά πρωτεΐνης και θραυσμένου αμύλου δίνει άρτο ανώτερης ποιότητας (Huttner et al., 2010b).

3.10.1.4 Άμυλο σίτου

Το άμυλο σίτου παράγεται από το άλευρο σίτου με την απομάκρυνση των πρωτεϊνών, συμπεριλαμβανομένης και της γλουτένης. Γενικά πιστεύεται ότι η απομάκρυνση της γλουτένης από το άλευρο σίτου δεν είναι πλήρης, αλλά δεν είναι γνωστό σε τι ποσοστό παραμένει. Έρευνες έχουν τονίσει τις επιβλαβείς μακροπρόθεσμες επιπτώσεις από την τακτική λήψη μικρών ποσοτήτων γλοιοαδίνης (π.χ. από το άμυλο σίτου) (Skerritt & Hill, 1992; Chartrand et al., 1997, Lohiniemi et al., 2000). Αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με βάση το άμυλο σίτου έχουν μελετηθεί, καθώς η δομή τους προσομοιάζει αυτή των συμβατικών αρτοσκευασμάτων από αλεύρι σίτου (Gallagher et al., 2003b).

3.10.1.5 Άλευρο σόργου και κεχριού

Το σόργο είναι δημητριακός καρπός με υψηλή περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτικές ουσίες που ενισχύουν την λειτουργία της καρδιάς και αποτελεί βασική τροφή σε ορισμένες ασιατικές και αφρικανικές χώρες. Λόγω της γενετικής του ποικιλομορφίας, οι σπόροι σόργου ποικίλλουν σημαντικά σε μέγεθος και σχήμα και μπορεί να έχουν λευκό, κίτρινο ή κόκκινο χρώμα.

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την χρήση του αλεύρου σόργου σε συνδυασμό με άμυλα αραβόσιτου, πατάτας, ρυζιού ή κασάβας σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης (Schober et al., 2005, 2007; Onyango et al., 2009b, 2011a). Πιο συγκεκριμένα ο συνδυασμός αλεύρου σόργου και αμύλου κασάβας σε αναλογία 50:50 οδηγεί στην παρασκευή άρτου, ο οποίος διατηρεί τα δομικά του χαρακτηριστικά κατά

την αποθήκευση σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα που παράχθηκαν με τις υπόλοιπες αναλογίες αμύλου κασάβας (10%-40% υποκατάσταση επί του αλεύρου σόργου) (Onyang et al., 2011). Επιπλέον έχουν γίνει μελέτες για την βελτίωση της ποιότητας αρτοσκευασμάτων με βάση το σόργο, στις οποίες αναφέρεται η χρήση υδροκολλοειδών, πρωτεϊνών, γαλακτωματοποιητών και ενζύμων. Μπορεί να αναφερθεί η προσθήκη κυτταρινών, γαλακτωματοποιητών και αλβουμίνης στην παρασκευή άρτου χωρίς γλουτένη από άλευρο σόργου και άμυλο κασάβας ώστε το τελικό προϊόν να εμφανίζει ικανοποιητική δομή ψίχας και χαμηλό ρυθμό μπαγιατέματος (Onyang et al., 2009b). Η πλειοψηφία των μελετών για χρήση αλεύρου σόργου σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης βασίζονται στην χρήση κόκκινου αλεύρου σόργου, όμως πρόσφατα αναφέρεται και η χρήση αλεύρου λευκού σόργου (Velazquez et al., 2012).

Το κεχρί είναι η γενική ονομασία μιας ομάδας σιτηρών αποτελούμενη από διάφορα είδη ποωδών φυτών της οικογένειας *Graminae*, τα οποία παράγουν μικρά εδώδιμα σπέρματα. Τα είδη κεχριού που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι το κοινό κεχρί (*proso millet*), το μαργαριτώδες κεχρί (*pearl millet*), το δακτυλοειδές κεχρί (*finger millet*) και το τεφ (*teff*).

Παραδοσιακά τρόφιμα και ποτά που βασίζονται στο κεχρί είναι διαδεδομένα στην Αφρική, την Ινδία και την Ανατολική Ασία, ανάμεσα τους και τα επίπεδα ψωμιά (*flat breads*), το κους-κους, τα ντάμπλινγκς (*dumplings*), οι πουτίγκες και αλκοολούχα και μη-ποτά (Taylor et al., 2008).

Το αλεύρι τεφ χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά διαιτητικών ινών, ασβεστίου, μαγνησίου και σιδήρου και θεωρείται συστατικό υψηλής διατροφικής αξίας για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι η προσθήκη υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνης σε άρτο με βάση άλευρο τεφ οδήγησε στην αύξηση του όγκου των τελικών προϊόντων (Hager & Arendt, 2013).

3.10.1.6 Άλευρα ψευδοδημητριακών

Τα ψευδοδημητριακά είναι δικοτυλήδονα φυτά (σε αντίθεση με τα δημητριακά, τα οποία είναι μονοκοτυλήδονα), αλλά οι καρποί τους παρομοιάζουν αυτούς των δημητριακών ως προς την χημική σύσταση και τις χρήσεις τους. Το πιο γνωστό ψευδοδημητριακό είναι ο αμάρανθος (αμάρανθος ο ουροφόρος-*Amaranthus caudatus*, αμάρανθος ο αιματώδης-*Amaranthus cruentus* και αμάρανθος ο υποχονδριακός-*Amaranthus hypochondriacus*), η κινόα (*Chenopodium quinoa*) και το φαγόπυρο (*Fagopyrum esculentum*). Τα ψευδοδημητριακά ανήκουν στα ελεύθερα γλουτένης συστατικά και χρησιμοποιούνται συχνά για την ανάπτυξη των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, χάρη στην υψηλή διατροφική τους αξία καθώς έχουν υψηλό πρωτεϊνικό περιεχόμενο, απαραίτητα αμινοξέα και λιπαρά οξέα και υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα και βιοενεργά συστατικά (Alvarez-Jubete et al., 2009, 2010a, 2010b). Πιο συγκεκριμένα, ο αμάρανθος έχει το υψηλότερο ποσοστό πρωτεϊνών (16.5% επί ξηράς βάσεως) ακολουθούμενος από την κινόα (14.5% επί ξηράς βάσεως) και το φαγόπυρο (12.5% επί ξηράς βάσεως). Οι πρωτεΐνες των ψευδοδημητριακών είναι κυρίως αλβουμίνες και γλοβουλίνες ενώ περιέχουν λίγες έως καθόλου προλαμίνες, οι οποίες

είναι οι τοξικές πρωτεΐνες στην ασθένεια της κοιλιοκάκης. Επιπλέον, το φαγόπυρο περιέχει σημαντικά υψηλότερα ποσοστά φυτικών ινών (29.5% επί ξηράς βάσεως) σε σύγκριση με τον αμάρανθο (20.6% επί ξηράς βάσεως) και την κινόα (14.2% επί ξηράς βάσεως), τα οποία έχουν επίπεδα φυτικών ινών συγκρίσιμα με εκείνα των κοινών δημητριακών (Alvarez -Jubete et al., 2009).

Όσον αφορά την περιεκτικότητα των σπόρων σε βιταμίνες και μέταλλα, ο αμάρανθος είναι καλή πηγή ριβοφλαβίνης (Berghofer & Schoenlechner, 2002), η κινόα πηγή ριβοφλαβίνης, θειαμίνης και φυλλικού οξέος (Taylor & Parker, 2002), και το φαγόπυρο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θειαμίνη, ριβοφλαβίνη και πυριδοξίνη (Bonafaccia et al., 2003). Επιπλέον, όλα τα ψευδοδημητριακά είναι εξαιρετικές πηγές βιταμίνης E, ασβεστίου, μαγνησίου και σιδήρου (Alvarez-Jubete et al., 2009).

Το φαγόπυρο καλλιεργείται παραδοσιακά στην Ασία και την Ευρώπη, ενώ προέρχεται από την Κεντρική Ασία και μεταφέρθηκε από νομαδικούς λαούς στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη. Οι σπόροι φαγόπυρου έχουν τριγωνικό σχήμα, ενώ το αλεύρι φαγόπυρου παράγεται είτε από ολόκληρο τον σπόρο (ολικής άλεσης) ή μετά από αποφλοιώση του σπόρου και άλεση (Alvarez-Jubete et al., 2009). Ο αμάρανθος και η κινόα αποτελούσαν σημαντικές καλλιέργειες των προ-Κολομβιανών πολιτισμών της Λατινικής Αμερικής. Μετά την ισπανική κατάκτηση, ωστόσο η κατανάλωση και η καλλιέργεια τους περιορίστηκε σε μικρή κλίμακα. Λόγω του μικρού μεγέθους των σπόρων του αμάρανθου και της κινόας αλέθονται συνήθως ως αλεύρι ολικής αλέσεως (Alvarez-Jubete et al., 2009).

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την δυνατότητα χρήσης των ψευδοδημητριακών για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης. Η προσθήκη αλεύρου φαγόπυρου και κινόας σε άρτο ελεύθερο γλουτένης, φαίνεται να αυξάνει τον όγκο των αρτοσκευασμάτων σε σχέση με τον άρτο αναφοράς, ενώ η ψίχα των άρτων ήταν σημαντικά πιο μαλακή λόγω της παρουσίας φυσικών γαλακτωματοποιητών που υπάρχουν στους σπόρους των ψευδοδημητριακών. Τα αρτοσκευάσματα που παρήχθησαν με την προσθήκη ψευδοδημητριακών αξιολογήθηκαν εξίσου οργανοληπτικά αποδεκτά με τον άρτο αναφοράς (Alvarez-Jubete et al., 2010b).

Επιπλέον έχει αξιολογηθεί η προσθήκη ολικής άλεσης ή αποφλοιωμένου αλεύρου φαγόπυρου σε ποσοστό μέχρι 20% σε αρτοσκευάσματα με βάση το ρυζάλευρο, για την παρασκευή των οποίων δεν ήταν απαραίτητη η χρήση υδροκολλοειδών (Torbica et al., 2010). Η αύξηση του ποσοστού του αλεύρου φαγόπυρου δεν αύξησε σημαντικά την σκληρότητα της ψίχας ενώ όλα τα αρτοσκευάσματα αξιολογήθηκαν ως οργανοληπτικά αποδεκτά ανεξάρτητα από το είδος του αλεύρου που χρησιμοποιήθηκε (Torbica et al., 2010). Πιο πρόσφατα μελετήθηκε η προσθήκη αλεύρου φαγόπυρου σε εμπορικά μίγματα αλεύρων ελεύθερων γλουτένης, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλή διατροφική αξία. Η ενσωμάτωση αλεύρου φαγόπυρου κατά 40%, συνδυασμένη με την χρήση υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνης βελτίωσε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων, οδηγώντας σε μαλακότερη ψίχα και πιο αργό ρυθμό μπαγιατέματος (Mariotti et al., 2013).

Ο αμάρανθος έχει επίσης μελετηθεί ως εναλλακτικό άλευρο για την ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης. Σύμφωνα με τους Schoenlechner et al. (2010), άρτος με

40% αλεύρι αμάρανθου και 60% μίγμα αλεύρων ελεύθερων γλουτένης (άμυλο αραβόσιτου, πατάτας, ρυζάλευρου και κόμμεος χαρουπιού) μπορεί να βελτιωθεί με έλεγχο της περιεκτικότητας σε νερό, την προσθήκη αλβουμίνης και λιπαρού. Με βάση πείραμα ανίχνευσης του εύρους των ποσοτήτων προσθήκης νερού, αλβουμίνης και λιπαρού (screening experiment), ο άρτος που παρασκευάστηκε χαρακτηρίζεται από υψηλή διόγκωση, μαλακή υφή ψίχας και ευχάριστη γεύση στο στόμα (Schoenlechner et al., 2010).

Επιπλέον έχει παρασκευασθεί άρτος ελεύθερος γλουτένης από 100% αμάρανθο, με διαφορετικές αναλογίες αλεύρου αμάρανθου ακατέργαστου και διογκωμένου (popped). Το τελικό προϊόν βασίζεται στον συνδυασμό 60% διογκωμένου αλεύρου αμάρανθου και 40% ακατέργαστου και παρουσίασε ομοιογενή χαρακτηριστικά ψίχας και υψηλή διόγκωση (de la Barca et al., 2010). Έχουν αναφερθεί διάφορες μέθοδοι για την βελτίωση αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη με βάση αλεύρι αμάρανθου όπως η οξίνιση (acidification), η χρήση προζυμιού κατά την επώαση (Houben et al., 2010), αλλά και ο συνδυασμός πρωτεϊνικών συμπυκνωμάτων και υδροκολλοειδών (Mariotti et al., 2009).

Όσον αφορά την προσθήκη της κινάας για την παραγωγή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης, έχει μελετηθεί η αντικατάσταση σε ποσοστά 40%-100% ρυζάλευρου και αλεύρου αραβόσιτου από λευκό αλεύρι κινάας (αποφλοιωμένο) για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης. Η προσθήκη αλεύρου κινάας αύξησε τον όγκο του άρτου κατά 33%, η κατανομή των κυψελίδων αέρα στην ψίχα ήταν ομοιόμορφη και η γεύση του αποδεκτή (Elgeti et al., 2014). Πιο πρόσφατα, έχει αναφερθεί η δυνατότητα ανάπτυξης άρτων ελεύθερων γλουτένης με ψευδοδημητριακά (κινόα και αμάρανθο) με παρόμοια οργανοληπτικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, αλλά υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη και λίπος, σε σύγκριση με αρτοσκευάσματα με βάση το ρυζάλευρο και ποικίλλα άμυλα φυτικής προέλευσης (Alencar et al., 2015).

3.10.1.7 Άλευρα ψυχανθών

Τα ψυχανθή είναι φυτά της οικογένειας των δικοτυλήδων και μπορούν να έχουν τη μορφή μικρών ποωδών θάμνων ή ακόμα και δέντρων. Μερικά είδη στην κατηγορία των ψυχανθών, τα οποία χρησιμοποιεί ο άνθρωπος ως τροφή είναι η σόγια, τα ρεβίθια, τα φασόλια, τα μπιζέλια, η φακή και το χαρούπι. Τα ψυχανθή αποτελούν σημαντική πηγή πρωτεϊνών καθώς περιέχουν υψηλές ποσότητες λυσίνης, λευκίνης, ασπαρτικού οξέος, γλουταμικού οξέος και αργινίνη, ενώ παρέχουν ένα ισορροπημένο προφίλ απαραίτητων αμινοξέων όταν καταναλώνονται με δημητριακά και άλλα τρόφιμα με αμινοξέα πλούσια σε θείο και τρυπτοφάνη. Εκτός από τις θρεπτικές ιδιότητες τους, το αλεύρι των ψυχανθών έχει λειτουργικές ιδιότητες με σημαντικό ρόλο στην παρασκευή των τροφίμων (Dakia et al., 2007; Boye et al., 2010; Roy et al., 2010). Οι λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνών των ψυχανθών, συγκεκριμένα του αλεύρου ρεβιθιού (*Cicer arietinum L.*), του μπιζελιού (*Pisum sativum L.*), και του φύτρου χαρουπιού (*Ceratonia siliqua L.*) έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη προϊόντων αρτοποιίας, έτοιμων για κατανάλωση σνακ και σουπών και προϊόντων εξώθησης. Τα διατροφικά οφέλη του

αλεύρου των ψυχανθών σε συνδυασμό με το αυξανόμενο ενδιαφέρον για υψηλής ποιότητα προϊόντα ελεύθερα γλουτένης έχουν οδηγήσει στη μελέτη της χρήσης τους ως εναλλακτική λύση στα κοινά ελεύθερα γλουτένης άλευρα (Miñarro et al., 2012). Συγκεκριμένα, η πρωτεΐνη από το φύτρο χαρουπιού έχει αναφερθεί να παρουσιάζει παρόμοιες ρεολογικές ιδιότητες με την γλουτένη (Feillet and Roulland, 1998; Bengoechea et al., 2008; Wang et al., 2001; Smith et al., 2010).

Έρευνα σχετικά με την προσθήκη πρωτεϊνών σόγιας, μπιζελιού, ρεβιθιού και χαρουπιού για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης με πρωτεϊνική περιεκτικότητα 1.5% έδειξε την υψηλότερη διόγκωση για άρτο με πρωτεΐνη ρεβιθιού σε σχέση με την πρωτεΐνη χαρουπιού που εμφάνισε την μικρότερη διόγκωση. Επιπλέον ο άρτος με πρωτεΐνη ρεβιθιού είχε την μαλακότερη ψίχα και υψηλή οργανοληπτική αποδοχή (Miñarro et al., 2012). Άλλοι μελετητές αναφέρουν την βελτίωση αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης με βάση το άμυλο από την προσθήκη σόγιας, η οποία ενίσχυσε την διόγκωση, την υφή της ψίχας και την συνολική οργανοληπτική αποδοχή του άρτου. (Moore et al., 2004; Sanchez & Osella, 2002). Σχετικά με την χρήση της πρωτεΐνης από φύτρο χαρουπιού σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης έχει αναφερθεί βελτιστοποιημένη συνταγή άρτου με υψηλή διόγκωση (~3.5 cm³/g) και μαλακή ψίχα (βάσει της μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης) η οποία περιλαμβάνει 7% πρωτεΐνη φύτρου χαρουπιού, ενώ οι ερευνητές αναφέρουν και την ικανότητα της πρωτεΐνης να σχηματίζει ζύμη με παρόμοιες ιξωδοελαστικές ιδιότητες με την ζύμη αλεύρου σίτου (Smith et al., 2012).

Η χρήση αλεύρων ψυχανθών δεν περιορίζεται μόνο στα αρτοσκευάσματα. Εντυπωσιακά αποτελέσματα αναφέρονται και στην προσθήκη σε ποσοστό 50% αλεύρων ρεβιθιού, φασολιού, φακής και μπιζελιού για την ανάπτυξη κέικ ελεύθερων γλουτένης με βάση το ρυζάλευρο (Gularte et al., 2012b). Ο ειδικός όγκος των κέικ με την προσθήκη των ανωτέρω αλεύρων αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με το κέικ αναφοράς (χωρίς προσθήκη αλεύρων ψυχανθών), με εξαίρεση το κέικ με αλεύρι ρεβιθιού. Επιπλέον η προσθήκη των αλεύρων ψυχανθών, εκτός της φακής αύξησε την σκληρότητα και την μασητικότητα της ψίχας. Όσον αφορά την διατροφική αξία, τα παραγόμενα κέικ παρουσίασαν υψηλά ποσοστά πρωτεΐνης, διαιτητικών ινών και μετάλλων, ενώ παρουσίασαν και μειωμένο γλυκαιμικό δείκτη σε σχέση με το κέικ αναφοράς. Οι ερευνητές προτείνουν το κέικ με βάση το άλευρο φακής ως το βέλτιστο από άποψη ποιοτικών και διατροφικών χαρακτηριστικών (Gularte et al., 2012b).

3.10.1.8 Άλλα άλευρα

Εναλλακτικά άλευρα για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης με ενθαρρυντικά αποτελέσματα αποτελούν τα άλευρα ριζών και κονδύλων, όπως η κασάβα και η γλυκοπατάτα, αλλά και άλευρα σπόρων κίας (chia) ή λιναρόσπορου (Gambus, 2005; Pasqualone et al., 2010; Seguchi et al., 2012; Moreira et al., 2012, 2013).

Η κασάβα (*Manihot esculenta* Crantz) αποτελεί μια από τις κυριότερες φυτείες στον κόσμο, καθώς έρχεται τέταρτη σε σειρά κατάταξης με παγκόσμια ετήσια παραγωγή 160 χιλιάδων τόνων. Η κασάβα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άμυλο, ενώ

δεν περιέχει γλουτένη. Στις περιοχές καλλιέργειας της, ο άρτος που παράγεται με βάση την κασάβα είναι επίπεδος και τραγανός, σαν κράκερ (Pasqualone et al., 2010). Επιπλέον, έχει μελετηθεί η παρασκευή διογκωμένου άρτου χωρίς γλουτένη με βάση αλεύρι κασάβας, με την προσθήκη ελαιόλαδου και αλβουμίνης. Τα αρτοπαρασκευάσματα που παρήχθησαν παρουσίασαν βελτιωμένη διόγκωση, μαλακή υφή ψίχας, ομοιόμορφη κατανομή κυψελίδων αέρα και μειωμένη κολλητικότητα σε σχέση με άρτο που περιείχε μόνο άλευρο κασάβας. Επιπλέον τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των άρτων με κασάβα, ελαιόλαδο και αλβουμίνη αξιολογήθηκαν οργανοληπτικά ισάξια με κλασικό άρτο σίτου (Pasqualone et al., 2010).

Η γλυκοπατάτα (*Ipomoea batatas*) θεωρείται ιδιαίτερα διαδεδομένη στην Ιαπωνία και χρησιμοποιείται κυρίως για την παρασκευή κέικ. Θεωρείται υψηλής διατροφικής αξίας καθώς περιέχει υψηλά ποσοστά διαιτητικών ινών και καλίου (12 mg/100 g), βελτιώνει την πέψη και έχει αντιοξειδωτική δράση προλαμβάνοντας τον καρκίνο του παχέως εντέρου, την υπέρταση και τον διαβήτη (Seguchi et al., 2012). Αναφέρεται πως η γλυκοπατάτα περιέχει 5-15% πολυσακχαρίτες και 84-95% γλυκοπρωτεΐνες, με τους πολυσακχαρίτες να είναι κυρίως μαννάνες, ενώ στις γλυκοπρωτεΐνες το κλάσμα των πολυσακχαριτών αποτελείται κυρίως από γαλακτόζη, μανόζη, γλυκόζη και αραβινόζη ενώ το κλάσμα των πρωτεϊνών από ασπαρτικό οξύ, γλυκίνη και αργινίνη (Tsukui, 2003). Κατά την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης με βάση άμυλο σίτου και άλευρο γλυκοπατάτας, παρήχθησαν τελικά προϊόντα με παρόμοια ποιοτικά χαρακτηριστικά με αυτά άρτου από σίτο (Seguchi et al., 2012).

Οι σπόροι κίας (chia) καλλιεργούνται στο Μεξικό ενώ υπάρχουν μονοετή είδη κίας καλοκαιρινά ή χειμερινά. Τα καλοκαιρινά είδη είναι τα *Hyptis suaveolens* και *Salvia hispanica* και τα χειμερινά *Salvia columbariae* και *Salvia carduacea*. Η διατροφική αξία των σπόρων κίας είναι υψηλή, με πρωτεϊνικό περιεχόμενο 19.0% - 26.5%, και ολικές διαιτητικές ίνες 47.1%-59.8% (Weber et al., 1991). Οι σπόροι κίας έχουν χρησιμοποιηθεί για την αύξηση του πρωτεϊνικού περιεχομένου και της δομής άρτου ελεύθερου γλουτένης. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη σπόρων κίας αύξησε την σταθερότητα ζυμαριού άρτου ελεύθερου γλουτένης με βάση άλευρο κάστανου, ενώ η συνδυασμένη χρήση 4% αλεύρου σπόρων κίας, 1% κόμμεος γκούαρ και 1.5% υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνη αύξησαν επιπλέον την ελαστικότητα και την σταθερότητα του ζυμαριού (Moreira et al., 2013).

Εναλλακτική πηγή αλεύρου για την παραγωγή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης μπορεί να αποτελέσει το άλευρο κάστανου, λόγω της υψηλής διατροφικής του αξίας. Το άλευρο κάστανου περιέχει υψηλής αξίας πρωτεΐνες με απαραίτητα αμινοξέα (4-7%), υψηλό ποσοστό σακχάρων (20-32%), αμύλου (50-60%, διαιτητικών ινών (4-10%) και χαμηλά ποσοστά λίπους (2-4%). Επιπλέον περιέχει βιταμίνη E, βιταμίνες του συμπλέγματος B, κάλιο, φώσφορο και μαγνήσιο (Sacchetti et al., 2004; Chenlo et al., 2007). Αν και το αλεύρι κάστανου έχει υψηλή διατροφική αξία, μπορεί να δώσει κατώτερης ποιότητας ψημένα προϊόντα με χαμηλό όγκο και σκούρο χρώμα. Ωστόσο η χρήση αλεύρου κάστανου σε ποσοστό 30% σε αρτοσκευάσματα με βάση το ρυζάλευρο και με συνδυαστική προσθήκη μίγματος κόμμεος ξανθάνης/γκουάρ και DATEM ως γαλακτωματοποιητή έδωσε τελικά προϊόντα με υψηλά ποιοτικά

χαρακτηριστικά (διόγκωση, υφή, χρώμα ψίχας και οργανοληπτική αποδοχή) (Demirkesen et al, 2010a).

3.10.2 Συστατικά για την αύξηση της διατροφικής αξίας προϊόντων χωρίς γλουτένη

Η εφαρμογή δίαιτας ελεύθερη γλουτένης από τους ασθενείς με κοιλιοκάκη δεν εξασφαλίζει τις απαραίτητες ποσότητες θρεπτικών συστατικών καθώς έχουν αναφερθεί διατροφικές ελλείψεις μετά από μακροχρόνια τήρηση της δίαιτας (Thompson et al., 2005). Σε έρευνα για τις Ηνωμένες Πολιτείες 47 ατόμων που ακολουθούσαν δίαιτα ελεύθερη γλουτένης, οι γυναίκες που πήραν μέρος φαίνεται να προσλαμβάνουν κατά 32%, 44% και 46% χαμηλότερα των συνιστώμενων ποσοτήτων ασβεστίου, σιδήρου και διαιτητικών ινών αντίστοιχα (Thompson et al., 2005). Το χαμηλό ποσοστό πρόσληψης διαιτητικών ινών και θρεπτικών συστατικών φαίνεται να σχετίζεται με την διατροφική σύσταση των διαθέσιμων προϊόντων χωρίς γλουτένη, τα οποία παρασκευάζονται από άμυλα με χαμηλό ποσοστό διαιτητικών ινών. Επιπλέον, έρευνες έχουν μελετήσει την διατροφική σύνθεση προϊόντων χωρίς γλουτένη, τα οποία βρέθηκαν να περιέχουν υψηλά ποσοστά λιπαρών, σακχάρων και αλατιού. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι οι πάσχοντες από κοιλιοκάκη, οι οποίοι ακολουθούν δίαιτα χωρίς γλουτένη να προσλαμβάνουν υψηλά ποσοστά λιπαρών κυρίως κορεσμένων αλλά και πολλές θερμίδες. Η δίαιτα χωρίς γλουτένη συχνά αναφέρεται ως υπερπρωτεϊνική και υπερλιπιδική με χαμηλά ποσοστά υδατανθράκων, σιδήρου, ασβεστίου και διαιτητικών ινών (Mariani et al., 1998). Ως εκ τούτου ο εμπλουτισμός των προϊόντων χωρίς γλουτένη με διαιτητικές ίνες και μικροσυστατικά θεωρείται απαραίτητος και μπορεί να γίνει με την ενσωμάτωση εναλλακτικών διαιτητικών αλεύρων ή άλλων θρεπτικών συστατικών στις βασικές συνταγές των προϊόντων. Στον **Πίνακα 3.2** παρουσιάζονται κάποια συστατικά, τα οποία μπορούν να ενισχύσουν διατροφικά τα προϊόντα χωρίς γλουτένη.

Πίνακας 3.2 Συστατικά υψηλής διατροφικής αξίας για την ενίσχυση αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη (Capriles & Agêas, 2014).

Διαιτητικές Ίνες	Λειτουργικά συστατικά	Μικροσυστατικά	Συστατικά φρούτων και λαχανικών
Ίνες δημητριακών	Ινουλίνη	Μέταλλα (Σίδηρος, Ασβέστιο)	Άλευρα
Ίνες με πηκτικές ιδιότητες	β-γλυκάνη Ανθεκτικό άμυλο Ψύλλιο Προβιοτικά	Βιταμίνες (Βιταμίνη D, Φυλλικό οξύ)	Εκχυλίσματα παραπροϊόντων

3.10.2.1 Διαιτητικές ίνες

Ορισμός

Ο όρος διαιτητικές ίνες φαίνεται να χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Hipsley (1953) για να περιγράψει τα συστατικά των φυτικών κυτταρικών τοιχωμάτων. Το 1976 ο Trowell, διεύρυνε τον ορισμό των διαιτητικών ινών σε συνδυασμό και με την διατροφική αξία και τις ασθένειες που μπορούν να προληφθούν από την κατανάλωση διαιτητικών ινών. Έτσι ο νέος ορισμός συμπεριλαμβάνει όλους τους μη αφομοιώσιμους πολυσακχαρίτες φυτικής προέλευσης, όπως κόμμεα, τροποποιημένες κυτταρίνες, ολιγοσακχαρίτες και πηκτίνες.

Τελικά, το 2001 υπό την αιγίδα της AACC προτάθηκε ο ακόλουθος ορισμός:

«Οι διαιτητικές ίνες αποτελούν τα εδώδιμα μέρη των φυτών ή οι ανάλογοι υδατάνθρακες που είναι ανθεκτικά στην πέψη και την απορρόφηση στο λεπτό έντερο του ανθρώπου, με πλήρη ή μερική ζύμωση στο παχύ έντερο. Οι διαιτητικές ίνες περιλαμβάνουν πολυσακχαρίτες, ολιγοσακχαρίτες, λιγνίνη και συνδεδεμένες με αυτά φυτικές ουσίες. Οι διαιτητικές ίνες προωθούν ευεργετικές φυσιολογικές δράσεις, συμπεριλαμβανομένων της καλής λειτουργίας (εκκένωσης) του εντέρου, και/ή μετρίασης της χοληστερόλης του αίματος, και/ή μετρίασης της γλυκόζης του αίματος».

Οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση του συνόλου των διαιτητικών ινών δεν είναι συγκεκριμένες και αλλάζουν συνεχώς (McCleary, 2010). Λόγω του αυξημένου αριθμού μελετών που αφορούν τις φυσιολογικές και θρεπτικές ιδιότητες συγκεκριμένων συστατικών των διαιτητικών ινών (ανθεκτικό άμυλο, πολυδεξτρώζη κ.α.) προτάθηκε η διεύρυνση του ορισμού των διαιτητικών ινών.

Τελικά, η επιτροπή του Codex Alimentarius το 2009(b) με βάση όλους τους προγενέστερους ορισμούς διατύπωσε τον παρακάτω ορισμό, που ισχύει μέχρι και σήμερα:

«Οι διαιτητικές ίνες αποτελούνται από υδατανθρακικά πολυμερή* με δέκα ή περισσότερα μονομερή** τα οποία δεν αφομοιώνονται ούτε απορροφώνται από το λεπτό έντερο του ανθρώπινου οργανισμού και εμπίπτουν στις εξής κατηγορίες: α) εδώδιμα υδατανθρακικά πολυμερή που απαντώνται φυσικά στα τρόφιμα ως έχουν, ή β) εδώδιμα υδατανθρακικά πολυμερή που έχουν ληφθεί από πρώτες ύλες τροφίμων με φυσικά, ενζυμικά ή χημικά μέσα και έχουν ωφέλιμη επίδραση στη φυσιολογία του οργανισμού, η οποία αποδεικνύεται με γενικώς αποδεκτά επιστημονικά στοιχεία, ή γ) εδώδιμα συνθετικά υδατανθρακικά πολυμερή που έχουν ωφέλιμη επίδραση στη φυσιολογία του οργανισμού, η οποία αποδεικνύεται με γενικώς αποδεκτά επιστημονικά στοιχεία».

* Όταν είναι φυτικής προέλευσης οι διαιτητικές ίνες μπορεί να περιλαμβάνουν κλάσματα λιγνίνης και/ή άλλων ενώσεων που σχετίζονται με τους πολυσακχαρίτες στα φυτικά κυτταρικά τοιχώματα. Οι ενώσεις αυτές μπορούν να μετρηθούν μέσω συγκεκριμένων αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των

διαιτητικών ινών. Όταν οι ενώσεις αυτές εκχυλιστούν και προστεθούν εκ νέου στο προϊόν, τότε δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στον ορισμό των διαιτητικών ινών.

** Οι εθνικές αρχές είναι υπεύθυνες για το αν θα περιλαμβάνονται υδατάνθρακες με 3 έως 9 μονομερή ή όχι.

Στον ορισμό του Codex Alimentarius δεν είναι καθορισμένα τα φυσιολογικά κριτήρια που πρέπει να πληρούν οι ουσίες, για να χαρακτηρίζονται διαιτητικές ίνες και μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τη χώρα. Τέλος, δεν είναι σαφές κατά πόσο οι πολυσακχαρίτες με 3-9 μονομερή μπορούν να αναφέρονται ως διαιτητικές ίνες

Ωστόσο, τα υδατανθρακικά oligομερή με 3 έως 9 μονομερή αποτελούν διαιτητικές ίνες, καθώς ταιριάζουν στον ανωτέρω ορισμό στα ακόλουθα σημεία: 1) δεν πέπτονται, ούτε απορροφώνται στο λεπτό έντερο, 2) εμφανίζουν πλήρη ή μερική ζύμωση στο παχύ έντερο, 3) προωθούν την ευεργετική φυσιολογική λειτουργία του εντέρου και 4) μπορεί να αυξήσουν την απορρόφηση μετάλλων. Λόγω των ανωτέρω, στο 9^ο Διεθνές συνέδριο σχετικά με τις διαιτητικές ίνες, (International Vahouny Dietary Fiber conference, 2010), ψηφίστηκε με συντριπτική πλειοψηφία, η ένταξη των υδατανθρακικών oligομερών με 3 έως 9 μονομερή στην κατηγορία των διαιτητικών ινών. Ως εκ τούτου, οι αρμόδιες αρχές των περισσότερων χωρών (με εξαίρεση τις ΗΠΑ-FDA) τα έχουν ήδη συμπεριλάβει στον ορισμό (Jones, 2014).

Η προσθήκη διαιτητικών ινών στα προϊόντα μπορεί να τα χαρακτηρίσει ως (Codex Alimentarius 2009b):

- «πηγή» διαιτητικών ινών αν περιέχουν 3 g ινών ανά 100 g προϊόντος ή 1,5 g ινών ανά 100 kcal προϊόντος

-«τρόφιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες» αν περιέχουν τουλάχιστον 6 g ινών ανά 100 g προϊόντος ή 3 g ινών ανά 100 kcal προϊόντος.

Εφαρμογές των διαιτητικών ινών στην ανάπτυξη προϊόντων ελεύθερων γλουτένης

Ο ρόλος της προσθήκης των διαιτητικών ινών σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης είναι διττός, καθώς οι ίνες βελτιώνουν όχι μόνο την διατροφική αξία αλλά και τα ποιοτικά, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και την διάρκεια ζωής των προϊόντων χωρίς γλουτένη. Πρέπει να σημειωθεί, πως για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων πλούσιων σε διαιτητικές ίνες, είναι απαραίτητη η προσθήκη αυξημένων ποσοτήτων νερού στις συνταγές, λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης νερού των διαιτητικών ινών. Η αύξηση της ποσότητας του νερού δίνει στο ζυμάρι ικανοποιητικό ιξώδες και επιτρέπει την ζελατινοποίηση του αμύλου και την μετουσίωση των πρωτεϊνών που λαμβάνουν χώρα κατά την αρτοποιητική διαδικασία.

Έτσι είναι απαραίτητη η προσαρμογή της περιεκτικότητας σε νερό στο ζυμάρι, για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης εμπλουτισμένων με διαιτητικές ίνες με ικανοποιητική διόγκωση, ομοιόμορφη και μαλακή υφή ψίχας, (Juszczak et al., 2012; Cappa et al., 2013). Το ποσοστό αύξησης του νερού στα εκάστοτε σκευάσματα εξαρτάται από το είδος των διαιτητικών ινών που χρησιμοποιούνται. Ο αριθμός των υδροξυλομάδων των μορίων των ινών καθορίζουν

την αλληλεπίδραση με το νερό, μέσω δεσμών υδρογόνου (Lazaridou et al., 2007; Sabanis et al., 2009a).

Σύμφωνα με την Matkovic (2013), μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση διάφορων τύπων διαιτητικών ινών για την επίτευξη υψηλού ποσοστού περιεχόμενων συνολικών διαιτητικών ινών και υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών στα προϊόντα αρτοποιίας. Η ισορροπημένη χρήση αδιάλυτων και διαλυτών ινών είναι απαραίτητη για τον σχηματισμό ζυμαριού με την βέλτιστη συνοχή. Συχνά είναι απαραίτητη η ανάμιξη του ζυμαριού σε χαμηλή ταχύτητα και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε να είναι δυνατή η σωστή ενυδάτωση των συστατικών του ζυμαριού. Επιπλέον, η προσθήκη διαιτητικών ινών στα αρτοσκευάσματα επιτρέπει την αντικατάσταση ακριβών συστατικών, τα οποία χρησιμοποιούνται ως βελτιωτικά της ποιότητας και της διατηρησιμότητας των προϊόντων, μειώνοντας το κόστος και βελτιώνοντας την καταναλωτική τους αποδοχή, καθώς οι διαιτητικές ίνες αποτελούν συστατικά «καθαρής ετικέτας - clean label» στην επισήμανση των προϊόντων.

Στην κατηγορία των διαιτητικών ινών που μπορούν να προστεθούν στα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης έχουν μελετηθεί ίνες από δημητριακά, αλλά και ίνες με πηκτικές ιδιότητες, όπως τα κόμμεα (υδροκολλοειδή). Η προσθήκη διαιτητικών ινών από δημητριακά (κριθάρι, αραβόσιτο, βρώμη και σίτο) σε ποσοστά 3, 6 και 9 % σε άρτο ελεύθερο γλουτένης με βάση άμυλο αραβοσίτου και ρυζάλευρο έχει μελετηθεί από τους Sabanis et al. (2009a). Οι μελετητές αναφέρουν, ότι η προσθήκη ινών βρώμης και αραβοσίτου βελτίωσαν την διόγκωση και την υφή της ψίχας του άρτου. Επιπλέον, ο άρτος με 3% ίνες αραβοσίτου έλαβε την υψηλότερη οργανοληπτική βαθμολογία ως προς το χρώμα, την εμφάνιση, το άρωμα, την γεύση και την συνολική αποδοχή. Καθώς η προσθήκη ινών αραβοσίτου ενίσχυσε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του άρτου χωρίς γλουτένη, έγινε περαιτέρω βελτιστοποίηση της συνταγής ως προς τα ποσοστά νερού και προσθήκης ινών αραβοσίτου με χρήση της μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης (RSM) (Sabanis et al., 2009b). Η βελτιστοποιημένη συνταγή οδηγεί σε αρτοσκεύασμα με βελτιωμένη διόγκωση, μαλακή ψίχα και ενισχυμένο σε διαιτητικές ίνες 5.2% (Sabanis et al., 2009b). Επιπλέον έχει μελετηθεί η προσθήκη σε ποσοστό 10% διαφορετικών κλασμάτων πτύρων ρυζιού, τα οποία διέφεραν ως προς τα ποσοστά πρωτεΐνης, λίπους και διαιτητικών ινών (κλάσμα διαλυτών προς αδιάλυτων διαιτητικών ινών) για την βελτίωση των ποιοτικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και της διάρκειας ζωής άρτου με βάση το ρυζάλευρο (Phimolsiripol et al., 2012). Η ενίσχυση άρτου χωρίς γλουτένη από πίτυρο ρυζιού βελτίωσε την ποιότητα του τελικού προϊόντος, δίνοντας σκουρότερο χρώμα κόρας, βελτιωμένη διόγκωση και μαλακή υφή ψίχας ενώ βελτίωσε και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (από 4.4 για το δείγμα αναφοράς στο 5.9 μέχρι 7.7 σε δεκαβάθμια κλίμακα αρεσκείας). Η προσθήκη πτύρων ρυζιού αύξησε την διατροφική αξία των αρτοσκευασμάτων, αυξάνοντας την περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνη και διαιτητικές ίνες και παρέτεινε την διάρκεια ζωής τους, ιδιαίτερα των αρτοσκευασμάτων με πίτυρα ρυζιού υψηλής περιεκτικότητας σε διαλυτές ίνες (Phimolsiripol et al., 2012).

Όσον αφορά την προσθήκη διαιτητικών ινών με πηκτικές ιδιότητες, τα υδροκολλοειδή, έχουν μελετηθεί ως δομικοί παράγοντες σε μικρές ποσότητες (0.3-2% επί του αλεύρου) στην ανάπτυξη προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, αλλά και σε

μεγαλύτερα ποσοστά (μέχρι 12% επί του αλεύρου) για την βελτίωση των ποιοτικών, οργανοληπτικών και διατροφικών χαρακτηριστικών των αρτοσκευασμάτων (Angioloni & Collar 2009a; Hager & Arendt 2013). Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η υποκατάσταση μέχρι 12% του ρυζάλευρου από υδροκολλοειδή όπως η καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη (CMC), και το κόμμα χαρουπιού, αλλά και μιγμάτων υδροκολλοειδών-πρεβιοτικών, όπως οι γαλακτο-ολιγοσακχαρίτες και οι φρουκτο-ολιγοσακχαρίτες. Τα τελικά προϊόντα αναλύθηκαν με βάση τα ρεολογικά, οργανοληπτικά και φυσικά χαρακτηριστικά τους με τα αποτελέσματα των αναλύσεων να προτείνουν την χρήση κόμματος χαρουπιού και των μιγμάτων καρβοξυμεθυλοκυτταρίνης-πρεβιοτικών ως τις κατάλληλες διαιτητικές ίνες για την παρασκευή άρτου χωρίς γλουτένη (Angioloni & Collar, 2009a).

3.10.2.2 Λειτουργικά συστατικά

Για την ενίσχυση της διατροφικής αξίας αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη μπορούν να χρησιμοποιηθούν λειτουργικά συστατικά όπως τα πρεβιοτικά (ινουλίνη, ανθεκτικό άμυλο, ολιγοσακχαρίτες), β-γλυκάνη, ίνες ψίλλιου (*Psyllium*) αλλά και προβιοτικά.

Πρεβιοτικά

Ως πρεβιοτικά μπορούν να οριστούν μη-αφομοιώσιμα συστατικά με ευεργετικές επιδράσεις στην υγεία του ξενιστή, τα οποία διεγείρουν την δραστηριότητα ενός ή περισσότερων βακτηρίων (προβιοτικά) στο γαστρεντερικό σύστημα (Scholz-Ahrens et al., 2007). Οι κυριότεροι τύποι πρεβιοτικών είναι η ινουλίνη, οι ολιγοσακχαρίτες και το ανθεκτικό άμυλο. Συγκεκριμένα η ινουλίνη και οι ολιγοσακχαρίτες υπάρχουν φυσικά σε διάφορα φρούτα και λαχανικά όπως οι μπανάνες, το κichώριο, το σκόρδο, τα κρεμμύδια, τα πράσα αλλά και το σιτάρι (Buttriss & Stokes, 2008). Η ενσωμάτωση πρεβιοτικών ουσιών στην καθημερινή διατροφή αποτελεί πιο αποτελεσματικό τρόπο ενίσχυσης της μικροχλωρίδας του εντέρου σε σχέση με την χορήγηση προβιοτικών σκευασμάτων (Korus et al., 2006).

Η ινουλίνη ανήκει στην οικογένεια των φρουκτανών και είναι μίγμα ολιγομερών και πολυμερών φρουκτόζης με βαθμό πολυμερισμού ≥ 10 και προέρχεται κυρίως από το κichώριο και τους εδώδιμους κονδύλους του ηλίανθου (*Helianthus tuberosus*). Οι ολιγοσακχαρίτες χωρίζονται κυρίως στους γαλακτο-ολιγοσακχαρίτες (GOS) και τους φρουκτο-ολιγοσακχαρίτες (FOS). Οι γαλακτο-ολιγοσακχαρίτες αποτελούνται από τρεις έως πέντε μονοσακχαρίτες ενωμένους με α -1,6 δεσμούς και οι φρουκτο-ολιγοσακχαρίτες αποτελούνται από μικρές αλυσίδες μονάδων φρουκτόζης ενωμένων με β -2,1 γλυκοζιτικούς δεσμούς και παράγονται κυρίως με υδρόλυση του πολυμερούς της ινουλίνης. Η ινουλίνη και οι ολιγοσακχαρίτες ευνοούν την ανάπτυξη των λακτοβάκιλλων και των βακτηρίων *bifidus* τα οποία βρίσκονται στην μικροχλωρίδα του εντέρου παρεμποδίζοντας ταυτόχρονα την ανάπτυξη άλλων ανεπιθύμητων βακτηρίων.

Έρευνα που διεξήχθη σε ομάδα δέκα εθελοντών, οι οποίοι κατανάλωναν 9 g ινουλίνη/ ημέρα για δύο εβδομάδες, αναφέρει σχεδόν διπλάσια αύξηση του ποσοστού των βακτηρίων *bifidus* (Harmsen et al., 2002). Αντίθετα σε άλλη έρευνα με δεκατέσσερις εθελοντές οι οποίοι κατανάλωναν προβιοτικά σκευάσματα για δύο εβδομάδες δεν αναφέρεται αύξηση των βακτηρίων *bifidus* στο έντερο. Επιπλέον έχει μελετηθεί η επιλεκτική διέγερση των βακτηρίων *bifidus* από την κατανάλωση ινουλίνης και ολιγοφρουκτόζης σε έρευνα με οκτώ υγιής εθελοντές για 45 ημέρες (Gibson et al., 1995). Οι εθελοντές κατανάλωναν 15 g σουκρόζης ανα ημέρα για τις πρώτες 15 ημέρες, στις επόμενες 15 ημέρες η σουκρόζη αντικαταστάθηκε από 15 g ολιγοφρουκτόζης ανά ημέρα, ενώ μόνο τέσσερις από τους εθελοντές συνέχισαν για τις τελευταίες 15 ημέρες την κατανάλωση 15 g ινουλίνης ανά ημέρα. Τα αποτελέσματα τις έρευνας επιβεβαιώνουν ότι η κατανάλωση ολιγοφρουκτόζης και ινουλίνης αυξάνει τα βακτήρια *bifidus* στο έντερο.

Επιπλέον, η ινουλίνη αναφέρεται να αυξάνει την απορρόφηση του ασβεστίου στην εντερική οδό, καθώς μετατρέπει το ασβέστιο σε ιονισμένη μορφή κατά την διάρκεια της πέψης στο παχύ έντερο (Abrams et al., 2005), συμβάλλοντας στην πρόληψη και αντιμετώπιση της οστεοπόρωσης από την οποία πάσχουν συχνά τα άτομα με κοιλιοκάκη (Andrews, 1999).

Με βάση όσα ειπώθηκαν ανωτέρω, η ινουλίνη και οι ολιγοσακχαρίτες αποτελούν βιοδραστικά συστατικά, η ενσωμάτωση των οποίων σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης έχει μελετηθεί ευρέως.

Η προσθήκη ινουλίνης σε ποσοστό 5% οδηγεί στην παρασκευή καλής ποιότητας άρτου ελεύθερου γλουτένης, ο οποίος εμφανίζει υψηλή διόγκωση, αργό ρυθμό μπαγιατέματος και υψηλή οργανοληπτική αποδοχή (Korus et al., 2006). Επιπλέον, η οργανοληπτική αξιολόγηση άρτου χωρίς γλουτένη με φρουκτο-ολιγοσακχαρίτες αντί για ζάχαρη, προτιμήθηκε εξίσου από ομάδα ατόμων με κοιλιοκάκη (Morais et al., 2014). Στην παρασκευή κέικ χωρίς γλουτένη με βάση το ρυζάλευρο έχει μελετηθεί η υποκατάστασή του με ινουλίνη και μίγμα ινουλίνης-ινών βρώμης σε ποσοστό μέχρι 20%. Η προσθήκη ινουλίνης δεν μετέβαλλε τις ρεολογικές ιδιότητες της ζύμης σε σχέση με το δείγμα αναφοράς, μείωσε σημαντικά τον γλυκαιμικό δείκτη του τελικού προϊόντος, ενώ ο συνδυασμός ινουλίνης με ίνες βρώμης οδήγησαν στην ανάπτυξη προϊόντος με υψηλά ποσοστά διαιτητικών ινών (Gularte et al., 2012a).

Ωστόσο έχει αναφερθεί και αποικοδόμηση της ινουλίνης κατά την αρτοποιητική διαδικασία σε ποσοστά από 33% μέχρι 78% ανάλογα με τα αρχικά ποσοστά προσθήκης εξαιτίας της υδρόλυσης των φρουκτανών με χαμηλό βαθμό πολυμερισμού από την δράση της μαγιάς (*Saccharomyces cerevisiae*) κατά την επώαση και κατά τον κλιβανισμό (Praznik et al., 2002; Korus et al., 2006; Capriles & Areas, 2013). Η μαγιά παράγει ιμβερτάση, η οποία μπορεί να υδρολύσει τις χαμηλού μοριακού βάρους φρουκτάνες, οι οποίες είναι και επιρρεπείς στην υδρόλυση κατά τον κλιβανισμό (Praznik et al., 2002).

Επιπλέον η παρουσία των φρουκτανών στη σύνθεση των αρτοσκευασμάτων ευνοεί την αντίδραση Maillard κατά τον κλιβανισμό, καθώς στα παρασκευάσματα φρουκτανών περιέχονται αναγωγικά σάκχαρα, τα οποία αντιδρούν με τα αμινοξέα, αλλά και η υδρόλυση των χαμηλού μοριακού βάρους φρουκτανών κατά τον

κλιβανισμό αυξάνει την ποσότητα των ελεύθερων σακχάρων (ειδικά της φρουκτόζης) (Hager et al., 2011; Capriles & Areas, 2013). Η καστανώση της κόρας και της ψίχας είναι επιθυμητή, καθώς τα αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη είναι γενικά πιο ανοιχτόχρωμα από τα αρτοσκευάσματα σίτου (Gallagher et al., 2003a).

Το ανθεκτικό άμυλο (RS) θεωρείται πρεβιοτικό και λειτουργική διαιτητική ίνα (Almeida et al., 2013). Το ανθεκτικό άμυλο έχει οριστεί ως το άθροισμα του αμύλου και των προϊόντων του αμύλου που είναι ανθεκτικά κατά την διαδικασία της πέψης στο λεπτό έντερο υγιών ατόμων. Το ανθεκτικό άμυλο μπορεί να ταξινομηθεί σε τέσσερις τύπους με βάση το μηχανισμό με τον οποίο ανθίσταται στην πέψη και τις διαφορετικές πηγές τροφίμων από τα οποία προέρχεται (**Πίνακας 3.3**) (Fuentes-Zaragoza et al., 2010).

Πίνακας 3.3 Τύποι ανθεκτικού αμύλου (Fuentes-Zaragoza et al., 2010).

Τύπος Ανθεκτικού Αμύλου	Ιδιότητες	Πηγές
RS1 Φυσικά μη προσπελάσιμο	Δεν διογκώνεται, δεν ζελατινοποιείται και δεν διασπείρεται πλήρως Η μήτρα δεν είναι εύκολα προσβάσιμη από τα αμυλολυτικά ένζυμα	Ολόκληροι ή μερικώς αλεσμένοι σπόροι, υδροθερμικά κατεργασμένο ρύζι, όσπρια
RS2 Εγγενώς ανθεκτικό	Κοκκώδες με περιοχές υψηλής κρυσταλλικότητας	Ωμές πατάτες, πράσινες μπανάνες, άμυλο καλαμποκιού υψηλής περιεκτικότητας σε αμυλόζη (HAM)
RS3 Αναδιαμορφωμένο	Μη κοκκώδες	Μαγειρεμένα και ψυγμένα άμυλα
RS4 Τροποποιημένο	Διαλυτό ή αδιάλυτο	Δεν απαντάται στη φύση ή σε φυσικά προϊόντα

Ο τύπος RS1 μπορεί να βρεθεί σε ολόκληρους ή μερικώς αλεσμένους σπόρους και δεν είναι εύκολα προσβάσιμο στα αμυλολυτικά ένζυμα. Ο τύπος RS2 αποτελεί το άμυλο που είναι σε κοκκώδη μορφή, βρίσκεται σε ωμές πατάτες και σε πράσινες μπανάνες και η υψηλή κρυσταλλικότητά του (συμπαγής δομή) το καθιστά ανθεκτικό στην ενζυμική πέψη. Το ανθεκτικό άμυλο τύπου 3, RS3 αναφέρεται σε αναδιαμορφωμένο άμυλο, το οποίο σχηματίζεται σε τρόφιμα υψηλής περιεκτικότητας σε άμυλο τα οποία κατεργάζονται θερμικά (μαγείρεμα) και κατόπιν ψύχονται. Ο τελευταίος τύπος ανθεκτικού αμύλου (RS4) αφορά χημικώς τροποποιημένα άμυλα μέσω διαδικασιών δεξτρινοποίησης, αιθεροποίησης ή εστεροποίησης με σκοπό να μην υδρολύονται από τα πεπτικά ένζυμα. (Fuentes-Zaragoza et al., 2010).

Το ανθεκτικό άμυλο έχει συνδεθεί με πολλά πιθανά οφέλη για την υγεία καθώς μπορεί να προάγει την υγεία του παχέος εντέρου, προλαμβάνοντας φλεγμονώδεις

νόσους και καρκίνο (Topping et al., 2003). Η κατανάλωση ανθεκτικού αμύλου έχει συνδεθεί με υπογλυκαιμική δράση και μπορεί να αυξήσει τον χρόνο κορεσμού, καθώς ο μεταβολισμός του λαμβάνει χώρα σε διάστημα 5-7 ωρών από την στιγμή της κατανάλωσης σε σχέση με το κοινό άμυλο το οποίο πέπτεται άμεσα. (Raben et al., 1994; Reader et al, 1997). Τέλος το ανθεκτικό άμυλο ενισχύει την υγεία του εντέρου καθώς η κατανάλωσή του έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των λιπαρών οξέων μικρής αλυσίδας, ιδιαίτερα του βουτυρικού, και τη μείωση του pH. Η αύξηση της οξύτητας περιορίζει την ανάπτυξη παθογόνων βακτηρίων, αυξάνει την απορρόφηση θρεπτικών συστατικών και αποτρέπει την απορρόφηση συστατικών με τοξική ή καρκινογενετική δράση. Το βουτυρικό οξύ προωθεί την αύξηση των φυσιολογικών κυττάρων του παχέος εντέρου και αποτρέπει την ανάπτυξη των καρκινικών κυττάρων. Επιπλέον το ανθεκτικό άμυλο αυξάνει το ποσοστό των διαιτητικών ινών των τροφίμων, ενώ θεωρείται πρεβιοτικό, καθώς αποτελεί υπόστρωμα για την ανάπτυξη των βακτηρίων *bifidus* του εντέρου (Nugent, 2005).

Το ανθεκτικό άμυλο έχει ενσωματωθεί με επιτυχία σε αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη λόγω των μοναδικών λειτουργικών του ιδιοτήτων. Σε αυτές ανήκουν το λευκό χρώμα, η ήπια γεύση, η χαμηλή κοκκομετρία και η μειωμένη ικανότητα δέσμευσης νερού, χάρη στις οποίες η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε ψημένα προϊόντα επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό την διαδικασία παραγωγής τους και την ποιότητα τους σε σχέση με διαιτητικές ίνες από σιτηρά ή φρούτα (Baixauli et al., 2008b).

Η ενσωμάτωση ανθεκτικού αμύλου σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης ως εναλλακτικό συστατικό αμύλου αραβοσίτου δεν επηρέασε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και την οργανοληπτική αποδοχή του άρτου σε σχέση με το δείγμα αναφοράς, ενώ ταυτόχρονα αύξησε το ποσοστό των διαιτητικών ινών κατά 89% (Korus et al., 2009).

Επιπλέον έχει μελετηθεί και η δυνατότητα χρήσης αλεύρου άγουρης μπανάνας (ως πηγή ανθεκτικού αμύλου και διαιτητικών ινών) στην ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με βάση ρυζάλευρο και άμυλο πατάτας (Siqueira et al., 2013). Τα αποτελέσματα της έρευνας είναι ενθαρρυντικά καθώς η διατροφική αξία του άρτου με ποσοστά 30%-60% άλευρο άγουρης μπανάνας είναι υψηλότερη σε σχέση με τα συμβατικά αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με βάση άμυλα ενώ ταυτόχρονα το τελικό προϊόν έλαβε υψηλή οργανοληπτική βαθμολογία.

β- γλυκάνη

Η β- γλυκάνη είναι ένα φυσικός πολυσακχαρίτης με υψηλά λειτουργικά και διατροφικά χαρακτηριστικά. Η δομή της αποτελείται από μακριές ευθύγραμμες αλυσίδες δομικών μορίων D-γλυκοπυρανόζης ενωμένων με β -1,4 και β-1,3 δεσμούς. Οι κυριότερες πηγές β- γλυκάνης είναι το κριθάρι με ποσοστά 5-11%, η βρώμη με περιεκτικότητα 3-7% και τέλος το σιτάρι με 1% (Skendi et al., 2003). Σύμφωνα με κλινικές μελέτες, η κατανάλωση της β-γλυκάνης έχει συνδεθεί με την μείωση των επιπέδων χοληστερόλης και των μεταγευματίων επιπέδων γλυκόζης και ινσουλίνης στο αίμα. Επιπλέον, η β-γλυκάνη μπορεί να θεωρηθεί διαιτητική ίνα και χρησιμοποιείται ως υδροκολλοειδές στα τρόφιμα λόγω της ικανότητας σχηματισμού υψηλού ιξώδους.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς της Ευρωπαϊκής Αρχής για την ασφάλεια των τροφίμων (EFSA) και της διαχειριστικής Αρχής Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) για τις Ηνωμένες Πολιτείες μπορεί να γίνει ισχυρισμός υγείας για μείωση του κινδύνου εμφάνισης στεφανιαίας νόσου από την κατανάλωση τροφίμων με βάση ολικής άλεσης βρώμη, που περιέχουν κατ' ελάχιστον 0.75 g διαλυτών ινών ανά ποσό αναφοράς που καταναλίσκεται (π.χ. 50 g ψωμί).

Μπορεί να αναφερθεί η προσθήκη β-γλυκάνης σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με βάση ρυζάλευρο και άμυλο πατάτας για την διατροφική ενίσχυσή τους. Η προσθήκη β-γλυκάνης από βρώμη αύξησε την περιεκτικότητα σε νερό της ζύμης, ενώ την έκανε ταυτόχρονα και ελαστική. Το τελικό προϊόν εμφάνισε μαλακή ψίχα και αργό ρυθμό μπαγιατέματος, ενώ η διατροφική αξία του άρτου ήταν υψηλή με περιεκτικότητα 0.75 g β-γλυκάνης ανά μερίδα άρτου (50 g) (Hager et al., 2011). Επιπλέον έχει μελετηθεί η επίδραση της β-γλυκάνης στα δομικά χαρακτηριστικά αρτοσκευασμάτων με βάση το ρυζάλευρο. Η προσθήκη β-γλυκάνης σε ποσοστό 1% αύξησε τον ειδικό όγκο του άρτου, οδήγησε στην δημιουργία υψηλού πορώδους, ενώ δεν αύξησε την σκληρότητα της ψίχας σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (Lazaridou et al., 2007).

Προβιοτικά

Τα τελευταία χρόνια, τα προβιοτικά έχουν προωθηθεί ευρέως από τα μέσα ενημέρωσης. Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας (FAO/WHO, 2001) τα προβιοτικά μπορούν να οριστούν ως ζωντανοί μικροοργανισμοί που χορηγούνται σε ποσότητες που επηρεάζουν θετικά την υγεία του ξενιστή.

Το προζύμι έχει χρησιμοποιηθεί από τους αρχαίους χρόνους στην αρτοποιητική διαδικασία χάρη στην ικανότητά του να βελτιώσει την ποιότητα και να αυξάνει τη διάρκεια ζωής του άρτου. Κατά τη διάρκεια επώασης του προζυμιού τα γαλακτικά βακτήρια (LAB) παράγουν σημαντικό αριθμό μεταβολιτών με θετική επίδραση στην υφή και το μπαγιατέμα του άρτου, όπως οργανικά οξέα, εξωπολυσακχαρίτες (EPS) και / ή ένζυμα. Οι εξωπολυσακχαρίτες που παράγονται από τα γαλακτικά βακτήρια έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν πιο ακριβά υδροκολλοειδή που χρησιμοποιούνται ως βελτιωτικά άρτου. Η μείωση του ρυθμού μπαγιατέματος μπορεί να αποδοθεί στην πτώση του pH που σχετίζεται με την παραγωγή οργανικών οξέων, τα οποία προκαλούν αύξηση της δράσης των πρωτεασών και των αμυλασών του αλεύρου. Παράλληλα με την βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του άρτου, κατά την επώαση του προζυμιού αυξάνεται η βιοδιαθεσιμότητα των ανόργανων συστατικών και μετάλλων.

Η λειτουργικότητα της επώασης άρτου με χρήση προζυμιού, βασίζεται στην διόγκωση ζύμης που σχηματίζεται από την προσθήκη του νερού σε αλεύρι δημητριακών από την δράση των μικροοργανισμών που υπάρχουν εκ φύσεως στο αλεύρι. Σύμφωνα με μικροβιολογικές μελέτες μπορούν να απομονωθούν από προζύμι περισσότερα από 50 είδη γαλακτικών βακτηρίων, κυρίως του είδους *Lactobacillus*, και περισσότερα από 25 είδη ζυμομυκήτων, του γένους *Saccharomyces* και *Candida*. Ωστόσο ως βασικά γαλακτικά βακτήρια στο προζύμι μπορούν να χαρακτηριστούν τα

είδη *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus sanfranciscensis*, *Lactobacillus pontis* και *Lactobacillus panis* (Arendt et al, 2007).

Αρκετοί ερευνητές αναφέρουν την χρήση προζυμιού κατά την επώαση για την βελτίωση άρτου ελεύθερου γλουτένης. Συγκεκριμένα σε άρτο με βάση αλεύρο σόργου, παρά την προσθήκη 2% υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνης για την παρασκευή τελικού προϊόντος με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά, η τάση για επίπεδη επιφάνεια και για σχηματισμό τρύπας στην ψίχα παρέμεινε, ενώ τα προβλήματα αυτά εξαλείφθηκαν με την χρήση προζυμιού κατά την επώαση του άρτου (Schober et al., 2007).

Επιπλέον και η γεύση, το άρωμα και η υφή στο στόμα βελτιώθηκαν με την προσθήκη προζυμιού σε άρτο από μίγμα αλεύρων αραβοσίτου, ρυζιού και φαγόπυρου (Pruska-Kedzior et al., 2008).

Σε άρτο με βάση αλεύρα από φαγόπυρο, αμάρανθο, ρεβίθι και κινόα, η χρήση προζυμιού οδήγησε στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά άρτου με βάση το σίτο, ενώ βελτίωσε και την γεύση τους σε σχέση με τον άρτο που είχε ζυμωθεί με μαγιά αρτοποιίας (Coda et al., 2010).

Αξίζει να σημειωθεί πως η δράση των προβιοτικών βακτηρίων κατά την διάρκεια της επώασης οδηγεί στην αποδόμηση της γλουτένης (Di Cagno et al., 2002, 2004; Rizzello et al., 2007). Αποτελέσματα κλινικής μελέτης αναφέρουν ότι κατά την παρασκευή προζυμιού από 30% αλεύρο σίτου και μη τοξικά αλεύρα (βρώμη, κεχρί και φαγόπυρο) με την χρήση γαλακτικών βακτηρίων και επώαση μετά από 24 ώρες, οι γλοιαδίνες του σίτου και τα χαμηλού μοριακού βάρους πολυπεπτίδια υδρολύθηκαν σχεδόν ολοκληρωτικά. Επιπλέον άρτος που είχε επωαστεί για 2 ώρες με μαγιά αρτοποιίας και άρτος με προζύμι δόθηκε προς κατανάλωση σε ομάδα δεκαεπτά εθελοντών πασχόντων από κοιλιοκάκη. Η κατανάλωση άρτου με μαγιά αρτοποιίας μετέβαλε την εντερική διαπερατότητα των δεκατριών από τους δεκαεπτά εθελοντές, σε σχέση με την κατανάλωση του άρτου με προζύμι, η κατανάλωση του οποίου δεν μετέβαλε την εντερική διαπερατότητα των ασθενών (Di Cagno et al., 2002, 2004). Ως εκ τούτου, η χρήση προζυμιού κατά την επώαση άρτου χωρίς γλουτένη μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο επιμόλυνσης των αλεύρων από γλουτένη.

3.10.2.3 Μικροθρεπτικά συστατικά

Τα μικροθρεπτικά συστατικά διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανθρώπινη διατροφή, για την βέλτιστη σωματική και ψυχική λειτουργία, συμπεριλαμβανομένου και της πρόληψης και θεραπείας διαφόρων ασθενειών. Οι δύο τύποι των μικροθρεπτικών συστατικών είναι οι βιταμίνες και τα μέταλλα.

Λίγες μελέτες υπάρχουν διαθέσιμες σχετικά με την ενίσχυση προϊόντων χωρίς γλουτένη με μικροθρεπτικά συστατικά.

Πιο συγκεκριμένα, λόγω του υψηλού ποσοστού εμφάνισης οστεοπόρωσης σε ασθενείς με κοιλιοκάκη, έχει μελετηθεί η άμεση προσθήκη ασβεστίου ως εναλλακτική πηγή γαλακτοκομικών συστατικών, τα οποία μπορεί να προκαλούν δυσανεξία στη λακτόζη. Αναφέρεται η επίδραση προσθήκης μεμονωμένου αλλά και συνδυασμού καζεϊνικών αλάτων ασβεστίου και κιτρικού ασβεστίου ποσοστού 2% σε αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη (Krupa-Kozak et al., 2011a). Τα αρτοσκευάσματα

που περιείχαν ασβέστιο εμφάνισαν πιο μαλακή και ελαστική ψίχα και βελτιωμένη γεύση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της οργανοληπτικής αξιολόγησης αναφέρονται χαρακτηριστικά βουτυρένιου αρώματος και γεύσης. Επιπλέον και τα ποσοστά ασβεστίου αυξήθηκαν στα αρτοσκευάσματα με 2% κιτρικό ασβέστιο και συνδυασμό 1.3% κιτρικού ασβεστίου + 0.7% καζεϊνικών αλάτων ασβεστίου από 2.2 mg/100 g του άρτου αναφοράς σε 469 mg/100 g και 315.3 mg/100 g αντίστοιχα.

Διαφορετικοί τύποι ασβεστίου έχουν μελετηθεί σε αρτοσκεύασμα ελεύθερο γλουτένης εμπλουτισμένο με 3.9% ινουλίνη. Διαφορετικές οργανικές και μη οργανικές πηγές ασβεστίου, όπως το γαλακτικό ασβέστιο, κιτρικό ασβέστιο, χλωριούχο ασβέστιο, και ανθρακικό ασβέστιο, προστέθηκαν σε αρχικό ποσοστό 0,6% στην συνταγή. Ο άρτος που παρασκευάστηκε με ανθρακικό ασβέστιο έλαβε την υψηλότερη οργανοληπτική βαθμολογία (από 5.7 για το δείγμα αναφοράς στους 7 βαθμούς σε εννιαβάθμια κλίμακα) ενώ και η διατροφική του αξία αυξήθηκε με ποσοστό ασβεστίου 10.85 mg/g σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (0.15 mg/g) (Krupa-Kozak et al., 2012)

Η αναιμία είναι μία ασθένεια η οποία συχνά συνδυάζεται με την κοιλιοκάκη, είτε λόγω της κακής απορρόφησης του σιδήρου, ή λόγω της μειωμένης κατανάλωσης προϊόντων τα οποία είναι εμπλουτισμένα με σίδηρο. Η ενίσχυση των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης με σίδηρο παρουσιάζει περιορισμούς λόγω της μεταλλικής γεύσης που μπορεί να προσδώσει στα αρτοσκευάσματα, αλλά και του υψηλού κόστους του. Έχει μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης πέντε πηγών σιδήρου (πυροφωσφορικός σίδηρος, πυροφωσφορικός σίδηρος με γαλακτωματοποιητές, σύμπλοκο νατρίου EDTA- σιδήρου (NaFeEDTA), θειικός σίδηρος, και στοιχειακός σίδηρος) σε αρτοσκεύασμα χωρίς γλουτένη. Σε γενικές γραμμές, η προσθήκη σιδήρου πρόσδωσε στα αρτοσκευάσματα παρόμοια χαρακτηριστικά με τον άρτο αναφοράς, εκτός από τους άρτους με πυροφωσφορικό σίδηρο με γαλακτωματοποιητές και θειικό σίδηρο, τα οποία παρουσίασαν υψηλότερη υγρασία ψίχας. Τα αρτοσκευάσματα με πυροφωσφορικό σίδηρο και σύμπλοκο νατρίου EDTA- σιδήρου εμφάνισαν την σκληρότερη ψίχα. Κατά την οργανοληπτική αξιολόγηση η χρήση του στοιχειακού σιδήρου για την ανάπτυξη άρτου δημιουργεί την λιγότερο μεταλλική γεύση (Kiskini et al., 2012).

3.10.2.4 Συστατικά φρούτων και λαχανικών

Συστατικά φρούτων και λαχανικών αλλά και παραπροϊόντων της βιομηχανίας τροφίμων με την μορφή αλεύρων ή εκχυλισμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διατροφική ενίσχυση αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη. Στην κατηγορία των παραπροϊόντων ανήκουν υπολείμματα από την παραγωγική διαδικασία παρασκευής προϊόντων φρούτων και λαχανικών, όπως χυμών ή κομπόστας φρούτων. Τα υπολείμματα μπορούν να περιλαμβάνουν σπόρους, φλούδες, κουκούτσια, κοτσάνια, και πυρήνες. Ενθαρρυντικά αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί με την ενσωμάτωση συστατικών φρούτων και λαχανικών σε αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη, καθώς τα συστατικά αυτά μπορούν να αυξήσουν τις ποσότητες των θρεπτικών συστατικών των τελικών προϊόντων.

Πιο αναλυτικά έχει μελετηθεί η προσθήκη σταφιδίνης σε συμπυκνωμένη και ξηρή μορφή σε ποσοστά 3% και 5% σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με βάση άμυλο σίτου. Η σταφιδίνη είναι σιρόπι που παράγεται με βρασμό αποξηραμένων σταφίδων χωρίς την προσθήκη ζάχαρης ή άλλως προσθέτων. Η προσθήκη συμπυκνωμένης σταφιδίνης σε ποσοστό 3% ενισχύει την διόγκωση, το χρώμα και την υφή του άρτου, ωστόσο οδηγεί σε υψηλό ρυθμό μαγιατέματος. Αντίθετα η προσθήκη ξηρής σταφιδίνης στο ίδιο ποσοστό οδήγησε σε εξίσου βελτιωμένη διόγκωση και χρώμα ενώ παρέτεινε και την διάρκεια ζωής του άρτου. Η οργανοληπτική αξιολόγηση των τελικών προϊόντων αναφέρει την προτίμηση των δοκιμαστών προς τα αρτοσκευάσματα με συμπυκνωμένη σταφιδίνη, λόγω της φρουτώδους γεύσης τους. Τα προϊόντα που παρασκευάστηκαν με 5% σταφιδίνη δεν ήταν αποδεκτά λόγω του πολύ σκούρου χρώματός τους (Sabanis et al., 2008).

Σχετικά με την χρήση παραπροϊόντων της βιομηχανίας τροφίμων για την διατροφική ενίσχυση προϊόντων χωρίς γλουτένη μπορεί να αναφερθεί η επιτυχημένη προσθήκη πολτού πορτοκαλιού (O'Shea et al., 2015) και αποβουτυρωμένων σπόρων φράουλας και φραγκοστάφυλου (Korus et al., 2012) σε αρτοσκευάσματα και σπόρων κίτρινης κολοκύθας σε κέικ (Gorgonio et al., 2011).

Συγκεκριμένα ο πολτός πορτοκαλιού αποτελεί το 45% με 60% του συνολικού φρούτου, και θεωρείται πηγή διαιτητικών ινών, βιοδραστικών συστατικών όπως (βιταμίνη C και μέταλλα) και έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε λίπος ($\approx 2\%$). Για την παρασκευή άρτου ποιοτικά αποδεκτού ακολουθήθηκε πειραματικός σχεδιασμός για να βρεθούν τα βέλτιστα ποσοστά προσθήκης νερού, πολτού πορτοκαλιού και χρόνου επώασης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ο συνδυασμός υψηλού χρόνου επώασης και χαμηλών ποσοστών προσθήκης πολτού πορτοκαλιού επέδρασε στην αύξηση της διόγκωσης και την μείωση της σκληρότητας της ψίχας 2 και 24 ώρες μετά τον κλιβανισμό. Ο βέλτιστος συνδυασμός που προκύπτει περιλαμβάνει 5.5% πολτό πορτοκαλιού, και το ποσοστό των διαιτητικών ινών του τελικού προϊόντος ανέρχεται στο 3.9% σε σχέση με το δείγμα αναφοράς χωρίς πολτό πορτοκαλιού (2.1%) (O'Shea et al., 2015).

Οι αποβουτυρωμένοι σπόροι φράουλας και φραγκοστάφυλου έχουν τραβήξει την προσοχή των ερευνητών λόγω της διατροφικής τους αξίας (υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες, διαιτητικές ίνες και βιοδραστικά συστατικά). Η προσθήκη σπόρων φράουλας αύξησε την διόγκωση αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη σε σχέση με τον άρτο αναφοράς και τον άρτο με προσθήκη σπόρων φραγκοστάφυλου, πιθανώς λόγω του υψηλού ποσοστού σακχάρων στους σπόρους φράουλας, τα οποία ενισχύουν την δράση της μαγιάς, αυξάνοντας την παραγωγή CO₂. Επιπλέον η προσθήκη και των δύο ειδών σπόρων μείωσε την σκληρότητα της ψίχας των φρέσκων αρτοσκευασμάτων (2 ώρες μετά τον κλιβανισμό), ενώ μόνο στην περίπτωση προσθήκης σπόρων φράουλας η σκληρότητα του άρτου ήταν μικρότερη σε σχέση με το δείγμα αναφοράς 24 ώρες μετά τον κλιβανισμό. Η ενσωμάτωση 5% σπόρων φραγκοστάφυλου και 10% σπόρων φράουλας δεν επέδρασε αρνητικά στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, ενώ ενίσχυσε και την διατροφική τους αξία, αυξάνοντας την περιεκτικότητά τους σε διαιτητικές ίνες, πρωτεΐνες και πολυφαινόλες (Korus et al., 2012).

Οι σπόροι κολοκύθας απορρίπτονται συνήθως μετά προεπεξεργασία του καρπού. Έχει μελετηθεί η προσθήκη αλεύρου σπόρων κολοκύθας σε κέικ ελεύθερο γλουτένης με βάση άλευρο καλαμποκιού και σύγκριση με κέικ αναφοράς με βάση άλευρο σίτου. Η πυκνότητα της ζύμης που παράγεται μετά την προσθήκη 40% αλεύρου σπόρων κολοκύθας βρέθηκε μικρότερη από την πυκνότητα της ζύμης σίτου, υποδηλώνοντας την δημιουργία πιο αφράτης δομής σε σχέση με το κέικ αναφοράς. Τελικά το κέικ που παρασκευάστηκε με την προσθήκη αλεύρου σπόρων κολοκύθας εμφάνισε συγκρίσιμη διόγκωση και ομοιόμορφη ψίχα όπως και το κέικ αναφοράς. Η διατροφική αξία του κέικ με την προσθήκη 40% αλεύρου σπόρων κολοκύθας περιείχε σημαντικά ποσοστά πρωτεϊνών (12.28%) και αδιάλυτων ινών (10.20%) (Gorgonio et al., 2011).

Οι πρόσφατες και συνεχιζόμενες μελέτες σχετικά με την χρήση των παραπροϊόντων από την επεξεργασία τροφίμων έχουν δείξει τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε προϊόντα χωρίς γλουτένη, καθώς μπορούν να ενισχύσουν φυσικά τη γεύση, τη δομή και τη διατροφική αξία των προϊόντων, ενώ ταυτόχρονα αποτελούν δυννητικά οικονομικές πρώτες ύλες. Ωστόσο συχνά είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία τους (για παράδειγμα ξήρανση) πριν την χρήση τους με αποτέλεσμα να μειώνεται η εξοικονόμηση κόστους από την χρήση τους.

3.10.3 Συστατικά για την βελτίωση της ποιότητας αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης

Συστατικά, όπως τα υδροκολλοειδή, οι πρωτεΐνες, τα ένζυμα, οι γαλακτωματοποιητές και τα συντηρητικά, χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα και να επεκταθεί η διάρκεια ζωής των αρτοσκευασμάτων (Gray & BeMiller 2003). Για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη έχουν χρησιμοποιηθεί πρόσθετα όπως τα υδροκολλοειδή, οι πρωτεΐνες, τα ένζυμα, οι γαλακτωματοποιητές και συνδυασμός τους.

Υδροκολλοειδή

Τα υδροκολλοειδή (κόμμεα) είναι υδρόφιλοι πολυσακχαρίτες μακράς αλυσίδας και μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους στις παρακάτω κατηγορίες: α) από θαλάσσια φύκη, όπως το άγαρ, η καρραγενάνη και τα αλγινικά άλατα, β) από εκχυλίσματα φυτών όπως η πηκτίνη και η β-γλυκάνη, γ) από εκκρίματα φυτών όπως το αραβικό κόμμι, δ) κόμμεα από σπόρους όπως το κόμμι χαρουπιού, το κόμμι γκουάρ και το ψύλλιο, ε) κόμμεα παραγόμενα από μικροοργανισμούς, όπως το κόμμι ξανθάνης, στ) τροποποιημένοι φυσικοί πολυσακχαρίτες όπως παράγωγα κυτταρινών (μέθυλοκυτταρίνη- MC, υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνη- HPMC και καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη- CMC (Houben et al., 2012).

Τα υδροκολλοειδή αναγνωρίζονται ως πηγές διαιτητικών ινών λόγω των υψηλών ποσοστών διαλυτών ινών που περιέχουν, μεταξύ 60-90%. Στα διάφορα οφέλη για την υγεία από την κατανάλωση υδροκολλοειδών περιλαμβάνονται η μείωση του κινδύνου εμφάνισης καρδιαγγειακών νοσημάτων, ο έλεγχος του βάρους και η διατήρησης της υγείας του εντέρου. Ωστόσο η χρήση τους για την διατροφική ενίσχυση των προϊόντων

δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, λόγω του υψηλού κόστους τους, αλλά και λόγω της δυσκολίας ενσωμάτωσής τους στα προϊόντα σε ποσοστό ικανό να δικαιολογεί διατροφικό ισχυρισμό. Η υψηλή ικανότητα αύξησης του ιξώδους και σχηματισμού πηκτών των υδροκολλοειδών παρουσία νερού, έχει καθιερώσει το πρακτικό ποσοστό προσθήκης τους στα προϊόντα στο 1%. Ωστόσο ορισμένα υδροκολλοειδή όπως το κόμμι ακακίας και η ινουλίνη παρουσιάζουν χαμηλό ιξώδες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλότερα ποσοστά στον σχεδιασμό προϊόντων με οφέλη για την υγεία (Viebkke et al., 2014).

Ο ρόλος των υδροκολλοειδών στην αρτοποιητική διαδικασία προϊόντων ελεύθερων γλουτένης είναι να μεταβάλλουν τις ιδιότητες του ζυμαριού και να βελτιώνουν την δομή, την υφή, την οργανοληπτική αποδοχή και την διάρκεια ζωής των προϊόντων στα οποία προστίθενται (Lazaridou et al., 2007). Τα υδροκολλοειδή αντιδρούν με το νερό δημιουργώντας πηκτές, υποβοηθώντας έτσι την αύξηση του ιξώδους του ζυμαριού, την ενίσχυση των τοιχωμάτων των φυσαλίδων αέρα του ζυμαριού, αυξάνοντας την ικανότητα συγκράτησης αερίου κατά την διαδικασία της επώασης.

Τα υδροκολλοειδή που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη είναι η υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνη (HPMC) και το κόμμι ξανθάνης (Anton & Artfield 2008). Τα συνήθη ποσοστά προσθήκης υδροκολλοειδών κυμαίνονται από 0.3% μέχρι 2% επί του αλεύρου (Hager & Arendt, 2013).

Έχει μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης υδροκολλοειδών όπως η καρραγενάνη, η αλγίνη, το κόμμι ξανθάνης, η καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη και η ζελατίνη, στις ιδιότητες ζύμης και άρτου ελεύθερου γλουτένης με βάση άλευρα ρυζιού, αραβοσίτου και σόγιας. Σε γενικές γραμμές, η προσθήκη των υδροκολλοειδών αύξησε την σταθερότητα της ζύμης, με την πιο ισχυρή επίδραση να εμφανίζει το κόμμι ξανθάνης, ακολουθούμενο από την καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη. Τα αρτοσκευάσματα με την προσθήκη υδροκολλοειδών εμφάνισαν αυξημένη διόγκωση σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (χωρίς προσθήκη υδροκολλοειδών), και μπορεί να αναφερθεί αύξηση της διόγκωσης κατά 18.3% του άρτου με κόμμι ξανθάνης σε σχέση με τον άρτο αναφοράς. Η δομή της ψίχας εμφάνισε τις υψηλότερες τιμές μέσης διαμέτρου πόρων για τα αρτοσκευάσματα με ζελατίνη, κόμμι ξανθάνης και καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη, με τα δείγματα αυτά να φαίνονται πιο αφράτα. Η σκληρότητα της ψίχας μειώθηκε με την προσθήκη κόμμιος ξανθάνης και καρβοξυμεθυλοκυτταρίνης, ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε ο ρυθμός παλαίωσης των άρτων (Sciarini et al., 2010).

Η αλληλεπίδραση της προσθήκης υδροκολλοειδών και νερού στις ιδιότητες ζύμης και αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη έχει μελετηθεί με πειραματικό σχεδιασμό (μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης), βάσει του οποίου προκύπτουν βελτιστοποιημένες συνταγές.

Τα βέλτιστα ποσοστά υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνης (HPMC) και νερού με την εφαρμογή πειραματικού σχεδιασμού για την βελτιστοποίηση άρτου με βάση ρυζάλευρο, άμυλο πατάτας και σκόνη γάλακτος βρέθηκαν να είναι 2.2% HPMC σε εύρος τιμών 0.5-2.5% και 79% περιεκτικότητα σε νερό σε εύρος τιμών 70-95% (McCarthy et al, 2005), ενώ σε άρτο με βάση ρυζάλευρο και άμυλο αραβοσίτου

αναφέρονται ποσοστά 1.5% και 88.7%, αντίστοιχα, με το ίδιο εύρος τιμών για την HPMC και το νερό (Sabanis & Tzia, 2011).

Πρόσφατα μελετήθηκε με την μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης η επίδραση της HPMC, του κόμμεος ξανθάνης και του συνδυασμού τους στην παρασκευή άρτου από ρυζάλευρο, άλευρο αραβοσίτου, άλευρο τεφ και άλευρο φαγόπυρου (Hager & Arendt, 2013). Τα αποτελέσματα της μελέτης αναφέρουν πως η επίδραση των υδροκολλοειδών στα αρτοσκευάσματα ποικίλλει ανάλογα με την πρώτη ύλη του αλεύρου που χρησιμοποιείται για την αρτοποιήση. Συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση HPMC αύξησε την διόγκωση των αρτοσκευασμάτων από άλευρο τεφ και αραβόσιτου, μείωσε τον όγκο των άρτων από ρυζάλευρο, ενώ δεν επηρέασε τον όγκο του άρτου από φαγόπυρο. Αντιθέτως, η προσθήκη κόμμεος ξανθάνης επέδρασε αρνητικά στην διόγκωση όλων των αρτοσκευασμάτων. Επιπλέον η προσθήκη HPMC μείωσε την σκληρότητα της ψίχας όλων των αρτοσκευασμάτων, σε σχέση με το κόμμι ξανθάνης που αύξησε την σκληρότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων από άλευρο τεφ και φαγόπυρο, δεν επηρέασε την υφή της ψίχας του άρτου από ρυζάλευρο ενώ μείωσε την σκληρότητα της ψίχας των άρτων από αραβόσιτο.

Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη με το διπλό στόχο τόσο της ενίσχυσης της οργανοληπτικής αποδοχής, όσο και της διατροφικής (αύξηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη και παροχή βασικών αμινοξέων). Οι πρωτεΐνες χρησιμοποιούνται κυρίως ως μιμητές της γλουτένης βελτιώνοντας τις ρεολογικές ιδιότητες της ζύμης, καθώς και τα δομικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων και την διάρκεια ζωής τους. Οι πιο κοινές πηγές πρωτεϊνών είναι τα γαλακτοκομικά, τα αυγά, τα όσπρια και τα δημητριακά. Ωστόσο είναι σημαντικό να ληφθούν υπ' όψιν πιθανή αλλεργία ή δυσανεξία (λακτόζη, σόγια), πριν την κατανάλωση αρτοσκευασμάτων εμπλουτισμένων σε πρωτεΐνη.

Οι πρωτεΐνες του αυγού χρησιμοποιούνται λόγω των γαλακτωματοποιητικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας σχηματισμού αφρού, ενσωματώνοντας και συγκρατώντας αέρα κατά την διάρκεια του ψησίματος, σταθεροποιώντας την δομή της ζύμης και βελτιώνοντας το πορώδες και την υφή της ψίχας του τελικού προϊόντος. Αναφέρεται η βελτιστοποίηση αρτοσκευασμάτων με βάση άλευρο αμάρανθου με την προσθήκη αλβουμίνης, η οποία αύξησε κυρίως την ελαστικότητα της ψίχας (Schoenlechner et al., 2010).

Η πρωτεΐνη σόγιας, μπορεί να ενσωματωθεί σε αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη με την μορφή αλεύρου σόγιας ή πρωτεϊνικών συμπυκνωμάτων. Η προσθήκη αλεύρου σόγιας σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης, βελτιώνει τον όγκο και τα δομικά χαρακτηριστικά τους, ωστόσο η βελτιστοποίηση της ποιότητας των τελικών προϊόντων επηρεάζεται από τα ποσοστά προσθήκης αλεύρου σόγιας και την κοκκομετρία του αλεύρου (Ribotta et al., 2004).

Οι πρωτεΐνες των γαλακτοκομικών προϊόντων έχουν ποικίλες λειτουργικές ιδιότητες και επιδράσεις στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων. Η προσθήκη τους μπορεί

να βελτιώσει τον όγκο, την γεύση, την υφή και το χρώμα του τελικού προϊόντος. Είναι χαρακτηριστική η καστανώση της κόρας άρτων που περιέχουν πρωτεΐνες γάλακτος, λόγω των αντιδράσεων Maillard και καραμελοποίησης, οι οποίες ευνοούνται από την ύπαρξη των πρωτεϊνών γάλακτος και της λακτόζης (Houben et al., 2012). Έχει ερευνηθεί η ενσωμάτωση σε αρτοσκεύασμα ελεύθερο γλουτένης με βάση άμυλο σίτου πρωτεΐνης ορού γάλακτος, στερεά φρέσκου γάλακτος και απομονωμένη πρωτεΐνη γάλακτος σε ποσοστό 6% επί του αλεύρου, και η ταυτόχρονη αύξηση του νερού κατά 10% και 20% σε σχέση με τα δείγματα αναφοράς. Η ταυτόχρονη αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό και η προσθήκη πρωτεϊνών γάλακτος οδήγησε στην παραγωγή άρτων με σκουρόχρωμη κόρα, βελτιωμένη διόγκωση και μαλακή ψίχα (Gallagher et al., 2003a).

Συχνά γίνεται ενσωμάτωση πρωτεϊνών από ποικίλες πηγές στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη. Μπορεί να αναφερθεί η χρήση μαθηματικού σχεδιασμού για την βελτιστοποίηση των επιπέδων αλεύρου σόγιας και σκόνης γάλακτος σε άρτο χωρίς γλουτένη. Ο βέλτιστος συνδυασμός αλεύρου σόγιας 7.5% και σκόνης γάλακτος 7.8% οδηγεί στην αύξηση του πρωτεϊνικού περιεχομένου του άρτου από 1% στο 7.3%, με μικρές οργανοληπτικές μεταβολές (Sanchez et al., 2004).

Τέλος, μπορεί να αναφερθεί συγκριτική μελέτη της επίδρασης στην ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης, πρωτεϊνικών συμπυκνωμάτων και απομονωμένων πρωτεϊνών από διαφορετικές πηγές προέλευσης (Ziobro et al., 2013). Οι πρωτεΐνες που μελετήθηκαν ήταν η αλβουμίνη, το κολλαγόνο, πρωτεΐνη μπιζελιού, λούπινου και σόγιας. Η επίδραση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων εξαρτάται από το είδος των πρωτεϊνών που ενσωματώθηκαν. Συγκεκριμένα, η διόγκωση μειώθηκε με την προσθήκη πρωτεΐνης σόγιας και κολλαγόνου, ενώ σημαντική αύξηση σημειώθηκε με την προσθήκη πρωτεϊνών λούπινου και αλβουμίνης. Ως προς την οργανοληπτική αποδοχή, ο άρτος με πρωτεΐνη μπιζελιού σημείωσε την υψηλότερη βαθμολογία, ενώ ο άρτος με την πρωτεΐνη σόγιας ήταν ο λιγότερο αποδεκτός. Η προσθήκη των πρωτεϊνών βελτίωσε όχι μόνο την διατροφική αξία των αρτοσκευασμάτων αλλά παρέτεινε και την διάρκεια ζωής τους (Ziobro et al., 2013). Γενικά μπορεί να ειπωθεί πως απαιτείται βελτίωση της συνταγής για κάθε είδος πρωτεΐνης, λόγω των διαφορετικών τους λειτουργικών ιδιοτήτων (ικανότητα συγκράτησης νερού, γαλακτωματοποιητικές ιδιότητες).

Ένζυμα

Τα ένζυμα προστίθενται συχνά για να βελτιώσουν τις ιδιότητες της ζύμης και την ποιότητα και διάρκεια ζωής των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα ένζυμα στην παραγωγή προϊόντων ελεύθερων γλουτένης είναι ένζυμα που τροποποιούν το άμυλο (αμυλάση και γλυκοζυλοτρανσφεράση της κυκλοδεξτρίνης [CGT]), τα ένζυμα που ενώνουν τα πρωτεϊνικά μόρια (τρανσγλουταμινάση [TG] και οξειδάση της γλυκόζης [GO]), και πρωτεάσες.

Το ένζυμο της τρανσγλουταμινάσης TG καταλύει αντιδράσεις στις οποίες ένα ακετύλιο μεταφέρεται από τη γ-καρβοξυλική ομάδα των υπολειμμάτων γλουταμίνης

ενός πεπτιδίου (δότης ακετυλίου) σε διάφορες πρωτοταγείς αμίνες (δέκτες ακετυλίου). Όταν μία ε-αμινομάδα του υπολείμματος λυσίνης ενός πεπτιδίου συμμετέχει στην ενζυμική αυτή αντίδραση ως δέκτης ακετυλίου, τα πρωτεϊνικά μόρια συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ τους (σύνδεση με σταυροειδείς δεσμούς, cross-linking) (Nonaka et al., 1989). Υπάρχουν αρκετές μελέτες σχετικά με την λειτουργικότητα των ενζύμων που ενώνουν πρωτεϊνικά μόρια, όπως η TG και η GO. Συγκεκριμένα, η προσθήκη TG σε ποσοστό 1% επί του αλεύρου σε αρτοσκευάσματα με βάση ρυζάλευρο, που περιείχαν και 2% υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνη (HPMC), ενίσχυσε την δομή του πρωτεϊνικού δικτύου, βελτίωσε την ικανότητα συγκράτησης αερίων της ζύμης με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να χαρακτηρίζεται από υψηλή διόγκωση και βελτιωμένη υφή (Gujral & Rosell 2004a). Επιπλέον έχει μελετηθεί η προσθήκη σε αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη διαφορετικών ποσοστών TG (0, 0.1, 1, και 10 U TG/g πρωτεΐνης στην συνταγή) και ποικίλων πρωτεϊνικών πηγών (σκόνη γάλακτος, αλεύρι σόγιας και σκόνη αυγού) και αναφέρεται πως ο βαθμός σχηματισμού του πρωτεϊνικού δικτύου εξαρτάται από το είδος της πρωτεΐνης και το ποσοστό του ενζύμου που χρησιμοποιήθηκε (Moore et al., 2006). Έρευνα έχει εκπονηθεί σχετικά με την επίδραση της προσθήκης TG σε ποσοστά 0, 1 και 10 U/g πρωτεΐνης στην δημιουργία δικτύου σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με βάση άλευρα από καστανό ρύζι, φαγόπυρο, αραβόσιτο, βρώμη, σόργο και τεφ (Renzetti et al., 2008). Τα αποτελέσματα έδειξαν την θετική επίδραση της TG στα αρτοσκευάσματα από φαγόπυρο και καστανό ρύζι, ενώ δεν υπήρξε επίδραση του ενζύμου στα αρτοσκευάσματα από σόργο και τεφ. Τέλος μπορεί να αναφερθεί μελέτη σχετικά με την βελτιστοποίηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών άρτου χωρίς γλουτένη (υψηλή διόγκωση και μαλακή υφή ψίχας) με τον συνδυασμό TG (1.35 U TG /g πρωτεΐνης ρυζάλευρου), αλβουμίνης (0.67%) και καζεΐνης (0.67%) (Storck et al, 2013).

Η οξειδάση της γλυκόζης GO καταλύει την οξείδωση της γλυκόζης προς γλυκονικό οξύ και υπεροξειδίο του υδρογόνου, το οποίο στο αλεύρι σίτου προκαλεί το σχηματισμό δισουλφιδικών δεσμών μεταξύ των πρωτεϊνών της γλουτένης, δημιουργώντας το πρωτεϊνικό δίκτυο. Η προσθήκη GO (0.01% επί του αλεύρου) σε αρτοσκεύασμα ελεύθερο γλουτένης με βάση το ρυζάλευρο και HPMC (2% επί του αλεύρου), οδήγησε στην δημιουργία αρτοσκευασμάτων με αυξημένη διόγκωση και μαλακή υφή (Gujral & Rosell, 2004b). Επιπλέον η προσθήκη GO σε αρτοσκευάσματα από άλευρο σόργου και αραβοσίτου χωρίς την προσθήκη υδροκολλοειδών βελτίωσε την διόγκωση και μείωσε το φαινόμενο της κατάρρευσης της κόρας (Renzetti & Arendt, 2009a).

Οι κυκλοδεξτρίνες είναι κυκλικά μόρια που σχηματίζονται από ενζυμική κατεργασία του αμύλου. Η γλυκοζυλοτρανσφεράση της κυκλοδεξτρίνης CGT αποικοδομεί το άμυλο με ενδομοριακή διάσπαση του α-1,4 γλυκοζιδικού δεσμού του αμύλου, οδηγώντας στον σχηματισμό των κυκλοδεξτρινών, οι οποίες είναι κυκλικά oligομερή με 6, 7, ή 8 μονάδες γλυκόζης και ονομάζονται α-, β-, ή γ-κυκλοδεξτρίνες αντίστοιχα. Η εσωτερική κοιλότητα των κυκλοδεξτρινών είναι υδρόφοβη, ενώ εξωτερικά το μόριο είναι υδρόφιλο σχηματίζοντας εύκολα σύμπλοκα με λιπίδια και πρωτεΐνες. Η προσθήκη CGT σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης οδηγεί στην βελτίωση του όγκου, την μείωση της σκληρότητας της ψίχας και μείωση του ρυθμού

παλαιώσης (Gujral et al., 2003a, 2003b). Επιπλέον, και η προσθήκη α-αμυλάσης βελτίωσε την διόγκωση του άρτου, αλλά οδήγησε στον σχηματισμό κολλώδους υφής της ψίχας. Τέλος, η CGT φαίνεται να έχει υψηλότερη δράση ενάντια στην παλαιώση των αρτοσκευασμάτων σε σχέση με την α-αμυλάση (Gujral et al., 2003b).

Οι πρωτεάσες είναι ένζυμα που προκαλούν πρωτεόλυση, δηλαδή, καταβολισμό των πρωτεϊνών με υδρόλυση των πεπτιδικών δεσμών που συνδέουν τα αμινοξέα στην πολυπεπτιδική αλυσίδα. Η προσθήκη πρωτεασών σε ποσοστά (0.01% και 0.1% επί του αλεύρου) επέδρασε αρνητικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη από φαγόπυρο και σόργο, καθώς η αποδόμηση των πρωτεϊνών των αλεύρων οδήγησε σε ζύμες πολύ ρευστές, με μειωμένες ιξωδοελαστικές ιδιότητες και μειωμένη ικανότητα συγκράτησης αερίων (Renzetti & Arendt 2009a). Ωστόσο, η προσθήκη πρωτεασών σε αρτοσκευάσματα από άλευρο ρυζιού και καστανού ρυζιού, αύξησε την διόγκωση και οδήγησε στην δημιουργία αφράτης δομής, μείωσε την σκληρότητα της ψίχας και αύξησε την διάρκεια ζωής των τελικών προϊόντων (Kawamura-Konishi et al., 2013; Renzetti & Arendt 2009b). Σύμφωνα με τις ανωτέρω έρευνες ο ρόλος της πηγής πρωτεΐνης είναι ένα βασικό στοιχείο για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων των ενζύμων στην ποιότητα των τελικών προϊόντων.

Γαλακτωματοποιητές

Οι γαλακτωματοποιητές αποτελούν κοινά πρόσθετα των ψημένων αρτοσκευασμάτων. Χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των ζυμαριών αλλά και της δομής, του όγκου, της υφής (μείωση σκληρότητας της ψίχας) και της διάρκειας ζωής των αρτοσκευασμάτων (Gray & BeMiller 2003). Οι γαλακτωματοποιητές είναι αμφίφιλα μόρια καθώς περιέχουν υδρόφοβες και υδρόφιλες ομάδες που τους επιτρέπουν να μεταναστεύουν και να αλληλεπιδρούν στην διεπιφάνεια μεταξύ 2 μη αναμίξιμων φάσεων (έλαιο και νερό), μειώνοντας την επιφανειακή τάση και σχηματίζοντας γαλάκτωμα (Nunes et al., 2009a). Οι γαλακτωματοποιητές αλληλεπιδρούν με τις πρωτεΐνες σχηματίζοντας σύμπλοκα, ενισχύοντας την συγκράτηση αερίου στο ζυμάρι μέσω της μείωσης της επιφανειακής τάσης των φυσαλίδων αέρα, ενώ επιβραδύνουν και την διαδικασία παλαιώσης, αλληλεπιδρώντας με τα μόρια του αμύλου και μειώνοντας έτσι τον ρυθμό αναδιάταξής του (Demirkesen et al., 2010b). Οι γαλακτωματοποιητές προστίθενται σε ποσοστά από 0.1% -1% επί του αλεύρου κατά την παρασκευή αρτοσκευασμάτων και οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι γαλακτωματοποιητές είναι: διακετυλο-τρυγικοί εστέρες των μονογλυκεριδίων (DATEM), λεκιθίνη, distilled monoglycerides, νατριούχος στεατικός εστέρας του γαλακτικού οξέος (sodium stearyl lactylate), νατριούχος στεατικός εστέρας του φουμαρικού οξέος (sodium stearyl fumarate), σορβικός εστέρας του λαουρικού οξέος (sodium lauryl sulfate), νατριούχος διοκτυλεστέρας του θειοηλεκτρικού οξέος (dioctyl sodium sulfosuccinate), πολυγλυκερολικοί εστέρες των λιπαρών οξέων (polyglycerol esters) και εστέρες σακχαρόζης με λιπαρά οξέα (sucrose esters) (Nunes et al., 2009a, Demirkesen et al., 2010b).

Έχει μελετηθεί η προσθήκη γαλακτωματοποιητών στην παρασκευή άρτου χωρίς γλουτένη (Nunes et al., 2009a; Onyango et al., 2009a). Η επίδραση των

γαλακτωματοποιητών στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων ποικίλλει ανάλογα με το είδος και την ποσότητα του γαλακτωματοποιητή που προστίθεται. Συνολικά, η ποιότητα των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη (διόγκωση, υφή, εμφάνιση) ενισχύθηκε και η διάρκεια ζωής τους παρατάθηκε με την χρήση του κατάλληλου γαλακτωματοποιητή στο βέλτιστο ποσοστό προσθήκης του. Επιπλέον έχει μελετηθεί η συνδυασμένη χρήση υδροκολλοειδών και γαλακτωματοποιητών στην ανάπτυξη άρτου χωρίς γλουτένη με βάση το ρυζάλευρο (Demirkesen et al., 2010b). Σύμφωνα με τους ερευνητές η συνδυασμένη προσθήκη 0.5% (επί του αλεύρου) γαλακτωματοποιητή (DATEM) και 0.5% (επί του αλεύρου) μείγματος υδροκολλοειδών ξανθάνης-γκουάρ ή ξανθάνης-κόμμεος χαρουπιού οδήγησε στην παρασκευή άρτου με τα καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως υψηλή διόγκωση και ικανοποιητική υφή ψίχας, ενώ έλαβε και υψηλή οργανοληπτική βαθμολογία στην υφή (4.5 βαθμούς σε πενταβάθμια κλίμακα αναφοράς). Εν τούτοις, έχει αναφερθεί πως η χρήση προσθέτων (υδροκολλοειδών, γαλακτωματοποιητών και ενζύμων) στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη, οδήγησε σε τελικά προϊόντα με διαφορετικά χαρακτηριστικά, αλλά όχι απαραίτητα καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα αναφοράς, επομένως δεν είναι απαραίτητη η παρουσία τους στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη (Sciarini et al., 2012).

Συνολικά, οι επιδράσεις των προσθέτων στις λειτουργικές ιδιότητες του ζυμαριού και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά άρτων χωρίς γλουτένη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, το είδος και την ποσότητα του πρόσθετου που χρησιμοποιείται, την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται σε κάθε συνταγή, καθώς και τις συνθήκες της αρτοποιητικής διαδικασίας, και είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί η επίδρασή τους στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων κάθε συνταγής.

3.10.4 Το χαρουπάλευρο ως συστατικό αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης

Η χαρουπιά (*Ceratonia siliqua*) είναι δέντρο αειθαλές και ανήκει στην οικογένεια των Κυαμοειδών (*Fabaceae*). Φυτρώνει σε πολλές παράκτιες περιοχές της Μεσογείου. Στην Ελλάδα βρίσκεται αυτοφυής σε πολλές νησιώτικες περιοχές και κυρίως στη Κρήτη. Η χαρουπιά είναι γνωστή στην Ελλάδα και με το όνομα ξυλοκερατιά, από την αρχαιοελληνική λέξη κεράτιον, για το χαρούπι. Ο καρπός της χαρουπιάς είναι επιμήκης λοβός, συμπιεσμένος, ευθύγραμμος ή με καμπύλη, παχύτερος στις ραφές, με διαστάσεις 10-30 cm μήκος και 1.5 έως 3.5 cm πλάτος (**Σχήμα 3.10**) (Batlle & Tous, 1997). Οι λοβοί αποτελούν το 90% του βάρους του καρπού και είναι γεμάτοι με πολλούς σπόρους διατεταγμένους με γραμμικό μη επικαλυπτόμενο τρόπο, οι οποίοι διαχωρίζονται από το μεσοκάρπιο. Οι σπόροι αποτελούν το υπόλοιπο 10% του καρπού και είναι συμπιεσμένοι και ελαφρώς επιμηκισμένοι με τυπικές διαστάσεις από 8 έως 10 mm μήκος, 7 έως 8 mm πλάτος και 3 έως 5 mm πάχος (Batlle and Tous, 1997). Κατά την αρχαιότητα το βάρος των σπόρων χαρουπιού είχαν οριστεί σαν μονάδα

μέτρησης πολύτιμων λίθων και χρυσού. Από την χρήση αυτή του χαρουπιού (κεράτιον) προέρχεται και η λέξη καράτι.



Σχήμα 3.10 Λοβοί χαρουπιού με την χαρακτηριστική διάταξη των σπόρων (αριστερά), σπόροι χαρουπιού και χαρακτηριστικές διαστάσεις (δεξιά) (Με τροποποίηση Karababa & Coşkuner, 2013).

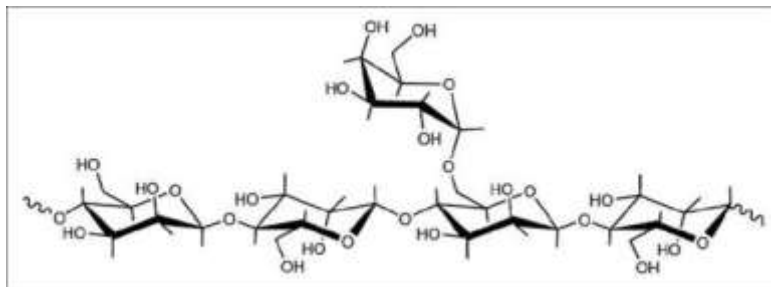
Αξιοποίηση καρπών χαρουπιάς

Οι αναφορές σχετικά με την κατανάλωση καρπών χαρουπιάς είναι αρκετά παλιές και χρονολογούνται γύρω στο 4000 π.Χ. Συγκεκριμένα, υπάρχει αναφορά στην Βίβλο, στην οποία αναφέρεται ο Ιωάννης ο Βαπτιστής κατά την απόσυρσή του στην έρημο, να έτρωγε χαρούπια (Iirumbu, 2008). Παραδοσιακά, οι λοβοί της χαρουπιάς καταναλώνονταν ως γλύκισμα από τα παιδιά ή ως τρόφιμο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως ο πόλεμος, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε σάκχαρα (Owen et al., 2003). Στην Ελλάδα, έχει αναφερθεί η κατανάλωση καβουρδισμένων σπόρων χαρουπιού ως μέρος της διατροφής ομάδων χαμηλού εισοδήματος (Marakis, 1996). Στις σύγχρονες κοινωνίες, τα χαρούπια χρησιμοποιούνται σε διάφορα επεξεργασμένα τρόφιμα, από γλυκά παρασκευάσματα μέχρι παγωτά και ροφήματα (Iirumbu, 2008).

Το πρώτο βήμα για την αξιοποίηση των χαρουπιών περιλαμβάνει την σύνθλιψη των καρπών, μέσω της οποίας διαχωρίζονται οι σπόροι από τους λοβούς καθώς επεξεργάζονται ξεχωριστά. Οι λοβοί αρχικά ψήνονται και έπειτα αλέθονται σε λεπτόκοκκο αλεύρι (carob powder). Το παραγόμενο αλεύρι χαρουπιού πωλείται στις ΗΠΑ και άλλες δυτικές χώρες σε καταστήματα υγιεινής διατροφής ως υποκατάστατο του κακάο (Yousif & Alghzawi, 2000). Η χρήση του αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι το χαρούπι δεν περιέχει καφεΐνη και έχει μικρή περιεκτικότητα σε λίπος σε σύγκριση με το κακάο, με αποτέλεσμα να επιλέγεται από άτομα με ευαισθησία στην καφεΐνη ή άτομα που ακολουθούν υγιεινό τρόπο διατροφής (Yousif & Alghzawi, 2000).

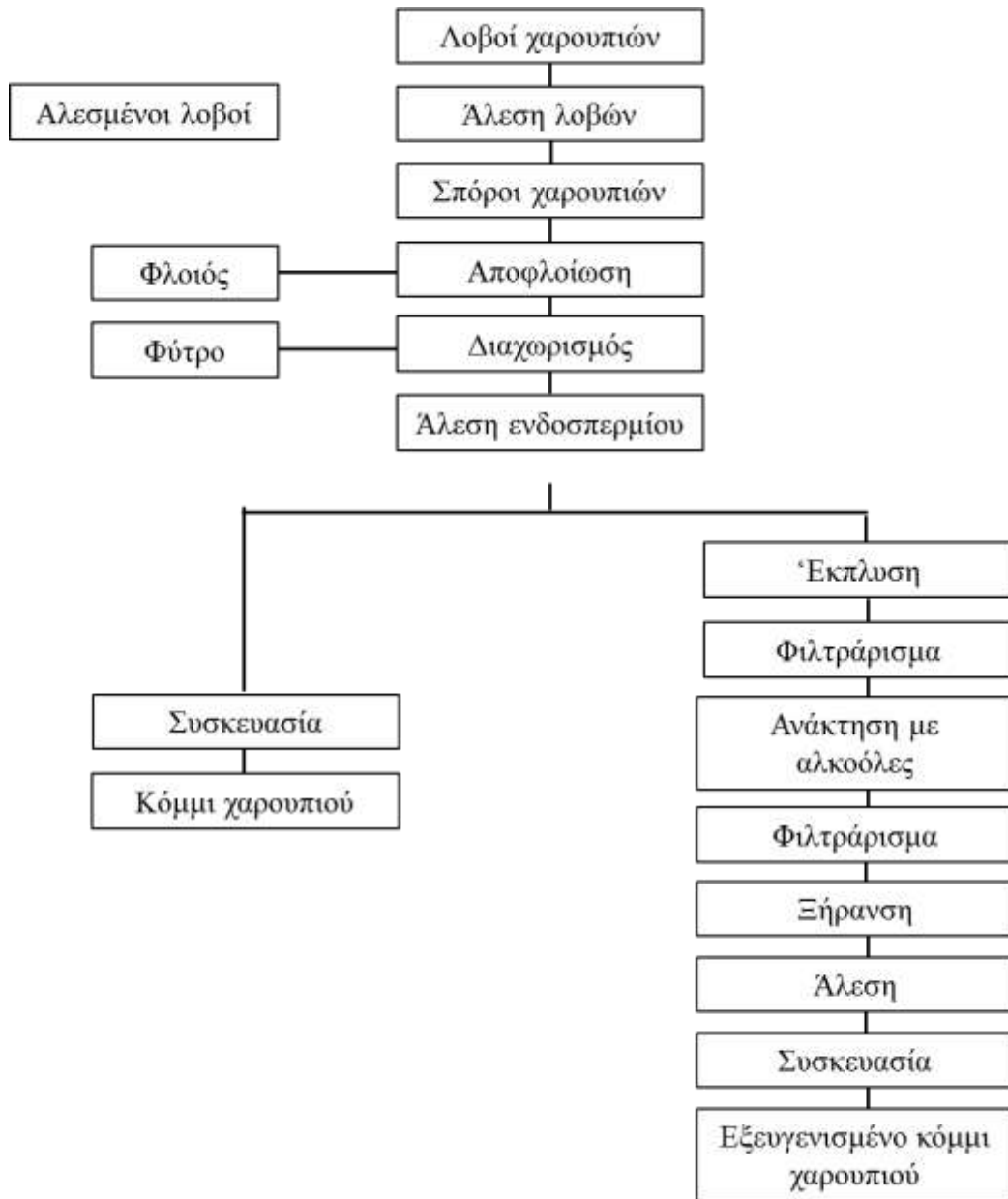
Οι σπόροι του χαρουπιού χρησιμοποιούνται κυρίως για την εξαγωγή του κόμμεος χαρουπιού (Locust bean gum). Το κόμμι χαρουπιού ανήκει στην κατηγορία των γαλακτομαννανών, με κεντρική αλυσίδα 1,4 D- μαννόζης, σε κάθε τέταρτη ή πέμπτη θέση, της οποίας βρίσκονται μονάδες D γαλακτόζης, οι οποίες συνδέονται με την κύρια αλυσίδα με 1,6 γλυκοζιτικούς δεσμούς (**Σχήμα 3.11**). Το κόμμι του χαρουπιού προέρχεται από το ενδοσπέρμιο του σπόρου με εκχύλιση με νερό ή υδατικά αλκαλικά διαλύματα. Η εκχύλιση του κόμμεος από τους σπόρους είναι μια αργή, δύσκολη διαδικασία, κυρίως λόγω της σκληρότητας του φλοιού, ο οποίος πρέπει να απομακρυνθεί από το ενδοσπέρμιο. Η διαδικασία απομόνωσης του κόμμεος χαρουπιού

ξεκινά με την αποφλοιώση των σπόρων με θειικό οξύ ή θερμική υδατική επεξεργασία. Ακολουθεί διαχωρισμός του ενδοσπερμίου από το φύτρο με άλεση και κοσκίνιση. Το κόμμα που παράγεται από την άλεση του ενδοσπερμίου εκπλένεται με αιθανόλη ή ισοπροπανόλη ώστε να ελεγχθεί το μικροβιολογικό του φορτίο. Μπορεί να καθαριστεί επιπλέον από προσμίξεις με διασπορά σε ζεστό νερό, ανάκτηση με ισοπροπανόλη ή αιθανόλη, φιλτράρισμα, ξήρανση και άλεση. Τυπικό διάγραμμα παραλαβής του κόμματος χαρουπιού φαίνεται στο **Σχήμα 3.12**. Μετά το διαχωρισμό το φύτρο χρησιμοποιείται ως πρωτεϊνικό συμπλήρωμα σε τρόφιμα και ζωοτροφές.



Σχήμα 3.11 Δομή του κόμματος χαρουπιού.

Σημαντική ικανότητά του κόμματος χαρουπιού είναι να αυξάνει το ιξώδες διαλυμάτων ακόμα και σε σχετικά χαμηλή συγκέντρωση, σταθεροποιώντας διασπορές και γαλακτώματα, ενώ μπορεί και να αντικαταστήσει το λίπος σε πολλά γαλακτοκομικά προϊόντα. Οι ιδιότητες του κόμματος χαρουπιού δεν επηρεάζονται από το pH, την παρουσία αλάτων και την θερμική επεξεργασία, καθώς είναι μη-ιονικός πολυσακχαρίτης. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλα κόμματα (καρραγενάνη, ξανθάνη ή άγαρ) για τον σχηματισμό ελαστικών και ισχυρών πηκτών (El Batal & Hasib, 2013). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (FAO/WHO, 2006) το αποδεκτό καθημερινό όριο πρόσληψης του κόμματος χαρουπιού «δεν προσδιορίζεται» ("not specified"). Ο χαρακτηρισμός «δεν προσδιορίζεται» σημαίνει ότι με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα (τοξικολογικά, βιοχημικά κ.α.) το συνολικό όριο πρόσληψης του κόμματος χαρουπιού που προκύπτει από την χρήση του σε επίπεδα που απαιτούνται για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος στα τρόφιμα δεν συνιστά κίνδυνο για την υγεία.



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα παραλαβής του κόμμεος χαρουπιού (με τροποποίηση (FAO/WHO, 2006).

Χημική σύσταση χαρουπιών

Τα δύο κύρια συστατικά του καρπού είναι (κατά βάρος): ο λοβός (90%) και οι σπόροι (10%). Ο λοβός έχει υψηλή περιεκτικότητα (48-56% κατά βάρος) σε ολικά σάκχαρα (κυρίως σακχαρόζη, γλυκόζη, φρουκτόζη και μαλτόζη) και χαμηλά ποσοστά πρωτεΐνης (3-4%) και λιπιδίων (0.4-0.8%). Επιπλέον περιέχει περίπου 18% κατά βάρος κυτταρίνη και ημικυτταρίνη. Οι ώριμοι λοβοί χαρουπιού είναι πλούσιοι σε συμπυκνωμένες ταννίνες (16-20% κατά βάρος) (Avallone et al., 1997; Karababa & Coşkuner, 2013). Η περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά του αλεύρου χαρουπιού από τους λοβούς έχει βρεθεί από τους Youssef et al. (2013) να είναι ίση με: K = 8637, Ca = 2123, Na = 505, Cu = 4, Fe = 381, Mn = 10, Zn = 24 (mg / Kg αλεύρου).

Οι σπόροι του χαρουπιού αποτελούνται από τον φλοιό (23–33%), το ενδοσπέρμιο (42–56%) και το φύτρο (20–25%) (Dakia et al., 2008). Σύμφωνα με τους El-Shatnawi & Erefej (2001), οι σπόροι χαρουπιού εμφάνισαν υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, διαιτητικές ίνες και λίπος σε σύγκριση με τους λοβούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονταν από υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες. Η χημική σύσταση εμπορικού αλεύρου σπόρων χαρουπιού βρέθηκε (επί ξηρού) 10% πρωτεΐνη, 1.6% λίπος, 3% τέφρα και 67% συνολικές διαιτητικές ίνες, εκ των οποίων 25% αδιάλυτες και 42% διαλυτές (Durazzo et al., 2014). Η χημική σύσταση του αλεύρου του ενδοσπερμίου του χαρουπιού επηρεάζεται από την διαδικασία παραλαβής του, η οποία μπορεί να γίνει είτε με υδατική θερμική επεξεργασία ή με όξινη επεξεργασία (**Πίνακας 3.4**). Αξίζει να σημειωθεί πως το πρωτεϊνικό περιεχόμενο του αλεύρου του ενδοσπερμίου, το οποίο προήλθε από υδατική επεξεργασία του σπόρου ήταν υψηλότερο, πιθανώς λόγω μεγαλύτερης επιμόλυνσης από το φύτρο του χαρουπιού (Dakia et al., 2008).

Πίνακας 3.4 Σύσταση (%) του αλεύρου του ενδοσπερμίου (Dakia et al., 2008).

	Υδατική Επεξεργασία	Όξινη επεξεργασία
Υγρασία	6.5	5.9
Τέφρα	1.5	0.7
Ολική Πρωτεΐνη	7.4	5.2
Λιπίδια (ουδέτερα και πολικά)	1.5	1.3
Υδατάνθρακες	89.6	92.8

Όλες οι μετρήσεις αναφέρονται επί ξηρού, εκτός από την υγρασία.

Το φύτρο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, η οποία ονομάζεται και καρουβίνη. Η τυπική σύσταση εμπορικού αλεύρου του φύτρου χαρουπιού βρέθηκε (επί ξηρού) 46% πρωτεΐνη, 5% διαιτητικές ίνες, 25% υδατάνθρακες, 7% λίπος και 6% τέφρα (Bengoechea et al., 2008). Ως καρουβίνη ορίζεται το μίγμα διαφόρων πρωτεϊνών με μοριακό βάρος που κυμαίνεται από αρκετές χιλιάδες Da έως περισσότερα από ένα εκατομμύριο. Συγκεκριμένα, το 78% των πρωτεϊνών έχουν μοριακό βάρος μεταξύ 65000 Da και 1000000 Da (Wang et al, 2001). Η σύνθεση των πρωτεϊνών του φύτρου του χαρουπιού είναι 14,5% αλβουμίνη, 50,0% σφαιρίνες, 3,4% προλαμίνες, και 32,1% γλουτελίνες (Smith et al, 2010). Η σύνθεση των αμινοξέων στο φύτρο του χαρουπιού χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε ασπατικό οξύ, γλουταμινικό οξύ και αργινίνη και μικρά ποσοστά αμινοξέων μεθειονίνης και κυστεΐνης, περίπου το 30% των πρότυπων τιμών με βάση το FAO-WHO (1991) (**Πίνακας 3.5**). Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε αρωματικά αμινοξέα (φαινυλαλανίνη και τυροσίνη) βρέθηκε περίπου 25% χαμηλότερη από τη συνιστώμενη (Bengoechea et al., 2008).

Πίνακας 3.5 Σύνθεση αμινοξέων του αλεύρου από φύτρο χαρουπιού (Bengoechea et al., 2008).

Αμινοξέα	g αμινοξέος / 100 g πρωτεΐνης	Πρότυπες τιμές FAO-WHO (1991)
Ασπαρτικό οξύ	8.75	
Γλουταμινικό οξύ	28.1	
Αργινίνη	11.5	
Σερίνη	5.05	
Γλυκίνη	5.0	
Αλανίνη	4.4	
Προλίνη	8.2	
Ιστιδίνη	2.3	1.9
Θρεονίνη	3.5	3.4
Βαλίνη	3.05	3.5
Ισολευκίνη	2.3	2.8
Λευκίνη	5.9	6.6
Λυσίνη	5.5	5.8
Τρυπτοφάνη	0.9	1.1
Φαινυλαλανίνη	2.9	6.3*
Τυροσίνη	2.0	
Μεθειονίνη	0.0	2.5**
Κυστεΐνη	0.8	

* Φαινυλαλανίνη + Τυροσίνη

** Μεθειονίνη + Κυστεΐνη

Η σύσταση του λίπους του φύτρου είναι πλούσια σε ακόρεστα λιπαρά οξέα, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3.6**. Σύμφωνα με τους Dakia et al. (2007), περισσότερο από το 78% του συνόλου των λιπαρών οξέων αποτελείται από το ελαϊκό, και λιγνελαικό οξύ. Ωστόσο η περιεκτικότητά σε ω-3 λιπαρά οξέα (λιγνελαικό οξύ) ήταν ιδιαίτερα χαμηλή (0.7%). Παλαιότερη έρευνα των Maza et al. (1989) έδειξε αντίστοιχα υψηλή περιεκτικότητα σε ελαϊκό οξύ (38.5%) και λιγνελαικό οξύ (43.6%) στο λίπος αλεύρου από φύτρο χαρουπιού.

Πίνακας 3.6 Η σύσταση των λιπαρών οξέων του λίπους του φύτρου χαρουπιού (Maza et al.,1989; Dakia et al., 2007).

Λιπαρά οξέα	Maza et al. (1989)	Dakia et al. (2007)
	% (των συνολικών λιπαρών οξέων)	
Μυριστικό	0.1	-
Παλμιτικό	14.2	16.2
Στεατικό	3.0	3.4
Ελαϊκό	38.5	34.4
Λιγνελαικό	43.6	44.5
Λιγνελαικό	0.3	0.7

Ενσωμάτωση χαρουπάλεου σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης

Το αλεύρι από σπόρους χαρουπιού χαρακτηρίζεται από υψηλή διατροφική αξία, λόγω των υψηλών ποσοστών πρωτεϊνών και διαιτητικών ινών που περιέχει. Επιπλέον, μπορεί να αποτελέσει εναλλακτικό άλευρο για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης, καθώς οι πρωτεΐνες του εμφανίζουν παρόμοιες ρεολογικές ιδιότητες με την γλουτένη (Wang et al., 2001). Επιπλέον το χαρουπάλεο αποτελεί ασφαλές άλευρο για κατανάλωση από άτομα που πάσχουν από κοιλιοκάκη, καθώς η σύσταση των πρωτεϊνών του είναι κυρίως γλουτελίνες και γλοβουλίνες/αλβουμίνες, ενώ περιέχει πολύ μικρό ποσοστό προλαμινών (3.4%), οι οποίες αποτελούν τις τοξικές πρωτεΐνες για την κοιλιοκάκη (Smith et al., 2010). Η προσθήκη αλεύρου από ολόκληρους σπόρους χαρουπιού σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης δεν έχει αναφερθεί βιβλιογραφικά, ωστόσο υπάρχουν αναφορές σχετικά με την ενσωμάτωση αλεύρου από το ενδοσπέρμιο και το φύτρο.

Συγκεκριμένα, τυπικά ποσοστά προσθήκης αλεύρου από το ενδοσπέρμιο του χαρουπιού (κόμμι χαρουπιού) σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης έχουν αναφερθεί μέχρι 2% επί του βάρους του αλεύρου (Sivaramakrishnan et al., 2004; Lazaridou et al., 2007; Demirkesen et al., 2010a). Η προσθήκη του κόμμιος χαρουπιού βελτίωσε την υφή και αύξησε το ιξώδες του ζυμαριού, καθώς επίσης αύξησε και την απόδοση των ψημένων προϊόντων. Επιπλέον, το κόμμι χαρουπιού μπορεί να λειτουργήσει ως δομικός παράγοντας αυξάνοντας την διόγκωση, βελτιώνοντας την δομή της ψίχας και επιβραδύνοντας την παλαίωση των αρτοσκευασμάτων (Kohajdová et al., 2009).

Όσον αφορά το αλεύρι από το φύτρο του χαρουπιού, τα ποσοστά προσθήκης του σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης έχουν αναφερθεί σε εύρος 4-30% επί του βάρους του αλεύρου (Smith, 2009; Miñarro et al., 2012; Smith et al., 2012). Μεταξύ των ερευνητών έχουν αναφερθεί αντικρουόμενα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση της προσθήκης αλεύρου από το φύτρο χαρουπιού στα ποιοτικά χαρακτηριστικά άρτων ελεύθερων γλουτένης. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Smith et al. (2012), η ενσωμάτωση αλεύρου από το φύτρο χαρουπιού οδήγησε στην παραγωγή άρτου με υψηλή διόγκωση και μειωμένη σκληρότητα ψίχας αντίστοιχων άρτου με βάση το σίτο. Αντιθέτως, οι Miñarro et al. (2012) αναφέρουν μειωμένες τιμές διόγκωσης και αυξημένη σκληρότητα σε άρτο ελεύθερο γλουτένης με προσθήκη αλεύρου από το φύτρο χαρουπιού. Οι διαφορές αυτές πιθανώς να οφείλονται στην διαφορετική χημική σύσταση του αλεύρου από φύτρο χαρουπιού που χρησιμοποιήθηκε στις δύο μελέτες, αλλά και σε διαφορές στην συνταγή και στην διαδικασία παρασκευής των αρτοσκευασμάτων.

4. Πειραματικό μέρος

4.1 Σκοπός

Η παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης αποτελεί πρόκληση για την βιομηχανία τροφίμων, λόγω της απουσίας της γλουτένης. Η γλουτένη προσδίδει στο ζυμάρι ιξωδοελαστικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να εμφανίζει υψηλή διόγκωση, μαλακή υφή, ευχάριστη γεύση και παρατεταμένη διάρκεια ζωής. Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης είναι κυρίως άλευρα, όπως το ρυζάλευρο ή το άλευρο αραβοσίτου και εξευγενισμένα άμυλα, τα οποία δεν έχουν την ικανότητα σχηματισμού ιξωδοελαστικού πρωτεϊνικού δικτύου και χαρακτηρίζονται από υψηλό υδατανθρακικό περιεχόμενο και χαμηλή περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνες. Ως αποτέλεσμα, τα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης που παράγονται χαρακτηρίζονται από μειωμένη διόγκωση, φτωχή γεύση, εύθρυπτη και κοκκώδη υφή ψίχας, μειωμένη διάρκεια ζωής, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε άμυλο, ενώ θεωρούνται και χαμηλής διατροφικής αξίας. Για την δομική και διατροφική ενίσχυση των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης, χρησιμοποιούνται πρωτεΐνες και διαιτητικές ίνες φυτικής ή ζωικής προέλευσης. Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη και ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης ενισχυμένων σε πρωτεΐνη και διαιτητικές ίνες και βελτιωμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών. Για την αύξηση της διατροφικής αξίας των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη χρησιμοποιήθηκε άλευρο από σπόρους χαρουπιού. Οι σπόροι του χαρουπιού χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραλαβή του κόμμεος χαρουπιού (Locust bean gum), ενώ ο υπόλοιπος σπόρος αποτελεί παραπροϊόν της βιομηχανίας τροφίμων και απορρίπτεται. Ωστόσο ο σπόρος χαρουπιού είναι πλούσιος σε πρωτεΐνη (καρουβίνη), η οποία έχει αναφερθεί πως παρουσιάζει παρόμοιες ιξωδοελαστικές ιδιότητες με την γλουτένη. Επιπλέον, έγινε μελέτη ενσωμάτωσης ανθεκτικού αμύλου, το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες φυσιολογικές ιδιότητες με τις διαλυτές ίνες, σε αρτοσκευάσματα και κέικ ελεύθερα γλουτένης, με σκοπό την αύξηση των ποιοτικών και διατροφικών χαρακτηριστικών των προϊόντων.

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

- Εύρεση καινοτόμων συστατικών για την αρτοποιία, υψηλών λειτουργικών και διατροφικών ιδιοτήτων. Η ενσωμάτωση χαρουπάλευρου από ολόκληρο τον σπόρο σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης δεν έχει αναφερθεί, μόνο η χρήση του κόμμεος χαρουπιού για την βελτίωση των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των ζυμαριών. Η αξιοποίηση των πολύτιμων συστατικών όπως βιταμίνες, αντιοξειδωτικά, διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνες του φλοιού και του φύτρου των σπόρων χαρουπιού αποτέλεσε βασικό άξονα της παρούσας μελέτης.
- Αύξηση της διατροφικής αξίας άρτων και κέικ ελεύθερων γλουτένης με χρήση πρεβιοτικών, όπως το ανθεκτικό άμυλο. Το ανθεκτικό άμυλο παρουσιάζει διαφοροποιημένες λειτουργικές ιδιότητες σε σχέση με συμβατικές

πηγές διαιτητικών ινών, όπως φρούτων, λαχανικών ή δημητριακών, καθώς χαρακτηρίζεται από άσπρο χρώμα, ήπια γεύση και χαμηλή ικανότητα δέσμευσης νερού. Ως αποτέλεσμα η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου στην ανάπτυξη προϊόντων αρτοποιίας δεν επηρεάζει τα οργανοληπτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την διατροφική τους αξία.

- Μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων. Εκτός από την συμβατική άλεση και παραλαβή αλεύρου ποικίλης κοκκομετρίας έγινε και χρήση της καινοτόμου διαδικασίας άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στο χαρουπάλευρο, η οποία επιτρέπει σημαντική μείωση του μεγέθους των κόκκων του αλεύρου.

- Ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών με την προσθήκη χαρουπάλευρου και ανθεκτικού αμύλου.

- Εκπλήρωση των αναγκών των πασχόντων από κοιλιοκάκη για προϊόντα υψηλής ποιότητας (σε γεύση και θρεπτική αξία).

Αρχικά πραγματοποιήθηκε συλλογή της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και, με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα, καθορίστηκαν οι βασικοί άξονες της έρευνας. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν για την επιλογή των υλικών και αναλογίας τους στη συνταγή, του χρόνου και μεθόδου ανάμιξης, του χρόνου και της θερμοκρασίας επώασης και κλιβανισμού, των συνθηκών και χρόνου αποθήκευσης για τα δύο είδη προϊόντων (άρτος και κέικ) που μελετήθηκαν. Το βασικό συστατικό για την παρασκευή των αρτοσκευασμάτων ήταν το ρυζάλευρο. Διενεργήθηκαν πειράματα παρασκευής άρτων ελεύθερων γλουτένης εμπλουτισμένων με χαρουπάλευρο σε ποσοστά 5-15% υποκατάσταση του ρυζάλευρου. Βασικό παράγοντα της αρτοποιητικής διαδικασίας αποτέλεσε η περιεκτικότητα σε νερό, η οποία στα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης συχνά καθορίζεται με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Επομένως ταυτόχρονα με την μεταβολή των ποσοστών ενσωμάτωσης χαρουπάλευρου στο ζυμάρι των άρτων μελετήθηκε η μεταβολή της περιεκτικότητας σε νερό σε ποσοστά από 80-150% επί του αλεύρου. Η επίδραση των δύο αυτών παραμέτρων στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων αξιολογήθηκε με ρεολογικές μετρήσεις στα ζυμάρια και μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων των τελικών άρτων. Επιπλέον με χρήση της μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης έγινε βελτιστοποίηση της προσθήκης ανθεκτικού αμύλου στην βασική συνταγή του άρτου ελεύθερου γλουτένης και βελτιστοποίηση ως προς τα ποσοστά συνδυασμένης χρήσης ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου αλλά και περιεκτικότητας σε νερό στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των άρτων. Το ανθεκτικό άμυλο χρησιμοποιήθηκε και για την διατροφική ενίσχυση κέικ ελεύθερων γλουτένης, ως αντικατάσταση αμύλου ταπιόκας μέχρι και ποσοστό 20% επί του αλεύρου, το οποίο περιείχε η βασική συνταγή (control). Στα κέικ που παρασκευάστηκαν μελετήθηκαν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της ζύμης, καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (όγκος, χρώμα, πορώδες, επιφανειακά μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας) και η διατηρησιμότητα των τελικών προϊόντων (υγρασία, υφή), ενώ πραγματοποιήθηκε και οργανοληπτική αξιολόγηση.

Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου προστιθέμενου σε σταθερό ποσοστό (15% επί του αλεύρου) αλλά για μεταβαλλόμενη

περιεκτικότητα νερού σε άρτο ελεύθερο γλουτένης, με σκοπό την εύρεση της κατάλληλης περιεκτικότητας σε νερό για κάθε κοκκομετρία χαρουπάλευρου αντίστοιχα. Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν την ικανότητα διόγκωσης της ζύμης κατά την επώαση, αλλά και των ποιοτικών χαρακτηριστικών (υφή, πορώδες, επιφανειακά μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας) των άρτων.

Τέλος έγινε συγκριτική μελέτη των αρτοσκευασμάτων με 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και εμπορικά δείγματα άρτων ελεύθερων γλουτένης ως προς τις δομικές ιδιότητες, την διάρκεια ζωής και την οργανοληπτική αποδοχή τους.

Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι 8 σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, ανάλογα με το σκοπό και τις ιδιότητες που αξιολογήθηκαν.

Πίνακας 4.1 Σειρές πειραμάτων.

1	Μελέτη των λειτουργικών ιδιοτήτων του χαρουπάλευρου.
Σκοπός	Ο προσδιορισμός των λειτουργικών ιδιοτήτων του χαρουπάλευρου και μιγμάτων ρυζάλευρου/χαρουπάλευρο, ώστε να είναι δυνατή η συσχέτιση με τις ιδιότητες των εμπλουτισμένων τελικών προϊόντων.
Υλικά	✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο (Τέσσερα κλάσματα μεταβαλλόμενης κοκκομετρίας και χημικής σύστασης).
Μετρήσεις	• Ιδιότητες ενυδάτωσης, Θερμορρολογικές ιδιότητες.
2	Ανάπτυξη βασικής συνταγής για την παρασκευή άρτων ελεύθερων γλουτένης.
Σκοπός	Ο προσδιορισμός του είδους και της ποσότητας των πρώτων υλών, του ζυμαριού για την παρασκευή άρτων.
Υλικά	✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο, Πρωτεΐνη γάλακτος, Αλβουμίνη, Γαλακτωματοποιητής.
Μετρήσεις	• Υφή, Πορώδες, Ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας.
3	Ρεολογικές ιδιότητες ζυμαριών άρτων με προσθήκη χαρουπάλευρου.
Σκοπός	Ο προσδιορισμός της επίδρασης της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στα ρεολογικά χαρακτηριστικά ζυμαριών άρτου ελεύθερου γλουτένης.
Υλικά	✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο ($d_{50} = 174.73 \mu\text{m}$), Νερό.
Μετρήσεις	• Δυναμικό ταλαντωτικό πείραμα συχνοτήτων, Πείραμα ερπυσμού-ανάκτησης.
4	Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με προσθήκη χαρουπάλευρου

	<p>Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για τον προσδιορισμό της επίδρασης της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στα ποιοτικά χαρακτηριστικά άρτου ελεύθερου γλουτένης. Συσχετισμός των αποτελεσμάτων με την 3^η σειρά πειραμάτων για την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών ποσοστού χαρουπάλευρου και νερού.</p>
Σκοπός	
Υλικά	<p>✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο ($d_{50} = 174.73 \mu\text{m}$), Νερό.</p>
Μετρήσεις	<p>• Υφή, Πορώδες, Ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας.</p>
5	<p>Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με συνδυασμένη προσθήκη ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου.</p>
Σκοπός	<p>Βελτιστοποίηση συνταγής με χρήση μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης ως προς την περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, ανθεκτικό άμυλο και νερό.</p>
Υλικά	<p>✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο ($d_{50} = 174.73 \mu\text{m}$), Ανθεκτικό άμυλο, Νερό.</p>
Μετρήσεις	<p>• Υφή, Πορώδες, Ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας.</p>
6	<p>Ανάπτυξη κέικ ελεύθερου γλουτένης με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου.</p>
Σκοπός	<p>Προσδιορισμός της επίδρασης της υποκατάστασης αμύλου ταπιόκας με ανθεκτικό άμυλο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά κέικ.</p>
Υλικά	<p>✓ Ρυζάλευρο, Άμυλο ταπιόκας, Ανθεκτικό άμυλο.</p>
Μετρήσεις	<p>• Ρεολογικές ιδιότητες ζυμαριών, Υφή, Πορώδες, Ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας, Χρώμα, Οργανοληπτικός έλεγχος, Μελέτη παλαιώσης.</p>
7	<p>Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας.</p>
Σκοπός	<p>Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου και του νερού στις ιδιότητες επώασης ζυμαριών άρτου ελεύθερου γλουτένης. Εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών κοκκομετρίας χαρουπάλευρου και νερού.</p>
Υλικά	<p>✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο (τέσσερα κλάσματα), Νερό.</p>
Μετρήσεις	<p>• Επώαση της ζύμης, Υφή, Πορώδες .</p>
8	<p>Συγκριτική μελέτη άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη.</p>

Σκοπός	Μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών των βέλτιστων συνταγών με βάση την 7 ^η σειρά πειραμάτων και σύγκριση με εμπορικά δείγματα.
Υλικά	✓ Ρυζάλευρο, Χαρουπάλευρο, Νερό. • Υφή, Πορώδες, Ανάλυση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας,
Μετρήσεις	Χρώμα, Οργανοληπτικός έλεγχος, Μελέτη παλαίωσης.

4.2 Υλικά

4.2.1 Υλικά για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης ήταν οι εξής:

- Ρυζάλευρο (Μύλοι Καπλανίδοι, Σέρρες)
- Ανθεκτικό άμυλο τύπου RS2 (Hi-Maize 260) (Ingredion, Westchester, IL, Η.Π.Α)
- Νωπή μαγιά αρτοποιίας (L'hirondelle, S.I. Lesaffre, Γαλλία)
- Κρυσταλλική ζάχαρη (EBZ, Λάρισα, Ελλάδα)
- Ιωδιούχο αλάτι (Κάλλας Α.Ε, Αθήνα, Ελλάδα)
- Μαγειρικό λίπος (shortening) (Βιτάμ, Unilever S.A, Αθήνα, Ελλάδα),
- Σκόνη αλβουμίνης αυγού (Laffort S.A., Bordeaux, France), με αναλογία 4g σκόνης αλβουμίνης να αντιστοιχεί σε ένα ασπράδι αυγού.
- Συμπύκνωμα πρωτεΐνης ορού γάλακτος (>65% πρωτεϊνικό περιεχόμενο) (whey protein concentrate (Nutrilac_ DR-7015), Arla Foods Ingredients, Δανία)
- Γαλακτωματοποιητής -DATEM: Εστέρες του διακετυλοτρυγικού οξέος με μονο- και διγλυκερίδια, Danisco, Δανία)
- Κόμμι χαρουπιού (LBG) (Sigma Aldrich Chemie GmbH, Γερμανία)
- Ενζυμικό σκεύασμα α- αμυλάσης, τρανσγλουταμινάσης και ημικυτταρινάσης (VERON CLX AB Enzymes, Γερμανία)
- Χαρουπάλευρο

Το χαρουπάλευρο που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε από άλεση σπόρων χαρουπιού, σε εργαστηριακό μύλο. Το αλεύρι που παραλήφθηκε κοσκινίστηκε με πρότυπη σειρά κοσκίνων για 10 λεπτά (Apparatebau, Engelsmann J. AKT-GES, Ludwigshafen, Germany). Το αλεύρι με κοκκομετρία μεγαλύτερη από 500 μm απορρίφθηκε και παραλήφθηκαν τρεις κοκκομετρίες, κλάσμα Α (315-500 μm), κλάσμα Β (250-315 μm) και κλάσμα C (125-250 μm). Επιπλέον το αλεύρι με κοκκομετρία μικρότερη από 500μm αλέστηκε ξανά σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα (Model 0101S, Fluid Energy Processing and Equipment Company, Η.Π.Α) με πίεση 8 bar (κλάσμα D). Τα

χαρακτηριστικά των κλασμάτων του χαρουπάλευρου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2**.

4.2.2 Υλικά για την παρασκευή κέικ ελεύθερου γλουτένης

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή κέικ ελεύθερου γλουτένης ήταν οι εξής:

- Ρυζάλευρο (Μύλοι Καπλανίδοι, Σέρρες)
- Ανθεκτικό άμυλο τύπου RS2 (Hi-Maize 260) (Ingredion, Westchester, IL, Η.Π.Α)
- Άμυλο ταπίοκας (85.0% άμυλο, 13.0% υγρασία, 0.25 % τέφρα (Polysons Ltd, Ελλάδα),
- Αυγά φρέσκα ολόκληρα
- Κρυσταλλική ζάχαρη (EBZ, Λάρισα, Ελλάδα)
- Ιωδιούχο αλάτι (Κάλλας Α.Ε, Αθήνα, Ελλάδα)
- Μαγειρικό λίπος (shortening) (Βιτάμ, Unilever S.A, Αθήνα, Ελλάδα),
- Διογκωτικός παράγοντας baking powder (Jotis S.A., Ελλάδα)
- Γαλακτωματοποιητής -DATEM: Εστέρες του διακετυλοτρυγικού οξέος με μονο- και διγλυκερίδια, Danisco, Δανία)
- Κόμμι χαρουπιού (LBG) (Sigma Aldrich Chemie GmbH, Γερμανία)
- Βανιλίνη (Merck & Co., Inc, Γερμανία).

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των πρώτων υλών.

α' ύλη	d ₅₀ (μm)	Υγρασία (%)	Πρωτεΐνες (%)	Διαιτητικές ίνες (%)	Τέφρα (%)
Ρυζάλευρο	255.84	13.10	7.30	0.50	0.80
Ανθεκτικό άμυλο*	10-15	12.00	-	63.90	-
Κλάσμα χαρουπάλευρου					
A	258.55 (0.68) ^a	9.74 (0.03) ^c	14.93 (0.24) ^a	65.61 (2.34) ^c	3.56 (0.16) ^b
B	174.73 (0.45) ^b	9.19 (0.03) ^a	22.96 (0.74) ^c	51.80 (2.67) ^b	4.85 (0.02) ^c
C	126.37 (2.10) ^c	9.31 (0.01) ^a	25.70 (0.03) ^d	43.46 (1.45) ^a	5.46 (0.02) ^d
D	80.36 (6.38) ^d	9.52 (0.18) ^b	18.86 (0.09) ^b	53.25 (1.64) ^b	2.91 (0.04) ^a

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

*Με βάση τον προμηθευτή

4.2.3 Εμπορικά μίγματα αλεύρων για αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης

- Αλεύρι χωρίς γλουτένη για όλες τις χρήσεις, (Μύλοι Αγίου Γεωργίου, Ελλάδα) (GF1)

- Αλεύρι με φυτικές ίνες-La farina con fibre- χωρίς γλουτένη (Glutafin, Ηνωμένο Βασίλειο) (GF2)
- Αλεύρι για ψωμί χωριάτικο-χωρίς γλουτένη (Valpiform, Γαλλία) (GF3)

Τα χαρακτηριστικά των εμπορικών μιγμάτων αλεύρων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.3**.

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά των εμπορικών μιγμάτων αλεύρων.

Κωδικός	Υγρασία (%)	Πρωτεΐνες* (%)	Διαιτητικές ίνες* (%)
GF1	16.61 (0.94) ^c	2.3	-
GF2	11.77 (0.08) ^a	5.5	6.3
GF3	12.21 (0.05) ^a	3.5	4.7

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

*Με βάση τον προμηθευτή

4.3 Πειραματική διαδικασία

4.3.1 Πειραματική διαδικασία παρασκευής άρτου ελεύθερου γλουτένης

Η παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης περιλάμβανε αρχικά την ζύγιση των πρώτων υλών και την ανάμιξη των στερεών συστατικών για 2 min στον κάδο του αναμίκτη (Hobart mixer, N50, Hobart Co., Η.Π.Α) (ρυζάλευρο, χαρουπάλευρο, ζάχαρη, αλάτι, σκόνη αλβουμίνης, σκόνη πρωτεΐνης γάλακτος, DATEM, LBG και ένζυμο). Η μαγιά αρτοποιίας διαλύθηκε στο νερό και προστέθηκε μαζί με το λιωμένο λιπαρό στα στερεά συστατικά. Το τελικό ζυμάρι που σχηματίστηκε αναμίχθηκε για 3 min στον κάδο του μίξερ σε ταχύτητα 475 rpm. Κατόπιν 400 g ζύμης εισήχθησαν σε φόρμες αλουμινίου (20 x 10 x 6 cm), οι οποίες τοποθετήθηκαν σε θάλαμο επώασης θερμοκρασίας 35 °C και 85% υγρασίας για 50 min, οπότε είχε γίνει πλήρης ανάπτυξη του ζυμαριού. Τέλος οι φόρμες εισήχθησαν στον κλίβανο για 30 min σε θερμοκρασία 170 °C. Μετά το στάδιο του κλιβανισμού, τα αρτοσκευάσματα αφέθηκαν για περίπου 1 h σε ηρεμία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να ψυχθούν, και κατόπιν τοποθετήθηκαν σε σακουλάκια πολυαιθυλενίου για 24h, ώστε να αξιολογηθούν ο ειδικός όγκος των αρτοσκευασμάτων, η υγρασία, το πορώδες, η σκληρότητα και η ελαστικότητα της ψίχας τους, το χρώμα και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Η βασική συνταγή για την παρασκευή του άρτου ελεύθερου γλουτένης παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4.4**.

Πίνακας 4.4 Βασική συνταγή για την ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του αλεύρου
Νερό	Μεταβλητό
Μαγιά	6
Αλβουμίνη	4
Πρωτεΐνη γάλακτος	4
Λιπαρό	3.5
Ζάχαρη	3
Αλάτι	2
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Κόμμι χαρουπιού- LBG	0.5
Ένζυμο	0.1

4.3.2 Πειραματική διαδικασία παρασκευής κέικ ελεύθερου γλουτένης

Για την παρασκευή του κέικ ακολουθήθηκε η διαδικασία μονού σταδίου (single bowl mixing) και περιλάμβανε αρχικά την ζύγιση των πρώτων υλών και την τοποθέτησή τους στον κάδο του αναμίκτη (Hobart mixer N50, Hobart Co., Troy, OH, ΗΠΑ). Όλα τα συστατικά αναμίχθηκαν για 1 min σε ταχύτητα 475 rpm και κατόπιν για 9 min σε ταχύτητα 950 rpm. Κατάλληλες ποσότητες μίγματος (80 g) τοποθετήθηκαν σε φόρμες αλουμινίου (80x 45x37mm) και ακολούθησε έψηση για 20 min στους 180 °C. Μετά τον κλιβανισμό, τα κέικ αφέθηκαν για περίπου 1 h σε ηρεμία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να ψυχθούν και προσδιορίστηκαν ο ειδικός όγκος των κέικ, η υγρασία, το πορώδες, η ελαστικότητα της ψίχας τους, το χρώμα και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά της ψίχας και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των κέικ ως φρέσκα (ημέρα 0). Η βασική συνταγή για την παρασκευή του κέικ ελεύθερου γλουτένης παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4.5**.

Πίνακας 4.5 Βασική συνταγή για την ανάπτυξη κέικ ελεύθερου γλουτένης.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του αλεύρου
Νερό και 2 αυγά	120
Ζάχαρη	80
Λιπαρό	25
Baking powder	6
Αλάτι	3
Κόμμι χαρουπιού- LBG	3.3
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Βανιλίνη	0.2

4.4 Μέθοδοι- Μετρήσεις-Αναλύσεις

4.4.1 Ικανότητα δέσμευσης νερού (WBC)

Η μέτρηση της ικανότητας δέσμευσης νερού έγινε με την μέθοδο της φυγοκέντρωσης. Κατάλληλη ποσότητα δείγματος (0.5 g) και νερού βρύσης (5 mL), τοποθετήθηκαν σε προζυγισμένο σωλήνα. Το δείγμα αναδεύτηκε με την χρήση vortex για 1 min και αφέθηκε σε θερμοκρασία 25 °C για 25 min. Κατόπιν το δείγμα φυγοκεντρήθηκε σε 1000 g για 30 min. Το υπερκείμενο υγρό απορρίφθηκε, ο σωλήνας με το δείγμα ξαναζυγίστηκε και η ποσότητα του νερού που συγκρατήθηκε από το δείγμα υπολογίστηκε εκ διαφοράς (βάρος του δείγματος μετά την φυγοκέντρωση μείον το αρχικό βάρος του δείγματος x100) με τα αποτελέσματα να εκφράζονται σε g νερού/g στερεού.

4.4.2 Θερμορολογικές ιδιότητες μιγμάτων αλεύρων

Οι θερμορολογικές ιδιότητες του ρυζάλευρου και των μιγμάτων ρυζάλευρου – χαρουπάλευρου προσδιορίστηκαν με χρήση ρεομέτρου (DHR3, TA Instruments, Η.Π.Α), εξοπλισμένου με γεωμετρία μέτρησης θερμορολογικών ιδιοτήτων (Starch Pasting Cell). Η γεωμετρία μέτρησης των ιδιοτήτων pasting των αλεύρων αποτελείται από ένα έμβολο περωτής και ένα κυλινδρικό δοχείο (3.6 cm πλάτος και 6.4 cm ύψος) (Σχήμα 4.1). Το έμβολο είναι σχεδιασμένο να εφαρμόζει πλήρως στο δοχείο αποτρέποντας την απώλεια θερμότητας. Η θέρμανση του δείγματος γίνεται μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος, το οποίο περιβάλλει το δοχείο, ενώ η ψύξη μέσω κυκλοφορίας νερού.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε την διασπορά των αλεύρων σε νερό (6% w/w), και 25 g διαλύματος τοποθετούνταν στο κυλινδρικό δοχείο σε θερμοκρασία 30 °C. Αρχικά έγινε έντονη ανάδευση του δείγματος (100 s^{-1}) για 10 s, ενώ κατόπιν ο ρυθμός διάτμησης ρυθμίστηκε στα 10 s^{-1} μέχρι το τέλος του πειράματος. Το δείγμα θερμάνθηκε από τους 30° έως τους 95 °C με ρυθμό 10 °C/min, κατόπιν η θερμοκρασία διατηρήθηκε στους 95 °C για 5 min. Ακολούθησε ψύξη του δείγματος στους 30 °C με 10 °C/min και διατήρηση στους 30 °C για 5 min. Έγινε καταγραφή των δεδομένων του ιξώδους ως προς το χρόνο και υπολογίστηκαν οι παράμετροι της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας (pasting temperature), το μέγιστο ιξώδες-PV, το ιξώδες θερμής πάστας – HPV (ιξώδες στο τέλος της ισοθερμοκρασιακής περιόδου θέρμανσης των 95 °C), το τελικό ιξώδες- FV και ο σχετικός δείκτης αναδιάταξης του αμύλου (setback) (FV-HPV/HPV).



Σχήμα 4.1 Γεωμετρία μέτρησης θερμορρολογικών ιδιοτήτων – Starch Pasting Cell. (<http://www.tainstruments.com/main.aspx?siteid=11&id=145&n=1>).

4.4.3 Ικανότητα επώασης ζύμης άρτου χωρίς γλουτένη

Δύο δείγματα των 10 mL ζύμης τοποθετούνταν σε διαβαθμισμένους γυάλινους ογκομετρικούς κυλίνδρους και κατόπιν σε θάλαμο επώασης θερμοκρασίας 35 °C και 85% υγρασίας για 50 min. Τα δεδομένα της μεταβολής του όγκου του ζυμαριού κατά την επώαση, καταγράφηκαν με βάση την εμφανή διαβάθμιση των ογκομετρικών κυλίνδρων με ακρίβεια ± 0.5 mL. Μετά την τοποθέτηση του ζυμαριού στους ογκομετρικούς κυλίνδρους δεν έγινε κανένας επιπλέον χειρισμός, ώστε να αποφευχθεί πιθανός κίνδυνος κατάρρευσης του από εφαρμογή μηχανικής καταπόνησής. Τα πειράματα διεξήχθησαν εις διπλούν.

4.4.4 Προσδιορισμός ρεολογικών χαρακτηριστικών

Ρεολογικά χαρακτηριστικά ζύμης άρτου χωρίς γλουτένη

Οι ρεολογικές ιδιότητες των ζυμαριών των άρτων χωρίς γλουτένη μελετήθηκαν με την χρήση περιστροφικού ρεομέτρου (Rheometric Scientific SR5, USA) με την γεωμετρία παράλληλων πλακών (25 mm διάμετρος και κενό 1 mm) και σε θερμοκρασία 25 °C (**Σχήμα 4.2**). Το ζυμάρι για τα ρεολογικά πειράματα παρασκευάστηκε χωρίς την προσθήκη μαγιάς αρτοποιίας, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας φυσαλίδων από την δράση της μαγιάς, ακόμα και στους 25 °C που έλαβαν χώρα τα πειράματα. Το δείγμα τοποθετήθηκε μεταξύ των πλακών και αφέθηκε για 2 min, ώστε να χαλαρώσουν οι εναπομείνουσες τάσεις από την μηχανική καταπόνηση των ζυμαριών κατά το στάδιο της ανάμιξης. Το δείγμα καλύφθηκε με υγρή παραφίνη, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Τα τεστ που πραγματοποιήθηκαν αφορούν (a) δυναμικό ταλαντωτικό πείραμα με εύρος συχνοτήτων από 0.1 έως 20 Hz σε 0.5% παραμόρφωση και (b)

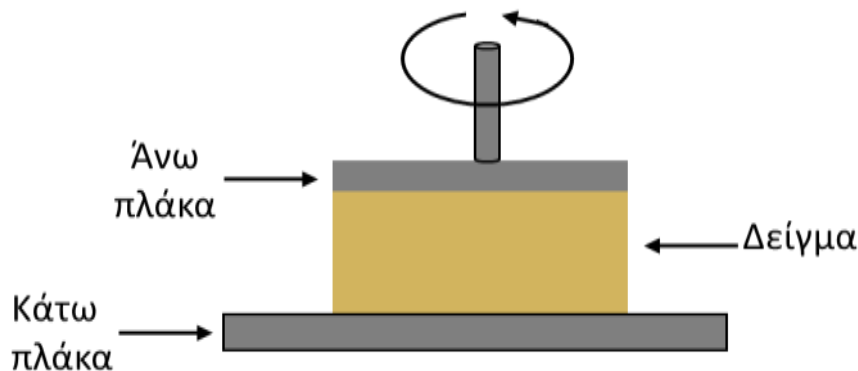
πείραμα ερπυσμού-χαλάρωσης με εφαρμογή σταθερής τάσης 50 Pa για 60 s και φάση χαλάρωσης διάρκειας 180 s μετά την απομάκρυνση της τάσης.

Ρεολογικά χαρακτηριστικά ζύμης κέικ χωρίς γλουτένη

Οι ρεολογικές ιδιότητες των δειγμάτων της ζύμης του κέικ μελετήθηκαν με την χρήση περιστροφικού ρεομέτρου (DHR3, TA Instruments, Η.Π.Α) με χρήση της γεωμετρίας παράλληλων πλακών και κενό 1mm και σε θερμοκρασία 25 °C (**Σχήμα 4.2**). Το δείγμα τοποθετήθηκε μεταξύ των πλακών και αφέθηκε για 2 min, ώστε να χαλαρώσουν οι εναπομείνουσες τάσεις από την μηχανική καταπόνηση της ζύμης κατά το στάδιο της ανάμιξης. Το δείγμα καλύφθηκε με υγρή παραφίνη, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Τα τεστ που πραγματοποιήθηκαν αφορούν (a) δυναμικό ταλαντωτικό πείραμα με εύρος συχνοτήτων από 0.01 έως 10 Hz σε 0.1% παραμόρφωση και (b) μέτρηση ιξώδους ως συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης με εύρος 0.1–100 s⁻¹. Οι καμπύλες του ιξώδους ως προς την διατμητική τάση προσαρμόστηκαν στο μοντέλο του Ostwald ακολουθώντας την εξίσωση Power Law:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n,$$

όπου τ είναι η διατμητική τάση (Pa), $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (s⁻¹), K ο συντελεστής συνεκτικότητας (Pa·sⁿ) και n ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς.



Σχήμα 4.2 Γραφική αναπαράσταση της γεωμετρίας παράλληλων πλακών.

4.4.5 Μέτρηση υγρασίας

Η περιεχόμενη υγρασία των άρτων και κέικ ελεύθερων γλουτένης προσδιορίστηκε με την μέθοδο AOAC 935.36.

4.4.6 Μέτρηση ειδικού όγκου

Ο ειδικός όγκος των άρτων και κέικ ελεύθερων γλουτένης (cm³/g) προσδιορίστηκε με την μέθοδο της εκτόπισης και χρήση πρότυπων γυάλινων σφαιριδίων διαμέτρου 2 mm ως το μέσο εκτόπισης (Hwang & Hayakawa, 1980).

4.4.7 Μέτρηση πορώδους

Ο υπολογισμός του πορώδους των άρτων και κέικ ελεύθερων γλουτένης μετρήθηκε σε δείγματα ψίχας μεγέθους 1.5 x 1.5 x 1.5cm (μήκος x πλάτος x ύψος).

Η πραγματική πυκνότητα του δείγματος (Kg/m^3) είναι ο λόγος της μάζας των στερεών προς τον όγκο των στερεών και εκφράζεται με την εξίσωση:

$$\rho_s = m_s/V_s \quad (4.1)$$

Ο όγκος των στερεών (V_s, m^3) μετρήθηκε με την χρήση στερεοπυκνόμετρου εκτόπισης ηλίου (Stereopycnometer SPY-3, Quantachrome, Syosset, N.Y., Η.Π.Α)

Η φαινόμενη πυκνότητα υπολογίστηκε από την μέτρηση των πραγματικών γεωμετρικών διαστάσεων του δείγματος με χρήση μικρόμετρου και εκφράζεται με την εξίσωση:

$$\rho_b = m_s/V_b \quad (4.2)$$

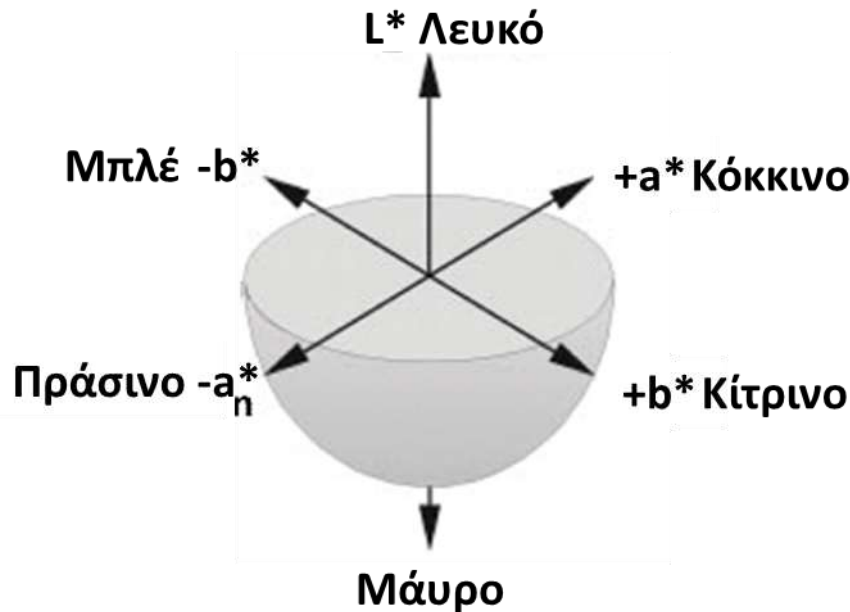
Το συνολικό πορώδες του δείγματος εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon = 1 - \rho_s / \rho_b \quad (4.3)$$

4.4.8. Προσδιορισμός επιφανειακών μορφολογικών χαρακτηριστικών ψίχας αρτοσκευασμάτων

Ο προσδιορισμός των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας των άρτων και κέικ ελεύθερων γλουτένης πραγματοποιήθηκε με την χρήση προγράμματος επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας. Με την χρήση σκάνερ (HP scanjet 4370, Hewlett–Packard, Η.Π.Α) λήφθηκαν εικόνες από φέτες των αρτοσκευασμάτων από το μέσο της φραντζόλας. Η ανάλυση των εικόνων έγινε με την χρήση του λογισμικού ImageProPlus 7 (Media Cybernetics, Η.Π.Α). Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν ήταν το χρώμα της ψίχας, το επιφανειακό πορώδες (επιφάνεια πόρων/συνολική επιφάνεια ($2 \times 2 \text{ cm}$), η πυκνότητα πόρων (πόροι/cm^2), η μέση διάμετρος πόρων (mm), η μέση επιφάνεια πόρων (mm^2) και ο δείκτης ομοιομορφίας των πόρων. Η τυπική απόκλιση της μέσης επιφάνειας των πόρων αποτελεί δείκτη της ομοιομορφίας των πόρων, καθώς όσο υψηλότερη είναι η τυπική απόκλιση, τόσο μικρότερη η ομοιομορφία.

Οι μετρήσεις του χρώματος βασίστηκαν στον προσδιορισμό των χρωματικών παραμέτρων L^* , a^* , b^* 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 (**Σχήμα 4.3**)



Σχήμα 4.3 Ανάλυση χρωματικών παραμέτρων συστήματος CIE.

4.4.9 Μέτρηση χαρακτηριστικών υφής

Τα χαρακτηριστικά της υφής των άρτων και κέικ ελεύθερων γλουτένης προσδιορίστηκαν με χρήση συσκευής μέτρησης υφής Instron (Universal Testing Machine, Model 1100, Η.Π.Α) με στέλεχος συμπίεσης διαμέτρου 4 cm. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν αφορούν την σκληρότητα και την ελαστικότητα της ψίχας. Η σκληρότητα της ψίχας μετρήθηκε σε φέτα πάχους 2.50 cm και βάθος συμπίεσης 40% του αρχικού ύψους (1cm) με ταχύτητα διείσδυσης 101 mm/min. Η σκληρότητα της ψίχας υπολογίστηκε ως η μέγιστη δύναμη κατά την διείσδυση.

Η σχετική ελαστικότητα της ψίχας (REL%) μετρήθηκε με τεστ συμπίεσης-χαλάρωσης, με χρόνο χαλάρωσης 4 min, σε δείγμα ψίχας μεγέθους 2 x 2 x 2 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) και βάθος συμπίεσης 25% του αρχικού ύψους. Η σχετική ελαστικότητα της ψίχας (η δύναμη, με την οποία αντιστέκεται το δείγμα στην εφαρμοζόμενη μηχανική τάση κατά την φάση της συμπίεσης) υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$\text{REL}\% = (\text{Fres}/\text{Fmax}) \times 100 \quad (4.4)$$

Όπου Fmax είναι η μέγιστη δύναμη της ψίχας σε βάθος συμπίεσης 25% και Fres είναι η εναπομείνουσα δύναμη μετά το πέρας (4 min) της φάσης χαλάρωσης.

4.4.10 Μελέτη παλαίωσης

Μελέτη παλαίωσης άρτων ελεύθερων γλουτένης

Για τη διεξαγωγή της μελέτης παλαίωσης παρασκευάστηκαν δείγματα άρτου, αρχικού βάρους 80 g. Τα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε σακούλες πολυαιθυλενίου στους 25 °C και 60% RH για 3 ημέρες. Η πρώτη μέτρηση λαμβανόταν 1h μετά τον κλιβανισμό και θεωρήθηκε ως μηδενικός χρόνος (0η). Δείγματα λαμβάνονταν κάθε ημέρα αποθήκευσης, προκειμένου να διερευνηθεί η υποβάθμιση των χαρακτηριστικών τους με μέτρηση της υγρασίας και της σκληρότητας της ψίχας. Η μέτρηση της υγρασίας έγινε με την μέθοδο AOAC 935.36 ενώ η σκληρότητα της ψίχας με χρήση συσκευής μέτρησης υφής Instron (Universal Testing Machine, Model 1100, Η.Π.Α) με στέλεχος συμπίεσης διαμέτρου 4 cm, σε δείγμα ψίχας μεγέθους 2 x 2 x 2 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) και βάθος συμπίεσης 50% του αρχικού ύψους (1cm) με ταχύτητα διείδυσης 101 mm/min.

Μελέτη παλαίωσης κέικ ελεύθερων γλουτένης

Για τη διεξαγωγή της μελέτης παλαίωσης παρασκευάστηκαν δείγματα κέικ αρχικού βάρους 80g. Τα δείγματα των κέικ αποθηκεύτηκαν σε σακούλες πολυαιθυλενίου στους 25 °C και 60% RH για 7 ημέρες. Η πρώτη μέτρηση λαμβανόταν 1h μετά τον κλιβανισμό και θεωρήθηκε ως μηδενικός χρόνος (0η). Δείγματα λαμβάνονταν επίσης την 1η, 2η, 4η και 7η ημέρα αποθήκευσης, προκειμένου να διερευνηθεί η υποβάθμιση των χαρακτηριστικών τους με μέτρηση της υγρασίας και της σκληρότητας της ψίχας. Η μέτρηση της υγρασίας έγινε με την μέθοδο AOAC 935.36 ενώ η σκληρότητα της ψίχας με χρήση συσκευής μέτρησης υφής Instron (Universal Testing Machine, Model 1100, Η.Π.Α) με στέλεχος συμπίεσης διαμέτρου 4 cm, σε δείγμα ψίχας μεγέθους 2 x 2 x 2 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) και βάθος συμπίεσης 50% του αρχικού ύψους (1cm) με ταχύτητα διείδυσης 101 mm/min.

4.4.11 Εκτίμηση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών

Διεξαγωγή οργανοληπτικής αξιολόγησης άρτων ελεύθερων γλουτένης

Για την οργανοληπτική αξιολόγηση των άρτων διενεργήθηκε δοκιμή ηδονικής εκτίμησης μεταξύ δύο αρτοσκευασμάτων που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της διατριβής και τριών εμπορικά διαθέσιμων αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης από 50 δοκιμαστές (μη εκπαιδευμένους) χωρίς προηγούμενη εμπειρία (καταναλωτική δοκιμή). Τα αρτοσκευάσματα αξιολογήθηκαν με χρήση 9-βάθμιας ηδονικής κλίμακας 1-9 (1: δεν αρέσει καθόλου, 9: μου αρέσει πάρα πολύ) και θεωρούνταν αποδεκτά αν οι μέσοι όροι για την ολική αποδοχή ήταν πάνω από 5.

Οι κύριες παράμετροι που αξιολογήθηκαν ήταν:

- Εμφάνιση (διόγκωση-πορώδες)
- Χρώμα κόρας-ψίχας

- Άρωμα (Οσμή-Γεύση)
- Υφή
- Συνολική Αποδοχή

Διεξαγωγή οργανοληπτικής αξιολόγησης κέικ ελεύθερων γλουτένης

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των κέικ έγινε με χρήση της ποσοτικής περιγραφικής ανάλυσης (Quantitative Descriptive Analysis, QDA), από 10-μελή ομάδα ημι-εκπαιδευμένων δοκιμαστών. Η εκπαίδευση των δοκιμαστών έγινε με βάση τα πρωτόκολλα ISO 8586-1 (1993) και 8586-2 (1994). Ως προς τα χαρακτηριστικά αναγνώρισης υφής, οι δοκιμαστές εκπαιδεύτηκαν με βάση το πρωτόκολλο ISO 11036 (1994). Η εκτίμηση και βαθμολόγηση των περιγραφικών όρων έγινε με χρήση 9-βάθμιας κλίμακας (1-9) (1 = μη ικανοποιητικό/ σκούρο/ μη έντονο/ λίγο, 9 = ικανοποιητικό/ ανοιχτό/ έντονο/ πολύ). Τα δείγματα κωδικοποιήθηκαν με τριψήφιους τυχαίους αριθμούς, τοποθετήθηκαν σε λευκά πιάτα και αξιολογήθηκαν ως προς τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Χρώμα κόρας
- Χρώμα ψίχας
- Διόγκωση
- Μετάγευση

Υφή

- Σκληρότητα
- Ελαστικότητα
- Συνεκτικότητα

Τέλος διενεργήθηκαν δοκιμές ηδονικής εκτίμησης και τα δείγματα αξιολογήθηκαν ως προς την συνολική τους αποδοχή με χρήση 9-βάθμιας ηδονικής κλίμακας 1-9 (1: δεν αρέσει καθόλου, 9: αρέσει πάρα πολύ). Τα κέικ θεωρούνταν αποδεκτά αν η βαθμολογία τους στην συνολική αποδοχή ήταν πάνω από 5 (ούτε μ'αρέσει-ούτε δεν μ'αρέσει).

4.4.12 Στατιστική επεξεργασία

Για την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμόστηκαν στατιστικά εργαλεία παραμετρικής ανάλυσης (ANOVA), για τον έλεγχο της σημαντικότητας της επίδρασης των σχεδιαστικών παραμέτρων της παρούσας διατριβής (ποσοστό χαρουπάλευρου/νερού/ανθεκτικού αμύλου, κοκκομετρία χαρουπάλευρου, χρόνος αποθήκευσης στις επιμέρους ιδιότητες των άρτων και κέικ που μετρήθηκαν. Στις περιπτώσεις που παρατηρήθηκαν σημαντικές επιδράσεις των σχεδιαστικών παραμέτρων, εφαρμόστηκε το κριτήριο Fisher's LSD για τον έλεγχο των διαφορών των μέσων όρων των ιδιοτήτων; στατιστικά σημαντικές διαφορές σημειώνονται για p-value < 0.05. Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα Statgraphics Statistical Graphics System, Centurion XV.II (Statgraphics, Rockville, Md., Η.Π.Α).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση μη-γραμμικής παλινδρόμησης μέσω του προγράμματος Systat 10.2® Software (CLECOM Software Specialists, Birmingham, UK), για τον προσδιορισμό των συντελεστών των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην διατριβή.

5. Αποτελέσματα -Συζήτηση

5.1 Μελέτη των λειτουργικών ιδιοτήτων του χαρουπάλευρου (1^η σειρά πειραμάτων)

Ως λειτουργικά τρόφιμα χαρακτηρίζονται τα τρόφιμα, τα οποία εκτός από την υψηλή διατροφική τους αξία, μπορούν να επηρεάσουν θετικά την βιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού, βελτιώνοντας την γενική κατάσταση της υγείας ή/και μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης ασθενειών (Diplock et al., 1999).

Οι διαιτητικές ίνες θεωρούνται σημαντικά συστατικά για την ανάπτυξη λειτουργικών τροφίμων, λόγω των ευεργετικών αποτελεσμάτων που συνδέονται με την κατανάλωσή τους, όπως η αύξηση του όγκου των κοπράνων και η μείωση του χρόνου της εντερικής τους διέλευσης, η μείωση των επιπέδων της χοληστερόλης και του σακχάρου στο αίμα, η παγίδευση ουσιών επικίνδυνων για τον ανθρώπινο οργανισμό (καρκινογόνοι παράγοντες), η ενίσχυση της εντερικής χλωρίδας, κ.α (Heredia et al., 2002).

Στην παρούσα διατριβή για τον διατροφικό εμπλουτισμό των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη χρησιμοποιήθηκε χαρουπάλευρο από σπόρους χαρουπιού, το οποίο έχει σχετιστεί με ποικίλα ευεργετικά οφέλη, λόγω του υψηλού ποσοστού διαλυτών ινών και πρωτεϊνών που περιέχει. Οι διαλυτές ίνες χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να μειώνουν την γλυκαιμική απόκριση και την χοληστερόλη του αίματος (Roehrig, 1988). Επιπλέον η πρωτεΐνη του χαρουπάλευρου περιέχει υψηλά ποσοστά φυτοχημικών, όπως πολυφαινόλες, προανθοκυανιδίνες και τανίνες. Τα φυτοχημικά προστατεύουν τον οργανισμό από την υπερβολική παραγωγή ελεύθερων ριζών, οι οποίες εμπλέκονται στην ανάπτυξη της παθολογίας πολλών ασθενειών όπως η νόσος Αλτσχάιμερ και ο καρκίνος (Luthria, 2006).

Εκτός από την διατροφική και λειτουργική τους αξία οι διαιτητικές ίνες, χαρακτηρίζονται και από ιδιαίτερες λειτουργικές ιδιότητες (σχετιζόμενες με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες), οι οποίες είναι απαραίτητο να μελετηθούν προκειμένου να ενσωματωθούν στα τρόφιμα. Ορισμένες από τις λειτουργικές ιδιότητες των ινών είναι η ικανότητα διόγκωσης, η ικανότητα συγκράτησης και δέσμευσης νερού και ελαίου, η αύξηση του ιξώδους, η δημιουργία πηγματος και η σταθεροποίηση της δομής συστημάτων στα οποία προστίθενται. Η προσθήκη διαιτητικών ινών σε ψημένα αρτοσκευάσματα έχει ως σκοπό την διατήρηση της φρεσκότητάς τους, λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης νερού των ινών. Ωστόσο η προσθήκη ινών μπορεί να μεταβάλλει την διόγκωση, την υφή, το χρώμα και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων, ανάλογα με τα ποσοστά ενσωμάτωσης και την φύση των διαιτητικών ινών που χρησιμοποιούνται. Επομένως είναι απαραίτητη η γνώση των λειτουργικών ιδιοτήτων των ινών, ώστε να καθορίζεται το ποσοστό προσθήκης τους και να ελέγχονται οι ανεπιθύμητες επιπτώσεις της προσθήκης τους στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Ανάμεσα στις λειτουργικές ιδιότητες των διαιτητικών ινών, για την αρτοποιία έχει ιδιαίτερη σημασία η ικανότητα δέσμευσης νερού, καθώς η προσθήκη διαιτητικών

ινών θα απορροφήσει το διαθέσιμο νερό του ζυμαριού του άρτου εμποδίζοντας ή περιορίζοντας δράσεις σχετικές με τον σχηματισμό της δομής του άρτου, όπως την δράση της μαγιάς για την εξέλιξη της διόγκωσης του άρτου, αλλά και τον σχηματισμό πρωτεϊνικού δικτύου και την ζελατινοποίηση του αμύλου, που σταθεροποιούν την δομή. Σκοπό της 1^{ης} πειραματικής σειράς αποτέλεσε η μελέτη των λειτουργικών ιδιοτήτων του χαρουπάλευρου, ώστε να είναι δυνατή η συσχέτισή τους με τα χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης που παρασκευάστηκαν στη συνέχεια.

5.1.1 Παραλαβή χαρουπάλευρου

Το χαρουπάλευρο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή προήλθε από την άλεση ολόκληρων σπόρων χαρουπιού. Το αλεύρι που προέκυψε, κοσκινίστηκε με πρότυπη σειρά κοσκίνων για 10 λεπτά (Apparatebau, Engelsmann J. AKT-GES, Ludwigshafen, Germany) και το κλάσμα με κοκκομετρία άνω των 500 μm απορρίφθηκε. Το υπόλοιπο άλευρο κοσκινίστηκε ξανά και προέκυψαν τρία κλάσματα που κωδικοποιήθηκαν ως κλάσμα A (315-500 μm), B (250-315 μm) και C (125-250 μm). Επιπλέον, μέρος του χαρουπάλευρου με κοκκομετρία μικρότερη των 500 μm αλέστηκε περαιτέρω σε μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα ώστε να παραχθεί πολύ χαμηλής κοκκομετρίας χαρουπάλευρο και κωδικοποιήθηκε ως κλάσμα D.

5.1.2 Λειτουργικές ιδιότητες κλασμάτων χαρουπάλευρου

Στον Πίνακα 5.1.1 παρουσιάζονται η χημική σύσταση και η ικανότητα δέσμευσης νερού (WBC) των διαφορετικών κλασμάτων του χαρουπάλευρου. Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν στην χημική σύσταση των τριών κλασμάτων που λήφθηκαν με κοσκίνιση (A, B, C). Το πρωτεϊνικό περιεχόμενο αυξάνει με την μείωση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου, ενώ αντιθέτως η περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες μειώνεται. Η τάση για μείωση της περιεκτικότητας σε διαιτητικές ίνες από τα χοντρόκοκκα προς τα λεπτόκοκκα κλάσματα μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα συστατικά του σπόρου (φλοιός, ενδοσπέρμιο και φύτρο) εμφανίζουν διαφορετική ευθρυπτότητα (Karababa & Coşkuner, 2013). Το ενδοσπέρμιο είναι πλούσιο σε διαιτητικές ίνες, γαλακτομαννάνες, ενώ το φύτρο είναι πλούσιο σε πρωτεΐνη, καρουβίνη. Ο φλοιός και το ενδοσπέρμιο είναι πιο σκληρά από το έμβρυο με αποτέλεσμα να αλέθονται δυσκολότερα σε μικρή κοκκομετρία σε σχέση με το έμβρυο (El Batal and Hasib, 2013).

Όσον αφορά την ικανότητα δέσμευσης νερού, η μείωση του μεγέθους σωματιδίων από τα 258 μm στα 126 μm οδήγησε σε μείωση της ικανότητας δέσμευσης νερού, ακολουθούμενη ωστόσο από μία αύξηση της ικανότητας δέσμευσης για το κοκκομετρικό κλάσμα D. Η μείωση του μεγέθους σωματιδίων των διαιτητικών ινών έχει συνδεθεί με μειωμένη ικανότητα δέσμευσης νερού (Sangnark & Noomhorm, 2003), λόγω της καταστροφής του πλέγματος των ινών και της κατάρρευσης των πόρων κατά την διαδικασία της άλεσης (Auffret et al., 1994). Ωστόσο ελλείπει της

απαραίτητης δομής της μήτρας των διαιτητικών ινών, η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων θα έχει ως αποτέλεσμα την έκθεση μεγαλύτερης επιφάνειας και ταυτόχρονα περισσότερων πολικών ομάδων με θέσεις δέσμευσης του νερού, αυξάνοντας τις ιδιότητες ενυδάτωσης των ινών (Chau et al., 2006; Rosell et al., 2006).

Με βάση την διεθνή βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων ενυδάτωσης των διαφόρων τύπων διαιτητικών ινών είναι αντιφατικά. Σύμφωνα με τους Zhu et al. (2010), η άλεση σε υπέρλεπτο μέγεθος σωματιδίων (μικροάλεση) πίτυρου σίτου μείωσε τις ιδιότητες ενυδάτωσης του, σε αντίθεση με τους Chau et al. (2007) και Zhao et al. (2009), οι οποίοι συνδυάζουν την εφαρμογή της μικροάλεσης με την αύξηση των ιδιοτήτων ενυδάτωσης αδιάλυτων ινών καρότου και τζίντζερ. Επομένως η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στις ιδιότητες ενυδάτωσης των ινών δεν μπορεί να γενικευτεί και πρέπει να καθορίζεται για κάθε τύπο ινών (Strange & Onwulata 2002). Επιπλέον οι ιδιότητες ενυδάτωσης των ινών δεν καθορίζονται μόνο από το μέγεθος των σωματιδίων αλλά και η χημική σύσταση των ινών παίζει σημαντικό ρόλο. Η πρωτεΐνη του χαρουπιού από το έμβρυο (καρουβίνη) έχει θεωρηθεί πως απορροφά $\approx 3\text{g}$ νερό/g πρωτεΐνης (στους $25\text{ }^\circ\text{C}$) (Wang et al., 2001), ενώ το κόμμα χαρουπιού (ενδοσπέρμιο) εμφανίζει ικανότητα δέσμευσης νερού $\approx 10\text{g}$ νερό/g κόμματος. Ως εκ τούτου, τα κλάσματα A, D, τα οποία παρουσιάζουν και υψηλότερο ποσοστό διαιτητικών ινών εμφανίζουν και υψηλότερες ικανότητες ενυδάτωσης.

Η γνώση των ιδιοτήτων ενυδάτωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων, όπου το νερό μετέχει στην ζελατινοποίηση του αμύλου, στη μετουσίωση των πρωτεϊνών και στην ενεργοποίηση της μαγιάς κατά τα στάδια της ανάμιξης και του ψησίματος (Collar et al., 2007; Rosell et al., 2006).

Πίνακας 5.1.1 Λειτουργικές ιδιότητες των κλασμάτων του χαρουπάλευρου.

Κλάσμα χαρουπάλευρου	A	B	C	D
d ₅₀ (μm)	258.55 (0.68) ^a	174.73 (0.45) ^b	126.37 (2.10) ^c	80.36 (6.38) ^d
Υγρασία (%)	9.74 (0.03) ^c	9.19 (0.03) ^a	9.31 (0.01) ^a	9.52 (0.18) ^b
Πρωτεΐνες (%) επί ξηρού	14.93 (0.24) ^a	22.69 (0.74) ^c	25.70 (0.03) ^d	18.86 (0.09) ^b
Διαιτητικές ίνες (%) επί ξηρού	65.61 (2.34) ^c	51.80 (2.67) ^b	43.46 (1.45) ^a	53.25 (1.64) ^b
Τέφρα (%) επί ξηρού	3.56 (0.16) ^b	4.85 (0.02) ^c	5.46 (0.02) ^d	2.91 (0.04) ^a
WBC (g νερού/ g αλεύρου)	7.02 (0.12) ^b	5.61 (0.25) ^a	5.77 (0.17) ^a	7.33 (0.59) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

5.1.3 Θερμορρολογικές ιδιότητες μιγμάτων ρυζάλευρου-χαρουπάλευρου

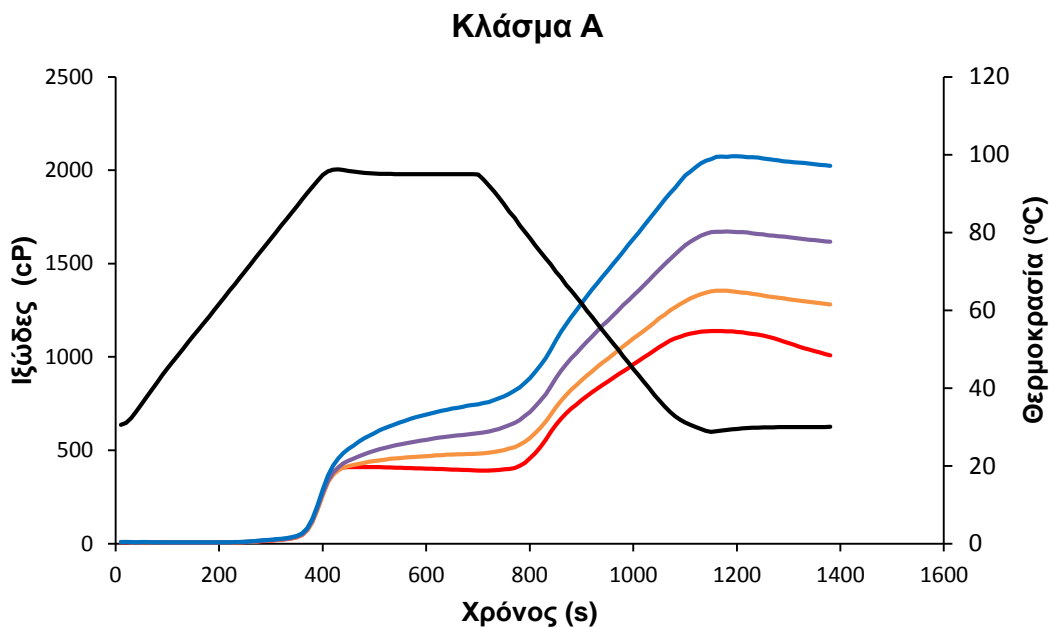
Η ικανότητα ζελοποίησης και σχηματισμού πάστας του αμύλου των αλεύρων παρουσία νερού με την εφαρμογή θέρμανσης και κατόπιν ψύξης, εμπλέκει πολλές διαδικασίες όπως η διόγκωση και η διάρρηξη των αμυλόκοκκων και η διαλυτοποίηση των σωματιδίων, οι οποίες καθορίζουν και τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του συστήματος. Το ζυμαρί μπορεί να θεωρηθεί ένα σύνθετο σύστημα, στο οποίο λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών του κατά την διαδικασία του κλιβανισμού και της ψύξης. Οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες και το ιξώδες του ζυμαριού καθορίζονται κυρίως από την ικανότητα ζελοποίησης και σχηματισμού πάστας του περιεχόμενου αμύλου. Οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ζυμαριού είναι αυτές που καθορίζουν την ποιότητα, την υφή και την διατηρησιμότητα του τελικού άρτου. Ωστόσο η παρουσία άλλων συστατικών στο ζυμαρί εκτός από το άμυλο, όπως πρωτεΐνες, λιπαρά, επιφανειοδραστικές ουσίες, μη αμυλούχοι-πολυσακχαρίτες έχουν την ικανότητα να μεταβάλουν το ιξώδες του συστήματος, λόγω ανταγωνισμού για την απορρόφηση νερού, επηρεάζοντας την αρτοποιητική ικανότητα και την παλαιώση των αρτοσκευασμάτων. Επομένως είναι απαραίτητη η γνώση και ο έλεγχος της επίδρασης της προσθήκης χαρουπάλευρου στην ικανότητα ζελατινοποίησης και αναδιάταξης του αμύλου του ρυζάλευρου, που αποτελεί το βασικό συστατικό παρασκευής των αρτοσκευασμάτων της διατριβής. Τα μίγματα μελετήθηκαν ως προς τις θερμορρολογικές τους ιδιότητες παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1.2**.

Πίνακας 5.1.2 Κωδικοποίηση δειγμάτων για θερμορρολογικές ιδιότητες.

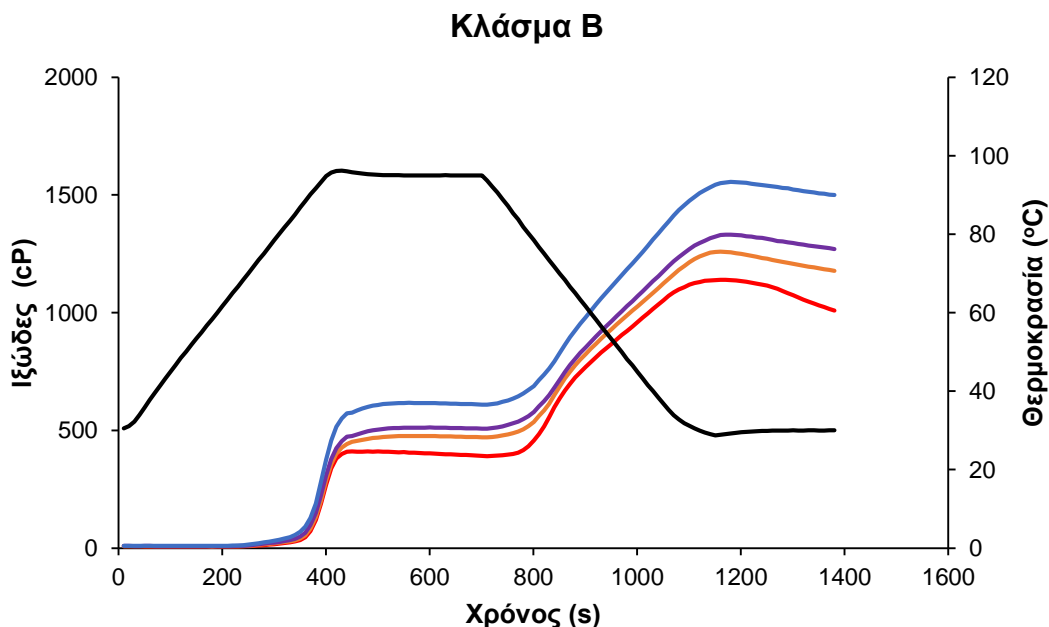
Κωδικός δείγματος	Συγκέντρωση χαρουπάλευρου % (επί του βάρους του αλεύρου)
Ρύζι	0
Ρύζι /Κλάσμα Α	5
	10
	15
Ρύζι / Κλάσμα Β	5
	10
	15
Ρύζι / Κλάσμα C	5
	10
	15
Ρύζι / Κλάσμα D	5
	10
	15

Η μεταβολή του ιξώδους ως προς το χρόνο και το θερμοκρασιακό κύκλο που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των θερμορρολογικών ιδιοτήτων του ρυζάλευρου και των μιγμάτων ρυζάλευρο – χαρουπάλευρο παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.1.1 – 5.1.4** και

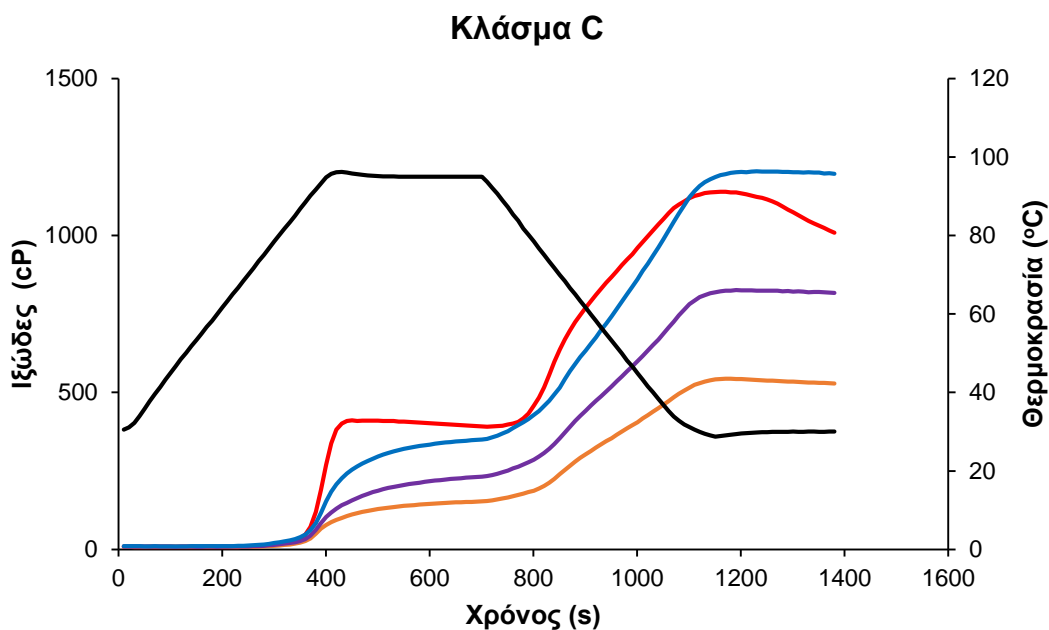
οι παράμετροι της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας (pasting temperature), το μέγιστο ιξώδες-PV, το ιξώδες θερμής πάστας - HPV, το τελικό ιξώδες- FV και ο δείκτης αναδιάταξης του αμύλου (setback) που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.3.



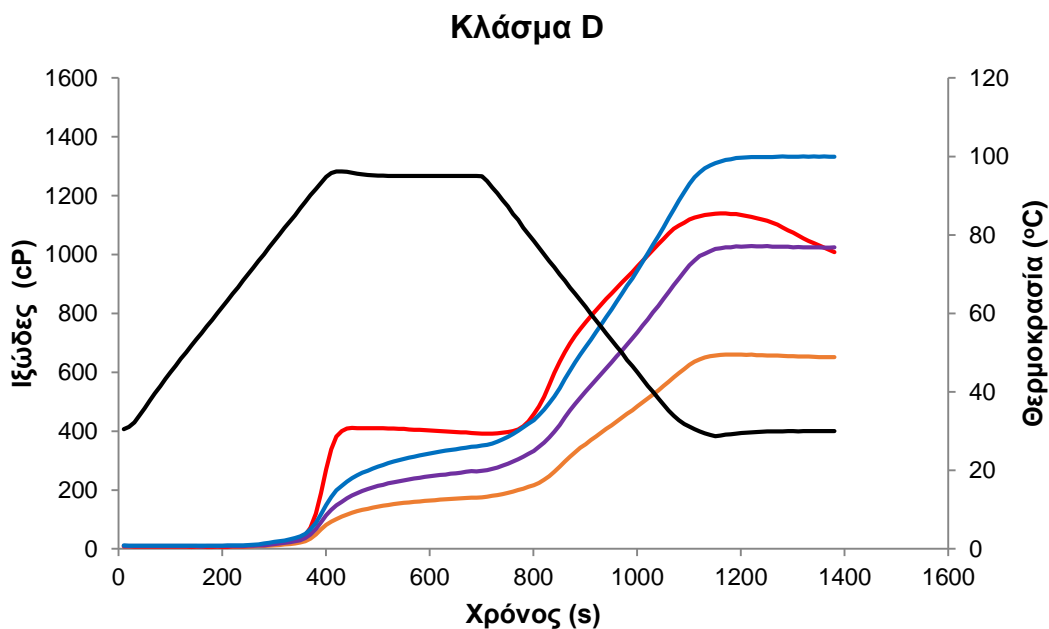
Σχήμα 5.1.1 Διάγραμμα μεταβολής ιξώδους ως προς το χρόνο και την θερμοκρασία μιγμάτων ρυζάλευρου/χαρουπάλευρου κλάσματος Α. (— Θερμοκρασία, — Ρύζι, — 5% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 10% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο).



Σχήμα 5.1.2 Διάγραμμα μεταβολής ιξώδους ως προς το χρόνο και την θερμοκρασία μιγμάτων ρυζάλευρου/χαρουπάλευρου κλάσματος Β. (— Θερμοκρασία, — Ρύζι, — 5% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 10% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο).



Σχήμα 5.1.3 Διάγραμμα μεταβολής ιξώδους ως προς το χρόνο και την θερμοκρασία μιγμάτων ρυζάλευρου/χαρουπάλευρου κλάσματος C. (— Θερμοκρασία, — Ρύζι, — 5% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 10% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο).



Σχήμα 5.1.4 Διάγραμμα μεταβολής ιξώδους ως προς το χρόνο και την θερμοκρασία μιγμάτων ρυζάλευρου/χαρουπάλευρου κλάσματος D. (— Θερμοκρασία, — Ρύζι, — 5% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 10% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, — 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο).

Πίνακας 5.1.3 Επίδραση του μεγέθους σωματιδίων και της συγκέντρωσης χαρουπάλευρου στις θερμορολογικές παραμέτρους των μιγμάτων ρυζάλευρου/χαρουπάλευρου.

Κωδικός δείγματος	Συγκέντρωση %	Μέγιστο ιξώδες PV (cP)	Ιξώδες θερμής πάστας HPV (cP)	Τελικό ιξώδες FV (cP)	Βαθμός αναδιάταξης αμύλου Setback	Θερμοκρασία σχηματισμού πάστας PT (°C)
Ρύζι	0	338 (30) ^A	393 (27) ^A	1008 (58) ^A	0.59 (0.114) ^A	71.94 (0.06) ^C
Ρύζι / Κλάσμα A	5	328 (32) ^{Ab}	481 (12) ^{Bb}	1280 (19) ^{Bd}	0.62 (0.109) ^{Aa}	71.33 (0.21) ^{BCa}
	10	337 (20) ^{Ab}	588 (17) ^{Cc}	1616 (23) ^{Cc}	0.63 (0.114) ^{Aa}	70.71 (0.05) ^{ABab}
	15	375 (16) ^{Bb}	743 (23) ^{Db}	2023 (50) ^{Db}	0.62 (0.011) ^{Ab}	69.95 (0.67) ^{Aa}
Ρύζι / Κλάσμα B	0	338 (30) ^A	393 (27) ^A	1008 (58) ^A	0.59 (0.114) ^A	71.94 (0.06) ^B
	5	356 (9) ^{ABb}	471 (17) ^{Bb}	1178 (34) ^{Bc}	0.60 (0.003) ^{Aa}	71.33 (0.19) ^{Ba}
	10	378 (35) ^{ABb}	508 (12) ^{Cb}	1270 (33) ^{Cb}	0.60(0.001) ^{Aa}	70.71 (1.28) ^{ABa}
	15	456 (60) ^{Bb}	610 (75) ^{Db}	1499 (160) ^{Da}	0.59 (0.006) ^{Aa}	69.95 (3.57) ^{Aa}
Ρύζι / Κλάσμα C	0	338 (30) ^C	393 (27) ^C	1008 (58) ^C	0.59 (0.114) ^A	71.94 (0.06) ^B
	5	86 (8) ^{Aa}	152 (5) ^{Aa}	528 (22) ^{Aa}	0.71 (0.001) ^{Ba}	76.76 (2.42) ^{Cb}
	10	117 (6) ^{Aba}	230 (13) ^{Aba}	817 (49) ^{Ba}	0.71 (0.001) ^{Ba}	72.51 (1.23) ^{Bb}
	15	183 (4) ^{Ba}	348 (9) ^{BCa}	1196 (26) ^{Da}	0.70 (0.001) ^{Bc}	67.54 (1.20) ^{Aa}
Ρύζι / Κλάσμα D	0	338 (30) ^C	393 (27) ^C	1008 (58) ^{AB}	0.59 (0.114) ^A	71.94 (0.06) ^{BC}
	5	91 (30) ^{Aa}	174 (11) ^{Aa}	650 (40) ^{Ab}	0.73 (0.001) ^{Ba}	75.04 (0.01) ^{Cb}
	10	132 (6) ^{ABa}	263 (38) ^{ABa}	1024 (146) ^{ABa}	0.74 (0.001) ^{Ba}	70.12 (2.44) ^{ABab}
	15	176 (23) ^{Ba}	348 (66) ^{BCa}	1332 (233) ^{Ba}	0.73 (0.004) ^{Bd}	66.73 (2.35) ^{Aa}

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης.

Κεφαλαία γράμματα (A-D) για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα στην ίδια στήλη, υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική επίδραση της συγκέντρωσης ($p < 0.05$)

Μικρά γράμματα (a-d) για σταθερή συγκέντρωση χαρουπάλευρου στην ίδια στήλη, υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική επίδραση της κοκκομετρίας ($p < 0.05$)

Το ποσοστό υποκατάστασης και η κοκκομετρία του χαρουπάλευρου επηρέασαν με διαφορετικό τρόπο τις ιδιότητες σχηματισμού πάστας των μιγμάτων ρυζάλευρου-χαρουπάλευρου. Σε ένα τυπικό διάγραμμα μεταβολής του ιξώδους ως προς την θερμοκρασία μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση του ιξώδους με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της διόγκωσης των αμυλόκοκκων, ενώ κατά την διάρκεια της ισοθερμοκρασιακής περιόδου θέρμανσης (95 °C) επέρχεται διάρρηξη των αμυλόκοκκων, έκλυση αμυλόζης, ευθυγράμμιση των αλυσίδων του αμύλου και τελικά μείωση του ιξώδους (κατάρρευση- breakdown), λόγω της εφαρμογής μηχανικής – διατμητικής τάσης. Γενικά παρατηρήθηκε αύξηση του ιξώδους των μιγμάτων με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της διόγκωσης των αμυλόκοκκων ή άλλων συστατικών των αλεύρων (πρωτεΐνες, μη αμυλούχοι πολυσακχαρίτες). Ωστόσο για κανένα από τα δείγματα δεν παρατηρήθηκε μείωση του ιξώδους κατά την διάρκεια της ισοθερμοκρασιακής περιόδου των 95 °C (απουσία κατάρρευσης). Η ικανότητα ενός δείγματος να ανθίσταται στον συνδυασμό υψηλής θερμοκρασίας και μηχανικής τάσης αποτελεί σημαντική παράμετρο πολλών διεργασιών, ωστόσο στην αρτοποιητική διαδικασία, η παράμετρος της κατάρρευσης θεωρείται δευτερεύουσας σημασίας, λόγω της απουσίας διατμητικών τάσεων στο στάδιο του κλιβανισμού των αρτοποιημάτων. Καθώς τα γραφήματα μεταβολής του ιξώδους των δειγμάτων που μελετήθηκαν δεν εμφάνισαν καθορισμένη κορυφή μέγιστου ιξώδους, η τιμή του μέγιστου ιξώδους (PV) υπολογίστηκε στην έναρξη της ισοθερμοκρασιακής περιόδου των 95 °C, η τιμή του ιξώδους θερμής πάστας (HPV) υπολογίστηκε ως το ιξώδες στο τέλος της ισοθερμοκρασιακής περιόδου των 95 °C ενώ δεν υπολογίστηκε ιξώδες κατάρρευσης (breakdown).

Η προσθήκη του χαρουπάλευρου ανεξάρτητα από το μέγεθος των σωματιδίων και της συγκέντρωσης που χρησιμοποιήθηκε στα μίγματα δεν μείωσε την σταθερότητα και την αντίσταση του ρυζάλευρου στην θερμική και μηχανική (διατμητική τάση) καταπόνηση, όπως έχει ήδη αναφερθεί για άλλου τύπου διαιτητικές ίνες. Συγκεκριμένα, η υποκατάσταση αμύλου σίτου με ίνες βρώμης, αρακά, λεμονιού και μήλου έχει αναφερθεί να αυξάνει την κατάρρευση του αμύλου κατά την διάρκεια της θέρμανσης (Yildiz et al., 2013).

Επιπλέον, η απουσία καθορισμένης κορυφής κατά την διάρκεια της θέρμανσης και της ισοθερμοκρασιακής περιόδου των 95 °C για το ρυζάλευρο έχει αναφερθεί και αποδοθεί στην παρουσία ενδογενούς πρωτεΐνης ή/και άλλων κυτταρικών δομών, οι οποίες σταθεροποιούν την πάστα του αμύλου αποτρέποντας την διάρρηξη των διογκωμένων αμυλόκοκκων λόγω μηχανικής καταπόνησης και θέρμανσης (Hasjim et al., 2013). Στην παρούσα μελέτη η παρουσία των πρωτεϊνών και των μη αμυλούχων πολυσακχαριτών του χαρουπάλευρου πιθανώς ενισχύουν την σταθερότητα της πάστας του αμύλου κατά την περίοδο της ισοθερμοκρασιακής θέρμανσης.

Όσον αφορά το μέγιστο ιξώδες (PV), η αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης του χαρουπάλευρου στα μίγματα ρυζάλευρου-χαρουπάλευρου, οδήγησε σε στατιστικά σημαντική αύξηση της τιμής του. Επιπλέον, η προσθήκη των χοντρόκοκκων κλασμάτων χαρουπάλευρου A, B, οδήγησε στην αύξηση του PV σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς (μόνο ρυζάλευρο), σε αντίθεση με τα λεπτόκοκκα κλάσματα, για τα οποία παρατηρήθηκαν μειωμένες τιμές PV των πηγμάτων. Η μείωση της τιμής του PV

υποδεικνύει μείωση του βαθμού διόγκωσης των αμυλόκοκκων. Σύμφωνα με τους Symons & Brennan (2006), έχει αναφερθεί μείωση της τιμής του PV για ποσοστό υποκατάστασης 5% αμύλου σίτου με β-γλυκάνη. Αντιθέτως, η αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης αμύλου σίτου από ίνες βρώμης, αρακά, λεμονιού και μήλου, οδήγησε σε αύξηση των τιμών PV σε σχέση με το πήγμα αναφοράς χωρίς προσθήκη ινών (Yildiz et al., 2013). Η μεταβλητότητα της συμπεριφοράς των χαρακτηριστικών σχηματισμού πάστας αμύλων με προσθήκη διαιτητικών ινών μπορεί να αποδοθεί στην διαφορετική φύση των ινών που χρησιμοποιήθηκαν. Στην παρούσα μελέτη, η διαφορετική επίδραση της προσθήκης των κλασμάτων χαρουπάλευρου στο μέγιστο ιξώδες PV των μιγμάτων οφείλεται στην διαφορετική χημική σύσταση και κοκκομετρία των κλασμάτων. Τα χοντρόκοκκα κλάσματα A, B παρουσιάζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες (κυρίως γαλακτομαννάνες από το ενδοσπέρμιο) σε σύγκριση με το κλάσμα C, το οποίο έχει υψηλότερο πρωτεϊνικό περιεχόμενο και το κλάσμα D, το οποίο έχει υποστεί μικροάλεση. Η αύξηση της τιμής του PV πηγμάτων αμύλου με της προσθήκη υδροκολλοειδών, όπως το κόμμι χαρουπιού, είναι καλά τεκμηριωμένη και έχει αποδοθεί στην αλληλεπίδραση των υδροκολλοειδών με το διαλυτοποιημένο άμυλο. Η αλληλεπίδραση αυτή αυξάνει τις δυνάμεις που ασκούνται στους αμυλόκοκκους, οδηγώντας στην διάσπασή τους και την αύξηση του διαλυτοποιημένου αμύλου που εκλύεται (Christianson, 1982). Σύμφωνα με τους Alloncle et al. (1989), η πάστα αμύλου μπορεί να θεωρηθεί ως εναιώρημα των διογκωμένων αμυλόκοκκων διεσπαρμένων σε συνεχές μακρομοριακό μέσο, όπου το υδροκολλοειδές υπάρχει μόνο στην συνεχή φάση του μέσου. Καθώς η διόγκωση των αμυλόκοκκων συνεχίζεται, η συγκέντρωση του υδροκολλοειδούς στην συνεχή φάση αυξάνεται, οδηγώντας στην αύξηση του ιξώδους της. Αντιθέτως η μείωση του ιξώδους PV με την προσθήκη χαρουπάλευρου του κλάσματος C, μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία της πρωτεΐνης, καθώς έχει αναφερθεί η μείωση του PV πάστας ρυζάλευρου με προσθήκη πρωτεϊνών, λόγω της επίδρασης της αραίωσης στην συγκέντρωση του αμύλου; έχει βρεθεί αρνητική συσχέτιση μεταξύ το πρωτεϊνικού περιεχόμενου του ρυζάλευρου και του μέγιστου ιξώδους της πάστας (Lim et al., 1999; Marco & Rosell, 2008b).

Όσον αφορά την κοκκομετρία του χαρουπάλευρου, μπορεί να παρατηρηθεί η μείωση του μέγιστου ιξώδους PV με την μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για πήγματα φαγόπυρου μετά την εφαρμογή μικροάλεσης (Batham et al., 2013).

Στον **Πίνακα 5.1.3** αναφέρεται η στατιστικά σημαντική επίδραση του μεγέθους σωματιδίων και της συγκέντρωσης του χαρουπάλευρου στο ιξώδες θερμής πάστας HPV) των μιγμάτων ρυζάλευρο/χαρουπάλευρο. Η μεταβολή του HPV ακολούθησε την ίδια τάση με το μέγιστο ιξώδες, όπου η προσθήκη των χοντρόκοκκων κλασμάτων χαρουπάλευρου αύξησε το HPV, σε αντίθεση με τα λεπτόκοκκα κλάσματα, για τα οποία σημειώθηκαν μικρότερες τιμές HPV σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (ρύζι). Η τιμή του ιξώδους θερμής πάστας επηρεάζεται από τον ρυθμό έκλυσης αμυλόζης, τον βαθμό διόγκωσης των αμυλόκοκκων και τον σχηματισμό συμπλόκου αμυλόζης-λιπιδίων (Kaushal, Kumar, & Sharma, 2012). Μια πιθανή εξήγηση των χαμηλών τιμών HPV για τα μίγματα με προσθήκη χαρουπάλευρου κλάσματος C, μπορεί να αποτελέσει το υψηλό πρωτεϊνικό περιεχόμενο του χαρουπάλευρου, με αποτέλεσμα οι αμυλόκοκκοι

να ενσωματώνονται σε μια άκαμπτη πρωτεϊνική μήτρα, περιορίζοντας την πρόσβασή τους στο νερό, και μειώνοντας τη διόγκωσή τους.

Κατά την φάση της ψύξης, επέρχεται αναδιαμόρφωση των μορίων του αμύλου, κυρίως της αμυλόζης, η οποία οδηγεί στον σχηματισμό γέλης - πήγμα (ζελοποίηση αμυλόζης), με ταυτόχρονη αύξηση των τιμών του ιξώδους. Στο τέλος της ισοθερμοκρασιακής περιόδου ψύξης μπορεί να υπολογιστεί το τελικό ιξώδες του πηγματος (Ragaee & Abdel-Aal, 2006). Η περίοδος της ψύξης έχει χαρακτηριστεί από τον βαθμό αναδιάταξης του αμύλου (setback). Στην παρούσα διατριβή υπολογίστηκε ο 'σχετικός βαθμός αναδιάταξης' (FV-HPV/HPV), ο οποίος επιτρέπει την σωστότερη σύγκριση μεταξύ των συστημάτων, εξαλείφοντας την επίδραση των απόλυτων τιμών του ιξώδους θερμής πάστας (HPV) και του τελικού ιξώδους (FV). Η χαμηλή τιμή του βαθμού αναδιάταξης υποδηλώνει και μικρό ρυθμό αναδιάταξης του αμύλου, ενώ έχει συνδεθεί με την σκληρότητα της ψίχας του άρτου μετά το πέρας του κλιβανισμού και στα αρχικά στάδια ψύξης.

Το τελικό ιξώδες (FV) έχει χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της ικανότητας σχηματισμού γέλης των υλικών μετά την εφαρμογή υψηλής θερμοκρασίας και ψύξης και επηρεάζεται κυρίως από την αναδιάταξη της διαλυτοποιημένης αμυλόζης κατά την ψύξη. Η περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και το μέγεθος σωματιδίων του αλεύρου επηρέασε στατιστικά σημαντικά ($p < 0.05$) το τελικό ιξώδες και τον δείκτη αναδιάταξης του αμύλου των μιγμάτων. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο των κλασμάτων A, B οδήγησε στην αύξηση του FV ενώ δεν επέδρασε στην ισχύ του πηγματος (setback) των μιγμάτων σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (ρύζι). Αντιθέτως η προσθήκη των λεπτόκοκκων κλασμάτων C και D, οδήγησε σε μειωμένες τιμές τελικού ιξώδους FV, με εξαίρεση τα πηγματα που παρασκευάστηκαν με 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο. Επιπλέον, η μεγαλύτερη τιμή setback υπολογίστηκε για τα μίγματα με χαρουπάλευρο του κλάσματος D και C σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Η παρουσία σε υψηλό ποσοστό πρωτεΐνης (καρουβίνη) του κλάσματος C οδήγησε σε υψηλές τιμές του βαθμού αναδιάταξης της αμυλόζης, ενώ παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από την ενσωμάτωση πρωτεΐνης σόγιας σε άμυλο σίτου (Ribotta et al., 2007).

Όσον αφορά την θερμοκρασία σχηματισμού πάστας των μιγμάτων δεν παρουσιάστηκε σαφής τάση με την συγκέντρωση του χαρουπάλευρου. Χαμηλά ποσοστά προσθήκης χαρουπάλευρου (5% και 10%) είτε δεν επηρέασαν σημαντικά, είτε αύξησαν την θερμοκρασία σχηματισμού πάστας των μιγμάτων σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (ρύζι). Ωστόσο για τα υψηλότερα ποσοστά ενσωμάτωσης χαρουπάλευρου 15% παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας, ιδιαίτερα για τα μίγματα με προσθήκη χαρουπάλευρου των λεπτόκοκκων κλασμάτων C,D. Η μείωση της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας έχει αναφερθεί για μίγματα αλεύρου σίτου ή αμύλου σίτου με προσθήκη ινών, υδροκολλοειδών ή πρωτεϊνών και εξαρτάται από την ικανότητα δέσμευσης νερού ή την ικανότητα αλληλεπίδρασής τους με τα μόρια του αμύλου (Ribotta et al., 2007; Rojas et al., 1999).

5.1.4 Συμπεράσματα

Η κοκκομετρία και η χημική σύσταση των κλασμάτων του χαρουπάλευρου που μελετήθηκαν στη παρούσα διατριβή επηρέασαν σημαντικά την ικανότητα δέσμευσης νερού, με τα κλάσματα, τα οποία περιείχαν υψηλότερα ποσοστά διαιτητικών ινών να εμφανίζουν υψηλότερη ικανότητα δέσμευσης νερού σε σχέση τα κλάσματα με το υψηλότερο πρωτεϊνικό περιεχόμενο. Επιπλέον, η προσθήκη χαρουπάλευρου επηρέασε τις θερμορρολογικές ιδιότητες του ρυζάλευρου. Όσον αφορά την συγκέντρωση του χαρουπάλευρου στα μίγματα με ρυζάλευρο, αύξηση της συγκέντρωσης των κλασμάτων Α και Β οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου ιξώδους, ενώ δεν επέδρασε στην σταθερότητα της πάστας αμύλου (τελικό ιξώδες- setback), σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (Ρύζι). Εν αντιθέσει, τα λεπτόκοκκα κλάσματα C, D σημείωσαν τελικό ιξώδες μεγαλύτερο από το δείγμα αναφοράς μόνο για περιεκτικότητα 15%, ενώ αύξησαν και την σταθερότητα της πάστας αμύλου (setback). Τέλος, η προσθήκη χαρουπάλευρου σε υψηλά ποσοστά (15%) οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας των μιγμάτων σε σχέση με το δείγμα αναφοράς.

5.2 Ανάπτυξη βασικής συνταγής για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης (2η σειρά πειραμάτων)

Η τεχνολογία ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης αποτελεί πρόκληση για την βιομηχανία τροφίμων, λόγω της απουσίας της γλουτένης και της εύρεσης κατάλληλων συστατικών, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως υποκαταστάτες της γλουτένης στο ζυμάρι. Βασικά συστατικά που χρησιμοποιούνται ως μιμητές της γλουτένης είναι οι πρωτεΐνες φυτικής ή ζωικής προέλευσης, τα υδροκολλοειδή, οι γαλακτωματοποιητές και τα ένζυμα. Οι επιδράσεις των ανωτέρω συστατικών στην ποιότητα άρτου ελεύθερου γλουτένης εξαρτάται από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται ως βασική συνταγή και την φύση των προσθέτων. Ως εκ τούτου κρίθηκε απαραίτητη η κατάρτιση της βασικής συνταγής για την ανάπτυξη των αρτοσκευασμάτων που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή και ο προσδιορισμός της επίδρασης διάφορων προσθέτων –μιμητών της γλουτένης σε μίγμα αλεύρων ρυζάλευρου και χαρουπάλευρου.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν πρωτεΐνες ζωικής προέλευσης, όπως η αλβουμίνη αβγού και η πρωτεΐνη ορού γάλακτος. Ως υδροκολλοειδές χρησιμοποιήθηκε το κόμμι χαρουπιού, το οποίο βρίσκεται και στο ενδοσπέρμιο του σπόρου του χαρουπιού. Χρήση άλλου τύπου υδροκολλοειδούς, όπως κυτταρίνες ή κόμμι ξανθάνης, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάπτυξη άρτων ελεύθερων γλουτένης πιθανώς θα οδηγούσε σε συνεργιστική δράση μεταξύ των υδροκολλοειδών και του κόμμιος χαρουπιού, το οποίο περιέχεται ήδη στο χαρουπάλευρο, αποτρέποντας τον σαφή προσδιορισμό της επίδρασης του προστιθέμενου χαρουπάλευρου στις φυσικές ιδιότητες των άρτων που μελετήθηκαν στις επόμενες πειραματικές σειρές. Ο γαλακτωματοποιητής που μελετήθηκε ήταν εστέρες του διακετυλοτρυγικού οξέος με μονο- και διγλυκερίδια (DATEM), ο οποίος δρα ως σταθεροποιητής και ενισχυτής της δομής των αρτοσκευασμάτων δημιουργώντας δεσμούς υδρογόνου με τις πρωτεΐνες και το άμυλο (Hähnel et al., 1995). Το ένζυμο που χρησιμοποιήθηκε για την βελτίωση της συνταγής ήταν ένα μίγμα ενζύμων που περιείχε αμυλάση, τρανσγλουταμινάση και ημικυτταρινάση.

Σκοπό της 2^{ης} πειραματικής σειράς αποτέλεσε ο προσδιορισμός του είδους και της ποσότητας των προσθέτων για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων με αναλογία ρυζάλευρο/χαρουπάλευρο 85/15 και αξιολογήθηκε η επίδραση τους στις δομικές (υφή, πορώδες) και ποιοτικές (επιφανειακά μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας) ιδιότητες των άρτων. Όλες οι συνταγές περιείχαν σε αναλογία επί του αλεύρου: 110% περιεκτικότητα σε νερό, 6% μαγιά, 3.5% λιπαρό, 3% ζάχαρη και 2% αλάτι.

Η κωδικοποίηση των συνταγών που παρασκευάστηκαν παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.2.1** και η επίδραση της προσθήκης πρωτεϊνών, υδροκολλοειδούς, γαλακτωματοποιητή, ενζύμων και η συνδυασμένη χρήση τους στις φυσικές ιδιότητες αρτοσκευασμάτων με βάση το ρυζάλευρο και χαρουπάλευρο που παρασκευάστηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.2.2**.

Πίνακας 5.2.1 Κωδικοποίηση των συνταγών που παρασκευάστηκαν.

Κωδικός δείγματος	Αλβουμίνη (%)	Πρωτεΐνη ορού γάλακτος (%)	Κόμμι χαρουπιού-LBG (%)	Γαλακτοματοποιητής - DATEM (%)	Ένζυμο (%)
Control	-	-	-	-	-
Alb	4	-	-	-	-
Whey	-	4	-	-	-
Alb+whey	4	4	-	-	-
Alb+LBG	4	-	0.5	-	-
Whey+LBG	-	4	0.5	-	-
Alb+Whey+LBG	4	4	0.5	-	-
Alb+Whey+LBG+DATEM	4	4	0.5	0.5	-
Alb+Whey+LBG+DATEM+Enz	4	4	0.5	0.5	0.1

Πίνακας 5.2.2 Επίδραση της προσθήκης πρωτεϊνών, κόμμεος χαρουπιού, γαλακτωματοποιητή και ενζύμων στα δομικά χαρακτηριστικά άρτων.

Συνταγές	Κωδικός δείγματος	Υγρασία % (επί υγρού)	Πορώδες %	Σκληρότητα ψίχας (N)	Ελαστικότητα ψίχας	Μέση διάμετρος πόρων (mm)	Πυκνότητα πόρων Πόροι/cm ²
Σ1	Control	46.4 (1.43) ^c	29.6 (0.70) ^a	49.5 (1.13) ^g	0.53 (0.08) ^a	0.82 (0.11) ^{ab}	14 (4) ^{abc}
Σ2	Alb	45.5 (0.60) ^c	46.2 (0.41) ^e	44.6 (2.86) ^f	0.56 (0.02) ^a	0.67 (0.52) ^a	19 (4) ^a
Σ3	Whey	41.2 (0.73) ^{ab}	43.8 (1.09) ^d	25.8 (3.03) ^a	0.52 (0.03) ^a	1.14 (0.31) ^{bc}	15 (5) ^a
Σ4	Alb+whey	40.9 (1.68) ^a	42.5 (0.52) ^d	41.5 (0.10) ^{ef}	0.56 (0.01) ^a	1.15 (0.12) ^{bc}	25 (3) ^{abc}
Σ5	Alb+LBG	45.3 (0.07) ^c	34.6 (3.15) ^b	49.9 (0.98) ^g	0.60 (0.01) ^b	0.75(0.15) ^a	34 (9) ^d
Σ6	Whey+LBG	46.4 (3.52) ^c	39.9 (0.24) ^c	34.9 (0.38) ^c	0.56 (0.02) ^a	1.01 (0.19) ^{abc}	18 (4) ^{ab}
Σ7	Alb+Whey+LBG	44.0 (1.14) ^{abc}	52.3 (4.64) ^f	39.3 (3.4) ^{de}	0.57 (0.02) ^a	0.91 (0.05) ^{ab}	26 (3) ^{bcd}
Σ8	Alb+Whey+LBG+DATEM	45.6 (0.90) ^{bc}	39.9 (1.19) ^c	32.4 (0.11) ^b	0.53 (0.02) ^a	0.89 (0.24) ^{ab}	24 (8) ^{abc}
Σ9	Alb+Whey+LBG+DATEM+Enz	43.0 (3.40) ^{abc}	41.6 (1.28) ^{cd}	37.4 (0.13) ^d	0.55 (0.01) ^a	1.14 (0.24) ^{bc}	29 (8) ^{cd}

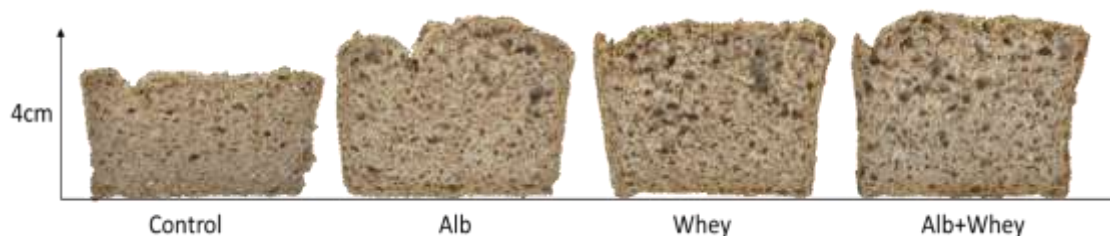
Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

5.2.1 Δομικές ιδιότητες, ανάλυση υφής και μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας άρτων χωρίς γλουτένη

Οι συνταγές Σ1-Σ4 αφορούν την προσθήκη πρωτεϊνών γάλακτος και αλβουμίνης αυγού στις φυσικές ιδιότητες των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη. Η προσθήκη αλβουμίνης δεν επηρέασε στατιστικά σημαντικά την υγρασία του άρτου, σε αντίθεση με την προσθήκη πρωτεΐνης ορού γάλακτος, η οποία την μείωσε στατιστικά σημαντικά ($p < 0.05$). Η συνδυασμένη προσθήκη πρωτεϊνών, οδήγησε σε τελικό προϊόν με μειωμένη υγρασία σε σχέση με το δείγμα αναφοράς, η οποία μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία της πρωτεΐνης γάλακτος. Σύμφωνα με τους Crockett et al., (2012), η προσθήκη αλβουμίνης σε αρτοσκευάσματα με βάση το ρυζάλευρο δεν οδήγησε σε στατιστικά σημαντική αύξηση της υγρασίας τους. Αντιθέτως, η προσθήκη πρωτεΐνης ορού γάλακτος μείωσε την υγρασία αρτοσκευασμάτων με βάση το ρυζάλευρο και άμυλο πατάτας (Nunes et al., 2009).

Η προσθήκη πρωτεϊνών στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη ενισχύει τόσο τα διατροφικά, όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων, λόγω των λειτουργικών τους ιδιοτήτων. Στην παρούσα μελέτη, η προσθήκη αλβουμίνης και ορού γάλακτος, οδήγησε σε στατιστικά σημαντική αύξηση του πορώδους των αρτοσκευασμάτων, ενώ επηρέασε και την υφή τους. Πιο συγκεκριμένα, ο άρτος με προσθήκη αλβουμίνης εμφάνισε το υψηλότερο πορώδες, ενώ και η προσθήκη ορού γάλακτος, αλλά και η συνδυασμένη χρήση των δύο πρωτεϊνών, οδήγησε σε τελικά προϊόντα με αυξημένο πορώδες, ωστόσο λίγο χαμηλότερο αλλά στατιστικά σημαντικά διαφορετικό σε σχέση με του άρτου με αλβουμίνη (Alb). Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, η προσθήκη πρωτεΐνης γάλακτος και αλβουμίνης σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης οδήγησε σε αύξηση του ειδικού όγκου και του πορώδους των προϊόντων με κατάλληλη ρύθμιση του περιεχόμενου νερού (Gallagher et al., 2003a; Nunes et al., 2009; Ziobro et al., 2013). Η βελτίωση των δομικών ιδιοτήτων των αρτοσκευασμάτων οφείλεται στις λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνών, οι οποίες εξαρτώνται από το είδος των πρωτεϊνών. Συγκεκριμένα οι αλβουμίνες έχουν χαμηλή μοριακή μάζα και αποτελούνται κυρίως από όξινα αμινοξέα, τα οποία έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν διοξειδίο του άνθρακα επιδρώντας στην αύξηση της διόγκωση των αρτοσκευασμάτων κατά το στάδιο της επάσης και του ψησίματος (Ziobro et al., 2013). Επιπλέον οι αλβουμίνες και οι πρωτεΐνες ορού γάλακτος επιδρούν στην διόγκωση των αρτοσκευασμάτων, λόγω των πηκτικών τους ιδιοτήτων. Οι θερμοκρασίες μετουσίωσης τους θεωρούνται χαμηλές ($\approx 70^\circ\text{C}$), με αποτέλεσμα κατά την διάρκεια του ψησίματος, να επέρχεται μετουσίωσή τους και κατ' επέκταση η πήξη τους, η οποία σταθεροποιεί την δομή των αρτοσκευασμάτων στα αρχικά στάδια του ψησίματος. Η μετουσίωση συνεπάγεται καταστροφή της τεταρτοταγής δομής των πρωτεϊνών, «ξεδίπλωμα» της πρωτεϊνικής αλυσίδας, αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρωτεϊνών ή και άλλων συστατικών, όπως του αμύλου στο ζυμάρι και τον σχηματισμό πρωτεϊνικού δικτύου με ενσωματωμένους κόκκους αμύλου, το οποίο καθορίζει και τα χαρακτηριστικά της ψίχας (Nunes et al., 2009; Ziobro et al., 2013). Όσον αφορά την

υφή της ψίχας, η προσθήκη αλβουμίνης (44.6 N) και ορού γάλακτος (25.8 N) οδήγησε σε στατιστικά σημαντική μείωση της σκληρότητας της ψίχας σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (49.5 N). Ωστόσο μεταξύ των δύο πρωτεϊνικών πηγών η προσθήκη ορού γάλακτος οδήγησε σε σημαντικά μαλακότερη ψίχα. Σύμφωνα με τους Schoenlechner et al., (2010), η προσθήκη αλβουμίνης σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με αμάρανθο και σε ποσοστά μέχρι 5%, παρόμοια με την παρούσα πειραματική σειρά (4%), δεν επηρέασε στατιστικά σημαντικά την σκληρότητα της ψίχας, ενώ σύμφωνα με τους Ziobro et al., (2013) παρόλο που η προσθήκη αλβουμίνης ενισχύει την διόγκωση αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη, οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας της ψίχας, όταν προστίθεται σε υψηλά ποσοστά ($\approx 15\%$). Η σκληρότητα της ψίχας επηρεάζεται σημαντικά από την αναδιάταξη του αμύλου στο στάδιο της ψύξης του άρτου. Ωστόσο η προσθήκη των πρωτεϊνών στην συνταγή μπορεί να επιδράσει στην αναδιάταξη του αμύλου, λόγω της αναδιοργάνωσης των μετουσιωμένων πρωτεϊνών, οδηγώντας σε διαφορετικές τάσεις αναλόγα με την πρωτεϊνική πηγή (Marco & Rosell, 2008b). Η ελαστικότητα της ψίχας, δεν επηρεάστηκε από την προσθήκη των πρωτεϊνών, όπως έχει ήδη αναφερθεί από άλλους μελετητές (Crockett et al., 20011; Ziobro et al., 2013). Όσον αφορά τα επιφανειακά χαρακτηριστικά της ψίχας των αρτοσκευασμάτων, η μέση διάμετρος πόρων αυξήθηκε με την προσθήκη ορού γάλακτος, ενώ η συνδυασμένη χρήση των δύο πρωτεϊνικών πηγών οδήγησε σε άρτο με μεγαλύτερη διάμετρο πόρων και υψηλότερη πυκνότητα πόρων σε σχέση με τον άρτο αναφοράς. Ωστόσο οι πόροι που δημιουργούνται μπορούν να χαρακτηριστούν ως μεσαίου μεγέθους σύμφωνα με τους Mariotti et al., (2013), οι οποίοι κατηγοριοποίησαν τους πόρους αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης σε τρεις κατηγορίες με βάση την επιφάνειά τους σε: μικρούς $< 0.8 \text{ mm}^2$; μεσαίους: $0.8 - 4.0 \text{ mm}^2$; μεγάλους $> 4.0 \text{ mm}^2$. Από τις απεικονίσεις της ψίχας των άρτων που παρασκευάστηκαν (**Σχήμα 5.2.1**) μπορεί να παρατηρηθεί πως η προσθήκη πρωτεΐνης γάλακτος και ο συνδυασμός των δύο πρωτεϊνών οδήγησε στον σχηματισμό μεσαίου μεγέθους και ομοιόμορφα κατανομημένων πόρων, ιδιότητα επιθυμητή από τους καταναλωτές.



Σχήμα 5.2.1 Επίδραση της προσθήκης πρωτεϊνών στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων.

Η χρήση υδροκολλοειδών στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης αφορά στην βελτίωση των δομικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και στην παράταση της διάρκειας ζωής τους. Πιο συγκεκριμένα, οι συνταγές Σ5-Σ7

αφορούν στη μελέτη της επίδραση του κόμμεος χαρουπιού σε αρτοσκευάσματα με πρωτεΐνες, αλβουμίνη, ορού γάλακτος και συνδυασμού τους. Η προσθήκη κόμμεος χαρουπιού φαίνεται να αυξάνει την υγρασία των αρτοσκευασμάτων, η οποία είναι στατιστικά σημαντική για τα αρτοσκευάσματα με πρωτεΐνη ορού γάλακτος και συνδυασμό αλβουμίνης με ορό γάλακτος. Η αύξηση της υγρασίας μπορεί να αποδοθεί στην ικανότητα δέσμευσης νερού του κόμμεος χαρουπιού. Σύμφωνα με τους Rosell et al. (2001), η προσθήκη υδροκολλοειδών οδήγησε στην αύξηση της υγρασίας άρτου με βάση το σίτο, λόγω της υψηλής τους ικανότητας δέσμευσης νερού. Η προσθήκη του κόμμεος χαρουπιού οδήγησε σε μείωση του πορώδους και αύξηση της σκληρότητας της ψίχας των αρτοσκευασμάτων που περιείχαν έναν τύπο πρωτεΐνης, ενώ επήλθε αύξηση του πορώδους και μείωση της σκληρότητας, με την συνδυασμένη χρήση πρωτεϊνών αλβουμίνης, ορού γάλακτος και κόμμεος χαρουπιού σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα χωρίς προσθήκη υδροκολλοειδούς. Έχει αναφερθεί η αρνητική συσχέτιση της σκληρότητας της ψίχας με τον όγκο και το πορώδες των αρτοσκευασμάτων (Moore et al., 2006). Η επίδραση της προσθήκης υδροκολλοειδών στην διόγκωση και την υφή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης ποικίλλει ανάλογα με το είδος του υδροκολλοειδούς που χρησιμοποιείται και την συνταγή, στην οποία προστίθενται. Υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές, στις οποίες αναφέρονται είτε η θετική ή η αρνητική επίδραση των υδροκολλοειδών στην διόγκωση και στην μείωση της σκληρότητας της ψίχας αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη (Gambus et al., 2001; Cato et al., 2004; Lazaridou et al., 2007). Στην παρούσα πειραματική σειρά, η προσθήκη υδροκολλοειδούς επιδρά αρνητικά στις συνταγές που περιείχαν έναν τύπο πρωτεΐνης, πιθανώς λόγω της περιορισμένη διαθεσιμότητας του νερού (110% επί του αλεύρου), με αποτέλεσμα τα ζυμάρια να γίνεται αρκετά συνεκτικό, ώστε να μην διογκώνεται κατά το στάδιο της επάσης. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για την προσθήκη ξανθάνης και την αρνητική της επίδραση στην διόγκωση αρτοσκευασμάτων από άλευρο σόργου (Schober et al., 2005). Αντιθέτως η προσθήκη του κόμμεος χαρουπιού ήταν θετική στην συνταγή με συνδυασμένη προσθήκη πρωτεϊνών, γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί σε πιθανή συνεργιστική δράση των δύο πρωτεϊνών, αλλά και σε φαινόμενα ασυμβατότητας μεταξύ των πολυμερών των πρωτεϊνών και του υδροκολλοειδούς. Οι Ngarize et al. (2004) αναφέρουν την συνεργιστική δράση αλβουμίνης και ορού γάλακτος, καθώς μίγμα των δύο πρωτεϊνών οδήγησε στον σχηματισμό ισχυρότερης πηκτής σε σύγκριση με κάθε πρωτεΐνη ξεχωριστά. Κατά τον κλιβανισμό και την μετέπειτα ψύξη του άρτου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα σχηματισμού πηκτών, λόγω της ζελατινοποίησης του αμύλου και της ζελοποίησης των περιεχόμενων πρωτεϊνών και υδροκολλοειδών. Η βελτίωση της διόγκωσης του άρτου με συνδυασμένη προσθήκη πρωτεϊνών και υδροκολλοειδούς πιθανώς να οφείλεται στην ασυμβατότητα μεταξύ των πολυμερών των πρωτεϊνών και του υδροκολλοειδούς. Η ασυμβατότητα αυτή οδηγεί στον διαχωρισμό φάσεων εντός της συνεχούς φάσης του αμύλου, αυξάνοντας την συγκέντρωση των πρωτεϊνών και του υδροκολλοειδούς στις αντίστοιχες φάσεις τους, οδηγώντας έτσι στον σχηματισμό ισχυρότερου πήγματος, το οποίο ισχυροποιεί και την δομή του άρτου ενισχύοντας την διόγκωση. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά της ποιότητας των αρτοσκευασμάτων αποτελούν η ελαστικότητα και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά της ψίχας, τα οποία δεν

επηρεάζονται στατιστικά σημαντικά από την προσθήκη του υδροκολλοειδούς, με εξαίρεση το δείγμα με αλβουμίνη και κόμμι χαρουπιού, το οποίο εμφανίζει μικρότερη διάμετρο πόρων και πυκνότητα πόρων, όπως μπορεί να επιβεβαιωθεί και από την οπτική παρατήρηση των δειγμάτων (**Σχήμα 5.2.2**). Ο συνδυασμός δύο πρωτεϊνικών πηγών (αλβουμίνη και ορού γάλακτος), παρουσία υδροκολλοειδούς οδηγεί στην παρασκευή τελικού προϊόντος με αυξημένο πορώδες, ομοιόμορφη κατανομή και μεσαίου μεγέθους πόρους, αλλά αυξημένη σκληρότητα.

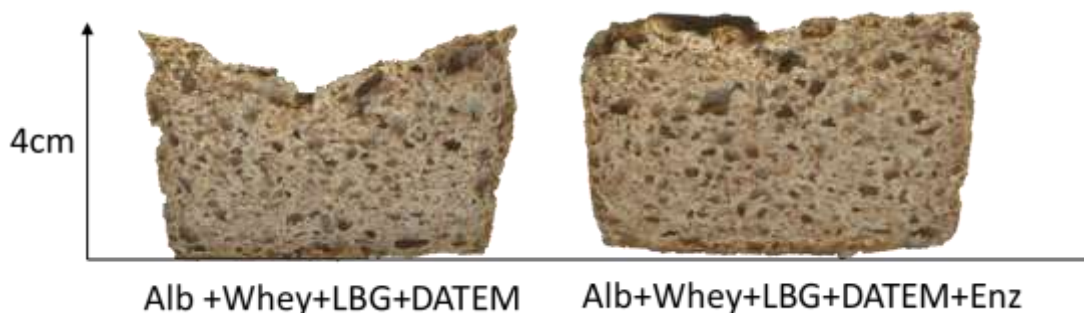


Σχήμα 5.2.2 Επίδραση της συνδυασμένης προσθήκης πρωτεϊνών και κόμμεος χαρουπιού στα μορφολογικά χαρακτηριστικά άρτων.

Οι γαλακτωματοποιητές προστίθενται στα αρτοσκευάσματα ώστε να ενισχυθούν τα δομικά χαρακτηριστικά της ψίχας και να μειωθεί η σκληρότητά της. Η δράση τους αυτή οφείλεται στην αμφοφιλική φύση τους, η οποία επιτρέπει στα μόρια τους να μεταναστεύουν στις διεπιφάνειες, μειώνοντας την επιφανειακή τάση και δημιουργώντας διασπορές. Συγκεκριμένα, ο γαλακτωματοποιητής που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη αυτή είναι ανιονικός και έχει την ικανότητα να αυξάνει την δύναμη του ζυμαριού, αλληλεπιδρώντας με τις υδρόφοβες ομάδες των πρωτεϊνών. Το λιπόφιλο τμήμα του συμβάλλει στην μετουσίωση των πρωτεϊνών της ζύμης στα αρχικά στάδια του ψησίματος, δημιουργώντας σύμπλοκα, τα οποία ισχυροποιούν την δομή και επιτρέπουν την καλύτερη διατήρηση του διοξειδίου του άνθρακα, κατά τον κλιβανισμό. Επιπλέον, οι γαλακτωματοποιητές επιδρούν στην ζελατινοποίηση του αμύλου, σχηματίζοντας σύμπλοκα με την αμυλόζη, καθυστερώντας την διάγκωση των αμυλόκοκκων και την έκλυση αμυλόζης, οδηγώντας στο σχηματισμό μαλακής ψίχας (Nunes et al., 2009). Όπως αναμενόταν η προσθήκη γαλακτωματοποιητή στην συνταγή οδήγησε σε στατιστικά σημαντική μείωση της σκληρότητας της ψίχας, ωστόσο οδήγησε σε μείωση του πορώδους του δείγματος, ενώ οι υπόλοιπες ιδιότητες που μελετήθηκαν δεν επηρεάστηκαν. Από την οπτική παρατήρηση του δείγματος προκύπτει κατάρρευση της δομής του άρτου στο μέσο της φέτας (**Σχήμα 5.2.3**). Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η περαιτέρω βελτίωση της συνταγής με χρήση ενζύμων, τα οποία προωθούν τον σχηματισμό δικτύου και βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του ζυμαριού κατά τον κλιβανισμό (Gujral & Rosell, 2004; Marco & Rosell, 2008b; Renzetti, Bello, & Arendt, 2008). Το ένζυμο που χρησιμοποιήθηκε για την βελτίωση της συνταγής ήταν ένα μίγμα ενζύμων που περιείχε αμυλάση, τρανσγλουταμινάση και ημικυτταρινάση. Η προσθήκη του ενζύμου δεν βελτίωσε το πορώδες των αρτοσκευασμάτων ενώ οδήγησε σε αύξηση της σκληρότητας της ψίχας. Ωστόσο από την οπτική παρατήρηση των δειγμάτων είναι φανερό η απουσία

κατάρρευσης στην φέτα του άρτου, αλλά και οι μικρότεροι μεγέθους και ομοιόμορφοι πόροι. Η βελτίωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών της φέτας του άρτου οφείλεται στην δράση της τρανσγλουταμινάσης. Έχει αναφερθεί ο πολυμερισμός των πρωτεϊνών του ρυζάλευρου λόγω της δράσης της τρανσγλουταμινάσης, ο οποίος οδηγεί στον σχηματισμό δικτύου ικανού να διατηρεί τα αέρια που παράγονται κατά την επώαση (Gujral & Rosell, 2004). Η αύξηση της σκληρότητας της ψίχας μπορεί να εξηγηθεί από την αύξηση του μοριακού βάρους των πρωτεϊνών του ρυζάλευρου λόγω της δράσης της τρανσγλουταμινάσης να δημιουργεί σταυροειδείς δεσμούς μεταξύ των πρωτεϊνικών μορίων, οδηγώντας στον σχηματισμό μεγάλων πολυμερών (Marco et al., 2008b).

Γενικά μπορεί να ειπωθεί πως η επίδραση των ενζύμων στην ποιότητα των αρτοσκευασμάτων εξαρτάται από το είδος και τον τρόπο δράσης τους. Συγκεκριμένα, η τρανσγλουταμινάση είναι ένα ένζυμο το οποίο καταλύει την αντίδραση μεταφοράς ακετυλίου, στην οποία ένα ακετύλιο μεταφέρεται από τη γ-καρβοξυλική ομάδα των υπολειμμάτων γλουταμίνης ενός πεπτιδίου (δότης ακετυλίου) σε διάφορες πρωτοταγείς αμίνες (δέκτες ακετυλίου). Όταν μία ε-αμινομάδα του υπολείμματος λυσίνης ενός πεπτιδίου συμμετέχει στην ενζυμική αυτή αντίδραση ως δέκτης ακετυλίου, τα πρωτεϊνικά μόρια συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ τους (σύνδεση με σταυροειδείς δεσμούς, cross-linking) (Motoki & Seguro, 1998). Το ρυζάλευρο έχει υψηλά ποσοστά λυσίνης και μπορεί να δράσει ως υπόστρωμα του ενζύμου. Ένας άλλος τύπος ενζύμου που χρησιμοποιείται στην αρτοποιία είναι οι αμυλάσες. Σκοπός της προσθήκης των αμυλασών στο ζυμάρι είναι η αύξηση των ζυμώσιμων και αναγωγικών σακχάρων του αλεύρου, μέσω της αποικοδόμησης του αμύλου και της παραγωγής χαμηλού μοριακού βάρους δεξτρινών, όπως η μαλτόζη, η οποία μπορεί να ζυμωθεί από την μαγιά. Επιπλέον η προσθήκη αμυλασών καθυστερεί την έκλυση της αμυλόζης κατά την ζελατινοποίηση του αμύλου, καθυστερώντας την αύξηση του ιξώδους, επιτρέποντας την παρατεταμένη διόγκωση κατά τον κλιβανισμό των αρτοσκευασμάτων (Goesaert et al., 2005). Τέλος η ημικυτταρινάση δρα διασπώντας την κυτταρίνη ή τις πεπτοζάνες των διαιτητικών ινών που προστίθενται στο ζυμάρι, στην περίπτωση μας, διαιτητικές ίνες από τον φλοιό των σπόρων του χαρουπάλευρου, ελευθερώνοντας το δεσμευμένο νερό στο ζυμάρι και βελτιώνοντας την μηχανική κατεργασία της ζύμης και την διόγκωση των τελικών προϊόντων. Στο **Σχήμα 5.2.3** φαίνεται η επίδραση της προσθήκης γαλακτωματοποιητή DATEM και ενζύμων στην ποιότητα του άρτου. Μπορεί να ειπωθεί πως οι αναλογίες των συστατικών που μελετήθηκαν οδήγησαν στην παρασκευή άρτου ελεύθερου γλουτένης με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Επομένως η συνταγή αυτή επιλέχθηκε ως η καταλληλότερη για τα πειράματα που θα ακολουθήσουν. Ωστόσο η περιεκτικότητα σε νερό στο ζυμάρι και σε χαρουπάλευρο αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους των φυσικών ιδιοτήτων των άρτων και επιλέχθηκαν να μελετηθούν περαιτέρω στις επακόλουθες πειραματικές σειρές.



Σχήμα 5.2.3 Επίδραση της προσθήκης γαλακτωματοποιητή (DATEM) και ενζύμων στα μορφολογικά χαρακτηριστικά άρτων.

5.2.2 Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης απαιτεί την προσθήκη ποικίλων συστατικών, τα οποία μπορούν να δράσουν ως μιμητές της γλουτένης. Η ενσωμάτωση πρωτεϊνικών πηγών βελτίωσε τα δομικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων με ρυζάλευρο και χαρουπάλευρο, ενώ η επιπλέον προσθήκη κόμμεος χαρουπιού ενίσχυσε την διόγκωση. Ωστόσο η σκληρότητα της ψίχας μειώθηκε με την προσθήκη του γαλακτωματοποιητή, αλλά δημιουργήθηκε κατάρρευση της δομής, η οποία αποκαταστάθηκε με την χρήση ενζύμων στην συνταγή. Η βασική συνταγή που χρησιμοποιήθηκε στις επόμενες πειραματικές σειρές περιείχε σε ποσοστά επί του βάρους του αλεύρου 4% πρωτεΐνη γάλακτος, 4% αλβουμίνη αυγού, 0.5% κόμμι χαρουπιού (LBG), 0.5% γαλακτωματοποιητή DATEM και 0.1% ένζυμο.

5.3 Ρεολογικές ιδιότητες ζυμαριών άρτων με προσθήκη χαρουπάλευρου (3^η Σειρά πειραμάτων)

Η ανάπτυξη ποιοτικών αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης απαιτεί την χρήση συστατικών, τα οποία θα δράσουν ως μιμητές της γλουτένης και συστατικών που αυξάνουν την διατροφική αξία των τελικών προϊόντων. Πολλοί ερευνητές αναφέρουν την χρήση πρωτεϊνών, διαιτητικών ινών, υδροκολλοειδών και γαλακτωματοποιητών (Gallagher et al., 2003a; Sivaramakrishnan et al., 2004; Lazaridou et al., 2007). Ωστόσο η προσθήκη αυτών των συστατικών και κυρίως των διαιτητικών ινών επηρεάζει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ζυμαριών συνήθως αυξάνοντας την ικανότητα απορρόφησης νερού. Οι ρεολογικές ιδιότητες των ζυμαριών αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη σχετίζονται με την ποιότητα του τελικού προϊόντος και συγκεκριμένα την διόγκωση μετά τον κλιβανισμό (Turabi et al., 2008b). Σύμφωνα με τους Sabanis et al. (2009) η προσθήκη ινών βρώμης και αραβοσίτου σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης, αύξησε το φαινόμενο ιξώδες των ζυμαριών και οδήγησε σε τελικά προϊόντα με αυξημένη διόγκωση και υψηλό πορώδες. Επομένως η μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων των ζυμαριών αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης είναι ουσιαστικής σημασίας, λόγω της επίδρασης τους στην μηχανική επεξεργασία, στην ικανότητα διόγκωσης των ζυμαριών και κατ' επέκταση στην ποιότητα του ψημένου άρτου (Van Bockstaele et al, 2011).

Ο προσδιορισμός των ιξωδοελαστικών χαρακτηριστικών των ζυμαριών μπορεί να μελετηθεί με την δοκιμή ερπυσμού-ανάκτησης (creep-recovery test), όπου καταγράφεται η παραμόρφωση του δείγματος από την εφαρμογή σταθερής τάσης ως προς το χρόνο (Wang and Sun, 2002). Έχει αναφερθεί η συσχέτιση της δοκιμής ερπυσμού-ανάκτησης με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά άρτων, όπως η διόγκωση και η κατανομή των κυψελίδων αέρα και με το φαινόμενο της παλαίωσης (Onyango et al, 2009b; Van Bockstaele et al, 2011). Η μελέτη των θεμελιωδών ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων ζυμαριών μπορεί να γίνει και με μικρού πλάτους ταλαντωτική δοκιμή (small amplitude test). Με την τεχνική αυτή μπορούν να μελετηθούν οι δομικές ιδιότητες ενός δείγματος καθώς καταγράφεται ταυτόχρονα ο ιξώδης και ο ελαστικός του χαρακτήρας και αξιολογείται η εξάρτησή τους από την συχνότητα και τον χρόνο (Khatkar & Schofield, 2002).

Η προσθήκη χαρουπάλευρου στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης στοχεύει στην κάλυψη των διατροφικών αναγκών των ατόμων που πάσχουν από κοιλιοκάκη. Το χαρουπάλευρο έχει χαρακτηριστεί ως συστατικό υψηλής διατροφικής αξίας, λόγω της σημαντικής περιεκτικότητάς του σε πρωτεΐνες και διαιτητικές ίνες, ενώ δεν υπάρχουν βιβλιογραφικές πληροφορίες σχετικά με την χρήση του σε προϊόντα ελεύθερα γλουτένης.

Ο σκοπός της 3^{ης} πειραματικής σειράς ήταν η επίδραση διαφορετικών βαθμών υποκατάστασης χαρουπάλευρου στα δομικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά ζυμαριών με βάση το ρυζάλευρο, με ταυτόχρονη μεταβολή της περιεκτικότητας σε νερό. Το χαρουπάλευρο και το νερό επιδρούν σημαντικά στις ρεολογικές ιδιότητες των ζυμαριών, οι οποίες σχετίζονται και με την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Επιπλέον έγινε ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή της επίδρασης της

περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ζυμαριών.

Οι συνδυασμοί που μελετήθηκαν και η συνταγή που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη των ζυμαριών φαίνονται στους Πίνακες 5.3.1 και 5.3.2. Το χαρουπάλευρο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των αρτοσκευασμάτων ήταν του κλάσματος B ($d_{50} = 174.73 \mu\text{m}$, 9.19% υγρασία, 22,69% πρωτεΐνη, 51.80% διαιτητικές ίνες, 4.85% τέφρα).

Συντομογραφίες:

Σύμβολο	Ορισμός	Μονάδα μέτρησης
a_1, a_2, a_3, a_4	Σταθερές	Pa/Hz, Pa/Hz, Pa/Hz, Pa/Hz
$b_1, c_1, b_2, c_2, b_3, c_3, b_4, c_4, x, y, m_1, n_1, m_2, n_2, m_3, n_3, m_4, n_4, m_5, n_5,$	Σταθερές	Αδιάστατες
$j_{o1}, j_1, j_{max1}, \lambda_1, \eta_{o1}$	Σταθερές	$\text{Pa}^{-1}, \text{Pa}^{-1}, \text{Pa}^{-1}, \text{s}, \text{Pa} \cdot \text{s}$
C	Περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο	%
G'	Συντελεστής αποθήκευσης	Pa
G''	Συντελεστής απωλειών	Pa
J	Ενδοτικότητα	Pa^{-1}
J_e	Ελαστική ενδοτικότητα	Pa^{-1}
J_1	Ιξωδοελαστική ενδοτικότητα	Pa^{-1}
J_{max}	Μέγιστη ενδοτικότητα	Pa^{-1}
J_0	Στιγμιαία ενδοτικότητα	Pa^{-1}
J_v	Ιξώδης ενδοτικότητα	Pa^{-1}
η_o	Ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
t	Χρόνος	s
$\tan\delta$	Εφαπτομένη απώλειας	Αδιάστατη
W_t	Περιεκτικότητα σε νερό	%
γ	Παραμόρφωση	%
λ	Μέσος χρόνος υστέρησης	s
σ	Τάση διάτμησης	Pa
ω	Συχνότητα	Hz

Πίνακας 5.3.1 Διαφορετικοί συνδυασμοί χαρουπάλευρου και νερού που μελετήθηκαν.

Αναλογία Χαρουπάλευρο/Ρυζάλευρο	5/95	10/90	15/85
	70	80	100
Περιεκτικότητα σε νερό	80	90	110
(ποσοστό % επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*)	90	100	120
	100	110	130
		120	140
			150

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του χαρουπάλευρου.

Πίνακας 5.3.2 Βασική συνταγή για την παρασκευή ζυμαριού χωρίς γλουτένη.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*
Αλβουμίνη	4
Πρωτεΐνη γάλακτος	4
Λιπαρό	3.5
Ζάχαρη	3
Αλάτι	2
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Κόμμι χαρουπιού- LBG	0.5
Ένζυμο	0.1

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του χαρουπάλευρου.

5.3.1 Ρεολογικές ιδιότητες ζυμαριών

Πριν την εφαρμογή της δυναμικής ταλαντωτικής δοκιμής στα ζυμάρια ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός της ιξωδοελαστικής τους περιοχής, ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης, πάνω από την οποία επέρχεται μόνιμη παραμόρφωση του δείγματος. Στα ζυμάρια που μελετήθηκαν η μέγιστη ιξωδοελαστική τιμή παραμόρφωσης είναι το 1%, καθώς πάνω από την τιμή αυτή εμφανίζεται πτωτική τάση των συντελεστών αποθήκευσης και απωλειών, G' και G'' αντίστοιχα.

Η τιμή αυτή αναφέρεται ως το τέλος της ιξωδοελαστικής περιοχής και από άλλους ερευνητές για ζυμάρια ελεύθερα γλουτένης (Sivaramakrishnan et al., 2004; Lazaridou et al., 2007).

Οι ρεολογικές δοκιμές που εφαρμόστηκαν ήταν: α) δυναμικά ταλαντωτικά πειράματα για εύρος συχνοτήτων από 0.1 έως 20 Hz σε 0.5% παραμόρφωση και β) πειράματα ερπυσμού-ανάκτησης με την εφαρμογή σταθερής τάσης 50 Pa για 60 s στο δείγμα και 180 s χρόνο ανάκτησης. Κάθε δοκιμή πραγματοποιήθηκε τουλάχιστον τρεις φορές.

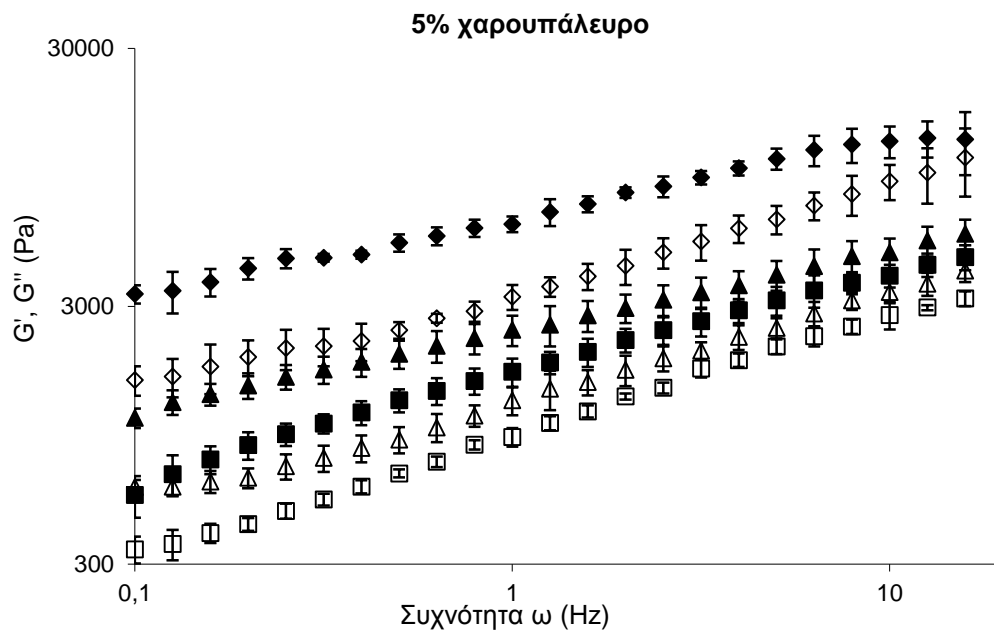
5.3.2 Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στις παραμέτρους της δυναμικής ταλαντωτικής δοκιμής των ζυμαριών

Στα Σχήματα 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3 και 5.3.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες του συντελεστή αποθήκευσης, συντελεστή απωλειών και της εφαπτομένης απωλειών $G'(\omega)$, $G''(\omega)$ και $\tan\delta(\omega)$ ως προς την συχνότητα για τα ζυμάρια με 5%, 10% και 15% χαρουπάλευρο και διάφορες περιεκτικότητες σε νερό.

Όλα τα ζυμάρια που παρασκευάστηκαν εμφάνισαν τιμές για τον συντελεστή αποθήκευσης $G'(\omega)$, υψηλότερες από τον συντελεστή απωλειών $G''(\omega)$, σε όλο το πεδίο συχνοτήτων. Οι δύο συντελεστές αυξήθηκαν με την αύξηση της συχνότητας, υποδεικνύοντας τον ελαστικό-στερεό χαρακτήρα των ζυμαριών. Επομένως και η εφαπτομένη απωλειών ($\tan\delta=G''/G'$) ήταν μικρότερη του 1 (Σχήμα 5.3.4). Παρόμοια αποτελέσματα δυναμικών ταλαντωτικών πειραμάτων έχουν αναφερθεί για ζυμάρια με βάση τον σίτο (Edwards et al., 2003) καθώς και για ζυμάρια με βάση το ρυζάλευρο (Sivaramakrishnan et al., 2004; Lazaridou et al., 2007).

Για σταθερή περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο, χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό μειώνει την εξάρτηση των δύο συντελεστών από την συχνότητα (ενίσχυση του ελαστικού χαρακτήρα), όπως διαπιστώθηκε από την κλίση των ευθειών (Σχήμα 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3). Επιπλέον, οι τιμές των δύο συντελεστών αυξήθηκαν με την μείωση της περιεκτικότητας σε νερό για σταθερή προσθήκη χαρουπάλευρου. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός, ότι το χαρουπάλευρο δεν ενυδατώνεται πλήρως σε χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό με αποτέλεσμα το ζυμάρι να γίνεται πιο σκληρό, προκαλώντας αρνητικές επιπτώσεις στην ιξωδοελαστικότητα του. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, μικρή διαθεσιμότητα νερού στο ζυμάρι προκαλεί ανταγωνισμό ως προς την απορρόφηση του διαθέσιμου νερού από τα επιμέρους συστατικά του (π.χ. πρωτεΐνη, άμυλο, μη-άμυλούχοι πολυσακχαρίτες). Η μη βέλτιστη κατανομή του νερού επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες σχηματίζοντας σκληρό και κολλώδες ζυμάρι ακατάλληλο για κλιβανισμό (Sadowska et al. 2003; Mastromatteo et al. 2012).

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο προκάλεσε μετατόπιση των δύο συντελεστών $G'(\omega)$ και $G''(\omega)$ προς υψηλότερες τιμές, ενώ η εφαπτομένη απωλειών παρουσίασε χαμηλότερες τιμές. Σύμφωνα με τα δεδομένα η προσθήκη χαρουπάλευρου αύξησε τον ελαστικό χαρακτήρα του ζυμαριού, οδήγησε δηλαδή πιο προφανή στερεό-ελαστικό χαρακτήρα. Συστατικά πλούσια σε φυτικές ίνες μπορούν να δράσουν ως δομικοί και ελαστικοί παράγοντες σε ζυμάρια – δίνοντας τους από ρεολογική άποψη συμπεριφορά στερεού (Skendi et al., 2009). Η προσθήκη ινών χαρουπιού έχει αναφερθεί να αυξάνει τον ελαστικό χαρακτήρα ζυμαριού με βάση το σίτο (Mis', 2011). Όταν όμως η περιεκτικότητα του νερού ήταν υψηλή (150% νερό, 15% χαρουπάλευρο) ο ελαστικός χαρακτήρας μειώθηκε αποδεικνύοντας τη σημασία του νερού ως πλαστικοποιητή.



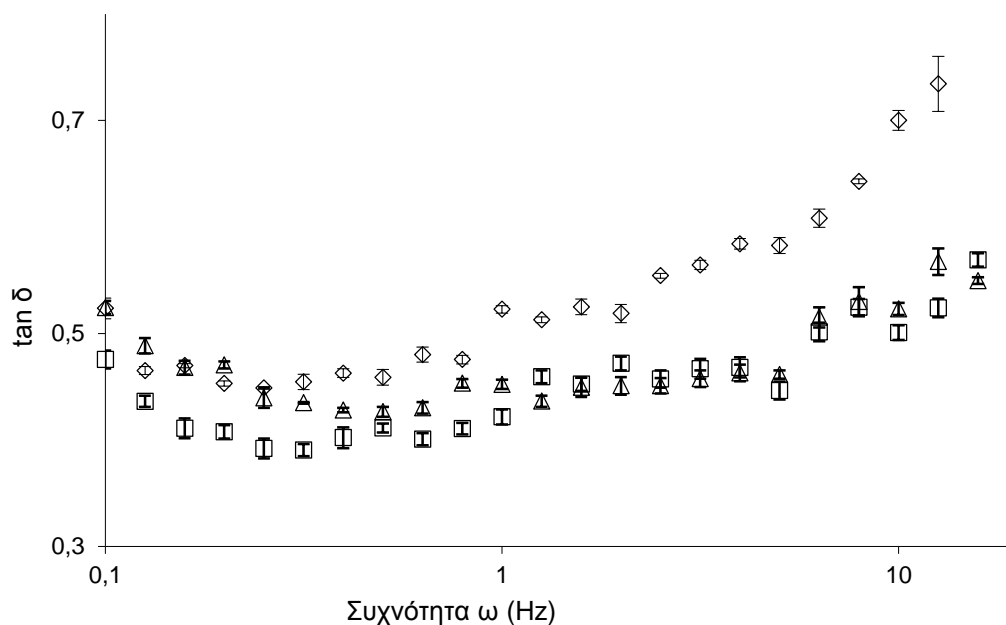
Σχήμα 5.3.1 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό σε ζυμάρια με 5% χαρουπάλευρο στον συντελεστή αποθήκευσης (G') και στον συντελεστή απωλειών (G''). Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Κλειστά σύμβολα, G' ; ανοικτά σύμβολα, G'' . \blacklozenge 80% περιεκτικότητα σε νερό, \blacktriangle 90% περιεκτικότητα σε νερό \blacksquare 100% περιεκτικότητα σε νερό.



Σχήμα 5.3.2 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό σε ζυμάρια με 10% χαρουπάλευρο στον συντελεστή αποθήκευσης (G') και στον συντελεστή απωλειών (G''). Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Κλειστά σύμβολα, G' ; ανοικτά σύμβολα, G'' . \blacklozenge 80% περιεκτικότητα σε νερό, \blacktriangle 90% περιεκτικότητα σε νερό, \blacksquare 100% περιεκτικότητα σε νερό, \bullet 110% περιεκτικότητα σε νερό.



Σχήμα 5.3.3 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό σε ζυμάρια με 15% χαρουπάλευρο στον συντελεστή αποθήκευσης (G') και στον συντελεστή απωλειών (G''). Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Κλειστά σύμβολα, G' ; ανοικτά σύμβολα, G'' . \blacklozenge 100% περιεκτικότητα σε νερό, \blacktriangle 110% περιεκτικότητα σε νερό, \blacksquare 120% περιεκτικότητα σε νερό, \bullet 150% περιεκτικότητα σε νερό.



Σχήμα 5.3.4 Τυπικές καμπύλες εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta$ (ω) ζυμαριών με διάφορα ποσοστά χαρουπάλευρου και νερού. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. \diamond 5% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και 80% περιεκτικότητα σε νερό, \square 10% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και 100% περιεκτικότητα σε νερό, Δ 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και 120% περιεκτικότητα σε νερό.

5.3.3 Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στις παραμέτρους δοκιμής ερπυσμού – ανάκτησης (creep-recovery test) των ζυμαριών

Τα δεδομένα της δοκιμής ερπυσμού - ανάκτησης περιγράφονται με τον όρο της ενδοτικότητας $J = f(t) = \gamma/\sigma$, ως συνάρτηση της παραμόρφωσης (γ) και της τάσης (σ), η οποία είναι σταθερή κατά την φάση του ερπυσμού.

Η ενδοτικότητα περιγράφεται από το μοντέλο του Burger με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$J(t) = J_0 + J_1 (1 - \exp(-t/\lambda)) + t/\eta_0 \text{ για την φάση του ερπυσμού}$$

και

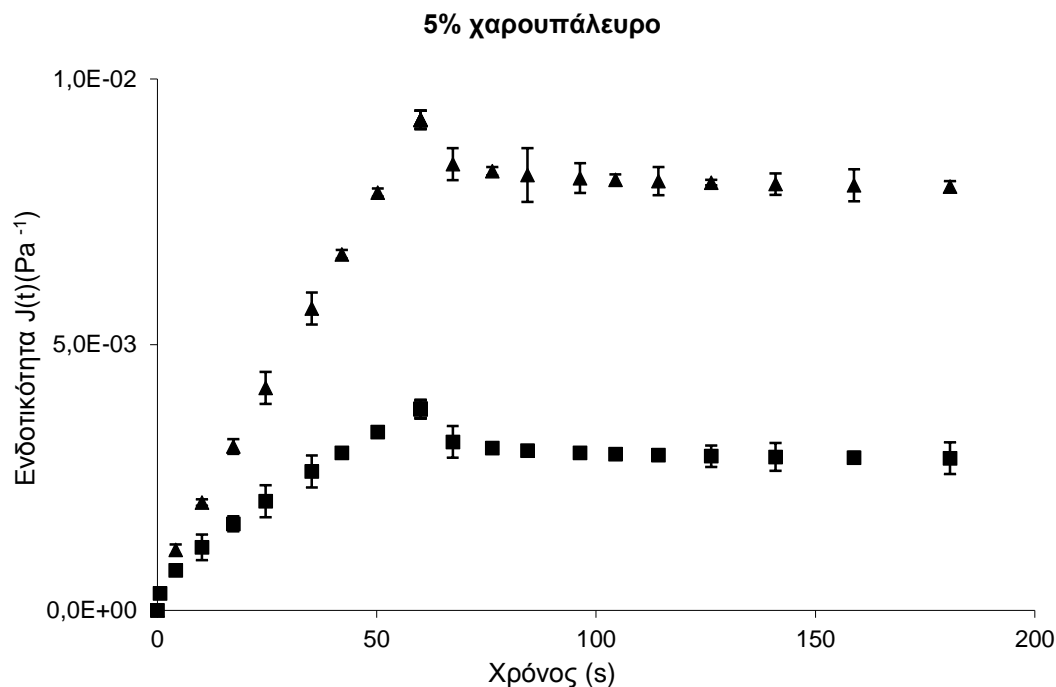
$$J(t) = J_{\max} - J_0 - J_1 (1 - \exp(-t/\lambda)) \text{ για την φάση ανάκτησης}$$

μέσω του οποίου μπορεί να υπολογιστεί η ελαστική ενδοτικότητα (J_0), η ιξωδοελαστική ενδοτικότητα (J_1), η μέγιστη ενδοτικότητα (J_{\max}), ο μέσος χρόνος υστέρησης (λ) και το ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης (η_0) (Mezger, 2006).

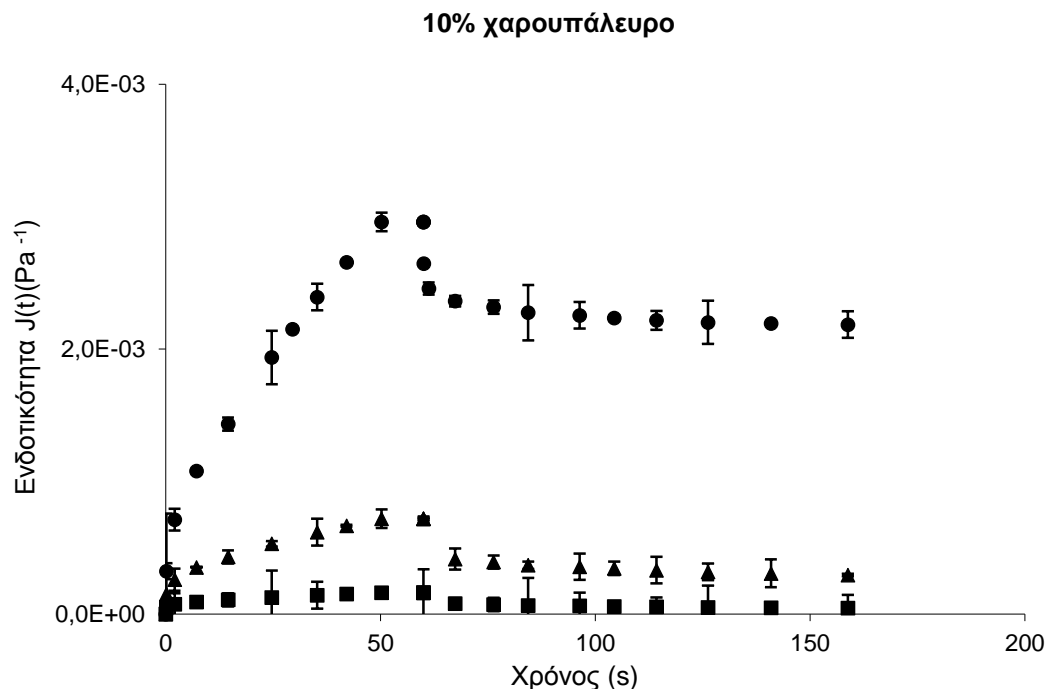
Η μέγιστη ενδοτικότητα περιλαμβάνει την σχετική ελαστική ενδοτικότητα (J_e/J_{\max}) και την σχετική ιξώδη ενδοτικότητα (J_v/J_{\max}). Η τιμή της σχετικής ελαστικής ενδοτικότητας μπορεί να υπολογιστεί με αφαίρεση από την μέγιστη ενδοτικότητα της τιμής της ενδοτικότητας στο τέλος της καμπύλης ανάκτησης, όπου το δείγμα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Η σχετική ελαστική ενδοτικότητα αντιπροσωπεύει το τμήμα της μέγιστης ενδοτικότητας που ανακτάται, ενώ η σχετική ιξώδη ενδοτικότητα αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση που παραμένει μετά την απομάκρυνση της τάσης (Onyango et al. 2009a; Rao et al. 1987).

Η δοκιμή ερπυσμού – ανάκτησης βασίζεται στον επαναπροσανατολισμό των δεσμών ενός ιξωδοελαστικού υλικού. Κατά την φάση της στιγμιαίας ενδοτικότητας οι δεσμοί μεταξύ των δομικών μονάδων επιμηκύνονται ελαστικά με την εφαρμογή τάσης και επανέρχονται πλήρως μετά την απομάκρυνσή της. Στην ιξωδοελαστική ενδοτικότητα οι δεσμοί των δομικών μονάδων παραμορφώνονται ανελαστικά και επανέρχονται μερικώς με καθυστέρηση (Rao et al., 1987; Karim et al., 2000).

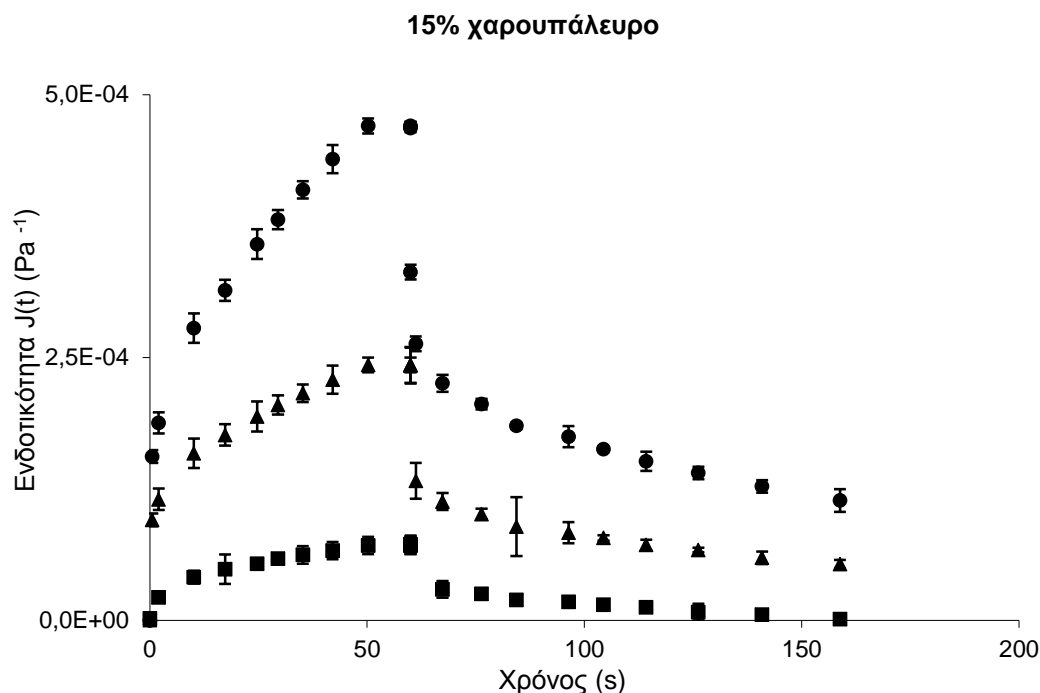
Αντιπροσωπευτικές καμπύλες της δοκιμής ερπυσμού- ανάκτησης για τα ζυμαρία που παρασκευάστηκαν παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.3.5, 5.3.6 και 5.3.7** και στον **Πίνακα 5.3.3** παρατίθενται τιμές για σχετική ελαστική και ιξώδη ενδοτικότητα. Με βάση τα δεδομένα προκύπτει ο ιξωδοελαστικός χαρακτήρας των ζυμαριών, με συνδυασμό ελαστικών και ιξώδη συνιστωσών, ο οποίος χαρακτηρίζει τα ζυμαρία των αρτοσκευασμάτων (Lazaridou et al; 2007, Onyango et al; 2009a). Οι τιμές της ενδοτικότητας αυξάνουν με την αύξηση του νερού και στις δύο φάσεις (ερπυσμού και ανάκτησης). Αντιθέτως η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο προκαλεί μετατόπιση των καμπυλών σε χαμηλότερες τιμές με ταυτόχρονη αύξηση της σχετικής ελαστικής ενδοτικότητας (**Πίνακας 5.3.3**).



Σχήμα 5.3.5 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην ενδοτικότητα ζυμαριών με 5% χαρουπάλευρο. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. ■ 80% περιεκτικότητα σε νερό, ▲ 90% περιεκτικότητα σε νερό.



Σχήμα 5.3.6 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην ενδοτικότητα ζυμαριών με 10% χαρουπάλευρο. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. ■ 90% περιεκτικότητα σε νερό, ▲ 100% περιεκτικότητα σε νερό, ● 120% περιεκτικότητα σε νερό.



Σχήμα 5.3.7 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην ενδοτικότητα ζυμαριών με 15% χαρουπάλευρο. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. ■ 100% περιεκτικότητα σε νερό, ▲ 120% περιεκτικότητα σε νερό, ● 140% περιεκτικότητα σε νερό.

Πίνακας 5.3.3 Επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στην σχετική ελαστική (J_e) και την σχετική ιξώδη (J_v) ενδοτικότητα της μέγιστης τιμής ενδοτικότητας (J_{max}) κατά την φάση ανάκτησης.

Χαρουπάλευρο %	Νερό %	J_v/J_{max} %	J_e/J_{max} %
5	70	44.95 ± 1.20	55.05 ± 1.20
	80	75.42 ± 0.98	24.58 ± 0.98
	90	86.37 ± 0.75	13.63 ± 0.75
	100	94.60 ± 0.46	5.40 ± 0.46
10	80	13.70 ± 1.70	86.30 ± 1.70
	90	27.80 ± 0.87	72.20 ± 0.87
	100	40.95 ± 1.35	59.05 ± 1.35
	110	69.62 ± 0.64	30.38 ± 0.64
15	120	73.80 ± 2.40	26.20 ± 2.40
	100	1.95 ± 0.06	98.05 ± 0.06
	110	22.10 ± 0.45	77.90 ± 0.45
	120	25.12 ± 1.24	74.88 ± 1.24
	130	31.01 ± 0.97	68.99 ± 0.97
15	140	34.32 ± 2.30	65.68 ± 2.30
	150	48.12 ± 1.40	51.88 ± 1.40

Τα δεδομένα της ενδοτικότητας αναλύθηκαν με το μοντέλο του Burger και παρουσιάζονται ως συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο στα **Σχήματα 5.3.8, 5.3.9, 5.3.10, 5.3.11 και 5.3.12**. Αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα με μη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου Burger και της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό, τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.3.4**.

Το ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης δηλώνει την ρευστότητα (flowability) του δείγματος στο τέλος της φάσης ερπυσμού, ενώ η μέγιστη ενδοτικότητα J_{max} (παραμόρφωση στο τέλος της φάσης ερπυσμού) χαρακτηρίζει την αντοχή των δεσμών μεταξύ των δομικών μονάδων του δείγματος και κατ' επέκταση την ικανότητα αντίστασης της ζύμης στην παραμόρφωση. Αύξηση στην περιεκτικότητα νερού οδήγησε στην αύξηση της μέγιστης ενδοτικότητας, υποδεικνύοντας ότι η ζύμη είναι ευπαθής στην παραμόρφωση (**Σχήμα 5.3.8**). Αντιθέτως η αύξηση του χαρουπάλευρου, στα δείγματα με το ίδιο περιεχόμενο νερού, αύξησε την αντοχή του ζυμαριού σε παραμόρφωση, μείωσε την ρευστότητά του, αυξάνοντας έτσι το ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης η_0 (**Σχήμα 5.3.9**). Στα ζυμάρια με 5% ή 10% χαρουπάλευρο αυξημένα ποσοστά περιεχόμενου νερού δεν μπορούν να απορροφηθούν από τις ίνες του χαρουπάλευρου με αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά το ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης. Σύμφωνα με τους Sivaramakrishnan et al. (2004) υψηλή περιεκτικότητα σε νερό στο ζυμάρι δεν μπορεί να δεσμευτεί από τις ίνες και τις πρωτεΐνες, με αποτέλεσμα οι αμυλόκοκκοι να κινούνται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο και να αυξάνουν την ρευστότητα του ζυμαριού (μείωση του ιξώδους).

Η επίδραση του χαρουπάλευρου και του νερού στον χρόνο υστέρησης (λ) φαίνεται παρόμοια με τις προηγούμενες παραμέτρους. Ωστόσο στα δείγματα με 10% και 15% χαρουπάλευρο, οι τιμές του χρόνου υστέρησης μειώθηκαν φτάνοντας σε ισορροπία, ενώ ακολούθως παρατηρήθηκε μικρή αύξηση τους για συγκεκριμένα ποσοστά περιεχόμενου νερού (**Σχήμα 5.3.10**). Η μείωση του χρόνου υστέρησης αντιστοιχεί σε ταχύτερη φάση ανάκτησης και φαίνεται να υπάρχει βέλτιστος συνδυασμός περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο, οι οποίοι οδηγούν σε μειωμένο χρόνο υστέρησης, συγκεκριμένα λόγος χαρουπάλευρο/νερό 10/100, 15/120 και 15/130. Για το ζυμάρι με 15% χαρουπάλευρο η επίδραση του νερού στον χρόνο υστέρησης φαίνεται να μην είναι σημαντική για ποσοστά άνω του 120%.

Η ελαστική ενδοτικότητα J_0 , μειώθηκε με την αύξηση του περιεχόμενου νερού όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.3.11**. Η ελαστική ενδοτικότητα περιγράφει την ιδανικά ελαστική συμπεριφορά των δειγμάτων, επομένως οι χαμηλές τιμές J_0 των ζυμαριών με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της δράσης του νερού ως πλαστικοποιητή, με αποτέλεσμα τα ζυμάρια να εμφανίσουν ιξώδη συμπεριφορά. Το νερό ως πλαστικοποιητής κατέστησε την εσωτερική δομή των ζυμαριών εύκολα παραμορφώσιμη και μη ανακτήσιμη. Αντίθετα η προσθήκη χαρουπάλευρου αύξησε την στιγμιαία ελαστική ενδοτικότητα, συμπέρασμα που υποστηρίζεται και από τα ταλαντωτικά δυναμικά πειράματα, στα οποία η προσθήκη χαρουπάλευρου ενίσχυσε τον ελαστικό χαρακτήρα των ζυμαριών.

Επιπλέον η ιξωδοελαστική ενδοτικότητα J_1 αντιπροσωπεύει τον ιξωδοελαστικό χαρακτήρα, δηλαδή τον βαθμό της μόνιμης παραμόρφωσης των δειγμάτων. Τα ζυμάρια

με μικρές τιμές ενδοτικότητας (J_1 , J_{max}) και υψηλό ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης εμφάνισαν και υψηλές τιμές σχετικής ελαστικής ενδοτικότητας (J_e) (**Πίνακας 5.3.3**).

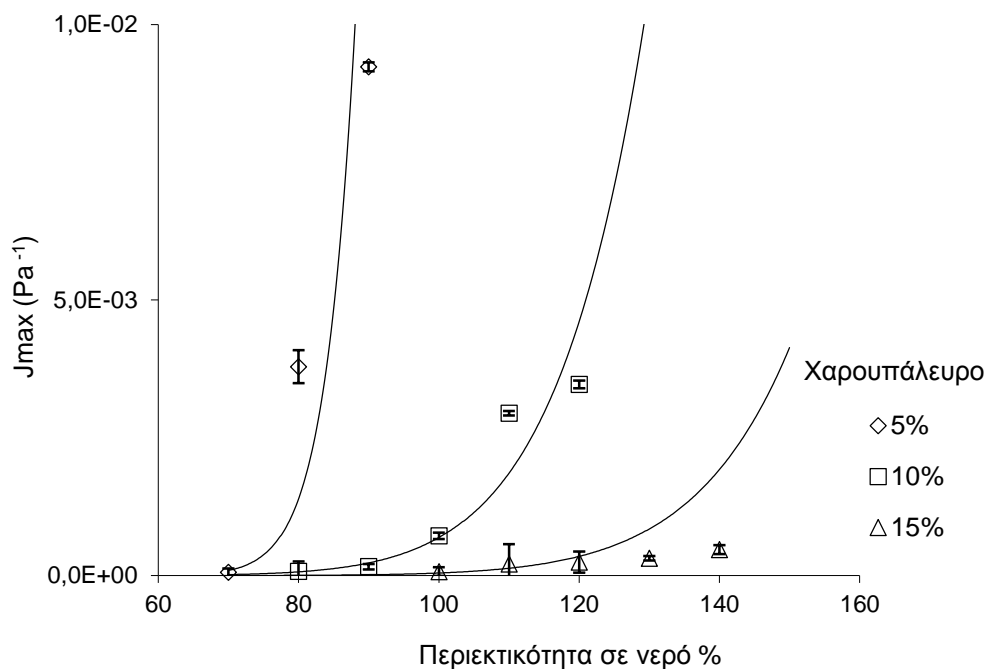
Η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές J_1 για το ίδιο περιεχόμενο νερό, ενώ αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό αύξησε τις τιμές του J_1 , το οποίο συνεπάγεται αύξηση του ιξώδους χαρακτήρα και της μόνιμης παραμόρφωσης των ζυμαριών (**Σχήμα 5.3.12**). Αύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης κατά την φάση ανάκτησης υποδηλώνει ότι οι ελαστικοί δεσμοί μεταξύ των δομικών μονάδων του συστήματος έχουν παραμορφωθεί μη αντιστρεπτά και η δομή της ζύμης έχει καταρρεύσει (Onyango et al., 2009b). Επομένως υψηλές τιμές J_1 θεωρούνται μη αποδεκτές καθώς υποδεικνύουν πως η δομή του ζυμαριού διασπάται εύκολα με συνέπεια το τελικό προϊόν να χαρακτηρίζεται από μικρή διόγκωση και μη αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, είναι απαραίτητη η ισορροπία μεταξύ του ιξώδους και του ελαστικού χαρακτήρα του ζυμαριού. Το ζυμάρι πρέπει να είναι αρκετά ιξώδες, για να συγκρατεί το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται κατά την επώαση της μαγιάς και ικανοποιητικά ελαστικό, ώστε να επιτρέπει στις φυσαλίδες του αέρα να διογκώνονται και να συσσωματώνονται με άλλες φυσαλίδες κατά τον κλιβανισμό. Τα ζυμάρια με αναλογία χαρουπάλευρο/νερό 10/100, 15/130 και 15/140 εμφάνισαν ενδιάμεσες τιμές ιξωδοελαστικής ενδοτικότητας J_1 και ισορροπία μεταξύ του ελαστικού και ιξώδη χαρακτήρα, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 5.3.3**.

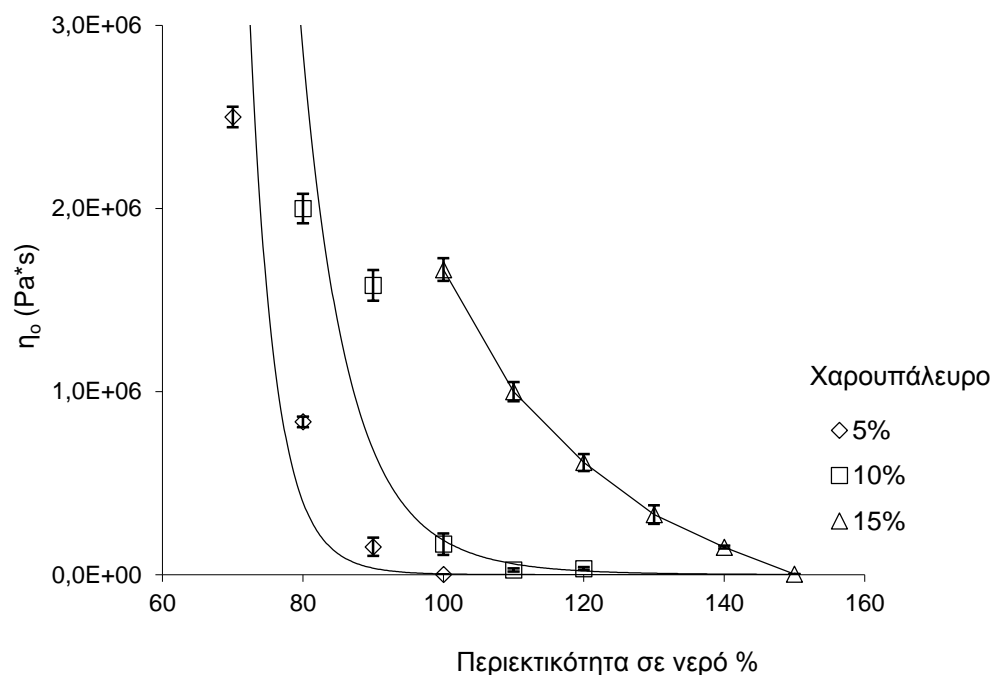
Επομένως, η ταυτόχρονη προσθήκη χαρουπάλευρου και νερού στο ζυμάρι δημιουργεί δύο αντικρουόμενες τάσεις σχετικά με την ιξωδοελαστικότητα. Αύξηση του ιξώδους χαρακτήρα λόγω του νερού, και αύξηση του ελαστικού χαρακτήρα, λόγω του χαρουπάλευρου. Αυξάνοντας την ποσότητα του χαρουπάλευρου, η επίδραση του περιεχόμενου νερού στον ιξώδη χαρακτήρα της ζύμης έγινε λιγότερο έντονη, καθώς τα ζυμάρια που περιέχουν 15% χαρουπάλευρο παρουσίασαν σημαντικό ελαστικό χαρακτήρα ακόμη και σε υψηλό περιεχόμενο νερό.

Πίνακας 5.3.4 Μαθηματικά μοντέλα των παραμέτρων του μοντέλου Burger και της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό.

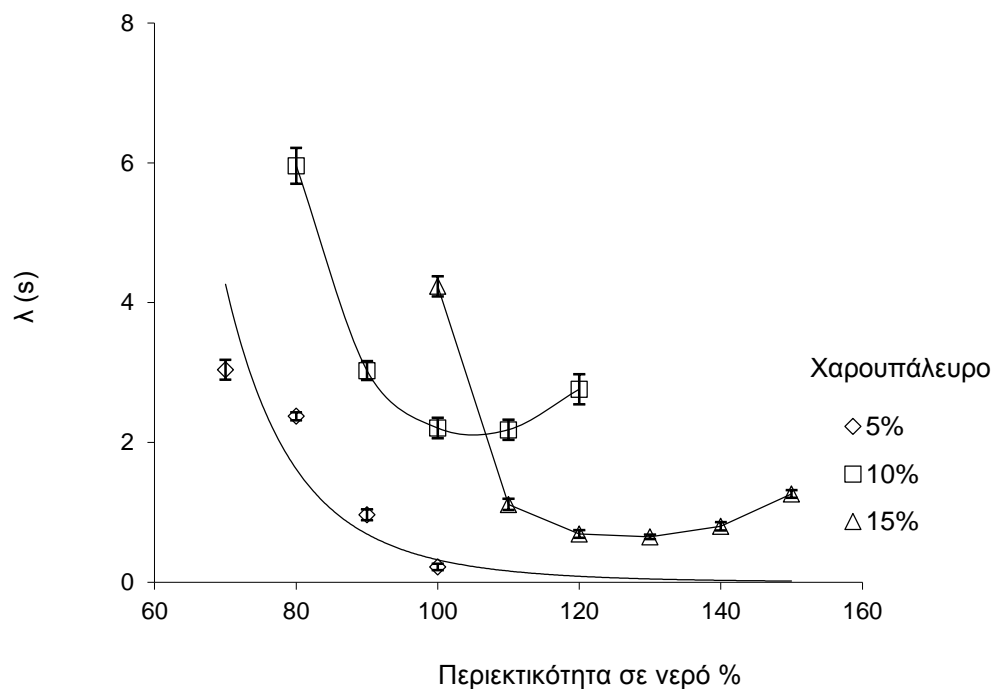
Μέγιστη ενδοτικότητα, J_{max}				
$J_{max}=j_{max1} \cdot C^{m3} \cdot W_t^{n3}$				
Ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης, n_o				
$n_o=n_{o1} \cdot C^{m5} \cdot W_t^{n5}$				
Χρόνος υστέρησης, λ				
$\lambda=\lambda_1 \cdot C^{m4} \cdot W_t^{n4}$				
Ελαστική ενδοτικότητα, J_o				
$J_o=j_{o1} \cdot C^{m1} \cdot W_t^{n1}$				
Ιξωδοελαστική ενδοτικότητα, J_1				
$J_1=j_1 \cdot C^{m2} \cdot W_t^{n2}$				
J_{max}	j_{max1}	$m3$	$n3$	R^2
	8.85	4.99	-5.78	0.822
p-value	0.00	0.00	0.00	
n_o	n_{o1}	$m5$	$n5$	R^2
	16.8 E 06	1.39	-5.88	0.841
p-value	0.63	0.00	0.00	
λ	λ_1	$m4$	$n4$	R^2
	65.83	1.51	-4.56	0.739
p-value	0.55	0.00	0.00	
J_o	j_{o1}	$m1$	$n1$	R^2
	5.97 E-07	0.60	-6.50	0.844
p-value	0.71	0.00	0.00	
J_1	j_1	$m2$	$n2$	R^2
	2.74 E-06	-1.50	8.40	0.794
p-value	0.00	0.00	0.00	



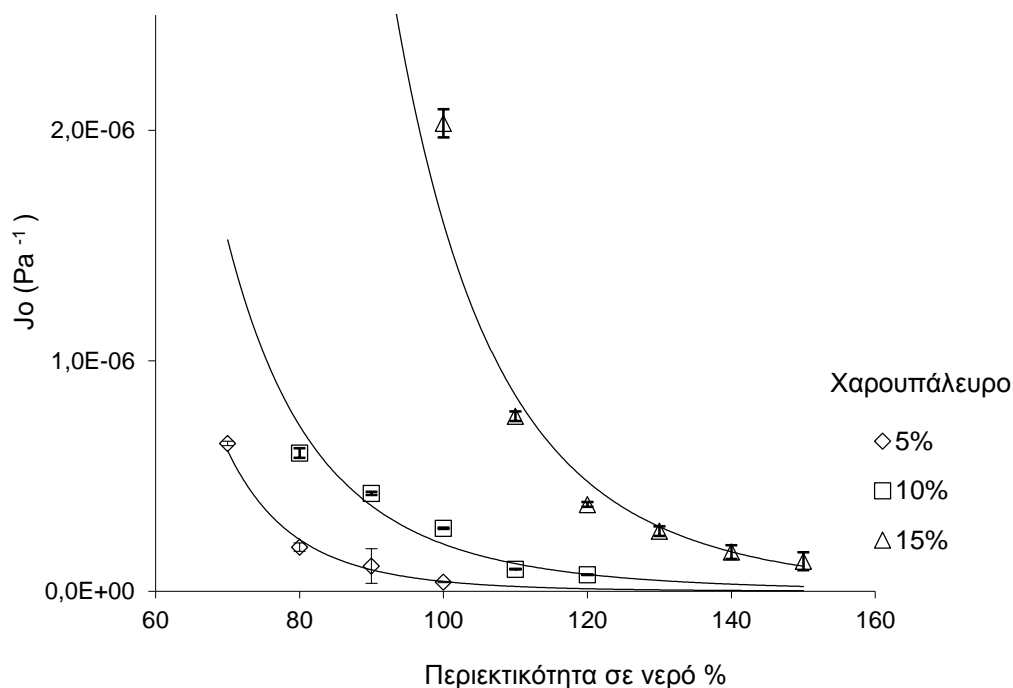
Σχήμα 5.3.8 Επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στην μέγιστη ενδοτικότητα των ζυμαριών. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.



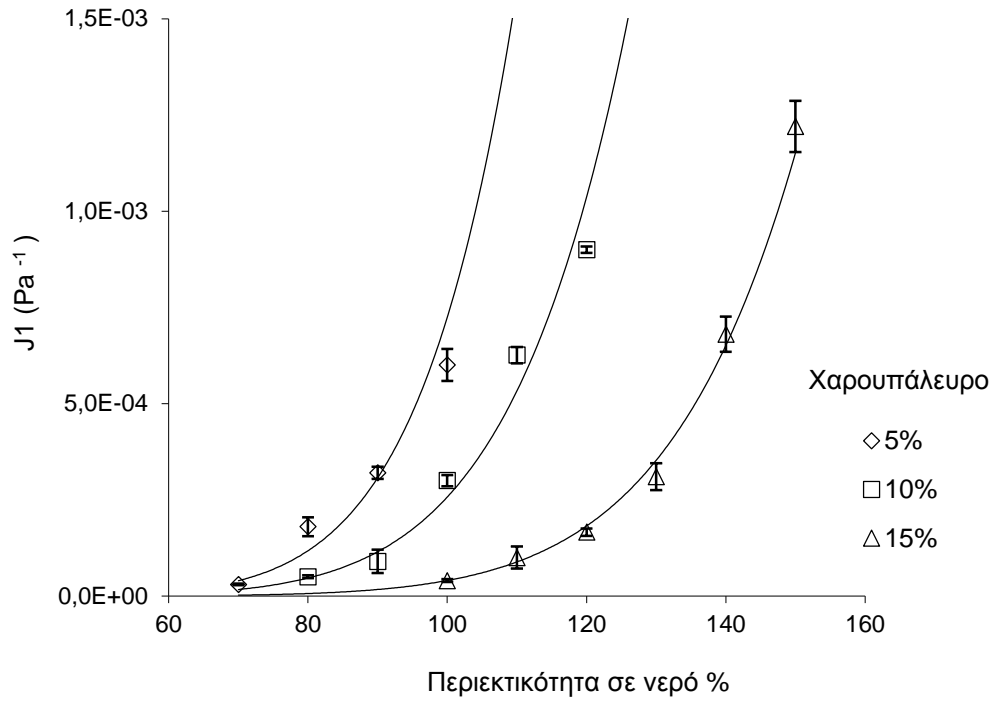
Σχήμα 5.3.9 Επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στο ιξώδες μηδενικού ρυθμού διάτμησης των ζυμαριών. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.



Σχήμα 5.3.10 Επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στον χρόνο υστέρησης των ζυμαριών. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.



Σχήμα 5.3.11 Επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στην ελαστική ενδοτικότητα των ζυμαριών. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.



Σχήμα 5.3.12 Επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στην ιξωδοελαστική ενδοτικότητα των ζυμαριών. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.

5.3.4 Συμπεράσματα

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προσθήκη χαρουπάλευρου και νερού επηρεάζει σημαντικά τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ζυμαριών ενώ ο κατάλληλος συνδυασμός τους μπορεί να οδηγήσει σε ζυμάρια με ισορροπία ιξώδους και ελαστικής συμπεριφοράς. Με βάση τα δυναμικά ταλαντωτικά πειράματα, τα ζυμάρια εμφάνισαν περισσότερο ελαστικό – στερεό χαρακτήρα καθώς ο συντελεστής αποθήκευσης ήταν μεγαλύτερος από τον συντελεστή απωλειών και η εφαπτομένη απωλειών μικρότερη του 1 σε όλο το πεδίο συχνοτήτων ($G'(\omega) > G''(\omega)$ και $\tan\delta(\omega) < 1$). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό οδήγησε σε μείωση και των δύο συντελεστών, μειώνοντας την ελαστικότητα του ζυμαριού, ενώ η προσθήκη χαρουπάλευρου οδήγησε σε πιο ελαστική δομή των ζυμαριών.

Τα πειράματα ερπυσμού – ανάκτησης βοήθησαν ώστε να αποτιμηθεί ο ρόλος του νερού και του χαρουπάλευρου ξεχωριστά στο σύστημα του ζυμαριού. Αποδείχτηκε ο ρόλος του νερού ως πλαστικοποιητή και πως αυτό συμβάλλει στον ιξώδη χαρακτήρα των ζυμαριών, ενώ αντίθετα η προσθήκη χαρουπάλευρου αύξησε την ελαστικότητα των ζυμαριών, αποτρέποντας την κατάρρευση της δομής τους. Τα ζυμάρια με περιεκτικότητα χαρουπάλευρο/νερό 10/100, 15/130 και 15/140 εμφάνισαν ικανοποιητικές ιξωδοελαστικές ιδιότητες, όπως προέκυψε από τον χρόνο υστέρησης, ο οποίος ελαχιστοποιείται για τους ανωτέρω συνδυασμούς χαρουπάλευρο/νερό, υποδηλώνοντας την ταχύτερη ανάκτηση του ζυμαριού μετά την απομάκρυνση της τάσης παραμόρφωσης. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και από την αξιολόγηση των λόγων της σχετικής ελαστικής (J_e) και της σχετικής ιξώδους (J_v) ενδοτικότητας ως προς τη μέγιστη τιμή ενδοτικότητας (J_{max}), καθώς παρατηρήθηκε ισορροπία μεταξύ της ελαστικής και της ιξώδους ενδοτικότητας για τους συνδυασμούς 10/100, 15/130 και 15/140 χαρουπάλευρο/νερό.

Τα αποτελέσματα των δυναμικών ταλαντωτικών δοκιμών και των δοκιμών ερπυσμού- ανάκτησης μπορούν να θεωρηθούν συγκρίσιμα. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο για σταθερό περιεχόμενο νερό αύξησε την ελαστικότητα της ζύμης, όπως μπορεί να συναχθεί από την αύξηση των τιμών του συντελεστή αποθήκευσης G' και των τιμών της σχετικής ελαστικής ενδοτικότητας των δύο ρεολογικών δοκιμών αντίστοιχα. Αντιθέτως η αύξηση του περιεχόμενου νερού ενίσχυσε τον ιξώδη χαρακτήρα των ζυμαριών, όπως φαίνεται από την μείωση του συντελεστή αποθήκευσης G' και την αύξηση της σχετικής ιξώδους ενδοτικότητας (J_v/J_{max}).

Στην παρούσα πειραματική σειρά προσδιορίστηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί χαρουπάλευρου και νερού, για τους οποίους τα ζυμάρια εμφανίζουν ικανοποιητική ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Οι ρεολογικές ιδιότητες του ζυμαριού επηρεάζουν σημαντικά τα διάφορα στάδια της αρτοποιητικής διαδικασίας και παίζουν σημαντικό ρόλο στην παρασκευή τελικών προϊόντων με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Επομένως είναι απαραίτητος ο έλεγχος και η γνώση των ρεολογικών ιδιοτήτων, ώστε να παράγονται ψημένα αρτοσκευάσματα υψηλής ποιότητας.

5.4 Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με προσθήκη χαρουπάλευρου (4^η Σειρά πειραμάτων)

Βασικό συστατικό για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη αποτελεί το ρυζάλευρο, λόγω των υποαλλεργικών του ιδιοτήτων, της ήπιας γεύσης του και του λευκού χρώματος (Gujral & Rosell, 2004). Ωστόσο οι πρωτεΐνες του ρυζάλευρου δεν δημιουργούν ιξωδοελαστικό δίκτυο στο ζυμάρι και θεωρείται απαραίτητη η χρήση δομικών παραγόντων, όπως οι διαιτητικές ίνες για την αύξηση της ιξωδοελαστικότητας (Gallagher et al., 2004). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη θεωρούνται χαμηλής διατροφικής αξίας, λόγω έλλειψης μικροσυστατικών αλλά και μακροσυστατικών, όπως οι πρωτεΐνες και οι διαιτητικές ίνες (Thompson, 2000). Οι σπόροι του χαρουπιού θεωρούνται υψηλής διατροφικής αξίας, λόγω των σημαντικών ποσοστών πρωτεΐνης και διαιτητικών ινών που περιέχουν. Οι σπόροι του χαρουπιού χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία τροφίμων κυρίως για την απομόνωση του κόμμεος χαρουπιού, ενώ το υπόλοιπο του σπόρου θεωρείται παραπροϊόν, το οποίο όμως περιέχει υψηλά ποσοστά πρωτεΐνης και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την διατροφική ενίσχυση αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης (Dakia et al., 2007). Επιπλέον, τα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης είναι σημαντικά ακριβότερα από τα αντίστοιχα προϊόντα με βάση τον σίτο και η εύρεση εναλλακτικών συστατικών χαμηλού κόστους δημιουργεί νέες ευκαιρίες εμπορικής εκμετάλλευσης (Singh and Whelan, 2011).

Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει διεθνής βιβλιογραφία για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων με χρήση χαρουπάλευρου προερχόμενο από ολόκληρους τους σπόρους και αποτελεί ενδιαφέρουσα προσέγγιση η χρήση χαρουπάλευρου στην ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης.

Στην αρτοποιητική διαδικασία, σημαντικό ρόλο παίζει η περιεκτικότητα σε νερό για την ποιότητα των τελικών αρτοσκευασμάτων. Στα συμβατικά αρτοσκευάσματα σίτου, η βέλτιστη περιεκτικότητα του ζυμαριού σε νερό υπολογίζεται με την χρήση φαρινογράφου και εξτενσογράφου. Ωστόσο το ζυμάρι των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη είναι περισσότερο ρευστό και προσομοιάζει τη ζύμη του κέικ με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η χρήση φαρινογράφου για τον υπολογισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε νερό. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, το ζυμάρι από ρυζάλευρο με ή χωρίς την προσθήκη υδροκολλοειδών καθυστερεί πάρα πολύ να φτάσει την συνεκτικότητα των 500 BU (τιμή με βάση την οποία υπολογίζεται η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό). Επιπλέον κατά τη χρήση φαρινογράφου για ζυμάρι με ρυζάλευρο, οι κόκκοι του αλεύρου μπαίνουν στο διάκενο μεταξύ του δοχείου και της λεπίδας του μίξερ του φαρινογράφου, με αποτέλεσμα αυξημένες τιμές ροπής προς το τέλος των πειραμάτων (Cauvain, 1998; Sivaramakrishnan et al., 2004; Lazaridou et al., 2007). Τα προβλήματα αυτά έχουν οδηγήσει τους ερευνητές στην αποφυγή χρήσης του φαρινογράφου για τον υπολογισμό της απορρόφησης νερού σε ζυμάρι χωρίς γλουτένη. Η απαραίτητη περιεκτικότητα σε νερό για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων με αποδεκτή διόγκωση, ποιοτικά και δομικά χαρακτηριστικά καθορίζεται με δοκιμή και σφάλμα (Haque and Morris, 1994; Gujral et al., 2003).

Ο σκοπός της 4ης πειραματικής σειράς ήταν η ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων με βάση το ρυζάλευρο και η προσθήκη διαφορετικών ποσοστών χαρουπάλευρου και νερού. Οι συνδυασμοί χαρουπάλευρου και νερού που μελετήθηκαν βασίστηκαν και στην 3^η πειραματική σειρά όπου προσδιορίστηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί για την παρασκευή ζυμαριού με τις βέλτιστες εξωδοελαστικές ιδιότητες (**Πίνακας 5.4.1**). Το χαρουπάλευρο υποκατέστησε το ρυζάλευρο σε ποσοστά 5%, 10% και 15% επί του αλεύρου. Χρησιμοποιήθηκε μια συγκεκριμένη κοκκομετρία χαρουπάλευρου και ήταν αυτή του κλάσματος B ($d_{50} = 174.73 \mu\text{m}$, 9.19% υγρασία, 22,69% πρωτεΐνη, 51.80% διαιτητικές ίνες, 4.85% τέφρα).

Αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα συσχετισμού της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό με τα μετρούμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων και συγκεκριμένα την σκληρότητα, το δείκτη ελαστικότητας (Young's Modulus) και την ελαστικότητα της ψίχας, το συνολικό πορώδες, την πυκνότητα, το επιφανειακό πορώδες και την μέση διάμετρο πόρων. Η βασική συνταγή για την ανάπτυξη των αρτοσκευασμάτων φαίνεται στον **Πίνακα 5.4.2**.

Συντομογραφίες:

Σύμβολο	Ορισμός	Μονάδα μέτρησης
$a_1, b_1, a_{o1}, x_1, z_1, a_2, b_2, a_{o2}, x_2, z_2, \varepsilon_o, F_o, Rel_o, n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3,$	Σταθερές των μοντέλων	Αδιάστατες
C_o, W_{to}	Σταθερές των μοντέλων	%
C_c	Περιεκτικότητα χαρουπάλευρου	%
C_r	Περιεκτικότητα ρυζάλευρου	%
d_{av}	Μέση διάμετρος πόρων	mm
F	Σκληρότητα της ψίχας	N
m_s	Μάζα στερεών	Kg
Rel	Σχετική ελαστικότητα της ψίχας	Αδιάστατη
V_b, V_s	Φαινόμενος όγκος, Όγκος στερεών	m^3
W_t	Περιεκτικότητα σε νερό	%
$\varepsilon, \varepsilon_s$	Συνολικό πορώδες, επιφανειακό πορώδες	%
ρ_b	Φαινόμενη πυκνότητα	Kg/m^3

Πίνακας 5.4.1 Διαφορετικοί συνδυασμοί χαρουπάλευρου και νερού που μελετήθηκαν.

Αναλογία Χαρουπάλευρο/Ρυζάλευρο	5/95	10/90	15/85
	70	80	100
Περιεκτικότητα σε νερό	75	85	110
(ποσοστό % επί του	80	90	120
βάρους του μίγματος	85	95	130
αλεύρων)	90	100	140
	95	110	150
	100	120	

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του χαρουπάλευρου.

Πίνακας 5.4.2 Βασική συνταγή για την ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*
Νερό	Μεταβλητό
Μαγιά	6
Αλβουμίνη	4
Πρωτεΐνη γάλακτος	4
Λιπαρό	3.5
Ζάχαρη	3
Αλάτι	2
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Κόμμι χαρουπιού- LBG	0.5
Ένζυμο	0.1

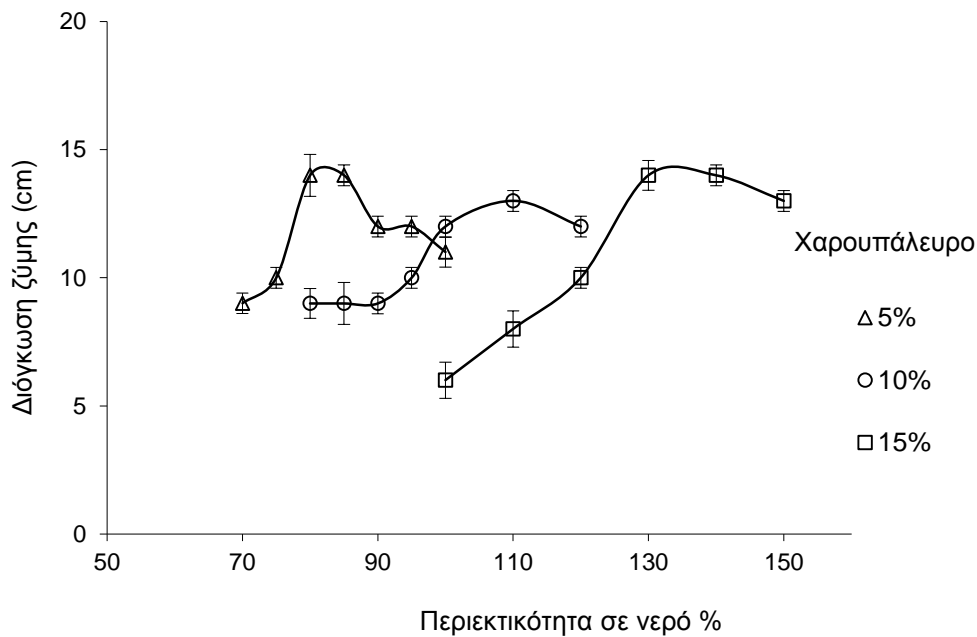
* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του χαρουπάλευρου

5.4.1 Ικανότητα επώασης της ζύμης, υγρασία και χημική ανάλυση των τελικών αρτοσκευασμάτων

Η ικανότητα επώασης των ζυμαριών φαίνεται στο **Σχήμα 5.4.1**. Από τις μετρήσεις μπορούν να προσδιοριστούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό, οι οποίοι οδηγούν σε μέγιστη διόγκωση ζύμης κατά την επώαση. Συγκεκριμένα οι συνδυασμένες αναλογίες χαρουπάλευρο προς νερό 5/80, 5/85, 10/110, 15/130, 15/140 οδηγούν στις υψηλότερες τιμές διόγκωσης, ενώ μόνο το ποσοστό του χαρουπάλευρου δεν φαίνεται να επηρεάζει την διόγκωση. Η διαθεσιμότητα του νερού κατά την επώαση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς η προσθήκη διαιτητικών ινών στο ζυμάρι απορροφά σημαντικά ποσοστά νερού, μειώνοντας το διαθέσιμο νερό για την δράση της μαγιάς και κατ'επέκταση μειώνοντας την ικανότητα διόγκωσης του ζυμαριού (Laurikainen et al., 1998; Collar et al., 2007). Η ικανότητα δέσμευσης νερού των διαιτητικών ινών εξαρτάται από την δομή τους, καθώς ο αριθμός των ελεύθερων υδροξυλίων αλληλεπιδρά με το νερό μέσω του σχηματισμού δεσμών υδρογόνου (Rosell et al., 2001). Εκτός από τις ίνες του χαρουπάλευρου, η περιεκτικότητά του σε πρωτεΐνη (καρουβίνη) αυξάνει την απορρόφηση του νερού στο ζυμάρι, λόγω του υδρόφιλου χαρακτήρα της πρωτεΐνης, η οποία εμφανίζει υψηλότερα ποσοστά απορρόφησης νερού (≈ 3 g νερό/g πρωτεΐνης στους 25 °C) σε σχέση με την γλουτένη (≈ 2 g νερό/g πρωτεΐνης στους 25 °C) (Wang et al., 2001).

Όσον αφορά τα τελικά προϊόντα, η υγρασία τους κυμαίνεται μεταξύ 35-45%, αυξανόμενη με την αύξηση του ποσοστού του χαρουπάλευρου που προστίθεται. Συγκεκριμένα για τα αρτοσκευάσματα με 5% χαρουπάλευρο, παρατηρείται μέση υγρασία 38%, ενώ για τα αρτοσκευάσματα με 15% χαρουπάλευρο, η μέση υγρασία είναι 42.5% για τον ίδιο χρόνο ψησίματος.

Στον **Πίνακα 5.4.3** φαίνονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης άρτου με 15% χαρουπάλευρο, ο οποίος περιείχε υψηλά ποσοστά πρωτεΐνης και διαιτητικών ινών, και αποτελεί καλή πηγή μικροσυστατικών. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, το πρωτεϊνικό περιεχόμενο εμπορικά διαθέσιμων αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης κυμαίνεται στο 0.91 μέχρι 15.05 g/100 g προϊόντος, με μόνο ένα από τα έντεκα αρτοσκευάσματα που μελετήθηκαν, το οποίο περιείχε σόγια, να εμφανίζει το υψηλό ποσοστό των 15 g/100 g προϊόντος (Segura & Rosell, 2011). Τα περισσότερα περιείχαν πολύ χαμηλά ποσοστά πρωτεϊνών σε σχέση με το πρωτεϊνικό περιεχόμενο των 8 g/100 g προϊόντος του άρτου με 15% χαρουπάλευρο που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των εμπορικών άρτων χωρίς γλουτένη σε διαιτητικές ίνες κυμαίνεται μεταξύ του 1.3 και 7.2 g/100 g προϊόντος. Ο άρτος με 15% χαρουπάλευρο που παρασκευάστηκε περιείχε 6.1 g/100 g προϊόντος διαιτητικών ινών και μπορεί να θεωρηθεί προϊόν εμπλουτισμένο με διαιτητικές ίνες. Τα εμπορικά αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως πηγές διαιτητικών ινών αν περιέχουν ποσοστά διαιτητικών ινών από 1.2 έως 5.6 g/100 g προϊόντος και εμπλουτισμένα αν περιέχουν από 6.1 μέχρι 9.6 g/100 g προϊόντος (Thompson, 2000).



Σχήμα 5.4.1 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο στην διόγκωση του ζυμαριού κατά την επώαση. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι δύο επαναλήψεων.

Πίνακας 5.4.3 Χημική ανάλυση άρτου ελεύθερου γλουτένης με 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο.

Μακροσυστατικά (g/100g άρτου)										
Πρωτεΐνη	Διατητηκές ίνες	Λίπος	Τέφρα	Υδατάνθρακες						
8.37	6.10	2.04	1.76	38.70						
Μικροσυστατικά (mg/100g άρτου)										
Ca	K	Mg	Na	P	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn
75.93	112.02	51.72	381.89	99.58	1.01	0.15	0.19	1.65	0.69	1.17

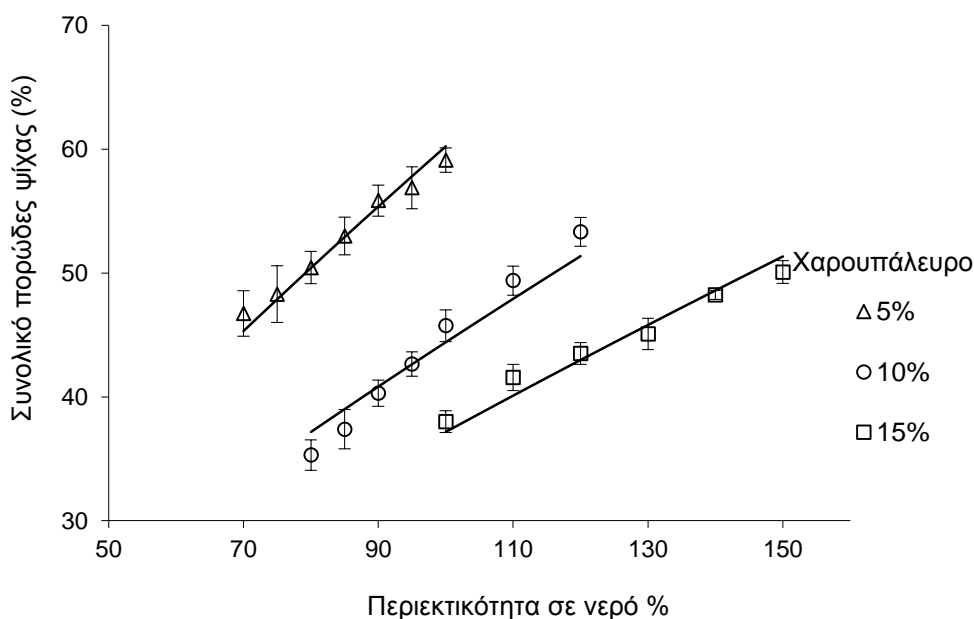
5.4.2 Δομικές ιδιότητες ψίχας

Το πορώδες αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της ποιότητας των αρτοσκευασμάτων και επηρεάζει την καταναλωτική αποδοχή. Στα **Σχήματα 5.4.2** και **5.4.3** φαίνεται η επίδραση της προσθήκης χαρουπάλευρου και της περιεκτικότητας σε νερό στο συνολικό πορώδες και στη φαινόμενη πυκνότητα των αρτοσκευασμάτων που μελετήθηκαν. Στα **Σχήματα 5.4.4** και **5.4.5** εκφράζεται το επιφανειακό πορώδες και η μέση διάμετρος πόρων ως προς το συνολικό πορώδες. Επιπλέον αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα για να περιγράψουν την επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στα ανωτέρω δομικά χαρακτηριστικά, τα οποία φαίνονται στον **Πίνακα 5.4.4**. Συγκεκριμένα, το συνολικό πορώδες αυξήθηκε με την αύξηση του νερού, ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε με εκθετικό ρυθμό από την αύξηση του

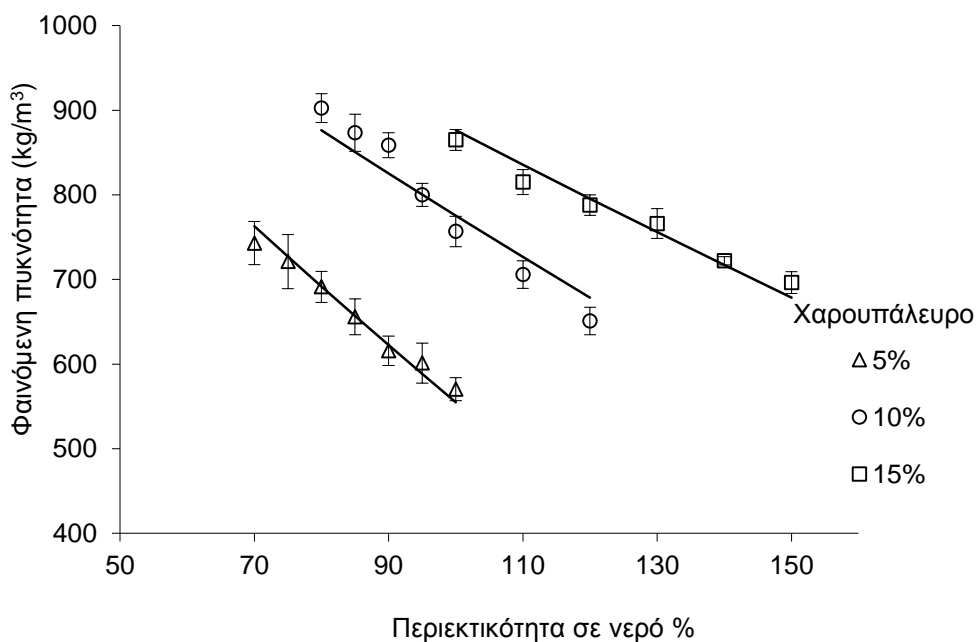
χαρουπάλευρου. Φαίνεται πως υπάρχει μια αλληλεξάρτηση μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο, η οποία καθορίζει το τελικό πορώδες των αρτοσκευασμάτων. Ωστόσο η επίδραση του νερού στο συνολικό πορώδες ήταν σημαντικότερη από την επίδραση της αύξησης του χαρουπάλευρου όπως φαίνεται και από τις αυξημένες τιμές των εκθετικών συντελεστών της εξίσωσης του συνολικού πορώδους για το νερό σε σχέση με το χαρουπάλευρο. Ο ρόλος του νερού στην διόγκωση των αρτοσκευασμάτων αποδεικνύεται για ακόμα μια φορά κρίσιμος παράγοντας, καθώς αύξηση του νερού στο ζυμάρι, οδήγησε σε αυξημένο πορώδες των τελικών προϊόντων. Αντιθέτως η μεταβολή της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο από 5% σε 15% οδήγησε σε μείωση του συνολικού πορώδους. Η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στις ίνες, οι οποίες διαρρηγνύουν το πρωτεϊνικό δίκτυο και μειώνουν την διόγκωση των αρτοσκευασμάτων (Collar et al., 2007). Η μείωση της διόγκωσης των αρτοσκευασμάτων αποτυπώθηκε και στην αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο (αύξηση των διαιτητικών ινών) των αρτοσκευασμάτων που παρασκευάστηκαν (**Σχήμα 5.4.3**). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για αρτοσκευάσματα που περιείχαν ίνες μήλου, καθώς η προσθήκη των ινών μείωσε την διόγκωσή τους, λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης νερού των ινών (Chen et al, 1988). Λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης των ινών υπάρχει ανταγωνισμός για το νερό μεταξύ των ινών και των συστατικών της ζύμης που ενεργοποιούνται με το νερό κατά τη διάρκεια του σταδίου της επώασης -διόγκωσης, όπως η μαγιά και ο σχηματισμός πρωτεϊνικού δικτύου.

Όσον αφορά το επιφανειακό πορώδες και την μέση διάμετρο πόρων φαίνεται η εκθετική συσχέτισή τους από το συνολικό πορώδες (**Σχήματα 5.4.4, 5.4.5**). Η διάμετρος των πόρων αυξήθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο. Η προσθήκη υψηλών ποσοτήτων νερού οδήγησε στον σχηματισμό μεγαλύτερων πόρων, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.4.6**, όπου απεικονίζονται μικρογραφίες της ψίχας των αρτοσκευασμάτων για διάφορες περιεκτικότητες νερού.

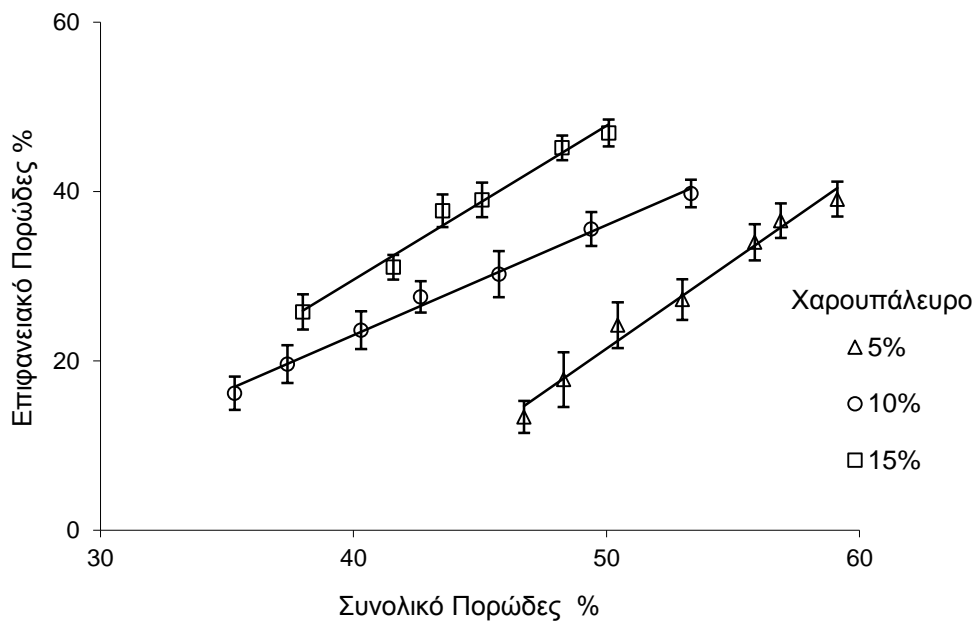
Η αύξηση του μεγέθους των πόρων αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό έχει αναφερθεί και σε αρτοσκευάσματα με βάση άλευρο αμάρανθου, όπου 33% αύξηση του νερού, οδήγησε σε αύξηση του μεγέθους των πόρων κατά 2.5 φορές (Schoenlechner et al., 2010).



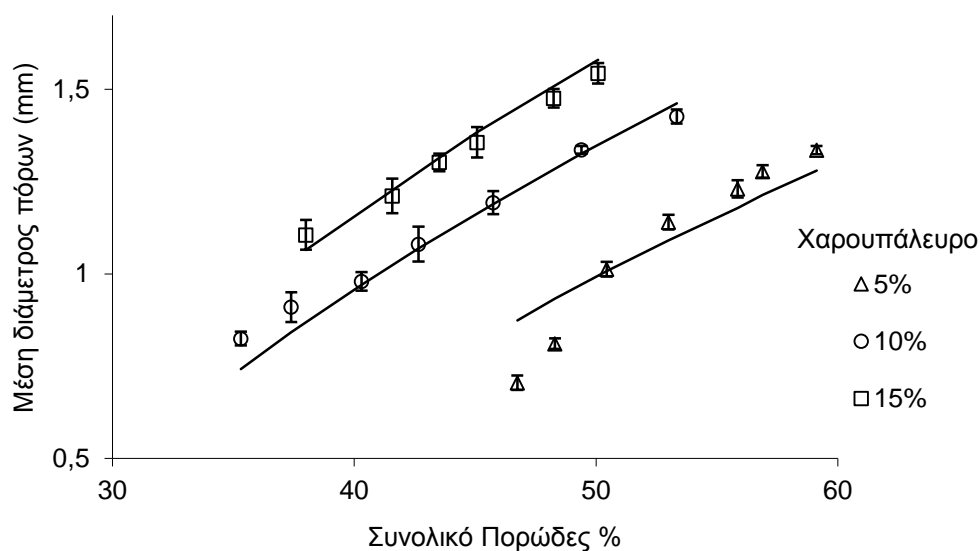
Σχήμα 5.4.2 Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στο συνολικό πορώδες της ψίχας των αρτοσκευασμάτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.



Σχήμα 5.4.3 Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στην φαινόμενη πυκνότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.



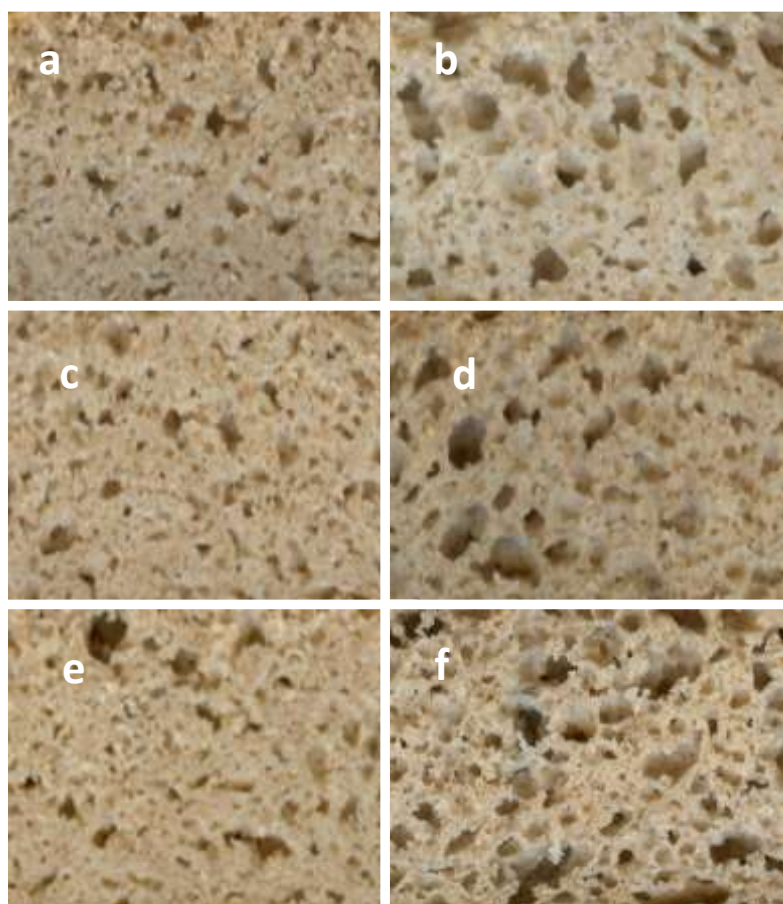
Σχήμα 5.4.4 Συσχέτιση του επιφανειακού πορώδους ως προς το συνολικό πορώδες αρτοσκευασμάτων με μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα χαρουπάλειρου και νερού. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.



Σχήμα 5.4.5 Συσχέτιση της μέσης διαμέτρου πόρων προς το συνολικό πορώδες αρτοσκευασμάτων με μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα χαρουπάλειρου και νερού. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.

Πίνακας 5.4.4 Μαθηματικά μοντέλα για το συνολικό πορώδες, την φαινόμενη πυκνότητα, το επιφανειακό πορώδες και την μέση διάμετρο πόρων.

Μαθηματικό μοντέλο συνολικού πορώδους							
$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (C_c/C_o)^{n_1} \cdot (W_t/W_{t0})^{m_1}$							
όπου							
$C_o = 10\%, W_{t0} = 100\%$							
Μαθηματικό μοντέλο φαινόμενης πυκνότητας							
$\rho_s = C_r \cdot \rho_{srice} + C_c \cdot \rho_{scarob}$							
όπου							
$\rho_{srice} = 1.4 \text{ kg/L}$ and $\rho_{scarob} = 1.3 \text{ kg/L}$.							
Μαθηματικό μοντέλο επιφανειακού πορώδους							
$\varepsilon_s = a_1 \cdot \ln \varepsilon + b_1$							
όπου							
$a_1 = a_{o1} \cdot (C_c/C_o)^{x_1} \cdot (W_t/W_{t0})^{z_1}$							
Μαθηματικό μοντέλο μέσης διαμέτρου πόρων							
$d_{av} = a_2 \cdot \ln \varepsilon + b_2$							
όπου							
$a_2 = a_{o2} \cdot (C_c/C_o)^{x_2} \cdot (W_t/W_{t0})^{z_2}$							
Συνολικό πορώδες		ε_0	n_1	m_1	R^2	S_R	S_E
ε		44.41	-0.43	0.79	0.971	0.031	0.018
p-value		0.000	0.000	0.000			
Επιφανειακό πορώδες		a_{o1}	x_1	z_1	b_1	R^2	S_R
ε_s		-58.06	0.17	-0.49	250	0.932	3.556
p-value		0.000	0.000	0.000			
Μέση διάμετρος πόρων		a_{o2}	x_2	z_2	b_2	R^2	S_R
d_{av}		1.61	0.07	0.02	-5	0.942	0.113
p-value		0.000	0.000	0.173			

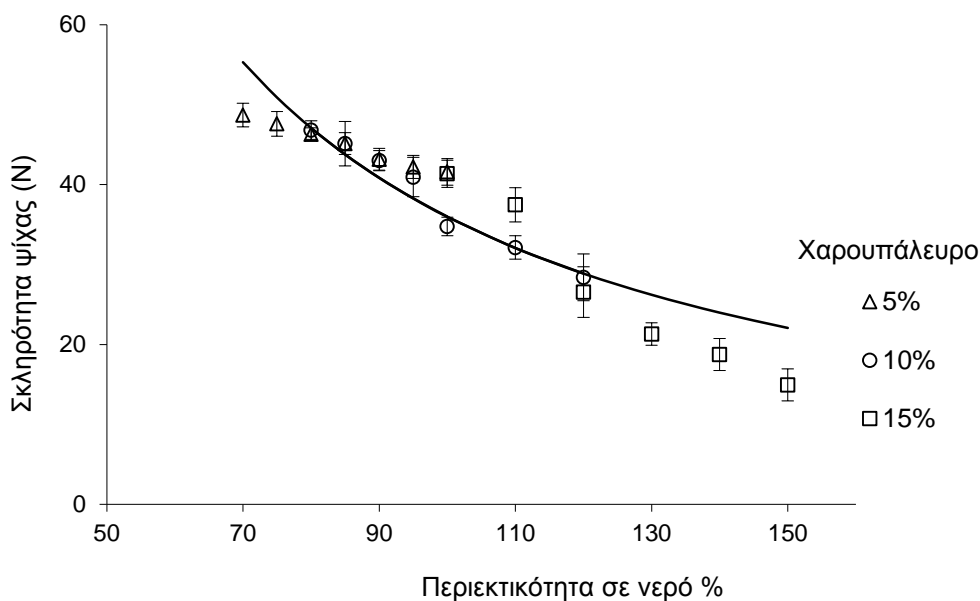


Σχήμα 5.4.6 Επιφανειακό πορώδες αρτοσκευασμάτων με διαφορετικά ποσοστά χαρουπάλευρου και νερού. Από αριστερά προς τα δεξιά: Αναλογία χαρουπάλευρο/νερό 5/80, 5/100 (a, b), 10/90, 10/120 (c, d), 15/100, 15/150 (e, f).

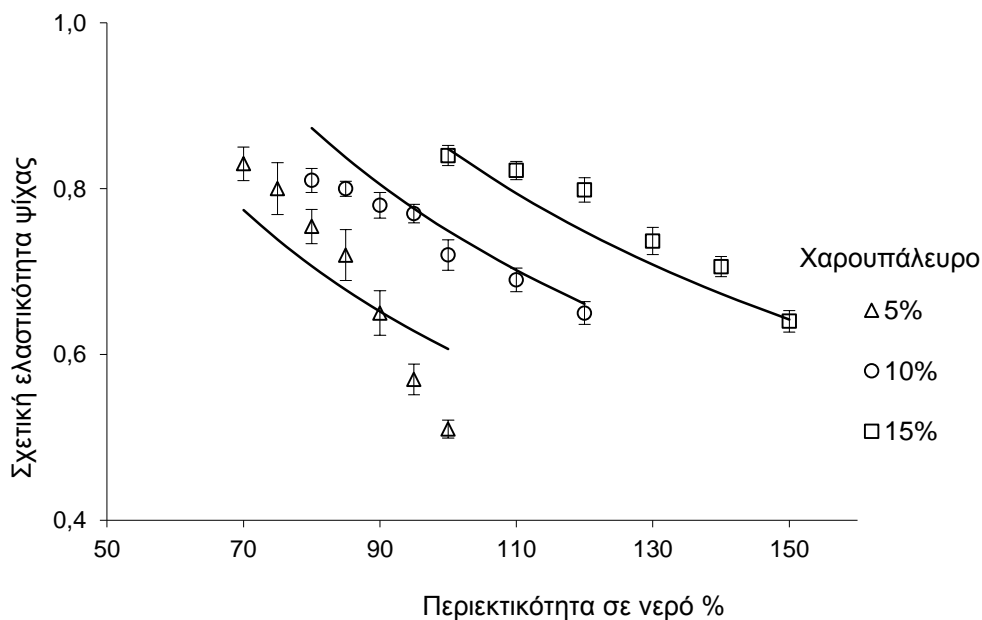
5.4.3 Ανάλυση υφής

Στα **Σχήματα 5.4.7** και **5.4.8** φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στην σκληρότητα και την ελαστικότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων που μελετήθηκαν. Στον **Πίνακα 5.4.5** φαίνονται τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την επίδραση της περιεκτικότητας σε χαρουπάλευρο και νερό στην υφή των αρτοσκευασμάτων. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο οδήγησε σε μειωμένη σκληρότητα ψίχας (**Σχήμα 5.4.7**). Η μεγαλύτερη τιμή σκληρότητας αφορά τον άρτο με 5% χαρουπάλευρο και 70% νερό (48.7 N). Ενώ η προσθήκη ινών σε αρτοσκευάσματα έχει συνδεθεί συνήθως με αύξηση της σκληρότητας της ψίχας, υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την προσθήκη ινών χαρουπιού σε άρτο με βάση τον σίτο που οδήγησε σε τελικό προϊόν με μαλακή ψίχα (Wang et al., 2002). Ωστόσο, η σκληρότητα της ψίχας επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την περιεκτικότητα σε νερό, όπως φαίνεται από τις τιμές των εκθετικών συντελεστών του μαθηματικού μοντέλου για την σκληρότητα (**Πίνακας 5.4.5**). Η σημαντική επίδραση της αύξησης του νερού στην σκληρότητα της ψίχας έχει διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές, συγκεκριμένα για άρτο με βάση αλεύρο αμάρανθου αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό από 60% στο 80% επί του αλεύρου οδήγησε σε 20% μαλακότερη ψίχα (Schoenlechner et al., 2010).

Η σχετική ελαστικότητα της ψίχας μειώνεται με την αύξηση του νερού, ενώ η προσθήκη χαρουπάλευρου αυξάνει την ελαστικότητα της ψίχας (**Σχήμα 5.4.8**). Η επίδραση του νερού στην ελαστικότητα της ψίχας είναι ισχυρότερη σε σχέση με την προσθήκη χαρουπάλευρου (**Πίνακας 5.4.5**), πιθανώς λόγω του μεγαλύτερου εύρους του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των αρτοσκευασμάτων.



Σχήμα 5.4.7 Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στην σκληρότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.



Σχήμα 5.4.8 Επίδραση της περιεκτικότητας χαρουπάλευρου και νερού στην σχετική ελαστικότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μαθηματικού μοντέλου.

Πίνακας 5.4.5 Μαθηματικά μοντέλα για την σκληρότητα και την ελαστικότητα της ψίχας

Μαθηματικό μοντέλο σκληρότητας F						
$F = F_o \cdot (C_c / C_o)^{n2} \cdot (W_t / W_{to})^{m2}$						
Μαθηματικό μοντέλο σχετικής ελαστικότητας Rel						
$Rel\% = Rel_o \cdot (C_c / C_o)^{n3} \cdot (W_t / W_{to})^{m3}$						
Σκληρότητα F	F_o	n₂	m₂	R²	S_R	S_E
	35.97	-0.00081	-1.20	0.917	5.679	1.869
p-value	0.000	0.979	0.000			
Σχετική ελαστικότητα	Rel_o	n₃	m₃	R²	S_R	S_E
	0.74	0.30	-0.68	0.864	0.077	0.017
p-value	0.000	0.000	0.000			

5.4.4 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων τα αρτοσκευάσματα που παρήχθησαν με αναλογίες χαρουπάλευρο/νερό 10/110, 15/130 και 15/140 παρουσίασαν τα βέλτιστα ποιοτικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα αυξημένη ανάπτυξη ζύμης κατά την επώαση, επαρκή διόγκωση, υψηλό πορώδες και μειωμένη σκληρότητα ψίχας. Επιπλέον τα αρτοσκευάσματα με 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο θεωρούνται υψηλής διατροφικής αξίας, καθώς είναι εμπλουτισμένα σε διαιτητικές ίνες, ενώ περιέχουν και υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών. Μπορεί να ειπωθεί, πως οι ρεολογικές ιδιότητες των ζυμαριών που μετρήθηκαν στην 3^η πειραματική σειρά αποτέλεσαν ένδειξη της αρτοποιητικής ικανότητας των ζυμαριών για την παρασκευή άρτων υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα τα ζυμάρια που εμφάνισαν ικανοποιητικές ιξωδολεαστικές ιδιότητες σύμφωνα με τα αποτελέσματα της 3^{ης} πειραματικής σειράς, και ήταν αυτά με αναλογία χαρουπάλευρο/νερό 10/110, 15/130 και 15/140 οδήγησαν στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων με την υψηλότερη διόγκωση και μαλακή και ελαστική ψίχα. Τα αρτοσκευάσματα αυτά μπορούν να προταθούν για κατανάλωση σε άτομα που πάσχουν από κοιλιοκάκη, ωστόσο θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω η βελτιστοποίηση των συνταγών με κατεύθυνση την αύξηση της διόγκωσης.

5.5 Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με συνδυασμένη προσθήκη ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου (5^η Σειρά πειραμάτων)

Το ανθεκτικό άμυλο (RS) έχει οριστεί ως το άθροισμα του αμύλου και των προϊόντων του αμύλου που είναι ανθεκτικά κατά την διαδικασία της πέψης στο λεπτό έντερο υγιών ατόμων. Η κατανάλωση ανθεκτικού αμύλου έχει συνδεθεί με πρεβιοτική δράση, θετική επίδραση στην εντερική λειτουργία, μείωση των επιπέδων χοληστερόλης του αίματος και έλεγχο του διαβήτη (Sanz-Penella et al., 2010; Topping & Clifton, 2001; Nugent 2005; Shih et al., 2007). Εκτός από τις επιδράσεις του ανθεκτικού αμύλου στην υγεία των καταναλωτών, έχει και λειτουργικές ιδιότητες, που δεν συναντώνται στις κλασσικές πηγές διαιτητικών ινών όπως δημητριακά, φρούτα ή λαχανικά. Χαρακτηριστικές λειτουργικές ιδιότητες του ανθεκτικού αμύλου είναι το λευκό χρώμα, ήπια γεύση, μικρή κοκκομετρία, χαμηλή ικανότητα δέσμευσης νερού και ικανότητα αντικατάστασης λίπους (Yue & Waring, 1998; Sajilata et al., 2006).

Επιπλέον, υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε ζυμάρι αρτοσκευασμάτων, το οποίο οδήγησε στην αύξηση της θερμοκρασίας ζελατινοποίησης, στην σταθεροποίηση της δομής και τέλος στην παραγωγή άρτων με βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά (Korus et al., 2009).

Τα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης συχνά χαρακτηρίζονται από μικρή περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες, λόγω των εξευγενισμένων αμύλων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τους. Η αύξηση των περιεχόμενων διαιτητικών ινών θα μπορούσε να γίνει με αντικατάσταση των εξευγενισμών αμύλων με αντίστοιχα άμυλα πλούσια σε διαιτητικές ίνες, όπως το ανθεκτικό άμυλο (Korus et al., 2009).

Όπως προέκυψε από την 4^η σειρά πειραμάτων, η χρήση χαρουπάλευρου για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης, οδήγησε σε τελικά προϊόντα με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά και υψηλή διατροφική αξία, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του χαρουπάλευρου σε διαιτητικές ίνες, πρωτεΐνες και μικροσυστατικά.

Σκοπό της 5^{ης} πειραματικής σειράς αποτέλεσε αρχικά η μελέτη της αλληλεπίδρασης του ανθεκτικού αμύλου με την πρωτεΐνη γάλακτος και αλβουμίνη που χρησιμοποιούνται στην συνταγή για την παρασκευή άρτου με βάση το ρυζάλευρο με την χρήση μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης. Οι βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την χρήση του ανθεκτικού αμύλου στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης είναι περιορισμένες. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως η κατά κεφαλήν κατανάλωση ανθεκτικού αμύλου στον Ευρωπαϊκό πληθυσμό κυμαίνεται μεταξύ 3 και 9 g/ ημέρα (Murphy, Douglass & Birkett, 2008), με την συνιστώμενη ημερήσια δόση διαιτητικών ινών να κυμαίνεται για την Ευρώπη στα 25 g/ ημέρα (EFSA, 2010). Επιπλέον υπάρχουν αναφορές σχετικά με την θετική επίδραση στην υγεία από την κατανάλωση ανθεκτικού αμύλου σε ποσοστά 6 μέχρι 12 g ανά γεύμα, να δρα ευεργετικά στην μείωση της μεταγευματικής γλυκόζης και των επιπέδων ινσουλίνης στο αίμα ενώ ημερήσια πρόσληψη 20 g βελτιώνει την λειτουργία του εντερικού συστήματος (Murphy et al., 2008).

Επιπλέον η 5^η πειραματική σειρά αφορά στην μελέτη της συνδυασμένης προσθήκης ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα

γλουτένης με βάση το ρυζάλευρο και στον προσδιορισμό της βέλτιστης συνταγής με χρήση μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης ως προς τις φυσικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων, τα οποία θα περιέχουν διάφορους τύπους διαιτητικών ινών, απαραίτητων σε μια ισορροπημένη διατροφή.

Η 5^η πειραματική σειρά μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο έγινε μελέτη της περιεκτικότητας ανθεκτικού αμύλου και πρωτεΐνης γάλακτος και αλβουμίνης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά πρότυπων άρτων με βάση το ρυζάλευρο ενώ στο δεύτερο στάδιο έγινε βελτιστοποίηση της συνταγής που προέκυψε από το πρώτο στάδιο με προσθήκη χαρουπάλευρου και ρύθμιση του περιεχόμενου νερού, προκειμένου να προκύψει ένα προϊόν με βέλιστα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά.

5.5.1 1^ο Στάδιο: Επίδραση της περιεκτικότητας του ανθεκτικού αμύλου σε πρότυπα αρτοσκευάσματα (MGFB)

Στόχος του 1^{ου} σταδίου ήταν η βελτιστοποίηση πρότυπων αρτοσκευασμάτων με ρυζάλευρο που περιείχαν ανθεκτικό άμυλο (RS) και πρωτεΐνες. Στον **Πίνακα 5.5.1** που ακολουθεί παρουσιάζεται η βασική συνταγή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των αρτοσκευασμάτων.

Οι περιεκτικότητες του ανθεκτικού αμύλου, του νερού και των πρωτεϊνών μεταβλήθηκαν σύμφωνα με έναν Box – Behnken πειραματικό σχεδιασμό με τρία κεντρικά σημεία και τις τρεις μεταβλητές να κωδικοποιούνται σε τρία επίπεδα: -1, 0, 1 ενώ μετρήθηκαν έξι εξαρτημένες μεταβλητές, ως αντιπροσωπευτικές για να περιγράψουν την ποιότητα του άρτου: υγρασία άρτου, σκληρότητα ψίχας, ελαστικότητα ψίχας, ολικό πορώδες, επιφανειακό πορώδες και πυκνότητα πόρων. Στον **Πίνακα 5.5.2** και **5.5.3** φαίνονται τα επίπεδα που επιλέχθηκαν για κάθε παράγοντα και ο κεντρικός σχεδιασμός που ακολουθήθηκε αντίστοιχα. Το ανθεκτικό άμυλο (RS) υποκατέστησε το ρυζάλευρο σε ποσοστά 5-15%, ώστε το σύνολο του μίγματος αλεύρων στην συνταγή να είναι 100% και οι πρωτεΐνες (μίγμα αλβουμίνης και πρωτεΐνης γάλακτος σε αναλογία 1:1) προστέθηκαν σε ποσοστά 6-10% επί του βάρους του μίγματος αλεύρων (ρυζάλευρο και ανθεκτικό άμυλο). Αναφορικά με τις πρωτεΐνες, η επιλογή της συγκέντρωσής τους βασίστηκε στα αποτελέσματα της 2^{ης} πειραματικής σειράς, σύμφωνα με τα οποία η συνδυαστική δράση αλβουμίνης και ορού γάλακτος σε αναλογία 1:1 οδήγησε σε αύξηση του πορώδους των αρτοσκευασμάτων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν δύο φορές και σε τυχαία σειρά προκειμένου να περιοριστεί ο κίνδυνος ανεξήγητης διακύμανσης των αποκρίσεων λόγω εξωτερικών παραγόντων.

Πίνακας 5.5.1 Βασική συνταγή που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή πρότυπου άρτου με ρυζάλευρο και ανθεκτικό άμυλο.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*
Ανθεκτικό άμυλο -RS	Μεταβλητό
Νερό	Μεταβλητό
Μαγιά	6
Αλβουμίνη	Μεταβλητό
Πρωτεΐνη γάλακτος	Μεταβλητό
Λιπαρό	3.5
Ζάχαρη	3
Αλάτι	2
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Κόμμι χαρουπιού- LBG	0.5

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του ανθεκτικού αμύλου.

Πίνακας 5.5.2 Επίπεδα μεταβλητών.

Μεταβλητή	Σύμβολο	Κωδικοποιημένα επίπεδα μεταβλητών		
		-1	0	1
Ανθεκτικό άμυλο- RS	X1	5	10	15
Πρωτεΐνες*	X2	6	8	10
Νερό*	X3	80	90	100

* Οι ποσότητες νερού και πρωτεϊνών υπολογίζονται ως ποσοστό του μίγματος ρυζάλευρο/ανθεκτικό άμυλο. Οι πρωτεΐνες είναι μίγμα αλβουμίνης και πρωτεΐνης γάλακτος σε αναλογία 1:1. Το εύρος της περιεκτικότητας του νερού υπολογίστηκε από προπειράματα.

Πίνακας 5.5.3 Κεντρικός σχεδιασμός για την βελτιστοποίηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών άρτων με ρυζάλευρο και ανθεκτικό άμυλο.

	Ανθεκτικό άμυλο RS %	Πρωτεΐνες %	Νερό %	Υγρασία άρτου %	Σκληρότητα ψίχας (N)	Σχετική Ελαστικότητα ψίχας	Συνολικό πορώδες %	Επιφανειακό πορώδες %	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)
Σ1	15	6	90	33.8 (0.8) ^c	97.4 (3.0) ^e	0.56 (0.01) ^a	47.3 (2.0) ^{cd}	35.4 (4.0) ^{ab}	42 (1) ^c
Σ2	10	6	80	31.8 (0.2) ^{ab}	114.8 (4.5) ^f	0.58 (0.001) ^{bcd}	53.3 (3.9) ^{fg}	33.3 (5.8) ^a	55 (4) ^d
Σ3	5	6	90	36.5 (0.2) ^f	94.7 (2.5) ^{de}	0.63 (0.004) ^k	52.5 (2.7) ^{gf}	33.4 (2.7) ^a	50 (11) ^{cd}
Σ4	10	8	90	37.9 (0.1) ^g	130.2 (5.3) ^g	0.48 (0.003) ^{hij}	47.8 (0.5) ^b	39.8 (3.7) ^{bcd}	54 (7) ^{cd}
Σ5	5	8	80	31.5 (0.4) ^a	157.0 (1.1) ^h	0.58 (0.001) ^{bcd}	47.6 (1.6) ^{cd}	43.6 (3.2) ^{de}	53 (6) ^d
Σ6	15	8	80	35.5 (0.1) ^e	109.6 (0.4) ^f	0.60 (0.009) ^{fghi}	54.8 (3.1) ^g	37.3 (4.1) ^{abc}	17 (4) ^a
Σ7	10	10	100	39.0 (0.3) ^h	96.9 (0.2) ^e	0.61 (0.009) ^{ghi}	46.8 (1.5) ^{cd}	36.8 (4.5) ^{abc}	21 (5) ^{ab}
Σ8	10	8	90	37.9 (1.1) ^g	130.0 (1.1) ^f	0.47 (0.02) ^{defg}	49.2 (1.7) ^{cd}	38.5 (2.9) ^{abcd}	21 (1) ^{ab}
Σ9	10	8	90	35.2 (0.1) ^e	173.9 (9.2) ⁱ	0.48 (0.001) ^{efgh}	49.8 (2.1) ^{cd}	39.6 (3.1) ^{bcd}	55 (9) ^d
Σ10	10	10	80	34.2 (0.3) ^d	124.1 (8.4) ^g	0.63 (0.0007) ^{jk}	54.4 (2.8) ^{fg}	39.6 (3.3) ^{bcd}	60 (12) ^e
Σ11	15	10	90	36.1 (0.5) ^f	84.4 (13.0) ^c	0.57 (0.011) ^{abc}	45.5 (2.9) ^c	48.1 (0.8) ^e	74 (1) ^e
Σ12	5	10	90	32.5 (0.1) ^{bc}	74.7 (1.6) ^{ab}	0.59 (0.014) ^{defg}	43.1 (1.1) ^a	42.5 (5.9) ^{cde}	22 (5) ^{ab}
Σ13	5	8	100	38.2 (0.3) ^g	86.8 (1.2) ^{cd}	0.59 (0.011) ^{ijk}	49.5 (4.7) ^{ef}	38.8 (3.8) ^{abcd}	54 (6) ^d
Σ14	10	6	100	38.5 (0.2) ⁱ	67.1 (0.1) ^a	0.59 (0.01) ^{defg}	49.4 (3.6) ^{de}	37.0 (5.9) ^{abc}	19 (5) ^{ab}
Σ15	15	8	100	39.1 (0.3) ^h	80.4 (1.0) ^{bc}	0.56 (0.02) ^{ab}	48.3 (2.9) ^{cde}	38.9 (3.8) ^{abcd}	28 (6) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης που προέκυψαν για τις εξαρτημένες μεταβλητές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.5.4**.

Πίνακας 5.5.4 Εξισώσεις παλινδρόμησης των εξαρτημένων μεταβλητών.

Εξίσωση παλινδρόμησης	R ²	SEE
Υγρασία = $-13.49 - 0.11 \cdot \text{νερό}$	91.91	1.53
Σκληρότητα ψίχας = $-150.16 + 2.35 \cdot \text{νερό} - 6.36 \cdot \text{πρωτεΐνες}^2$	86.03	15.98
Ελαστικότητα ψίχας = $6.13 + 5.91 \cdot 10^{-4} \cdot \text{νερό}^2 + 0.015 \cdot \text{πρωτεΐνες}^2 + 0.0018 \cdot \text{RS}^2$	93.84	0.02
Συνολικό πορώδες = $294.55 + 0.43 \cdot \text{πρωτεΐνες} \cdot \text{RS}$	84.46	3.38
Επιφανειακό πορώδες = $-123.10 + 13.16 \cdot \text{πρωτεΐνες}$	72.20	3.38

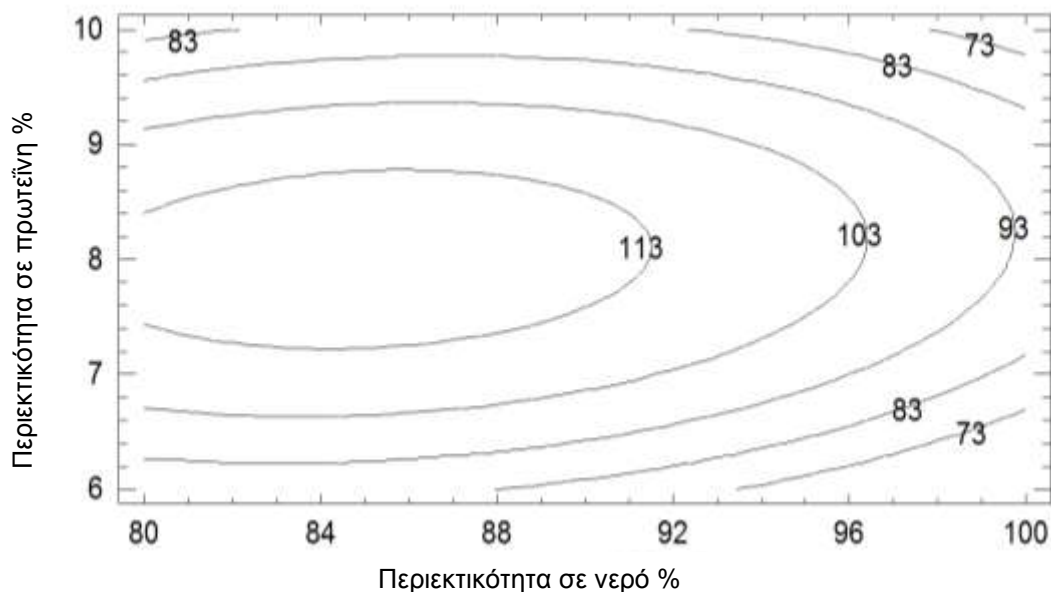
Η υγρασία των πρότυπων άρτων ελεύθερων γλουτένης που παρασκευάστηκαν κυμάνθηκε μεταξύ 31.5% και 39.1% (επί υγρού). Η μεταβολή της περιεκτικότητας σε νερό ($p = 0.0016$) είχε σημαντική επίδραση στην υγρασία των άρτων, η οποία κυμάνθηκε σε μικρό εύρος από 80% έως 100% επί του αλεύρου ενώ η περιεκτικότητα σε ανθεκτικό άμυλο και πρωτεΐνες δεν είχαν ιδιαίτερη επίδραση (**Πίνακας 5.5.4**).

Τα διαγράμματα των επιφανειών απόκρισης για την σκληρότητα και την σχετική ελαστικότητα της ψίχας και το συνολικό και επιφανειακό πορώδες σε σταθερό ποσοστό 15% ανθεκτικού αμύλου φαίνονται στα **Σχήματα 5.5.1, 5.5.2, 5.5.3** και **5.5.4**.

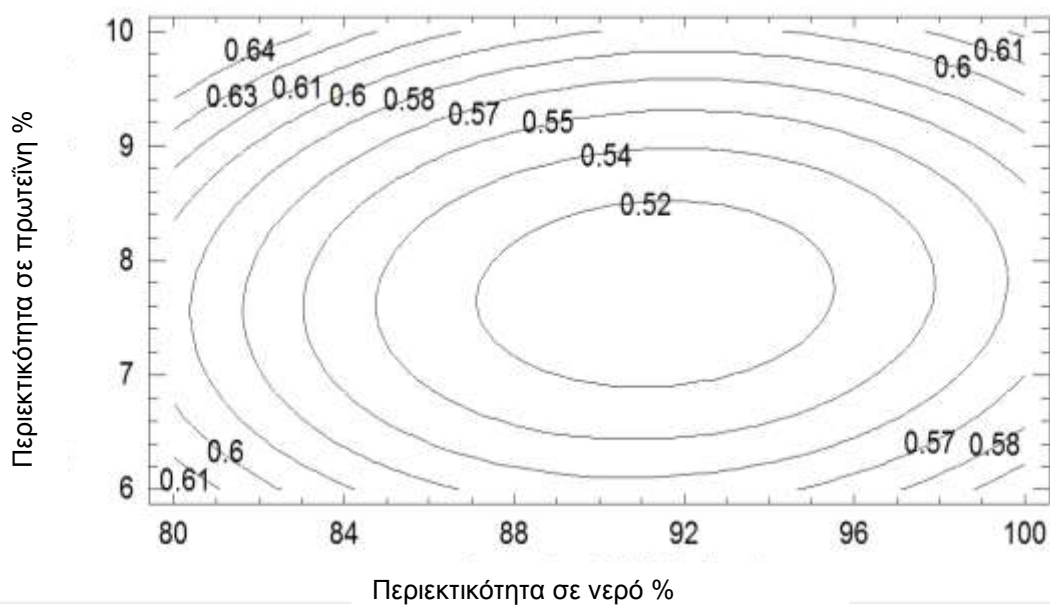
Όσον αφορά τη σκληρότητα, επηρεάστηκε σημαντικά από την περιεκτικότητα σε νερό ($p = 0.012$) και σε πρωτεΐνες ($p = 0.028$), σε αντίθεση με το ανθεκτικό άμυλο, το οποίο δεν είχε στατιστικά σημαντική επίδραση (**Πίνακας 5.5.4**). Η αύξηση του περιεχόμενου νερού και των πρωτεϊνών οδήγησε σε τελικά αρτοσκευάσματα με μαλακή ψίχα, εύρημα που συμφωνεί με τα αποτελέσματα της 4^{ης} πειραματικής σειράς. Ο ρόλος του διαθέσιμου νερού κατά την αρτοποιητική διαδικασία είναι κρίσιμος, καθώς χαμηλή διαθεσιμότητα νερού, προκαλεί μη βέλτιστη κατανομή του στα διάφορα συστατικά του ζυμαριού και μπορεί να οδηγήσει σε τελικά αρτοσκευάσματα με μη αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Συγκεκριμένα με την προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε ποσοστά 5% και 15% για σταθερή περιεκτικότητα σε νερό δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της σκληρότητας (**Πίνακας 5.5.3**). Η χαμηλή ικανότητα δέσμευσης νερού του ανθεκτικού αμύλου σε σχέση με άλλες πηγές διαιτητικών ινών, δεν επηρέασε τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ζυμαριού, το οποίο μπορεί να προσομοιάζει με του λευκού ψωμιού (χωρίς προσθήκη διαιτητικών ινών) (Sajilata et al., 2006).

Σύμφωνα με το διάγραμμα επιφάνειας απόκρισης της σκληρότητας της ψίχας (**Σχήμα 5.5.1**), η βέλτιστη συνταγή, η οποία ελαχιστοποίησε την σκληρότητα της ψίχας αποτελείται από 100% νερό, 6% πρωτεΐνες και 5% ανθεκτικό άμυλο. Ωστόσο, το ανθεκτικό άμυλο δεν αύξησε σημαντικά την σκληρότητα της ψίχας, επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην βέλτιστη συνταγή σε ποσοστό 15%.



Σχήμα 5.5.1 Εκτιμώμενη επιφάνεια απόκρισης της μεταβολής της σκληρότητας άρτων με σταθερή συγκέντρωση ανθεκτικού αμύλου (15%) και μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και νερό.



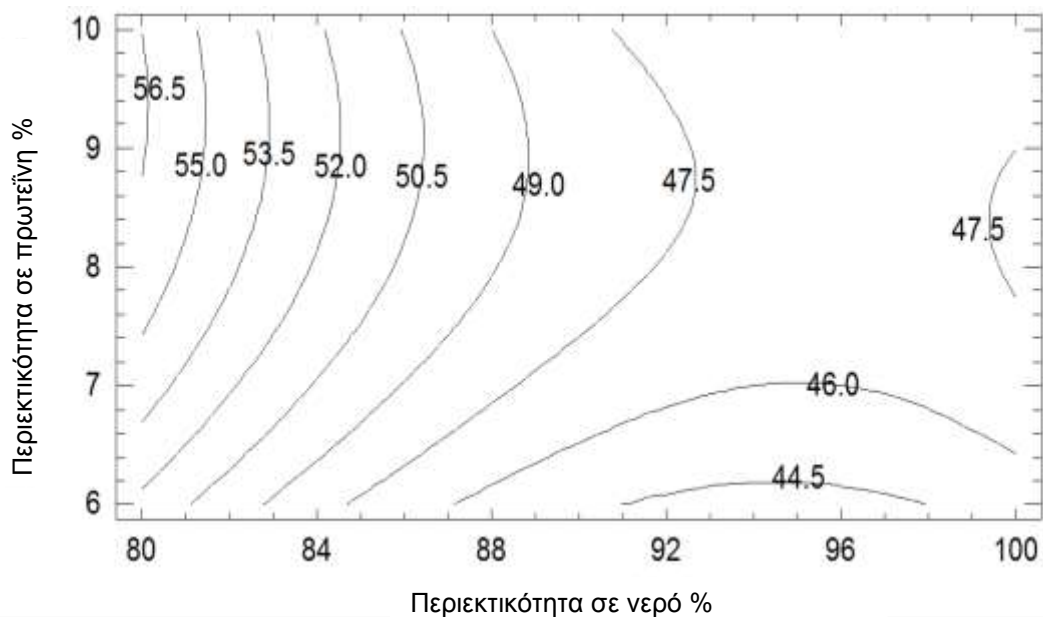
Σχήμα 5.5.2 Εκτιμώμενη επιφάνεια απόκρισης της μεταβολής της σχετικής ελαστικότητας της ψίχας άρτων με σταθερή συγκέντρωση ανθεκτικού αμύλου (15%) και μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και νερό.

Η σχετική ελαστικότητα της ψίχας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που επηρεάζει την καταναλωτική αποδοχή των αρτοσκευασμάτων, καθώς οι καταναλωτές επιθυμούν την ελαστική και ανοικτή δομή ψίχας. Η ελαστικότητα επηρεάστηκε σημαντικά από τετραγωνική συνάρτηση του περιεχόμενου νερό ($p = 0.0030$), την πρωτεΐνη ($p = 0.0022$) και το ανθεκτικό άμυλο ($p = 0.0090$) (**Πίνακας 5.5.4**). Η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου είχε θετική επίδραση στην ελαστικότητα της ψίχας. Υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές που επιβεβαιώνουν πως η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε ψημένα αρτοσκευάσματα οδήγησε σε τρυφερότερη ψίχα (Sajilata et al., 2006). Πιο συγκεκριμένα, για τον τύπο του ανθεκτικού αμύλου (Hi-Maize 260) που χρησιμοποιήθηκε στην 5^η σειρά πειραμάτων έχει αναφερθεί η αύξηση του ελαστικού χαρακτήρα (G') ζυμαριού ελεύθερου γλουτένης, στο οποίο είχε προστεθεί (Korus et al., 2009).

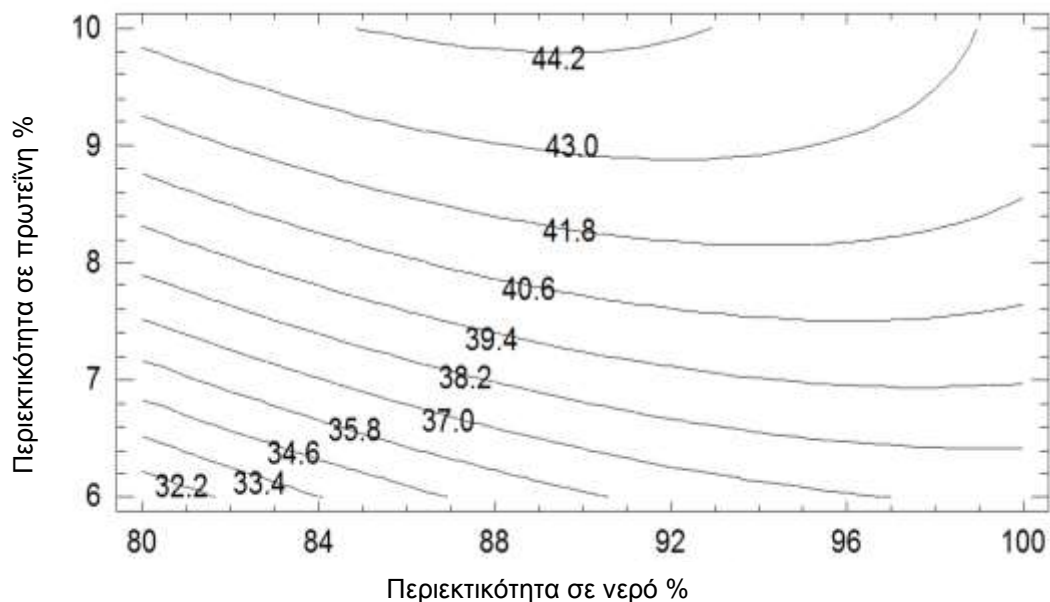
Ο συνδυασμός που έδωσε την βέλτιστη τιμή ελαστικότητας στο 0.68 αποτελείται από 80% νερό, 10% πρωτεΐνες και 15% ανθεκτικό άμυλο (**Σχήμα 5.5.2**). Αξίζει να σημειωθεί πως η ποσότητα του νερού για την οποία επιτυγχάνεται αυξημένη ελαστικότητα κυμαίνεται στο χαμηλότερο όριο του πειραματικού σχεδιασμού. Όπως αναφέρθηκε και στην 4^η σειρά πειραμάτων, υψηλότερη προσθήκη νερού σε σχέση με αυτή που απαιτείται για την πλήρη ενυδάτωση όλων των συστατικών του ζυμαριού, αύξησε σημαντικά τον ιξώδη χαρακτήρα του.

Το συνολικό πορώδες επηρεάστηκε θετικά από την αλληλεπίδραση των πρωτεϊνών με το ανθεκτικό άμυλο ($p = 0.0487$), ενώ η περιεκτικότητα σε νερό δεν φάνηκε να έχει στατιστικά σημαντική επίδραση ($p = 0.15$) (**Πίνακας 5.5.4**). Με βάση το διάγραμμα επιφάνειας απόκρισης του συνολικού πορώδους (**Σχήμα 5.5.3**) η βέλτιστη συνταγή για την μεγιστοποίησή του ήταν 80 % νερό, 9.36 % πρωτεΐνες και 15% ανθεκτικό άμυλο. Επιπλέον, το επιφανειακό πορώδες επηρεάστηκε θετικά από το πρωτεϊνικό περιεχόμενο ($p = 0.0331$), ενώ η περιεκτικότητα σε νερό και ανθεκτικό άμυλο δεν είχε σημαντική επίδραση (**Πίνακας 5.5.4**). Η συνταγή με 88% νερό, 10% πρωτεΐνες και 15% ανθεκτικό άμυλο, μεγιστοποίησε το επιφανειακό πορώδες όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.5.4**. Η πυκνότητα πόρων δεν επηρεάστηκε σημαντικά από καμία από τις μεταβλητές (ανθεκτικό άμυλο, πρωτεΐνες και νερό). Η χρήση των πρωτεϊνών στην ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης έχει καθιερωθεί, λόγω των λειτουργικών και δομικών ιδιοτήτων των πρωτεϊνών. Σύμφωνα με τους Ziobro et al. (2013) η ενσωμάτωση διάφορων πρωτεϊνικών πηγών σε αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη αύξησε το συνολικό πορώδες. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν και στην 2^η πειραματική σειρά της παρούσας διατριβής, όπου παρατηρήθηκε η αύξηση του πορώδους με την προσθήκη πρωτεϊνών ορού γάλακτος και αλβουμίνης (**Σχήμα 5.2.1**). Για την παρασκευή άρτου με μαλακή, ελαστική ψίχα και αφράτη πορώδη δομή πρέπει να βρεθούν σημεία, για τα οποία θα βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα όλες οι μεταβλητές απόκρισης. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την ανωτέρω ανάλυση, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η σκληρότητα ελαχιστοποιείται για μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό (100%) σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεταβλητές απόκρισης, οι οποίες βελτιστοποιούνται σε εύρος νερού 80-88%. Συνεπώς η συνταγή άρτου με αναλογίες 10% πρωτεΐνες, 15%

ανθεκτικό άμυλο και 85% περιεχόμενο νερό θεωρήθηκε ως σημείο σύγκλισης των αποκρίσεων του πειραματικού σχεδιασμού.



Σχήμα 5.5.3 Εκτιμώμενη επιφάνεια απόκρισης της μεταβολής του συνολικού πορώδους της ψίχας άρτων με σταθερή συγκέντρωση ανθεκτικού αμύλου (15%) και μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και νερό.



Σχήμα 5.5.4 Εκτιμώμενη επιφάνεια απόκρισης της μεταβολής του επιφανειακού πορώδους της ψίχας άρτων με σταθερή συγκέντρωση ανθεκτικού αμύλου (15%) και μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και νερό.

5.5.2 2^ο Στάδιο: Βελτιστοποίηση άρτων ελεύθερων γλουτένης που περιέχουν χαρουπάλευρο και ανθεκτικό άμυλο RS

Στόχος του 2^{ου} σταδίου ήταν η βελτιστοποίηση αρτοσκευασμάτων με ρυζάλευρο που περιείχαν τις βέλτιστες αναλογίες ανθεκτικού αμύλου και πρωτεϊνών, όπως υπολογίστηκαν από το 1^ο πειραματικό στάδιο ως προς την περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και νερό. Συγκεκριμένα οι συγκεντρώσεις των πρωτεϊνών και του ανθεκτικού αμύλου RS διατηρήθηκαν σταθερές στο 10% και 15% αντίστοιχα. Στον **Πίνακα 5.5.5** που ακολουθεί παρουσιάζεται η βασική συνταγή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των αρτοσκευασμάτων.

Οι περιεκτικότητες του χαρουπάλευρου και του νερού μεταβλήθηκαν σύμφωνα με έναν κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό $2^2 +$ αξονικά σημεία (Central Composite Design: $2^2 +$ star point) με τις δύο μεταβλητές να κωδικοποιούνται σε πέντε επίπεδα: -1.414, -1, 0, 1 και 1.414 ενώ μετρήθηκαν έξι εξαρτημένες μεταβλητές, ως αντιπροσωπευτικές για να περιγράψουν την ποιότητα του άρτου: υγρασία άρτου, σκληρότητα ψίχας, ελαστικότητα ψίχας, ολικό πορώδες, επιφανειακό πορώδες και πυκνότητα πόρων. Τα αξονικά σημεία επιτρέπουν την εκτίμηση της καμπυλότητας (curvature) και εγκαθιστούν νέες τιμές ακραίων επιπέδων των υπό μελέτη παραγόντων, ενώ δίνουν ομοιομορφία του σφάλματος πρόβλεψης. Στους **Πίνακες 5.5.6** και **5.5.7** φαίνονται τα επίπεδα που επιλέχθηκαν για κάθε παράγοντα και ο κεντρικός σχεδιασμός που ακολουθήθηκε αντίστοιχα.

Η περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης νερού του ζυμαριού, επομένως το εύρος του περιεχόμενου νερού που χρησιμοποιήθηκε για τον 2^ο πειραματικό σχεδιασμό ήταν υψηλότερο σε σχέση με του 1^{ου} σταδίου, ώστε να επιτευχθεί ζυμάρι με την κατάλληλη συνεκτικότητα. Η επιλογή του εύρους των μεταβλητών βασίστηκε στην 4^η πειραματική σειρά και κυμαίνονται μεταξύ 10 – 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και 110 – 140% περιεκτικότητα σε νερό. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν δύο φορές και σε τυχαία σειρά προκειμένου να περιοριστεί ο κίνδυνος ανεξήγητης διακύμανσης των αποκρίσεων λόγω εξωτερικών παραγόντων.

Πίνακας 5.5.5 Βασική συνταγή που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή άρτου με ρυζάλευρο, ανθεκτικό άμυλο και χαρουπάλευρο.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*
Χαρουπάλευρο	Μεταβλητό
Ανθεκτικό άμυλο -RS	15
Νερό	Μεταβλητό
Μαγιά	6
Αλβουμίνη	5
Πρωτεΐνη γάλακτος	5
Λιπαρό	3.5
Ζάχαρη	3
Αλάτι	2
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Κόμμι χαρουπιού- LBG	0.5

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου, του ανθεκτικού αμύλου και του χαρουπάλευρου.

Πίνακας 5.5.6 Επίπεδα μεταβλητών.

Μεταβλητή	Σύμβολο	Κωδικοποιημένα επίπεδα μεταβλητών				
		-1.414	-1	0	1	1.414
Χαρουπάλευρο	Y1	8.96	10	12.5	15	16.035
Νερό	Y2	103.78	110	125	140	146.21

Πίνακας 5.5.7 Κεντρικός σχεδιασμός για την βελτιστοποίηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών άρτων με ανθεκτικό άμυλο και χαρουπάλευρο.

	Χαρουπάλευρο %	Νερό %	Υγρασία άρτου % wb	Σκληρότητα ψίχας (N)	Ελαστικότητα ψίχας	Συνολικό πορώδες %	Επιφανειακό πορώδες %	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)
Σ'1	10	140	46.1 (0.2) ^g	30.1 (0.7) ^{ab}	0.57 (0.02) ^c	58.3 (0.3) ^g	33.7 (2.2) ^{cd}	73 (9) ^b
Σ'2	12.5	103.78	39.9 (0.1) ^c	70.2 (6.0) ^{ef}	0.54 (0.01) ^{bc}	41.2 (0.1) ^a	26.1 (0.3) ^{ab}	117 (15) ^c
Σ'3	12.5	125	40.6 (0.4) ^d	35.8 (1.7) ^{cd}	0.53 (0.04) ^{abc}	54.9 (0.1) ^f	23.8 (5.8) ^a	54 (11) ^a
Σ'4	10	110	40.4 (0.5) ^c	67.5 (2.0) ^e	0.49 (0.07) ^{ab}	53.5 (1.7) ^e	38.2 (5.6) ^d	87 (1) ^b
Σ'5	8.96	125	42.5 (0.1) ^e	33.5 (0.7) ^{bc}	0.57 (0.03) ^{bc}	52.9 (0.1) ^{de}	30.8 (4.3) ^{bc}	47 (2) ^a
Σ'6	15	110	36.1 (0.5) ^a	76.3 (2.9) ^f	0.51 (0.02) ^{abc}	46.8 (0.5) ^b	31.7 (1.8) ^{bc}	107 (3) ^c
Σ'7	12.5	125	40.9 (0.2) ^d	37.6 (2.8) ^{cd}	0.56 (0.05) ^{bc}	52.1 (1.7) ^{cd}	36.3 (2.4) ^{cd}	54 (5) ^a
Σ'8	15	140	44.3 (0.5) ^f	34.7 (1.1) ^{bc}	0.54 (0.03) ^{bc}	52.9 (1.6) ^{de}	38.8 (3.2) ^d	79 (4) ^b
Σ'9	16.03	125	37.5 (0.3) ^b	42.1 (3.5) ^d	0.45 (0.09) ^a	52.5 (0.5) ^{de}	31.4 (6.9) ^{bc}	55 (2) ^a
Σ'10	12.5	146.21	44.9 (0.8)	25.8 (2.3) ^a	0.55 (0.005) ^{bc}	51.2 (2.0) ^c	32.3 (2.1) ^{bc}	51 (2) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης που προέκυψαν για τις εξαρτημένες μεταβλητές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.5.8**.

Πίνακας 5.5.8 Εξισώσεις παλινδρόμησης των εξαρτημένων μεταβλητών.

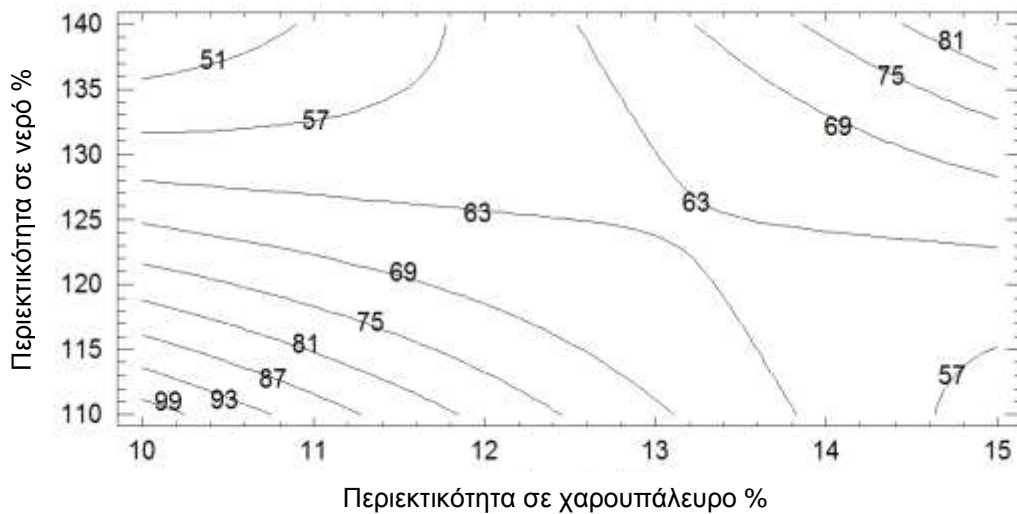
Εξίσωση παλινδρόμησης	R ²	SEE
Υγρασία = 112.20 – 1.71 · χαρουπί -1.07 · νερό	92.68	1.30
Σκληρότητα ψίχας = 748.41 – 9.67 · νερό	93.34	7.17
Πυκνότητα πόρων = 1482.73 – 21.97 · νερό	80.22	16.65

Η υγρασία των αρτοσκευασμάτων που αναπτύχθηκαν επηρεάστηκε θετικά από την περιεκτικότητα σε νερό ($p = 0.0046$) και αρνητικά από την περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο ($p = 0.0225$) (**Πίνακας 5.5.8**). Όπως αναμενόταν υψηλά ποσοστά προστιθέμενου νερού δεν μπόρεσαν να απορροφηθούν από τις ίνες του χαρουπάλευρου, με αποτέλεσμα την αύξηση της υγρασίας της ψίχας. Αντιθέτως, η προσθήκη χαρουπάλευρου μείωσε την υγρασία των αρτοσκευασμάτων για σταθερή περιεκτικότητα σε νερό, λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης νερού των διαιτητικών ινών (κυρίως γαλακτομαννάνες του ενδοσπερμίου) και της πρωτεΐνης (καρουβίνη) του χαρουπάλευρου. Σύμφωνα με τους Vittadini & Vodonotz (2003), υψηλά ποσοστά προσθήκης αλεύρου σόγιας οδήγησαν σε μείωση της υγρασίας των αρτοσκευασμάτων.

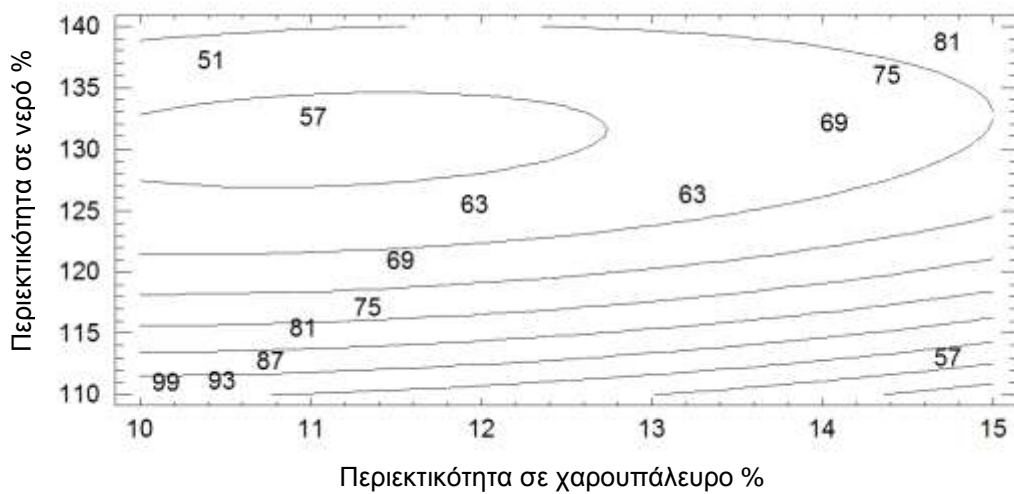
Επιπλέον η περιεκτικότητα σε νερό επέδρασε αρνητικά στην σκληρότητα της ψίχας ($p = 0.002$) και στην πυκνότητα πόρων ($p = 0.044$), ενώ το χαρουπάλευρο δεν επέδειξε σημαντική επίδραση (**Πίνακας 5.5.8**). Η ύπαρξη σημαντικής επίδρασης του νερού στις ανωτέρω παραμέτρους μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο εύρος του νερού σε σχέση με το χαρουπάλευρο που χρησιμοποιήθηκε στον πειραματικό σχεδιασμό. Οι δύο μεταβλητές (χαρουπάλευρο και νερό) δεν επέδρασαν στατιστικά σημαντικά στο συνολικό και επιφανειακό πορώδες και στην ελαστικότητα της ψίχας. Ωστόσο, οι τιμές του πορώδους εμφανίστηκαν αυξημένες στα αρτοσκευάσματα που περιείχαν χαρουπάλευρο, ενώ η ελαστικότητα μειώθηκε (**Πίνακας 5.5.7**). Τα διαγράμματα επιφανειών απόκρισης για την σκληρότητα και την πυκνότητα πόρων φαίνονται στα **Σχήματα 5.5.5** και **5.5.6** αντίστοιχα. Η πυκνότητα πόρων στα αρτοσκευάσματα που παρασκευάστηκαν κυμάνθηκε μεταξύ 47 και 117 πόροι/cm². Σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές, η πυκνότητα πόρων αρτοσκευασμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες κυμαίνεται μεταξύ 50 και 90 πόροι/cm² (Stojceska & Ainsworth, 2008).

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, το αρτοσκεύασμα με την μαλακότερη ψίχα περιείχε 12.5 % χαρουπάλευρο, 146.21 % νερό, 15 % ανθεκτικό άμυλο και 10 % πρωτεΐνες (Σ'10), ωστόσο παρουσίασε μικρή πυκνότητα πόρων. Αντιθέτως, το αρτοσκεύασμα με 15% χαρουπάλευρο, 110 % νερό, 15% ανθεκτικό άμυλο και 10% πρωτεΐνες (Σ'6) εμφάνισε υψηλή πυκνότητα πόρων, αλλά σφιχτή και σκληρή υφή ψίχας. Με βάση τα διαγράμματα επιφανειών απόκρισης (**Σχήματα 5.5.5, 5.5.6**) θα μπορούσε να προταθεί το αρτοσκεύασμα Σ'8 ως μέτριας σκληρότητας και

ικανοποιητικής διόγκωσης τελικό προϊόν, το οποίο περιείχε 15% χαρουπάλευρο, 140 % νερό, 15% ανθεκτικό άμυλο και 10% πρωτεΐνες.

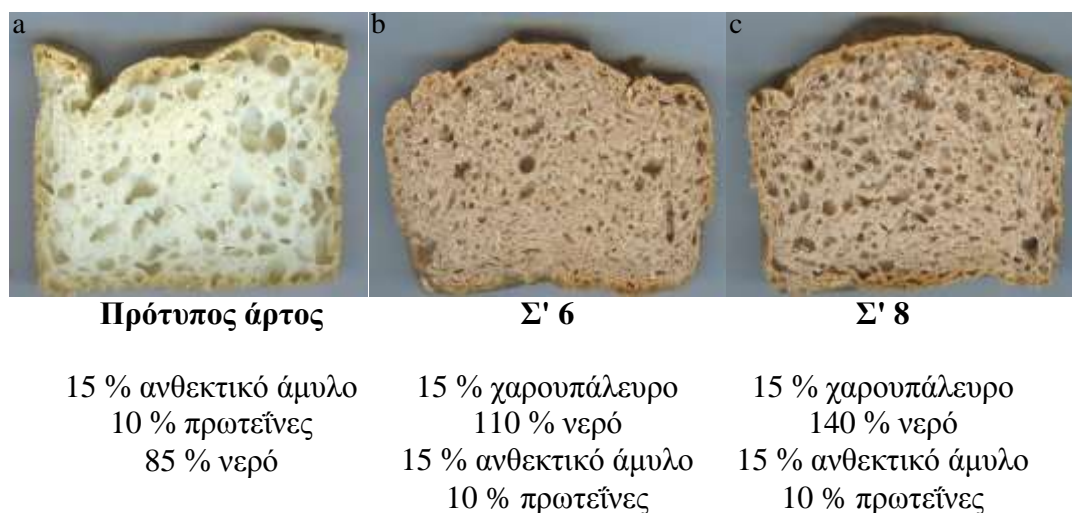


Σχήμα 5.5.5 Εκτιμώμενη επιφάνεια απόκρισης της μεταβολής της σκληρότητας της ψίχας άρτων με μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και νερό.



Σχήμα 5.5.6 Εκτιμώμενη επιφάνεια απόκρισης της μεταβολής της πυκνότητας πόρων της ψίχας άρτων με μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο και νερό.

Στο **σχήμα 5.5.7** απεικονίζονται ο βέλτιστος πρότυπος άρτος του 1^{ου} πειραματικού σταδίου, ο οποίος περιείχε 15% ανθεκτικό άμυλο, 10% πρωτεΐνες και 85% νερό και τα αρτοσκευάσματα Σ' 6 και Σ' 8 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.5.7 Επίδραση της προσθήκης χαρουπάλευρου και της περιεκτικότητας σε νερό στα αρτοσκευάσματα με ρυζάλευρο και ανθεκτικό άμυλο (Απεικονίσεις του πρότυπου άρτου του 1^{ου} πειραματικού σταδίου και των συνταγών Σ' 6 και Σ' 8 του 2^{ου} πειραματικού σταδίου).

Μπορεί να ειπωθεί, πως η προσθήκη χαρουπάλευρου βελτίωσε την εμφάνιση της ψίχας καθώς δημιούργησε μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των κυψελίδων αέρα (πόρων) στην φέτα του άρτου (**Σχήμα 5.5.7 α, ε**). Επιπλέον ο ρόλος του νερού αποδεικνύεται σημαντικός για τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Συγκεκριμένα στο αρτοσκεύασμα Σ' 6 μπορεί να παρατηρηθεί μια πυκνή δομή σε σχέση με το αρτοσκεύασμα Σ' 8, λόγω της μείωσης του διαθέσιμου νερού κατά την αρτοποιήση (**Σχήμα 5.5.7 β, ε**). Με βάση τα αποτελέσματα της 4^{ης} πειραματικής σειράς τα αρτοσκευάσματα με λόγο περιεκτικότητας χαρουπάλευρο / νερό 15/140, παρουσίασαν αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά, επαρκή διόγκωση και χαμηλή σκληρότητα. Επιπλέον η χημική ανάλυση αυτού του άρτου έδειξε υψηλό πρωτεϊνικό περιεχόμενο 8.37 g /100 g προϊόντος και περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες 6.10 g / 100 g προϊόντος (επί υγρού) ώστε να θεωρείται προϊόν ενισχυμένο με διαιτητικές ίνες και πλούσιο σε πρωτεΐνες. Η προσθήκη του ανθεκτικού αμύλου αποδείχτηκε επιτυχής, καθώς το τελικό προϊόν ήταν υψηλής ποιότητας ως προς τις δομικές (πορώδες, υφή) και διατροφικές του ιδιότητες, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε διαιτητικές ίνες από το προστιθέμενο χαρουπάλευρο και της πρεβιοτικής δράσης του ανθεκτικού αμύλου.

5.5.3 Συμπεράσματα

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, η ενσωμάτωση ανθεκτικού αμύλου ακόμα και σε υψηλά ποσοστά για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη ήταν επιτυχής. Η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε πρότυπα αρτοσκευάσματα με βάση το ρυζάλευρο δεν οδήγησε στην αύξηση της σκληρότητας της ψίχας, σε σχέση με άλλους τύπους διαιτητικών ινών, ενώ ενίσχυσε τον ελαστικό χαρακτήρα της ψίχας και την διόγκωση. Στο 1^ο πειραματικό στάδιο το βέλτιστο αρτοσκεύασμα που παρασκευάστηκε περιείχε 15% ανθεκτικό άμυλο, 10% πρωτεΐνες και 85% νερό και χαρακτηρίστηκε από χαμηλή σκληρότητα ψίχας και αποδεκτές τιμές ελαστικότητας και πορώδους. Η συνδυασμένη χρήση ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου για την παρασκευή βέλτιστου άρτου έγινε στο 2^ο πειραματικό στάδιο με την μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν την σημαντική επίδραση του περιεχόμενου νερού στις δομικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων, καθώς επηρέασε την σκληρότητα και τα χαρακτηριστικά της ψίχας (πυκνότητα πόρων). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό οδήγησε σε μείωση της σκληρότητας της ψίχας και σε μια ανοικτή δομή με ομοιόμορφη κατανομή κυψελίδων αέρα, σε αντίθεση με το χαρουπάλευρο που δεν επέδρασε σημαντικά σε καμία από τις μετρούμενες ιδιότητες.

Με βάση την ανάλυση του πειραματικού σχεδιασμού η βέλτιστη συνταγή που μπορεί να προταθεί περιείχε 15 % χαρουπάλευρο, 140 % νερό, 15% ανθεκτικό άμυλο και 10 % πρωτεΐνες και το τελικό προϊόν χαρακτηρίστηκε από μαλακή και αφράτη ψίχα.

5.6 Ανάπτυξη κέικ ελεύθερου γλουτένης με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου (6^η Σειρά πειραμάτων)

Τα κέικ προτιμώνται ιδιαίτερα από τους καταναλωτές ως πρωινό ή απογευματινό σνακ, λόγω της γλυκιάς γεύσης και της απαλής υφής τους. Η ζύμη του κέικ αποτελεί γαλάκτωμα ελαίου σε νερό, όπου η συνεχής φάση αποτελείται από το μίγμα των αυγών-σακχάρων-νερού και λίπους και οι φυσαλίδες αέρα είναι η ασυνεχής φάση, στις οποίες διασκορπίζονται τα σωματίδια του αλεύρου. Στα επιθυμητά χαρακτηριστικά του κέικ περιλαμβάνονται η σπογγώδης υφή του, που αποδίδεται στον μεγάλο αριθμό μικρών κυψελίδων αέρα, οι οποίες παρέχουν την χαρακτηριστική πορώδη δομή και τον υψηλό όγκο του (Martinez-Cervera et al., 2012). Η χαρακτηριστική πορώδης δομή του κέικ απαιτεί σταθερό ζυμάρι ικανό να διατηρεί τις μικρές φυσαλίδες του αέρα κατά τον κλιβανισμό (Gómez et al., 2007). Τα κέικ ελεύθερα γλουτένης έχουν ως βασικό συστατικό το ρυζάλευρο, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή ικανότητα συγκράτησης αερίων και σχηματισμό δομικού δικτύου. Ως εκ τούτου, πρωτεΐνες, υδροκολλοειδή και γαλακτωματοποιητές μπορούν να προστεθούν στο ζυμάρι με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος (Turabi et al., 2008a, 2010; Park et al., 2012; Matos et al., 2014).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τήρηση δίαιτας ελεύθερη γλουτένης οδηγεί τους ασθενείς σε χαμηλά ποσοστά πρόσληψης διαιτητικών ινών (Thompson et al., 2005). Το ανθεκτικό άμυλο μπορεί να αυξήσει την περιεκτικότητα των τελικών προϊόντων σε διαιτητικές ίνες.

Επιπλέον το ανθεκτικό άμυλο χαρακτηρίζεται από λευκό χρώμα, μικρή κοκκομετρία και μειωμένη ικανότητα δέσμευσης νερού, έτσι η προσθήκη του σε ψημένα προϊόντα φαίνεται να επηρεάζει τη διαδικασία παραγωγής και την ποιότητα των τελικών προϊόντων σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με ίνες που προέρχονται από άλλες πηγές (δημητριακά, φρούτα) (Baixauli et al., 2008b).

Το μπαγιατέμα, που προκαλείται κυρίως από φαινόμενα αναδιάταξης του ζελατινοποιημένου αμύλου, είναι μια σημαντική παράμετρος ποιότητας των προϊόντων χωρίς γλουτένη, δεδομένου ότι είναι πλούσια σε άμυλο. Το ανθεκτικό άμυλο μπορεί να δράσει ως παράγοντας κατά του μπαγιατέματος, καθώς έχει αναφερθεί πως η προσθήκη του σε ζυμάρια αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης αυξάνει την θερμοκρασία ζελατινοποίησης και τα τελικά προϊόντα εμφανίζουν μικρότερο ρυθμό παλαίωσης (Korus et al., 2009).

Βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την χρήση του ανθεκτικού αμύλου στην ανάπτυξη προϊόντων κέικ ελεύθερων γλουτένης είναι περιορισμένη. Οι περισσότερες έρευνες αφορούν την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων με βάση το σίτο και προσθήκη ανθεκτικού αμύλου. Επιπλέον το ανθεκτικό άμυλο έχει μελετηθεί κυρίως για τις διατροφικές και ευεργετικές στην υγεία ιδιότητές του και όχι τόσο για την τεχνολογική του χρήση (π.χ. ανάμιξη και ρεολογία, κλιβανισμός, παλαίωση).

Σκοπός της 6ης σειράς πειραμάτων ήταν η μελέτη της προσθήκης ανθεκτικού αμύλου στις ρεολογικές και φυσικές ιδιότητες κέικ χωρίς γλουτένη με βάση ρυζάλευρο και άμυλο ταπιόκας. Μέσω της μελέτης αυτής να υπάρξει μια καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας ανάπτυξης κέικ χωρίς γλουτένη και να επιτευχθεί η ανάπτυξη γλυκών

προϊόντων αρτοποιίας χωρίς γλουτένη ισοδύναμων ποιοτικών χαρακτηριστικών με τα προϊόντα σίτου. Επιπλέον, έχοντας υπ' όψιν την χρήση ποικίλων συστατικών για την ενίσχυση της διατροφικής αξίας των προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, μπορεί να υπάρξει βαθύτερη κατανόηση της δράσης του ανθεκτικού αμύλου στην ανάπτυξη κέικ χωρίς γλουτένη, διευκολύνοντας έτσι την σύγκριση με παρόμοια προϊόντα ενισχυμένα με διαιτητικές ίνες.

Η βασική συνταγή του κέικ περιείχε 80% ρυζάλευρο και 20% άμυλο ταπιόκας (δείγμα αναφοράς). Το ανθεκτικό άμυλο προστέθηκε στην βασική συνταγή με σκοπό να υποκαταστήσει το άμυλο ταπιόκας σε ποσοστά από 0%-20% επί του αλεύρου. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης ανθεκτικού αμύλου στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ζυμαριών του κέικ, αλλά και στις φυσικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων (υφή, χαρακτηριστικά ψίχας, οργανοληπτικός έλεγχος). Τέλος μελετήθηκε η μεταβολή των χαρακτηριστικών των προϊόντων κατά την αποθήκευσή τους (μελέτη παλαίωσης) για 7 ημέρες στους 25 °C και στο διάστημα αυτό πραγματοποιήθηκαν 5 δειγματοληψίες.

Η βασική συνταγή για την ανάπτυξη των κέικ και η κωδικοποίηση των δειγμάτων φαίνονται στους **Πίνακες 5.6.1, 5.6.2** που ακολουθούν.

Πίνακας 5.6.1 Βασική συνταγή για την ανάπτυξη του κέικ.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*
Νερό και 2 αυγά	120
Ζάχαρη	80
Λιπαρό	25
Baking powder	6
Αλάτι	3
Κόμμι χαρουπιού- LBG	3.3
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Βανιλίνη	0.2

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του ανθεκτικού αμύλου.

Πίνακας 5.6.2 Κωδικοποίηση των δειγμάτων που μελετήθηκαν.

Κωδικός δείγματος	Ανθεκτικό άμυλο %	Άμυλο ταπιόκας %	Ρυζάλευρο %
Control (Δείγμα αναφοράς)	0	20	80
5RS	5	15	80
10RS	10	10	80
15RS	15	5	80
20RS	20	0	80

5.6.1 Ρεολογικές ιδιότητες ζύμης κέικ

Οι ρεολογικές ιδιότητες της ζύμης των κέικ που μετρήθηκαν ήταν: δυναμικό ταλαντωτικό πείραμα συχνοτήτων με εύρος από 0.01 μέχρι 10 Hz σε 0.1% παραμόρφωση και μέτρηση του φαινομένου ιξώδους για ρυθμό διάτμησης από 0.1–100 s⁻¹ στους 25 °C. Τα δεδομένα του ιξώδους προσαρμόστηκαν στο μοντέλο του Ostwald (Power law model):

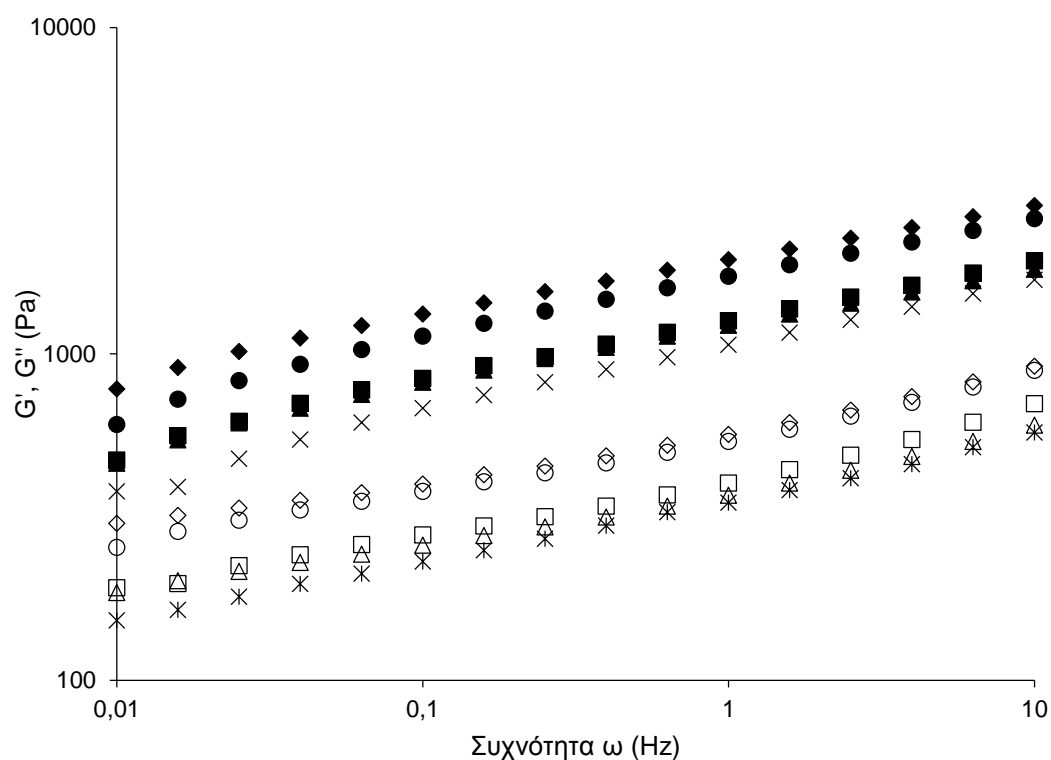
$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

όπου τ η διατμητική τάση (Pa), $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης (s⁻¹), K ο συντελεστής συνεκτικότητας (Pa·sⁿ), και n ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς.

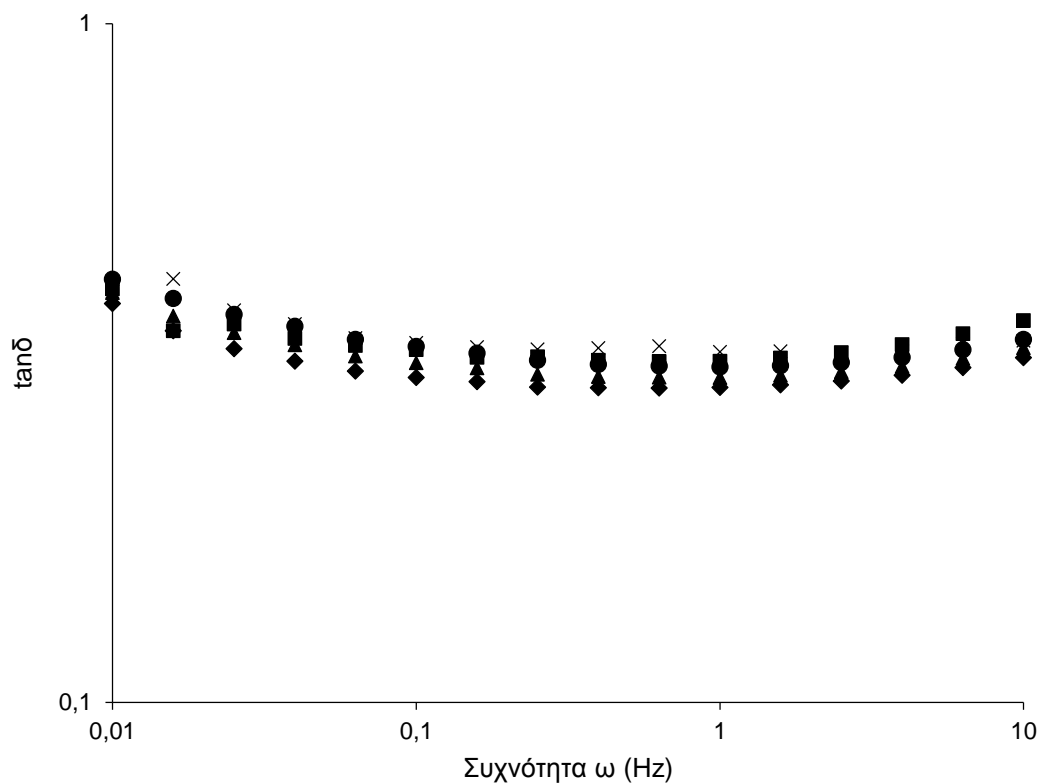
Στα **Σχήματα 5.6.1** και **5.6.2** παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή αποθήκευσης και του συντελεστή απωλειών $G'(\omega)$, $G''(\omega)$ καθώς και της εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta(\omega)$, του δυναμικού ταλαντωτικού πειράματος συχνοτήτων για τα ζυμάρια του κέικ με διαφορετικά ποσοστά προσθήκης ανθεκτικού αμύλου. Όλα τα ζυμάρια παρουσίασαν συντελεστή αποθήκευσης $G'(\omega)$ υψηλότερο από τον συντελεστή απωλειών $G''(\omega)$, σε όλο το πεδίο συχνοτήτων. Καθώς και οι δύο συντελεστές αυξάνουν με την συχνότητα και η εφαπτομένη απωλειών είναι μικρότερη του 1 (**Σχήματα 5.6.1, 5.6.2**), τα ζυμάρια του κέικ εμφανίζουν συμπεριφορά ελαστικού. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με την βιβλιογραφία καθώς έχει αναφερθεί η ύπαρξη χαρακτήρα μαλακής πηκτής (soft gels) με τιμές του συντελεστή αποθήκευσης $G'(\omega)$ ελαφρά μεγαλύτερες από του συντελεστή απωλειών $G''(\omega)$ για ζυμάρια κέικ σίτου με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου (Baixauli et al., 2008b). Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας ανθεκτικού αμύλου στις ζύμες των κέικ οδήγησε σε μείωση του ελαστικού χαρακτήρα, η οποία απεικονίζεται με μείωση των τιμών των $G'(\omega)$ και $G''(\omega)$.

Στο **Σχήμα 5.6.3** παρουσιάζονται οι τιμές του φαινομένου ιξώδους ως προς τον ρυθμό διάτμησης. Μπορεί να παρατηρηθεί η μείωση του φαινομένου ιξώδους με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης για όλα τα δείγματα, υποδεικνύοντας συμπεριφορά ψευδοπλαστικού ($n < 1$) για το εύρος του ρυθμού διάτμησης που μελετήθηκε. Επιπλέον η αύξηση της υποκατάσταση αμύλου ταπιόκας με ανθεκτικό άμυλο οδήγησε σε μείωση των τιμών του ιξώδους. Τα πειραματικά δεδομένα παρουσίασαν καλή προσαρμογή στην εξίσωση Power law ($R^2 > 0.98$). Στον **Πίνακα 5.6.3** παρατίθενται οι τιμές των ρεολογικών παραμέτρων K και n για τα κέικ που μελετήθηκαν. Η τιμή του συντελεστή συνεκτικότητας K για το δείγμα με 5% ανθεκτικό άμυλο (5RS) δεν διέφερε σημαντικά από του δείγματος αναφοράς (control). Ωστόσο οι τιμές του K για τα κέικ με 10% και 20% ανθεκτικό άμυλο (10RS, 20RS) ήταν σημαντικά μικρότερες από του control και του 5RS, χωρίς όμως στατιστικές διαφορές μεταξύ τους. Οι τιμές του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς ήταν μικρότερες του 1 για όλες τις συνταγές, αλλά αυξάνονταν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο. Παρόμοια τάση για τις τιμές του n έχουν αναφερθεί για κέικ σίτου με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου, ωστόσο οι τιμές του n για τα κέικ αυτά ήταν σημαντικά υψηλότερες (Baixauli et al., 2008b). Επιπλέον, σύμφωνα με τους Majzoobi et al. (2014) παρατηρήθηκε μειωμένη

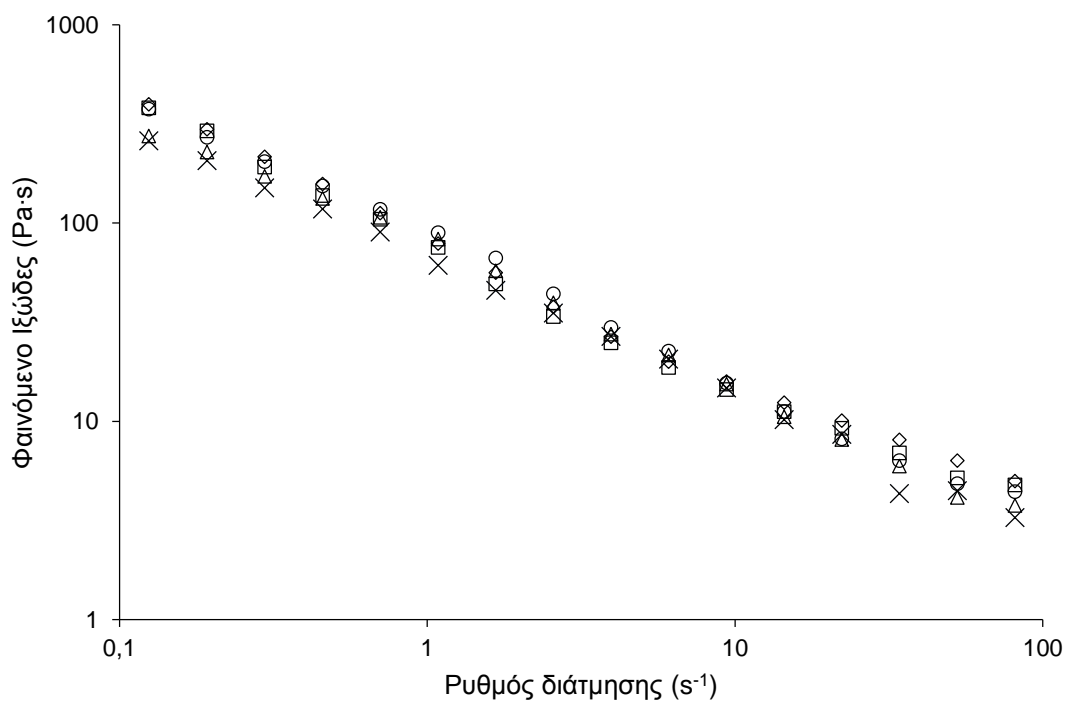
συνεκτικότητα ζύμης μάφιν (muffin) σίτου με αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο. Το ιξώδες της ζύμης του κέικ αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων και ειδικά για την διόγκωση, καθώς ζύμη κέικ με πολύ χαμηλό ιξώδες δεν μπορεί να διατηρήσει τις φυσαλίδες του αέρα, με αποτέλεσμα την κατάρρευση της δομής κατά τον κλιβανισμό, ενώ και πολύ υψηλού ιξώδους ζύμη μπορεί να περιορίσει την διόγκωση κατά τον κλιβανισμό (Sahi & Alava 2003, Ronda et al., 2011).



Σχήμα 5.6.1 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στον συντελεστή αποθήκευσης $G'(\omega)$ και απωλειών $G''(\omega)$ της ζύμης των κέικ. Κλειστά σύμβολα, G' ; ανοικτά σύμβολα, G'' . ♦ control, • 5RS, ■ 10RS, ▲ 15RS, × 20RS.



Σχήμα 5.6.2 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στην εφαπτομένη απωλειών της ζύμης των κέικ. ♦ control, ● 5RS, ■ 10RS, ▲ 15RS, × 20RS.



Σχήμα 5.6.3 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στο φαινόμενο ιξώδες της ζύμης των κέικ στους 25 °C. ◇ control, □ 5RS, ○ 10RS, Δ 15RS, × 20RS.

Πίνακας 5.6.3 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στις ρεολογικές παραμέτρους της ζύμης των κέικ, όπως προσδιορίστηκαν από το μοντέλο Power law.

Κωδικός δείγματος	K (Pa·s ⁿ)	n	R ²
Control	129.06 (20.19) ^b	0.22 (0.05) ^{ab}	0.991
5RS	139.50 (8.47) ^b	0.19 (0.003) ^a	0.981
10RS	83.61 (5.75) ^a	0.28 (0.03) ^{bc}	0.983
15RS	73.58 (15.69) ^a	0.36 (0.045) ^{cd}	0.994
20RS	68.24 (3.56) ^a	0.37 (0.04) ^d	0.990

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

5.6.2 Φυσικές ιδιότητες των κέικ

Στα κέικ που παρασκευάστηκαν έγινε μέτρηση των φυσικών τους ιδιοτήτων, συγκεκριμένα μετρήθηκε ο ειδικός όγκος, το συνολικό πορώδες, το χρώμα της ψίχας και η μορφολογία της ψίχας των κέικ.

Στο **Σχήμα 5.6.4** παρουσιάζονται οι τιμές του ειδικού όγκου των κέικ. Η προσθήκη του ανθεκτικού αμύλου αύξησε στατιστικά σημαντικά τον ειδικό όγκο των κέικ σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (control) ($p < 0.05$), με τον υψηλότερο ειδικό όγκο να σημειώνεται για το κέικ με 15% ανθεκτικό άμυλο (15RS). Σύμφωνα με τους Gómez et al., (2010) ο ειδικός όγκος κέικ χωρίς γλουτένη συσχετίστηκε με τις τιμές για τους συντελεστές αποθήκευσης και απωλειών (G' , G'') του ρεολογικού δυναμικού ταλαντωτικού πειράματος. Αναφέρεται πως χαμηλότερες τιμές των δύο συντελεστών οδήγησαν στην παρασκευή κέικ με αυξημένη διόγκωση. Όμοια αποτελέσματα μπορούν να αναφερθούν για τα κέικ με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου που παρασκευάστηκαν, καθώς η αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο, οδήγησε σε μείωση των δύο ρεολογικών συντελεστών και κατ' επέκταση σε αυξημένο ειδικό όγκο. Το συνολικό πορώδες των κέικ με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου κυμάνθηκε μεταξύ του 46.18% και 47.33% σε σχέση με το δείγμα αναφοράς στο 43%. Οι τιμές του πορώδους δεν επηρεάστηκαν στατιστικά σημαντικά από την αυξανόμενη προσθήκη ανθεκτικού αμύλου, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην χαμηλή κοκκομετρία του ανθεκτικού αμύλου (10-15 μ m), η οποία επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με άλλες πηγές διαιτητικών ινών τις δομικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Αντίστοιχες παρατηρήσεις έχουν αναφερθεί για άρτο με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε υψηλά ποσοστά (20g/100g αλεύρου) (Almeida et al., 2013). Στο **Σχήμα 5.6.5** και στον **Πίνακα 5.6.4** παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των κέικ που παρασκευάστηκαν και τα χαρακτηριστικά της ψίχας των κέικ, όπως το επιφανειακό πορώδες, η πυκνότητα πόρων και η μέση διάμετρος πόρων αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά, η προσθήκη 5% ανθεκτικού αμύλου (5RS), δηλαδή 3.2% περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες (υπολογισμένη με βάση την ανάλυση του προμηθευτή), δεν επηρέασε στατιστικά σημαντικά την μορφολογία της ψίχας του κέικ σε σχέση με το δείγμα

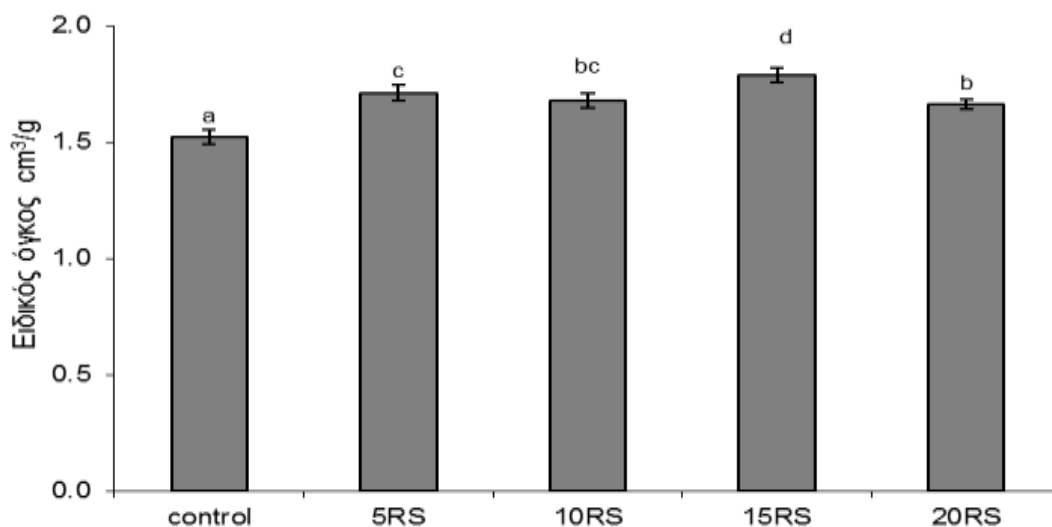
αναφοράς ($p > 0.05$). Προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε ποσοστά άνω του 15% οδήγησαν σε κέικ με στατιστικά σημαντικές διαφορές ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας σε σχέση με το κέικ αναφοράς, ωστόσο τα κέικ με 15% και 20% ανθεκτικό άμυλο (15RS, 20RS) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Σύμφωνα με τους Baixauli et al., (2008b) η αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο κέικ σίτου (μέχρι 20% επί του αλεύρου) οδήγησε σε μείωση του αριθμού των πόρων και της επιφάνειας των πόρων. Ωστόσο τα κέικ που παρασκευάστηκαν στην παρούσα πειραματική σειρά εμφάνισαν μείωση της πυκνότητας πόρων, αλλά αύξηση της μέσης διαμέτρου πόρων με την αύξηση της προσθήκης ανθεκτικού αμύλου.

Η επίδραση της προσθήκης ανθεκτικού αμύλου στο χρώμα της ψίχας των κέικ που παρασκευάστηκαν παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.6.5**. Τα κέικ με 5% και 20% ανθεκτικό άμυλο δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά από το κέικ αναφοράς, ενώ τα υπόλοιπα εμφάνισαν σκουρότερο χρώμα (μείωση των τιμών του L^*) και στατιστικά σημαντική μείωση του κίτρινου χρώματος (μείωση της τιμής της παραμέτρου b^*). Γενικά δεν μπορεί να αναφερθεί μια ξεκάθαρη τάση του χρώματος της ψίχας των κέικ. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για κέικ με υποκατάσταση εξευγενισμένων διαιτητικών ινών, καθώς δεν παρατηρήθηκε σταθερή τάση της μεταβολής του χρώματος των κέικ με την αύξηση του ποσοστού προσθήκης διαιτητικών ινών (Gómez et al., 2010).

Η σχετική ελαστικότητα της ψίχας των κέικ παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.6.6**. Η προσθήκη υψηλού ποσοστού ανθεκτικού αμύλου οδήγησε σε μειωμένη ελαστικότητα ψίχας, ωστόσο οι τιμές της ελαστικότητας για τα κέικ που μελετήθηκαν είναι σημαντικά υψηλότερες σε σχέση με άλλες βιβλιογραφικές πηγές (0.4-0.5) (Baixauli et al., 2008a).

Τέλος έγινε συσχέτιση των μετρούμενων ρεολογικών παραμέτρων της ζύμης με τις φυσικές ιδιότητες των κέικ, η οποία παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.6.6**. Οι ρεολογικοί συντελεστές K και n συσχετίζονται στατιστικά σημαντικά με την σχετική ελαστικότητα της ψίχας. Όπως αναμένεται υπάρχει θετική συσχέτιση με τον συντελεστή K και αρνητική με τον δείκτη n . Αύξηση της τιμής του συντελεστή n και μείωση του K , οδήγησε σε μείωση του ιξώδους της ζύμης του κέικ, δηλαδή σε μια πιο λεπτόρευστη ζύμη. Η μείωση του ιξώδους της ζύμης κέικ έχει συσχετιστεί με υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων, καθώς οι φυσαλίδες του αέρα δεν συγκρατούνται επαρκώς στη ζύμη κατά τον κλιβανισμό, οδηγώντας σε κέικ με πυκνή και σφιχτή δομή ψίχας χωρίς ελαστικότητα (Baixauli et al., 2008b). Εντούτοις στην μελέτη αυτή παρατηρήθηκε μείωση του ιξώδους της ζύμης, η οποία επέδρασε στην ελαστικότητα της ψίχας, αλλά υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων δεν ήταν εμφανής, καθώς ο ειδικός όγκος των κέικ με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου βρέθηκε σημαντικά υψηλότερος σε σχέση με το κέικ αναφοράς. Επιπλέον, το επιφανειακό πορώδες εμφάνισε θετική συσχέτιση με την πυκνότητα πόρων και την μέση διάμετρο πόρων. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για αρτοσκευάσματα με προσθήκη ανθεκτικού αμύλου, όπου οι τιμές του επιφανειακού πορώδους και της πυκνότητας πόρων μειώθηκαν ταυτόχρονα με την αύξηση της προσθήκης ανθεκτικού αμύλου (Sanz-Penella et al., 2010).

Με βάση τα ανωτέρω συμπεράσματα και έχοντας υπόψη τις απαιτήσεις των καταναλωτών για κέικ με υψηλή διόγκωση και ελαστική ψίχα, το ανθεκτικό άμυλο μπορεί να ενσωματωθεί με επιτυχία σε κέικ ελεύθερα γλουτένης, ακόμη και σε υψηλές συγκεντρώσεις, καθώς το κέικ με 20% προσθήκη ανθεκτικού αμύλου (20RS) εμφάνισε υψηλό πορώδες και ελαστικότητα ψίχας. Η ενσωμάτωση υψηλών ποσοστών ανθεκτικού αμύλου για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης οδήγησε σε τελικά προϊόντα υψηλής ποιότητας, όπως είδαμε και στην 5^η πειραματική σειρά για άρτο με 15% ανθεκτικό άμυλο, με αποδεκτές φυσικές ιδιότητες.



Σχήμα 5.6.4 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στον ειδικό όγκο των κέικ. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).



Control

Σχήμα 5.6.5 Ενδεικτικές φωτογραφίες των κέικ που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 5.6.4 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των κέικ.

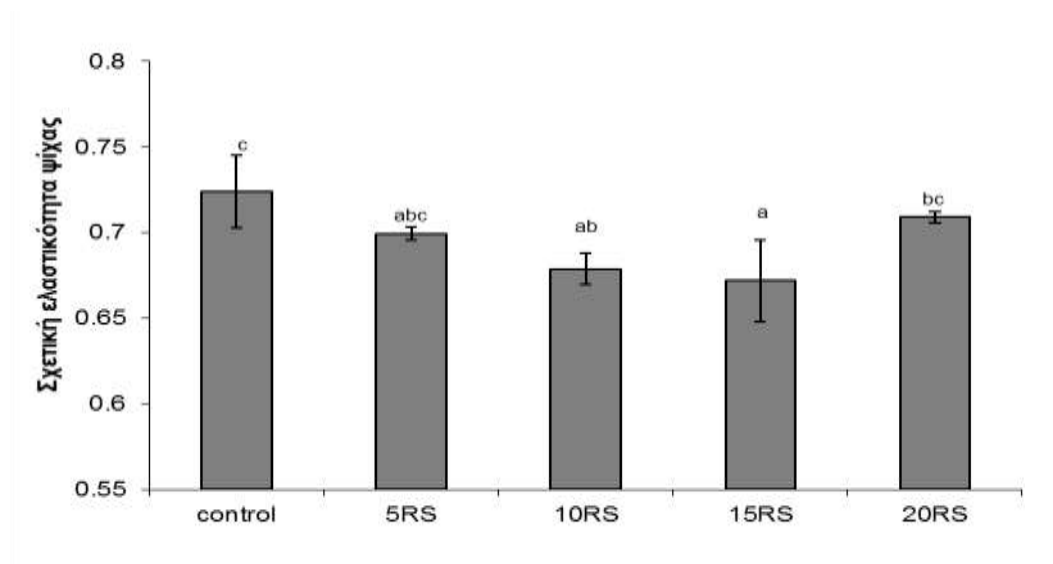
Κωδικός δείγματος	Επιφανειακό πορώδες %	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)	Μέση διάμετρος πόρων (mm)
Control	26.7 (0.96) ^b	30 (2) ^b	0.78 (0.07) ^a
5RS	24.6 (3.02) ^{ab}	24 (6) ^{ab}	0.91 (0.09) ^{ab}
10RS	22.6 (3.41) ^a	25 (4) ^{ab}	0.90 (0.04) ^{ab}
15RS	21.4 (4.07) ^a	21 (3) ^a	0.98 (0.09) ^b
20RS	22.2 (3.51) ^a	21 (3) ^a	1.00 (0.05) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

Πίνακας 5.6.5 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στο χρώμα των κέικ.

Κωδικός δείγματος	L*	a*	b*
Control	83.0 (1.84) ^b	-5.93 (0.01) ^a	33.0 (0.30) ^d
5RS	84.1 (0.45) ^b	-6.31 (0.14) ^a	31.9 (0.16) ^c
10RS	80.8 (0.18) ^a	-1.28 (0.20) ^b	28.6 (0.51) ^a
15RS	78.7 (1.58) ^a	-0.32 (0.74) ^c	29.9 (0.95) ^b
20RS	84.3 (1.00) ^b	-5.34 (0.15) ^a	32.4 (0.58) ^{cd}

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).



Σχήμα 5.6.6 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στην ελαστικότητα της ψίχας των κέικ. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

Πίνακας 5.6.6 Συντελεστές συσχέτισης των φυσικών ιδιοτήτων των κέικ.

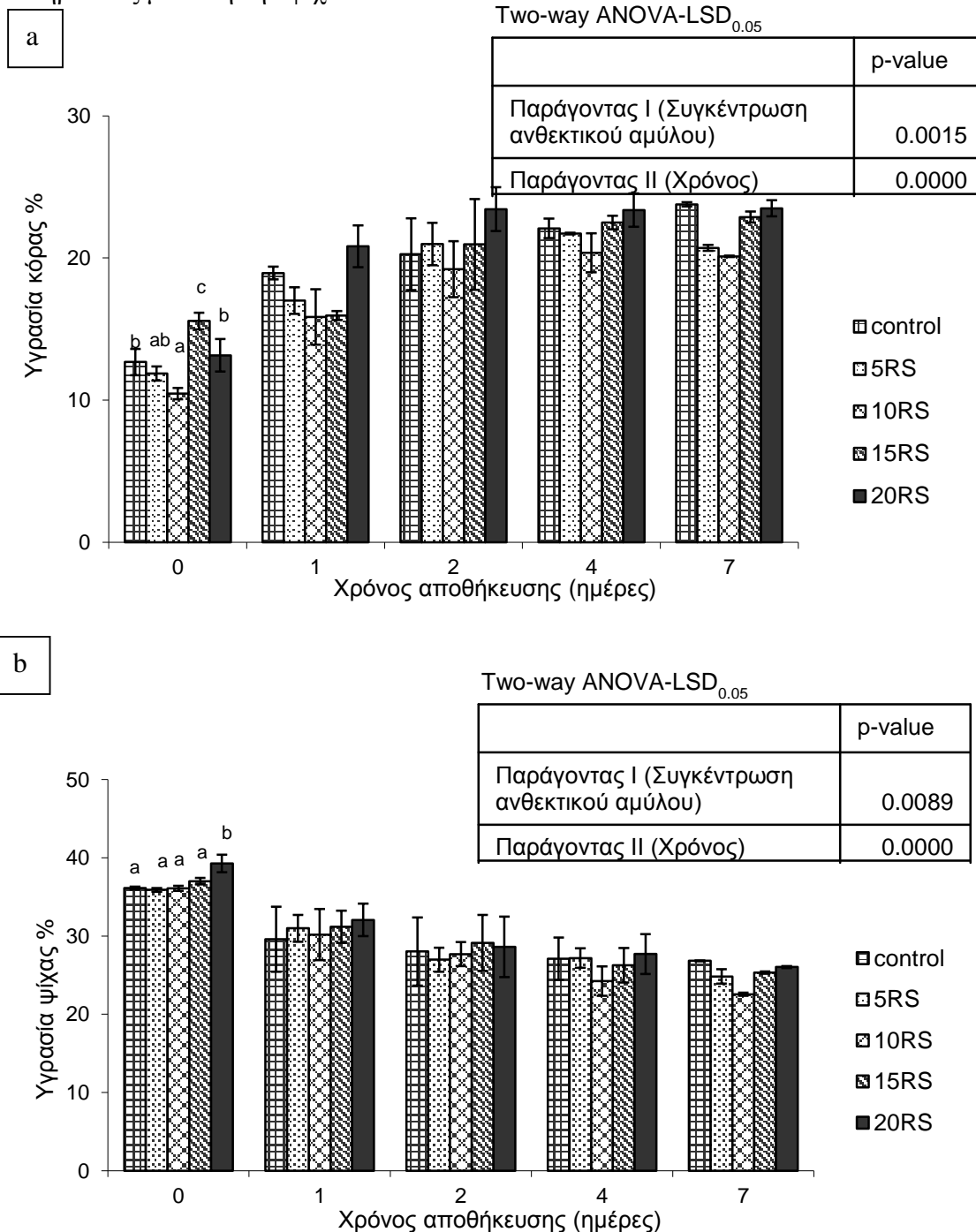
	b*	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)	Μέση διάμετρος πόρων (mm)	Σχετική ελαστικότητα ψίχας %	K	L*	Επιφανειακό πορώδες %	n
a*	-0.892	-0.385	0.367	-0.659	-0.660	-0.944	-0.711	0.543
b*		0.312	-0.298	0.485	0.486	0.763	0.635	0.278
Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)			-0.994	0.679	0.681	0.215	0.898	-0.730
Μέση διάμετρος πόρων (mm)				-0.723	-0.725	-0.176	-0.905	0.766
Σχετική ελαστικότητα ψίχας %					1.000	0.463	0.873	-0.958
K						0.464	0.875	-0.958
L*							0.513	-0.400
Επιφανειακό πορώδες %								-0.831

Συντελεστές συσχέτισης με έντονο μύθο χρώμα υποδηλώνουν την ύπαρξη στατιστικά σημαντικής συσχέτισης μεταξύ των μετρούμενων παραγόντων

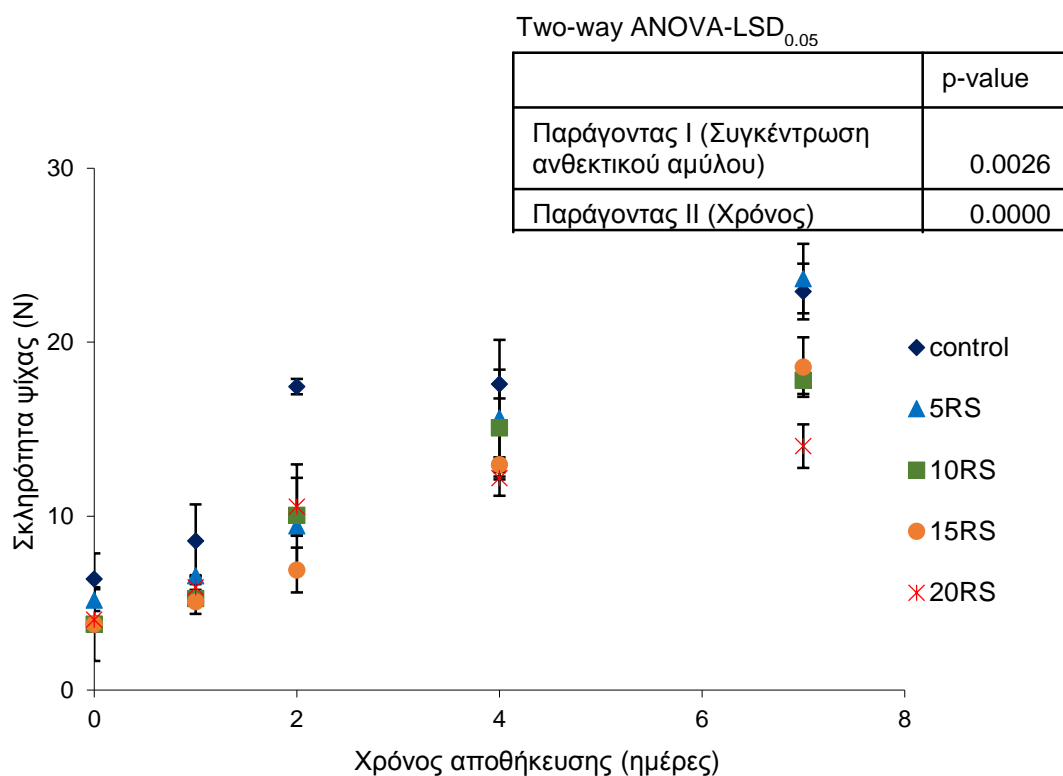
5.6.3 Μελέτη παλαίωσης

Η παλαίωση των αρτοσκευασμάτων σχετίζεται με την αύξηση της σκληρότητας της ψίχας, λόγω μετανάστευσης της υγρασίας από την ψίχα προς την κόρα και αναδιάταξης του αμύλου της ψίχας του κέικ (Willhoft 1973). Στα **Σχήματα 5.6.7a** και **5.6.7b** παρουσιάζεται η μεταβολή της υγρασίας της κόρας και της ψίχας αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν για όλα τα κέικ που παρασκευάστηκαν παρατηρήθηκε αύξηση της υγρασίας της κόρας με ταυτόχρονη μείωση της υγρασίας της ψίχας στο εύρος των 7 ημερών αποθήκευσης. Σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης (Two-way ANOVA), η περιεκτικότητα σε ανθεκτικό άμυλο και ο χρόνος ($p=0.0000$) επέδρασαν στατιστικά σημαντικά στην μεταβολή της υγρασίας της κόρας και της ψίχας αντίστοιχα ($p=0.0015$ και $p=0.0085$). Η υγρασία της ψίχας των φρέσκων κέικ δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά από το δείγμα αναφοράς, με εξαίρεση το κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο, το οποίο παρουσίασε σημαντικά υψηλότερη τιμή. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο υψηλότερο ποσοστό περιεχόμενων διαιτητικών ινών του κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο, καθώς τα υψηλά ποσοστά διαιτητικών ινών στη ζύμη του κέικ αύξησαν την ικανότητα συγκράτησης νερού της ζύμης και κατ' επέκταση την υγρασία του τελικού προϊόντος. Επιπλέον το ανθεκτικό άμυλο εμφάνισε υψηλότερη ικανότητα δέσμευσης νερού (109 g νερό/g αμύλου) σε σχέση με το άμυλο ταπιόκας (82 g νερού/g αμύλου), το οποίο υποκατέστησε. Σύμφωνα με τους Sanz-Penella et al., (2010) αναφέρεται αυξημένη υγρασία άρτου με την προσθήκη τροποποιημένου αμύλου μπιζελιού σε σχέση με τον πρότυπο άρτο χωρίς τροποποιημένο άμυλο, αλλά και αύξηση της υγρασίας του άρτου με την αύξηση των ποσοστών ενσωμάτωσης τροποποιημένου αμύλου μπιζελιού. Η μεταβολή της σκληρότητας της ψίχας των κέικ για το διάστημα των 7 ημερών αποθήκευσης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.6.8**. Η σκληρότητα της ψίχας αυξάνει με την διάρκεια αποθήκευσης, αλλά η αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο οδήγησε σε μαλακότερη ψίχα στο τέλος της 7^{ης} ημέρας αποθήκευσης. Πιο συγκεκριμένα το κέικ αναφοράς (control) παρουσίασε σημαντική αύξηση της σκληρότητας την 2^η ημέρα αποθήκευσης, η οποία διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή για τον υπόλοιπο χρόνο αποθήκευσης. Αντιθέτως το κέικ με 5% ανθεκτικό άμυλο σημείωσε χαμηλότερη σκληρότητα ψίχας ως φρέσκο (0^η ημέρα) σε σχέση με το κέικ αναφοράς, αλλά έφτασε σε ίδια τιμή σκληρότητας την 7^η μέρα. Ο ρυθμός παλαίωσης μπορεί να θεωρηθεί σημαντικά χαμηλότερος για το κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Η παλαίωση των αρτοσκευασμάτων σχετίζεται με φαινόμενα αναδιάταξης του αμύλου, στα οποία συμπεριλαμβάνεται η σταδιακή μεταβολή του ζελατινοποιημένου άμορφου αμύλου σε πιο κρυσταλλική δομή (Ji et al., 2007). Με την αύξηση της υποκατάστασης ανθεκτικού αμύλου, το οποίο δεν ζελατινοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 100 °C, επέρχεται μείωση του περιεχόμενου διαλυτοποιημένου αμύλου και κατ' επέκταση του αναδιαταγμένου αμύλου. Επιπλέον η αρχική περιεχόμενη υγρασία του κέικ παίζει σημαντικό ρόλο στον ρυθμό παλαίωσης. Έτσι ο μικρότερος ρυθμός παλαίωσης του κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο μπορεί να αποδοθεί και στο υψηλότερο ποσοστό υγρασίας της ψίχας του (He and Hosney 1990).

Συμπερασματικά, η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε υψηλά ποσοστά (20%) στο κέικ μπορεί να διατηρήσει την φρεσκότητα των προϊόντων παρεμποδίζοντας την αύξηση της σκληρότητας της ψίχας κατά την αποθήκευση. Το ανθεκτικό άμυλο δεν συμμετέχει στα φαινόμενα ζελατινοποίησης κατά τον κλιβανισμό του κέικ, με αποτέλεσμα υψηλά ποσοστά ανθεκτικού αμύλου, να μπορούν να υποκαταστήσουν το άμυλο ταπιόκας διατηρώντας μαλακή την ψίχα του κέικ.



Σχήμα 5.6.7 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου και του χρόνου αποθήκευσης στην υγρασία της κόρας (a) και της ψίχας (b) των κέικ. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

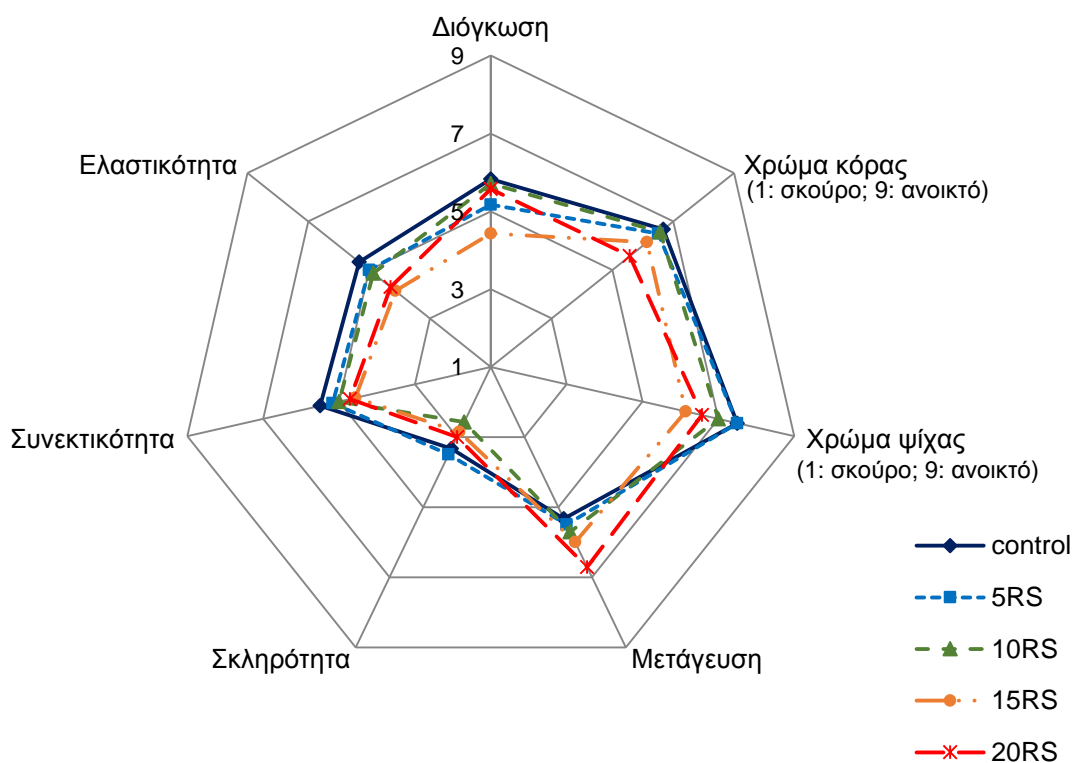


Σχήμα 5.6.8 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου και του χρόνου αποθήκευσης στην σκληρότητα της ψίχας των κέικ. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων. Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.

5.6.4 Οργανοληπτικός έλεγχος

Τα αποτελέσματα του οργανοληπτικού ελέγχου παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.6.9** και στον **Πίνακα 5.6.7**. Συγκεκριμένα οι τιμές των παραμέτρων της περιγραφικής δοκιμής δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά με την αύξηση του ανθεκτικού αμύλου ($p > 0.05$ σε όλες τις παραμέτρους). Οι δοκιμαστές δεν αναφέρουν διαφορά στην φωτεινότητα της ψίχας μεταξύ του δείγματος αναφοράς και του κέικ με 5% ανθεκτικό άμυλο. Ωστόσο παρατήρησαν μείωση της φωτεινότητας για το κέικ με 15% ανθεκτικό άμυλο, αλλά οι διαφορές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο ενίσχυσε την μετάγευση των κέικ, χωρίς βέβαια στατιστικές διαφορές λόγω της ήπιας γεύσης του ανθεκτικού αμύλου. Σχετικά με την σκληρότητα, την συνεκτικότητα και την ελαστικότητα της ψίχας των κέικ, οι δοκιμαστές ανέφεραν μείωση των παραμέτρων αυτών με την αύξηση του ανθεκτικού αμύλου. Η τάση αυτή επαληθεύεται και από τις αντικειμενικές μεθόδους μέτρησης του χρώματος και της υφής. Σχετικά με την συνολική αποδοχή (**Πίνακας 5.6.9**) όλα τα κέικ κρίθηκαν αποδεκτά καθώς έλαβαν βαθμολογία ανώτερη του 5, με το κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο να σημειώνει την υψηλότερη βαθμολογία. Παρόλο που δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ του κέικ αναφοράς και αυτού με 20% ανθεκτικό άμυλο, οι δοκιμαστές ανέφεραν την προτίμησή τους στο κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για προσθήκη 20% ανθεκτικού αμύλου σε

κέικ σίτου, η οποία δεν επηρέασε τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του κέικ (Majzoobi et al., 2014). Το γεγονός ότι τα κέικ με ανθεκτικό άμυλο δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το δείγμα αναφοράς θεωρήθηκε θετικό εύρημα, καθώς το ανθεκτικό άμυλο μπορεί να ενσωματωθεί σε υψηλά ποσοστά στα τελικά προϊόντα, βελτιώνοντας έτσι την διατροφική τους αξία (υψηλό ποσοστό διαιτητικών ινών) χωρίς την μεταβολή των οργανοληπτικών τους χαρακτηριστικών. Με βάση βιβλιογραφικές αναφορές τα τυπικά ποσοστά προσθήκης ανθεκτικού αμύλου στα αρτοσκευάσματα κυμαίνονται μέχρι το 20% επί του αλεύρου, καθώς η χρήση υψηλότερων ποσοστών (π.χ. 30%) οδηγεί σε υποβάθμιση των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών (Sanz-Penella et al., 2010; Majzoobi et al., 2014).



Σχήμα 5.6.9 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των κέικ.

Πίνακας 5.6.7 Επίδραση του ανθεκτικού αμύλου στην συνολική αποδοχή των κέικ.

Κωδικός δείγματος	Συνολική αποδοχή
Control	5.67 (1.86) ^a
5RS	6.00 (2.19) ^a
10RS	5.50 (1.58) ^a
15RS	6.00 (1.29) ^a
20RS	6.71 (1.5) ^a

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

5.6.5 Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση ανθεκτικού αμύλου σε κέικ ελεύθερα γλουτένης οδήγησε σε τελικά προϊόντα με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά ακόμα και σε υψηλά ποσοστά προσθήκης του 20%. Από τα ρεολογικά δεδομένα προέκυψε ο ελαστικός χαρακτήρας της ζύμης του κέικ με τις τιμές του συντελεστή αποθήκευσης να σημειώνονται υψηλότερες έναντι του συντελεστή απωλειών G'' (ω). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο οδήγησε στην μείωση των δύο συντελεστών και του ιξώδους της ζύμης. Η μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων των κέικ οδήγησε σε μη στατιστικά σημαντικές διαφορές των τιμών του πορώδους μεταξύ των κέικ με υψηλά ποσοστά ανθεκτικού αμύλου και του δείγματος αναφοράς, ενώ μπορεί να σημειωθεί και η συνεισφορά του ανθεκτικού αμύλου στην διατήρηση μαλακής ψίχας των κέικ κατά την αποθήκευσή του για 7 ημέρες. Σύμφωνα με την οργανοληπτική αξιολόγηση, η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου δεν επηρέασε τα περιγραφικά δεδομένα των κέικ, ενώ όλα τα κέικ θεωρήθηκαν αποδεκτά με τους δοκιμαστές να προτιμούν το κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο.

5.7 Ανάπτυξη άρτου ελεύθερου γλουτένης με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας 7^η σειρά πειραμάτων)

Τα βασικά στάδια της αρτοποιητικής διαδικασίας είναι η ανάμιξη, η επώαση και ο κλιβανισμός. Στο στάδιο της ανάμιξης τα συστατικά με την προσθήκη νερού μετατρέπονται σε ιξωδοελαστικό ζυμάρι, στο οποίο ενσωματώνονται φυσαλίδες αέρα, οι οποίες θα λειτουργήσουν ως πυρήνες αερίου και θα διογκωθούν κατά το στάδιο της επώασης. Κατά την επώαση, η μαγιά μεταβολίζει τα ελεύθερα σάκχαρα του ζυμαριού παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο οδηγεί στην διόγκωση του ζυμαριού (Romano et al, 2007). Στα αρτοσκευάσματα σίτου, η παρουσία της γλουτένης δημιουργεί ένα ιξωδοελαστικό πλέγμα, το οποίο διατηρεί το αέριο διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται (Sahlström, Park, & Shelton, 2004). Ωστόσο στα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης, η απουσία της γλουτένης συνεπάγεται το σχηματισμό ζυμαριού με μικρή ικανότητα αντίστασης στις μηχανικές καταπονήσεις κατά το στάδιο της επώασης και κατ' επέκταση σε μειωμένη ικανότητα συγκράτησης αερίων. Ως αποτέλεσμα ο χρόνος επώασης των αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη είναι σημαντικά μειωμένος σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα σίτου και τα τελικά προϊόντα έχουν υποδεέστερη γεύση και μικρότερη διάρκεια ζωής (Gallagher et al, 2004).

Επιπλέον, η κοκκομετρία του αλεύρου επηρεάζει την αρτοποιητική του ικανότητα, καθώς μεταβάλλει τις ρεολογικές ιδιότητες του ζυμαριού. Συγκεκριμένα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αρτοσκευάσματος χωρίς γλουτένη από άλευρο σόργου επηρεάστηκαν από την κοκκομετρία και την χημική σύσταση του αλεύρου (Trappey et al., 2015). Σύμφωνα με τους de la Hera et al., (2012), η παρασκευή άρτου από χοντρόκοκκο άλευρο αραβοσίτου (>106 μm) παρουσίασε αυξημένη διόγκωση και μειωμένη σκληρότητα σε σχέση με το άλευρο μικρής κοκκομετρίας (<106 μm). Επιπλέον έχει αναφερθεί η επίδραση της κοκκομετρίας αλεύρου κάστανου στα ρεολογικά χαρακτηριστικά ζυμαριών άρτων ελεύθερων γλουτένης, καθώς η ενσωμάτωση αλεύρου κάστανου μικρής κοκκομετρίας μείωσε την ελαστικότητα του ζυμαριού (Moreira et al, 2010). Οι ρεολογικές ιδιότητες των ζυμαριών επηρεάζουν την ικανότητα συγκράτησης αερίου και την αντοχή τους κατά την επώαση. Ως εκ τούτου, ο έλεγχος και η κατανόηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του ζυμαριού καθώς και η παρακολούθηση της διαδικασίας επώασης μπορεί να ενισχύσει την ανάπτυξη υψηλής ποιότητας αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης. Η εκτίμηση της διόγκωσης του ζυμαριού κατά το στάδιο της επώασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση συσκευών, όπως το ρεοφερμετόμετρο (rheofermentometer (Chopin, Tripette & Renaud, France) ή και με την καταγραφή της διόγκωσης ως προς το χρόνο επώασης με την χρήση ψηφιακών τεχνικών απεικόνισης (Romano et al, 2007). Οι Chevallier et al., (2012) συνέκριναν τρεις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης της διόγκωσης του ζυμαριού κατά την επώαση. Οι δύο μέθοδοι βασίζονταν στην ανάλυση ψηφιακών απεικονίσεων που λήφθηκαν κατά την διάρκεια της επώασης, σε ζυμάρι το οποίο αφέθηκε να διογκωθεί ελεύθερα (free expansion) και σε ζυμάρι το οποίο αφέθηκε να διογκωθεί μόνο οριζόντια (horizontal method). Η τρίτη μέθοδος βασίστηκε στην καταγραφή του ύψους διόγκωσης ζυμαριού κατακόρυφα (vertical method), καθώς είχε τοποθετηθεί σε

διαβαθμισμένο κύλινδρο. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, μικρές διαφορές παρατηρήθηκαν μεταξύ των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων. Ωστόσο η κατακόρυφη μέθοδος είναι η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παρακολούθηση της επώασης ζυμαριού αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης, το οποίο είναι αρκετά ρευστό και προσομοιάζει τη ζύμη του κέικ.

Με βάση τις προηγούμενες πειραματικές σειρές (4^η -5^η) η υποκατάσταση του ρυζάλευρου με 15% χαρουπάλευρο για την ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης έδωσε τελικά προϊόντα με βελτιωμένα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά. Σκοπό της 7^{ης} πειραματικής σειράς αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στην ικανότητα διόγκωσης των ζυμαριών ελεύθερων γλουτένης κατά την επώαση με μεταβολή της περιεκτικότητας σε νερό, καθώς η περιεκτικότητα σε νερό στα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης προσδιορίζεται συνήθως με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Η μεταβολή της διόγκωσης μοντελοποιήθηκε με χρήση της εξίσωσης του Baranyi, μια εξίσωση, η οποία χρησιμοποιείται στην προρρητική μικροβιολογία για τον υπολογισμό του ρυθμού ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Παρασκευάστηκαν ζυμάρια και τα αντίστοιχα ψημένα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με υποκατάσταση του ρυζάλευρου με 15% χαρουπάλευρο σε τέσσερις διαφορετικές κοκκομετρίες και περιεκτικότητες σε νερό από 100%-160% και αξιολογήθηκαν: α) η επίδραση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου και β) του νερού στην ικανότητα διόγκωση των ζυμαριών και στις φυσικές ιδιότητες των ψημένων αρτοσκευασμάτων (σκληρότητα ψίχας, συνολικό πορώδες και μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας). Η γνώση της επίδρασης της κοκκομετρίας στην ικανότητα διόγκωσης των ζυμαριών και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων, μπορεί να προάγει την παραγωγή υψηλότερης ποιότητας αρτοσκευασμάτων χωρίς γλουτένη πλούσιων σε διαιτητικές ίνες.

Στους Πίνακες 5.7.1, 5.7.2 και 5.7.3 που ακολουθούν αναφέρονται τα χαρακτηριστικά κάθε κοκκομετρίας χαρουπάλευρου, οι συνδυασμοί που μελετήθηκαν στην 7^η σειρά πειραμάτων και η συνταγή της αρτοποιήσης που ακολουθήθηκε.

Πίνακας 5.7.1 Χαρακτηριστικά κοκκομετρικών κλασμάτων χαρουπάλευρου.

Κλάσμα χαρουπάλευρου	A	B	C	D
d ₅₀ (μm)	258.55 (0.68) ^a	174.73 (0.45) ^b	126.37 (2.10) ^c	80.36 (6.38) ^d
Υγρασία (%)	9.74 (0.03) ^c	9.19 (0.03) ^a	9.31 (0.01) ^a	9.52 (0.18) ^b
Πρωτεΐνη (%)	14.93 (0.24) ^a	22.69 (0.74) ^c	25.70 (0.03) ^d	18.86 (0.09) ^b
Διαιτητικές ίνες (%)	65.61 (2.34) ^c	51.80 (2.67) ^b	43.46 (1.45) ^a	53.25 (1.64) ^b
Τέφρα (%)	3.56 (0.16) ^b	4.85 (0.02) ^c	5.46 (0.02) ^d	2.91 (0.04) ^a
WBC (g νερού/ g αλεύρου)	7.02 (0.12) ^b	5.61 (0.25) ^a	5.77 (0.17) ^a	7.33 (0.59) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά (p < 0.05).

Πίνακας 5.7.2 Συνδυασμοί κοκκομετρίας χαρουπάλευρου και περιεκτικότητας σε νερό που μελετήθηκαν.

Κλάσμα χαρουπάλευρου	A	B	C	D
	100	100	100	100
	110	110	110	110
Περιεκτικότητα σε νερό %	120	120	120	120
(ποσοστό % επί του βάρους του αλεύρου)	130	130	130	130
	140	140	140	140
	150	150	150	150
	160			

Πίνακας 5.7.3 Βασική συνταγή για την Παρασκευή των αρτοσκευασμάτων.

Συστατικό	Ποσοστό (%) επί του βάρους του μίγματος αλεύρων*
Νερό	Μεταβλητό
Μαγιά	6
Αλβουμίνη	4
Πρωτεΐνη γάλακτος	4
Λιπαρό	3.5
Ζάχαρη	3
Αλάτι	2
Γαλακτοματοποιητής – DATEM	0.5
Κόμμι χαρουπιού- LBG	0.5
Ένζυμο	0.1

* Ως μίγμα αλεύρων ορίζεται το άθροισμα του ρυζάλευρου και του χαρουπάλευρου με λόγο προσθήκης ρυζάλευρο/ χαρουπάλευρο (85/15).

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των κοκκομετρικών κλασμάτων του χαρουπάλευρου (Πίνακας 5.7.1) μπορεί να παρατηρηθεί η μεταβολή στην χημική σύσταση των τριών κλασμάτων που λήφθηκαν με κοσκίνιση (A, B, C). Το πρωτεϊνικό περιεχόμενο αυξάνει με την μείωση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου, ενώ αντιθέτως η περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες μειώνεται, λόγω της διαφορετικής ευθρυπτότητας των επιμέρους συστατικών του σπόρου (φλοιός, ενδοσπέρμιο και φύτρο) (Karababa & Coşkuner, 2013). Το ενδοσπέρμιο είναι πλούσιο σε διαιτητικές ίνες, γαλακτομαννάνες, ενώ το φύτρο είναι πλούσιο σε πρωτεΐνη, καρουβίνη. Ο φλοιός και το ενδοσπέρμιο είναι πιο σκληρά από το έμβρυο με αποτέλεσμα να αλέθονται δυσκολότερα σε μικρή κοκκομετρία σε σχέση με το έμβρυο (El Batal and Hasib, 2013). Συνεπώς το κλάσμα A αποτελείται από υψηλότερα ποσοστά φλοιού και ενδοσπερμιού σε αντίθεση με το κλάσμα C, το οποίο αποτελείται κυρίως από το φύτρο του σπόρου. Επιπλέον, το φύτρο του χαρουπιού περιέχει έλαιο σε ποσοστά 5-8% (Maza et al., 1989), γεγονός το οποίο μπορεί να εξηγήσει τα υψηλότερα ποσοστά τέφρας στα κλάσματα B,C, τα οποία περιέχουν υψηλά ποσοστά πρωτεΐνης.

5.7.1 Κινητική διόγκωσης στο στάδιο της επώασης

Η κινητική διόγκωσης των ζυμαριών μελετήθηκε με την καταγραφή της μεταβολής του όγκου $\frac{V(t) - V_0}{V_0}$, ως συνάρτηση του χρόνου επώασης. Η διόγκωση, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι αποτέλεσμα της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα από την δράση της μαγιάς και της μετανάστευσής του στους πυρήνες αερίου που σχηματίζονται κατά το στάδιο της ανάμιξης. Καθώς η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα σχετίζεται με τον μεταβολισμό της μαγιάς, η καμπύλη διόγκωσης του ζυμαριού, θα έχει το ίδιο σχήμα με την καμπύλη ανάπτυξης της, η οποία είναι κυρίως σιγμοειδούς μορφής.

Επομένως επιλέχθηκε να γίνει προσαρμογή της κινητικής διόγκωσης των ζυμαριών στην εξίσωση του Baranyi και οι παράμετροι τροποποιήθηκαν ώστε να σχετίζονται με τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διαδικασία της επώασης των αρτοσκευασμάτων.

$$V(t) = V_0 + \mu_{max} \cdot A(t) - \ln \left[1 + \frac{\exp(\mu_{max} \cdot A(t)) - 1}{\exp(V_{max} - y_0)} \right]$$

και

$$A(t) = t + \frac{1}{\mu_{max}} \cdot \ln [\exp(-\mu_{max} \cdot t) + \exp(-\mu_{max} \cdot \lambda) - \exp(-\mu_{max} \cdot (t + \lambda))]$$

όπου $A(t)$ συνάρτηση (προσαρμογής) της εξίσωσης Baranyi, $V(t)$ και V_0 αντιπροσωπεύουν την διόγκωση του ζυμαριού σε χρόνο t και χρόνο μηδέν αντίστοιχα, το V_{max} αντιπροσωπεύει την μέγιστη διόγκωση του ζυμαριού, το μ_{max} αντιπροσωπεύει τον μέγιστο ρυθμό διόγκωσης και το λ τον χρόνο υστέρησης της διαδικασίας διόγκωσης. Οι παράμετροι V_{max} , μ_{max} και λ της εξίσωσης Baranyi, θεωρήθηκαν συναρτήσεις της περιεκτικότητας σε νερό και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.7.4**. Οι καμπύλες διόγκωσης των ζυμαριών ως προς τον χρόνο επώασης για τους συνδυασμούς κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου και περιεκτικότητας σε νερό που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.7.1, 5.7.2, 5.7.3 και 5.7.4**.

Η παράμετρος λ εμφάνισε δευτέρου βαθμού εξάρτηση από την περιεκτικότητα σε νερό, υποδεικνύοντας έναν ελάχιστο σε διάρκεια χρόνο λανθάνουσας φάσης για συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε νερό, σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χαρουπάλευρου που μελετήθηκε. Η μεταβολή του χρόνου υστέρησης λ ως προς την περιεκτικότητα σε νερό, μπορεί να αποδοθεί στην δράση της μαγιάς κατά την διαδικασία επώασης του ζυμαριού. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή της διόγκωσης του ζυμαριού, στην φάση επώασης, είναι συνδυασμός του χρόνου που απαιτείται μέχρι να ξεκινήσει η ζύμωση των σακχάρων από τα κύτταρα της μαγιάς και του χρόνου διάχυσης του CO_2 , που παράγεται, στις κυψελίδες αερίου του ζυμαριού (Cooper & Reed, 1968). Συνεπώς, η αύξηση του περιεχόμενου νερού, οδήγησε στην αυξημένη ανάπτυξη των κυττάρων της μαγιάς, μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο υστέρησης λ της διαδικασίας επώασης. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε νερό αποτελεί κρίσιμο παράγοντα της αρτοποιικής διαδικασίας, καθώς επηρεάζει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ζυμαριού. Το ζυμάρι του άρτου πρέπει να χαρακτηρίζεται από ισορροπία μεταξύ του ιξώδους και του

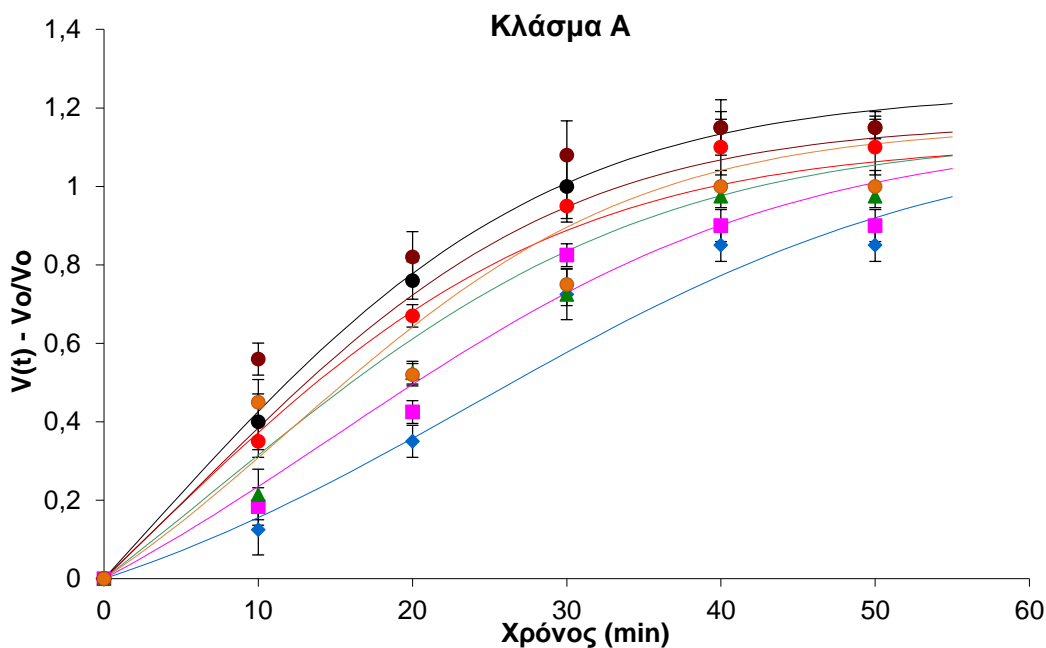
ελαστικού χαρακτήρα. Συγκεκριμένα το ζυμάρι πρέπει να είναι τόσο ιξώδες, ώστε να διατηρεί το CO₂ που παράγεται από την δράση της μαγιάς, όσο και ελαστικό ώστε να επιτρέπει την διόγκωση των κυψελίδων αέρα και την συννένωσή τους με τις γειτονικές κυψελίδες, δημιουργώντας την χαρακτηριστική σπογγώδη δομή του άρτου (Onyang et al., 2009a). Συνεπώς, περαιτέρω αύξηση του νερού, πέρα από την περιεκτικότητα, για την οποία σημειώθηκε η ελάχιστη τιμή του χρόνου υστέρησης, οδήγησε σε ενίσχυση του ιξώδους χαρακτήρα του ζυμαριού, με αποτέλεσμα το παραγόμενο από την μαγιά CO₂ να διαφέυγει από το ζυμάρι καθυστερώντας την διόγκωσή του (αύξηση των τιμών του λ). Η επίδραση του νερού στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ του ιξώδους και του ελαστικού χαρακτήρα του ζυμαριού με την προσθήκη χαρουπάλευρου έχει αναφερθεί πιο διεξοδικά στην 3^η πειραματική σειρά.

Η παράμετρος μ_{max} αντιπροσωπεύει τον μέγιστο ρυθμό διόγκωσης του ζυμαριού και μπορεί να σχετιστεί με την φάση ανάπτυξης των κυττάρων της μαγιάς, όπου ο ρυθμός ανάπτυξής τους αυξάνει μονοτονικά μέχρι ενός σημείου καμπής στην αρχή της φάσης στασιμότητας. Η παράμετρος μ_{max} θεωρήθηκε ως γραμμική συνάρτηση του περιεχόμενου νερού του ζυμαριού, καθώς αύξηση του διαθέσιμου νερού, οδήγησε στην αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης κυττάρων της μαγιάς και κατ' επέκταση του ρυθμού διόγκωσης του ζυμαριού. Σύμφωνα με τους Marechal et al., (1995), μείωση της ενεργότητας νερού του μέσου καλλιέργειας κυττάρων μαγιάς (*Saccharomyces cerevisiae*) οδήγησε σε μείωση της κυτταρικής βιωσιμότητας και του παραγόμενου κυτταρικού όγκου. Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί πως ο μέγιστος ρυθμός διόγκωσης μ_{max} ήταν υψηλότερος για τα ζυμάρια με προσθήκη χαρουπάλευρου χαμηλής κοκκομετρίας (C, D), όπως προκύπτει και από τις τιμές των εξισώσεων του μ_{max} (η τιμή μ_1 ισοδυναμεί με την κλίση της ευθείας του ρυθμού μ_{max}).

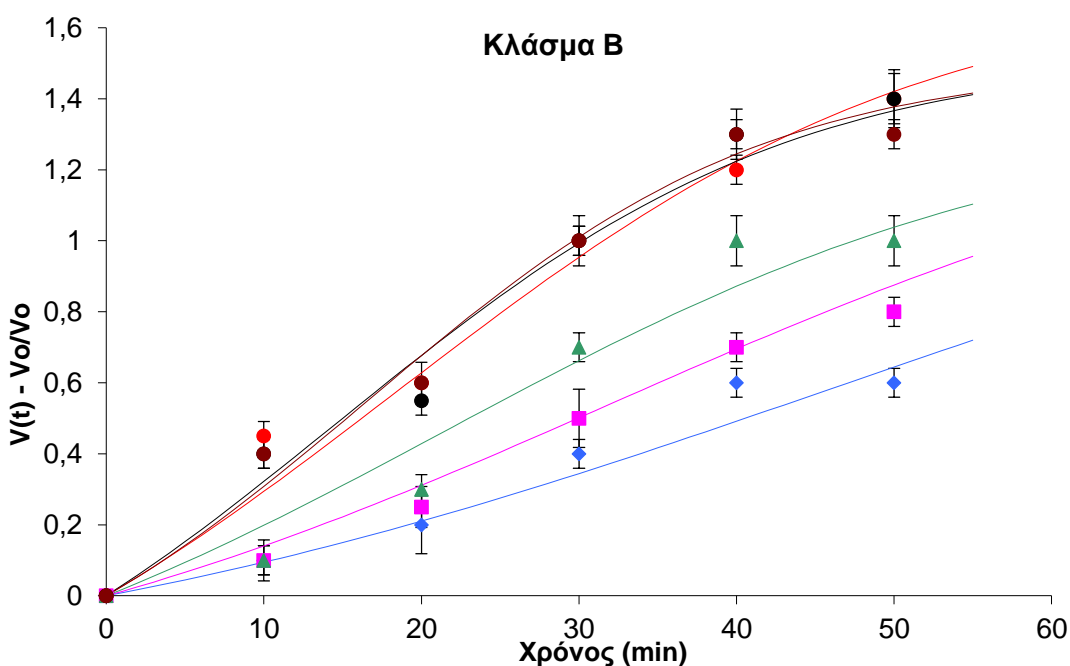
Η επίδραση του νερού στην μέγιστη διόγκωση του ζυμαριού V_{max} εμφάνισε εκθετική συσχέτιση. Οι υψηλότερες τιμές μέγιστης διόγκωσης V_{max} σημειώθηκαν για τα ζυμάρια με προσθήκη χαρουπάλευρου της κοκκομετρίας B, ενώ οι χαμηλότερες για τα ζυμάρια με την προσθήκη χαρουπάλευρου της κοκκομετρίας C, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα **Σχήματα 5.7.1, 5.7.2, 5.7.3 και 5.7.4**. Δεν παρατηρήθηκε σαφής τάση της μεταβολής της κοκκομετρίας στην μέγιστη διόγκωση του ζυμαριού, ωστόσο οι χαμηλές τιμές που παρατηρήθηκαν για την κοκκομετρία C, μπορούν να αποδοθούν στην χημική της σύσταση. Σύμφωνα με τους Crockett et al., (2011), η προσθήκη πρωτεΐνης σόγιας σε ζυμάρι άρτου, το οποίο περιείχε υδροκολλοειδές (υδροξυπροπυλομεθυλοκυτταρίνη –HPMC), μετέβαλε την λειτουργικότητα του υδροκολλοειδούς, λόγω ανταγωνισμού για το διαθέσιμο νερό, αποδυναμώνοντας την αλληλεπίδραση του υδροκολλοειδούς με το πλέγμα του αμύλου και μειώνοντας την σταθερότητα του ζυμαριού. Πιθανώς η παρουσία υψηλών ποσοστών πρωτεΐνης χαρουπιού στην κοκκομετρία C (περιεκτικότητα περίπου ίση με 3.7% επί του αλεύρου, με βάση την χημική ανάλυση του κλάσματος C), να περιόρισε την λειτουργικότητα του κόμματος χαρουπιού (από το ενδοσπέρμιο των κόκκων), οδηγώντας σε μικρότερες τιμές διόγκωσης του ζυμαριού- V_{max} . Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από τους Miñarro et al., (2012), για την προσθήκη πρωτεΐνης χαρουπιού σε ποσοστό 1.5% σε ζυμάρι άρτου ελεύθερου γλουτένης, το οποίο εμφάνισε την μικρότερη διόγκωση μετά

από 3 ώρες επώασης, συγκριτικά με τα ζυμάρια που περιείχαν πρωτεΐνες ρεβιθιού, μπιζελιού και σόγιας.

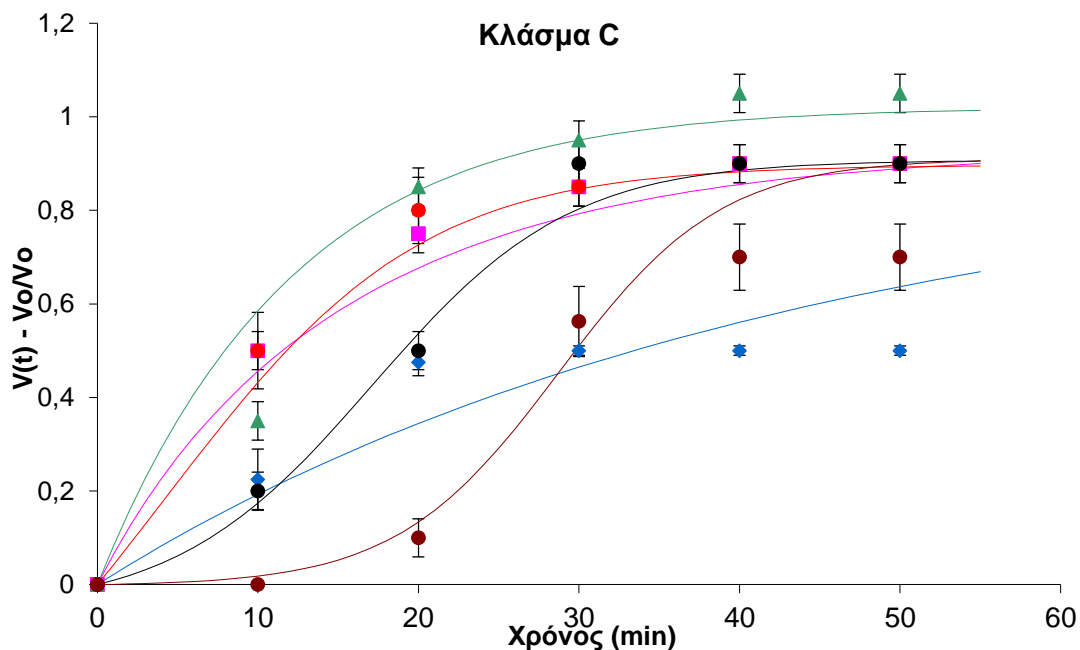
Τα ζυμάρια που παρασκευάστηκαν με τις υπόλοιπες τρεις κοκκομετρίες σημείωσαν υψηλότερα ποσοστά μέγιστης διόγκωσης, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς τους σε διαιτητικές ίνες και κυρίως κόμμι χαρουπιού. Έχει αναφερθεί η αύξηση της ικανότητας διατήρησης των κυψελίδων αέρα σε ζυμάρια άρτου με βάση το ρυζάλευρο από την συνδυασμένη προσθήκη κόμμιος χαρουπιού και γαλακτωματοποιητή-DATEM (ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διατριβή), βελτιώνοντας την διόγκωση των αρτοσκευασμάτων (Demirkesen et al., 2010a). Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε νερό στις συνταγές των ζυμαριών που παρασκευάστηκαν, μπορεί να παρατηρηθεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό προσθήκης νερού για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χαρουπάλευρου, για το οποίο σημειώνεται η μέγιστη διόγκωση του ζυμαριού. Το βέλτιστο ποσοστό περιεχόμενου νερού ήταν χαμηλότερο για τα λεπτόκοκκα κοκκομετρικά κλάσματα του χαρουπάλευρου (C, D), σε σχέση με τα χοντρόκοκκα, παρόλο που το κοκκομετρικό κλάσμα D σημείωσε αντίστοιχα υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού με το κλάσμα A. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί είτε στην χαμηλότερη ικανότητα συγκράτησης νερού του κλάσματος C, είτε σε πιθανή μεταβολή της μήτρας των ινών από την εφαρμογή της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στο κλάσμα D. Σύμφωνα με τους Sangnark & Noomhorm (2003), οι πειραματικές παράμετροι κατά την μέτρηση των ιδιοτήτων ενυδάτωσης των ινών, όπως η ταχύτητα ή ο χρόνος ανάδευσης, μπορεί να μεταβάλλουν την φυσική δομή των ινών προκαλώντας μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητες ενυδάτωσης. Πιθανώς, η επίδραση της ανάμιξης κατά τον σχηματισμό του ζυμαριού, να οδήγησε στην αντίστροφη σχέση που παρατηρήθηκε μεταξύ των ιδιοτήτων ενυδάτωσης και του βέλτιστου περιεχόμενου νερού στο ζυμάρια του κλάσματος D. Πιο συγκεκριμένα, οι βέλτιστοι συνδυασμοί περιεκτικότητας σε νερό για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα ήταν 140%-150% για το κλάσμα A, 130-140% για το κλάσμα B, 120% για το κλάσμα C και 130% για το κλάσμα D. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τιμές της σταθεράς V_{max2} για κάθε κοκκομετρία βρίσκονται πολύ κοντά στο βέλτιστο εύρος περιεκτικότητας σε νερό που μεγιστοποιεί την διόγκωση της ζύμης, όπως παρατηρήθηκε από τα **Σχήματα 5.7.1, 5.7.2, 5.7.3 και 5.7.4** και μπορεί να θεωρηθεί ως αντιπροσωπευτικός δείκτης της βέλτιστης περιεκτικότητας σε νερό για κάθε κοκκομετρία. Ωστόσο, η ικανότητα διόγκωσης του ζυμαριού, δεν εξασφαλίζει απαραίτητα την διατήρηση υψηλής διόγκωσης στα ψημένα αρτοσκευάσματα, καθώς κατά το στάδιο του ψησίματος, οι πιέσεις που υφίστανται οι κυψελίδες του αέρα στο ζυμάρια, λόγω του παραγόμενου ατμού και του CO₂ που διαστέλλεται, μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση της δομής, με μειωμένο τελικό όγκο άρτου. Συνεπώς είναι απαραίτητη η μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών των ψημένων αρτοσκευασμάτων, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό για κάθε κοκκομετρία, η οποία παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.7.2 που ακολουθεί.



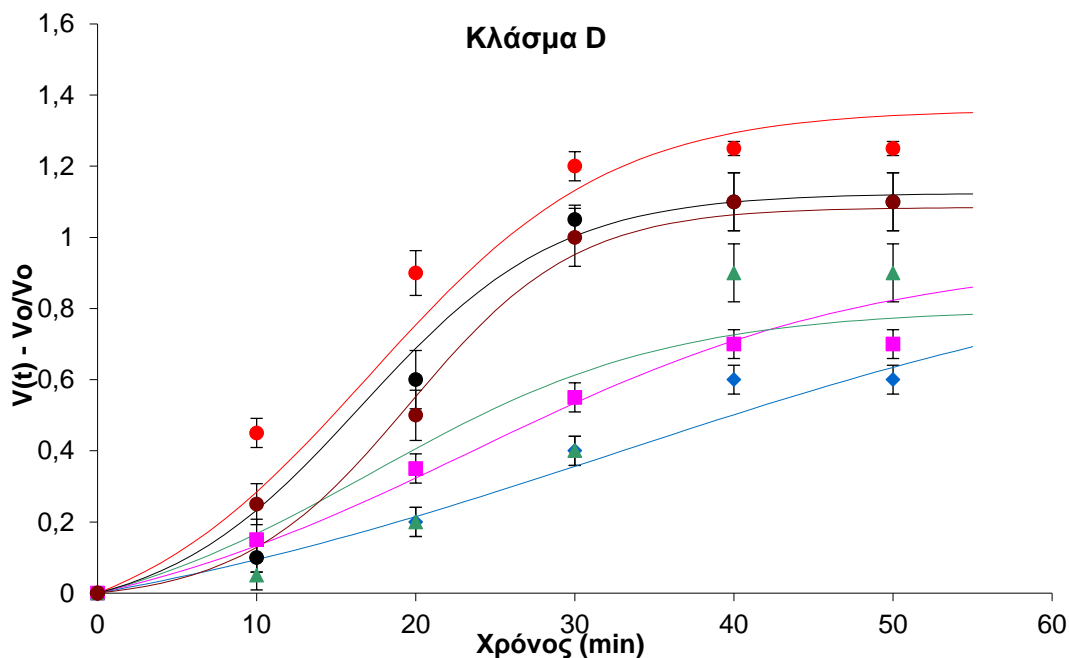
Σχήμα 5.7.1 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην διόγκωση του ζυμαριού άρτου με χαρουπάλευρο του κλάσματος A. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τεσσάρων επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου ($R^2=0.964$). Περιεκτικότητα σε νερό %: \blacklozenge 100, \blacksquare 110, \blacktriangle 120, \bullet 130, \bullet 140, \bullet 150, \bullet 160.



Σχήμα 5.7.2 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην διόγκωση του ζυμαριού άρτου με χαρουπάλευρο του κλάσματος B. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τεσσάρων επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου ($R^2=0.979$). Περιεκτικότητα σε νερό %: \blacklozenge 100, \blacksquare 110, \blacktriangle 120, \bullet 130, \bullet 140, \bullet 150.



Σχήμα 5.7.3 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην διόγκωση του ζυμαριού άρτου με χαρουπάλευρο του κλάσματος C. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τεσσάρων επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου ($R^2=0.957$). Περιεκτικότητα σε νερό %: \blacklozenge 100, \blacksquare 110, \blacktriangle 120, \bullet 130, \bullet 140, \bullet 150.



Σχήμα 5.7.4 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην διόγκωση του ζυμαριού άρτου με χαρουπάλευρο του κλάσματος D. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τεσσάρων επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου ($R^2=0.955$). Περιεκτικότητα σε νερό %: \blacklozenge 100, \blacksquare 110, \blacktriangle 120, \bullet 130, \bullet 140, \bullet 150.

Πίνακας 5.7.4 Μαθηματικά μοντέλα των παραμέτρων της εξίσωσης Baranyi ως προς το νερό για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χαρουπάλευρου που μελετήθηκε.

λ - χρόνος υστέρησης της διαδικασίας διόγκωσης				
$\lambda = \lambda_o + \lambda_1 * Water + \lambda_2 * Water^2$				
μ_{max} – μέγιστος ρυθμός διόγκωσης				
$\mu_{max} = \mu_o + \mu_1 * Water$				
V_{max} – μέγιστη διόγκωση ζυμαριού				
$V_{max} = V_{maxo} \cdot \exp(V_{max1} / (V_{max2} - Water))$				
	Fraction	λ_o	λ_1	λ_2
λ	A	209.12 (38.80) ^b	-2.99 (0.51) ^a	0.010 (0.001) ^a
	B	291.66 (13.07) ^b	-4.03 (0.27) ^a	0.014 (0.001) ^a
	C	28.18 (44.80) ^a	-1.27 (2.88) ^a	0.008 (0.008) ^a
	D	246.36 (66.29) ^b	-3.52 (1.00) ^a	0.013 (0.003) ^a
		μ_o	μ_1	
μ_{max}	A	0.021 (0.071) ^b	0.00044 (0.00048) ^a	
	B	-0.055 (0.018) ^b	0.00093 (0.00013) ^a	
	C	-0.329 (0.100) ^a	0.00353 (0.00106) ^b	
	D	-0.234 (0.027) ^a	0.00286 (0.00022) ^b	
		V_{maxo}	V_{max1}	V_{max2}
y_{max}	A	11.14 (0.06) ^a	-0.021 (0.008) ^b	137.54 (1.10) ^c
	B	11.46 (0.06) ^a	-0.065 (0.039) ^b	126.88 (1.08) ^b
	C	10.91 (0.08) ^a	0.014 (0.067) ^c	121.57 (7.79) ^a
	D	11.02 (0.07) ^a	-0.122 (0.006) ^a	125.85 (0.45) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$).

5.7.2 Φυσικές ιδιότητες των αρτοσκευασμάτων

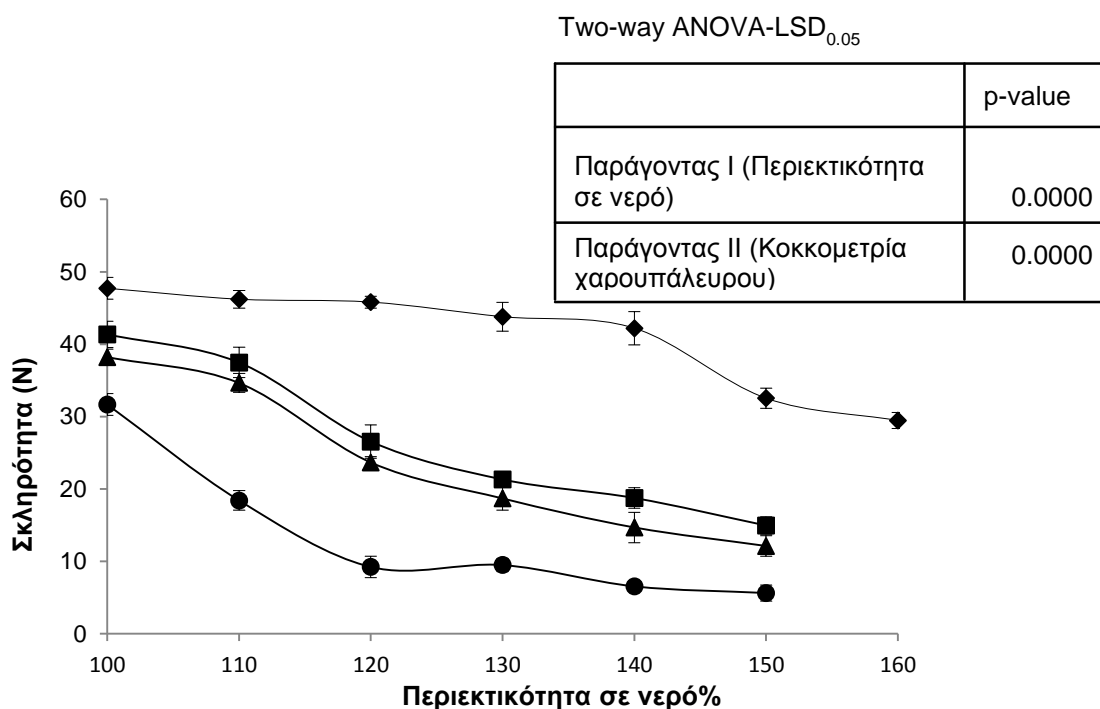
Η σκληρότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων που παρασκευάστηκαν με κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χαρουπάλευρου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.7.5**. Η περιεκτικότητα σε νερό επηρέασε στατιστικά σημαντικά την σκληρότητα της ψίχας ($p=0.0000$). Αύξηση του περιεχόμενου νερού, οδήγησε σε μείωση των τιμών της σκληρότητας της ψίχας για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα του χαρουπάλευρου που χρησιμοποιήθηκε. Ωστόσο, η μείωση της σκληρότητας της ψίχας για τα αρτοσκευάσματα που παρασκευάστηκαν με το κλάσμα A, μπορεί να παρατηρηθεί σε περιεκτικότητες σε νερό υψηλότερες του 140%. Αντιθέτως, στα αρτοσκευάσματα που παρασκευάστηκαν με τα υπόλοιπα κοκκομετρικά κλάσματα, η σκληρότητα της ψίχας εμφάνισε μια απότομη μείωση σε χαμηλές περιεκτικότητες σε νερό, ενώ από το 130% και άνω μπορεί να σημειωθεί ένα πλατό. Η περιεκτικότητα σε νερό αποτελεί σημαντική παράμετρο της αρτοποιητικής διαδικασίας και στα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης προσδιορίζεται συνήθως με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Σύμφωνα με τους Gallagher et al. (2003a), η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό σε άρτο χωρίς γλουτένη με προσθήκη πρωτεϊνών γάλακτος, οδήγησε σε τελικά προϊόντα με μαλακή ψίχα, εύρημα το οποίο αποδόθηκε στην μείωση του ρυθμού αναδιάταξης του αμύλου, λόγω της παρουσίας επιπλέον νερού. Επιπλέον, το μέγεθος των σωματιδίων του χαρουπάλευρου (d_{50}) επέδρασε στατιστικά σημαντικά ($p=0.0000$) στην σκληρότητα της ψίχας. Για σταθερή περιεκτικότητα σε νερό, η προσθήκη χαρουπάλευρου με μειωμένο μέγεθος σωματιδίων οδήγησε στην παρασκευή άρτου με μαλακότερη ψίχα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην διαφορετική χημική σύσταση των κλασμάτων του χαρουπάλευρου. Τα αρτοσκευάσματα που παρήχθησαν με χαρουπάλευρο του κλάσματος A περιέχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες σε αντίθεση με τα αρτοσκευάσματα που παρασκευάστηκαν με το κλάσμα C, το οποίο έχει σημαντικά υψηλότερη πρωτεΐνη. Λόγω των διαφορών στην χημική σύσταση των κλασμάτων, μπορεί να παρατηρηθεί και μεταβολή της ικανότητας δέσμευσης νερού (WBC). Το κλάσμα A εμφάνισε σημαντικά υψηλότερη ικανότητα δέσμευσης σε σχέση με το κλάσμα C, επομένως χαμηλές τιμές περιεκτικότητας σε νερό στο ζυμάρι με προσθήκη χαρουπάλευρου του κλάσματος A, πιθανώς οδήγησαν σε υποενυδατωμένο σύστημα με μειωμένη διόγκωση και αυξημένη σκληρότητα ψίχας. Επιπλέον, τα αρτοσκευάσματα που παρασκευάστηκαν με το κλάσμα C, περιείχαν περίπου ίση με 3.7% πρωτεΐνη από το φύτρο (υπολογισμός με βάσει την πρωτεϊνική περιεκτικότητα του κλάσματος C). Σύμφωνα με τους Smith et al. (2012), αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με προσθήκη πρωτεΐνης από το φύτρο του χαρουπιού σε ποσοστά μέχρι 7% παρουσίασαν μειωμένη σκληρότητα ψίχας. Εκτός από την χημική σύσταση των κλασμάτων του χαρουπάλευρου, σημαντική επίδραση στην υφή των άρτων παρουσιάζει και το μέγεθος των σωματιδίων. Μολονότι μεταξύ των κλασμάτων B και D δεν σημειώθηκε σημαντική διαφορά στο περιεχόμενο ποσοστό διαιτητικών ινών, τα αρτοσκευάσματα που περιείχαν χαρουπάλευρο κοκκομετρίας D, σημείωσαν σημαντικά πιο μαλακή ψίχα. Σύμφωνα με τους Sangnark & Noomhorm (2004), η ενσωμάτωση μικρότερου μεγέθους σωματιδίων διαιτητικών ινών από

ζαχαροκάλαμο σε άρτο με βάση το σίτο, οδήγησε σε τελικό προϊόν με πιο μαλακή και ελαστική ψίχα, σε σχέση με την χρήση των χοντρόκοκκων ινών.

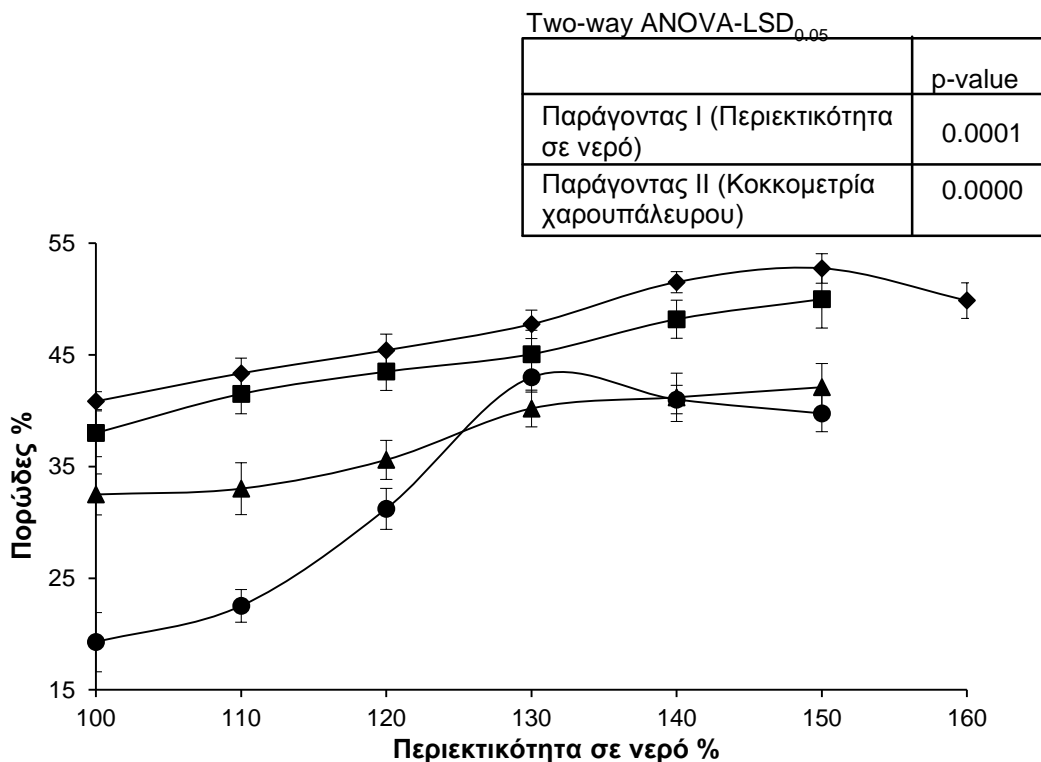
Το πορώδες αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της ποιότητας των άρτων, με υψηλές τιμές πορώδους να είναι επιθυμητές από τους καταναλωτές. Στο **Σχήμα 5.7.6** παρατίθενται οι τιμές του πορώδους για τα αρτοσκευάσματα που μελετήθηκαν. Σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης (two-way ANOVA), η περιεκτικότητα σε νερό και η κοκκομετρία του χαρουπάλευρου παρουσίασε στατιστικά σημαντική επίδραση στο πορώδες των άρτων. Αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό, οδήγησε σε αύξηση του πορώδους των άρτων, ωστόσο παρατηρήθηκε ένα βέλτιστο επίπεδο περιεκτικότητας σε νερό, πέραν του οποίου το πορώδες παρέμεινε σταθερό ή μειώθηκε. Η τάση αυτή ήταν περισσότερο εμφανής για τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο κοκκομετρίας D, στα οποία η καμπύλη της μεταβολής του πορώδους με την περιεκτικότητα σε νερό ακολούθησε την καμπύλη ανάπτυξης της ζύμης. Έχει αναφερθεί θετική συσχέτιση σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$ μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό και του πορώδους άρτων που περιείχαν άλευρο αμάρανθου (Schoenlechner et al., 2010). Αναφορικά με την επίδραση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου, η μείωση του μεγέθους σωματιδίων προκάλεσε μείωση του πορώδους για σταθερή περιεκτικότητα σε νερό. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για την προσθήκη πίτυρων σίτου σε αρτοσκευάσματα με βάση το άλευρο σίτου, όπου η ενσωμάτωση λεπτόκοκκων κλασμάτων πίτυρου μείωσε την διόγκωση των άρτων (Noort et al., 2010). Τα αποτελέσματα των κινητικών διόγκωσης των ζυμαριών επιβεβαιώνουν τις φυσικές ιδιότητες των άρτων που μελετήθηκαν. Οι τιμές της περιεκτικότητας σε νερό, για τις οποίες βελτιστοποιείται το πορώδες των άρτων, συμπίπτουν με τις τιμές περιεκτικότητας σε νερό για τη μεγιστοποίηση της διόγκωσης των ζυμαριών κατά την επώαση και πιο συγκεκριμένα των τιμών y_{max} . Συγκεκριμένα, περιεκτικότητα 150%, 140%, 120% και 130% σε νερό στα αρτοσκευάσματα, που περιέχουν τα αντίστοιχα κλάσματα χαρουπάλευρου A, B, C και D, οδήγησε στην παρασκευή άρτων με υψηλή διόγκωση και μειωμένη σκληρότητα ψίχας.

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων που παρασκευάστηκαν, όπως το μέσο μέγεθος πόρων, η πυκνότητα πόρων και ο δείκτης ομοιομορφίας των πόρων παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.7.7, 5.7.8 και 5.7.9**. Μπορεί να παρατηρηθεί η στατιστικά σημαντική επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στην πυκνότητα των πόρων, στο μέσο μέγεθος και στην ομοιομορφία των πόρων. Αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό, οδήγησε σε σημαντική μείωση του αριθμού των πόρων (πυκνότητα πόρων) συνοδευόμενη από μια απότομη αύξηση του μέσου μεγέθους των πόρων. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, υψηλή περιεκτικότητα σε νερό στα αρτοσκευάσματα, οδηγεί στον σχηματισμό μεγάλων κυψελίδων αέρα στην ψίχα του άρτου, με αποτέλεσμα επίσης και τη μείωση της σκληρότητας της ψίχας (Schoenlechner et al., 2010), όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης (**Σχήμα 5.7.5**). Για χαμηλά ποσοστά περιεκτικότητας σε νερό (100-110%), τα αρτοσκευάσματα παρουσίασαν πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας πόρων με ταυτόχρονα πολύ μικρές τιμές μέσου μεγέθους πόρων, οι οποίες χαρακτηρίζουν μια πυκνή και συνεκτική δομή με υψηλή σκληρότητα ψίχας.

Η ομοιομορφία των πόρων υπολογίζεται ως η τυπική απόκλιση της μέσης επιφάνειας των πόρων. Όσο υψηλότερη είναι η τυπική απόκλιση, υπάρχει μεγαλύτερη διακύμανση του μεγέθους των πόρων, σηματοδοτώντας μικρότερη ομοιομορφία πόρων. Η ομοιομορφία των πόρων μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό (αύξηση της τυπικής απόκλισης του μέσου μεγέθους πόρων συνδέεται με μείωση της ομοιομορφίας), οδηγώντας στον σχηματισμό μεγάλων και ανομοιόμορφα καταναμημένων κυψελίδων αέρα (Σχήματα 5.7.7, 5.7.9, 5.7.10). Τα αρτοσκευάσματα με προσθήκη χαρουπάλευρου των κλασμάτων Α και C παρουσιάζουν την πιο ομοιόμορφη επιφάνεια ψίχας (μικρές τιμές δείκτη ομοιομορφίας). Το μέγεθος των πόρων επηρεάζει την υφή κατά την μάσηση των άρτων, καθώς πολλοί και ομοιόμορφα καταναμημένοι μεσαίου μεγέθους πόροι χαρακτηρίζουν την μαλακή και ελαστική υφή του άρτου, ιδιότητες οι οποίες προτιμούνται από τους καταναλωτές (Angioloni & Collar, 2009b). Το μέγεθος των πόρων των άρτων μπορεί να καταναμηθεί διαστασιολογικά στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες με βάση την επιφάνειά τους σε: μικρούς < 0.8 mm²; μεσαίους: 0.8 - 4.0 mm²; μεγάλους > 4.0 mm² (Mariotti et al, 2013). Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα, οι συνδυασμοί περιεκτικότητας σε νερό 150%, 140%, 120% και 130% για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα fraction A, B, C, D αντίστοιχα, εκτός από τις βελτιωμένες δομικές ιδιότητες τους (μειωμένη σκληρότητα, υψηλό πορώδες) παρουσίασαν και υψηλό αριθμό μεσαίου μεγέθους πόρων.

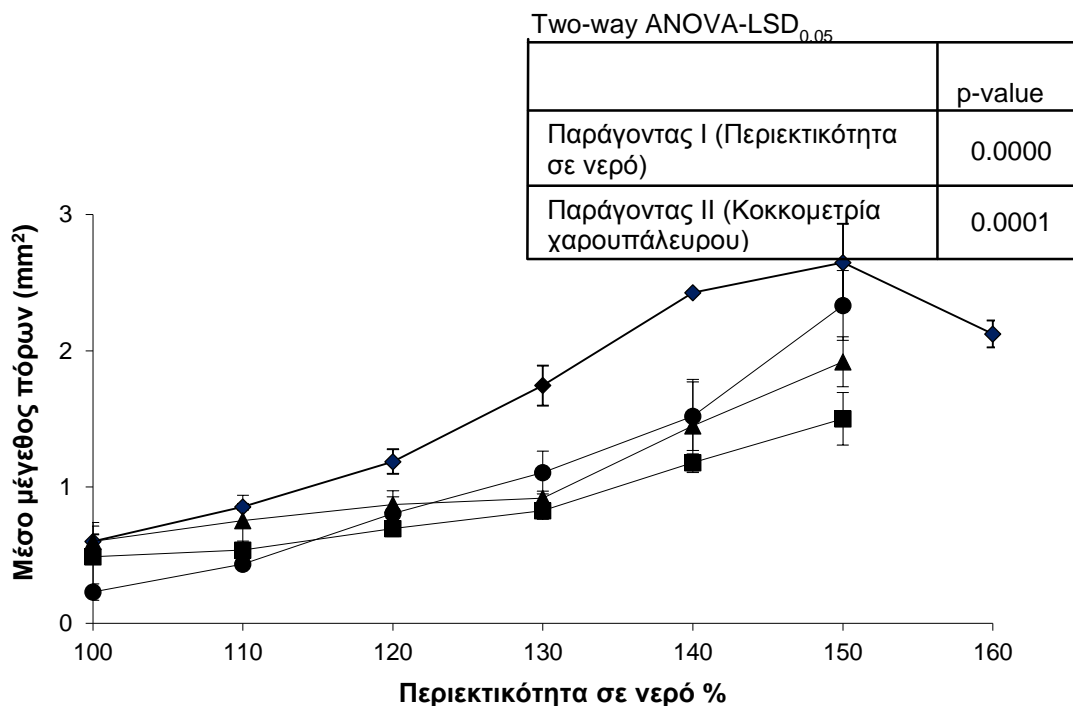


Σχήμα 5.7.5 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στην σκληρότητα της ψίχας των άρτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. ♦ Κλάσμα A, ■ Κλάσμα B, ▲ Κλάσμα C, ● Κλάσμα D.



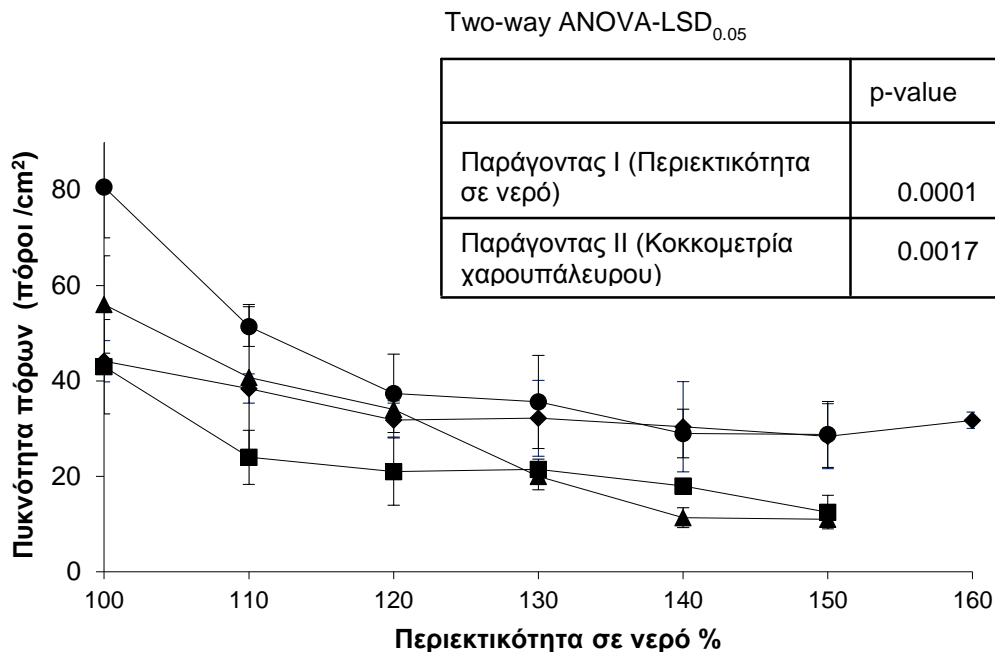
Σχήμα 5.7.6 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στο πορώδες της ψίχας των άρτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.

♦ Κλάσμα A, ■ Κλάσμα B, ▲ Κλάσμα C, ● Κλάσμα D.

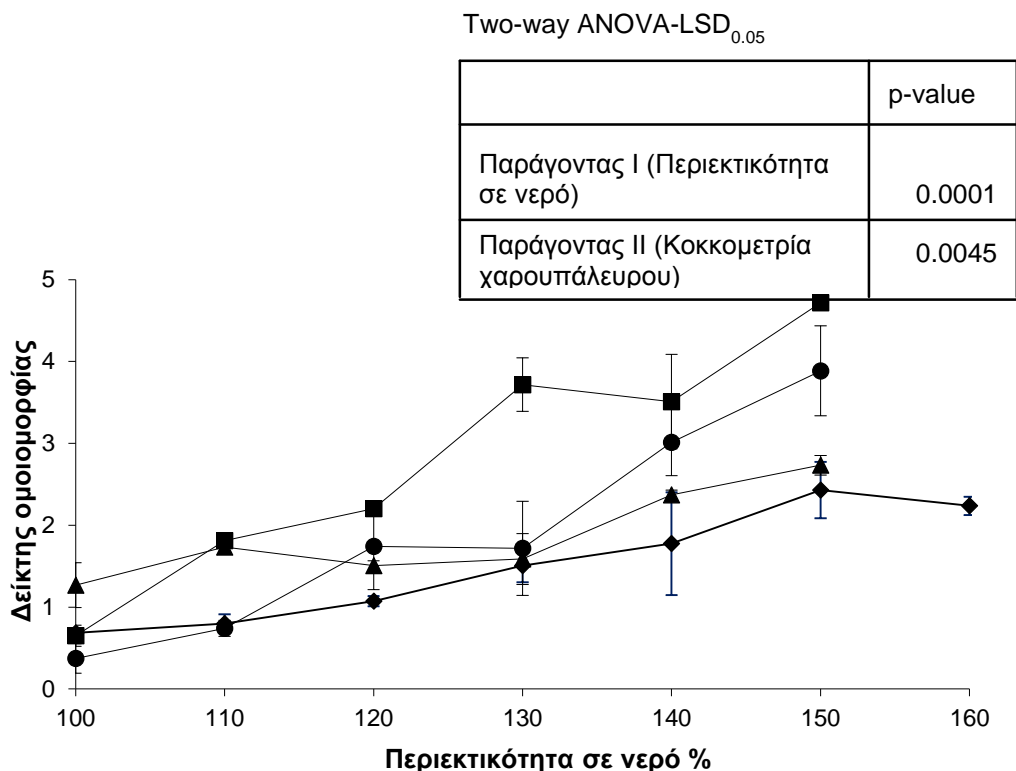


Σχήμα 5.7.7 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στο μέσο μέγεθος πόρων της ψίχας των άρτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση.

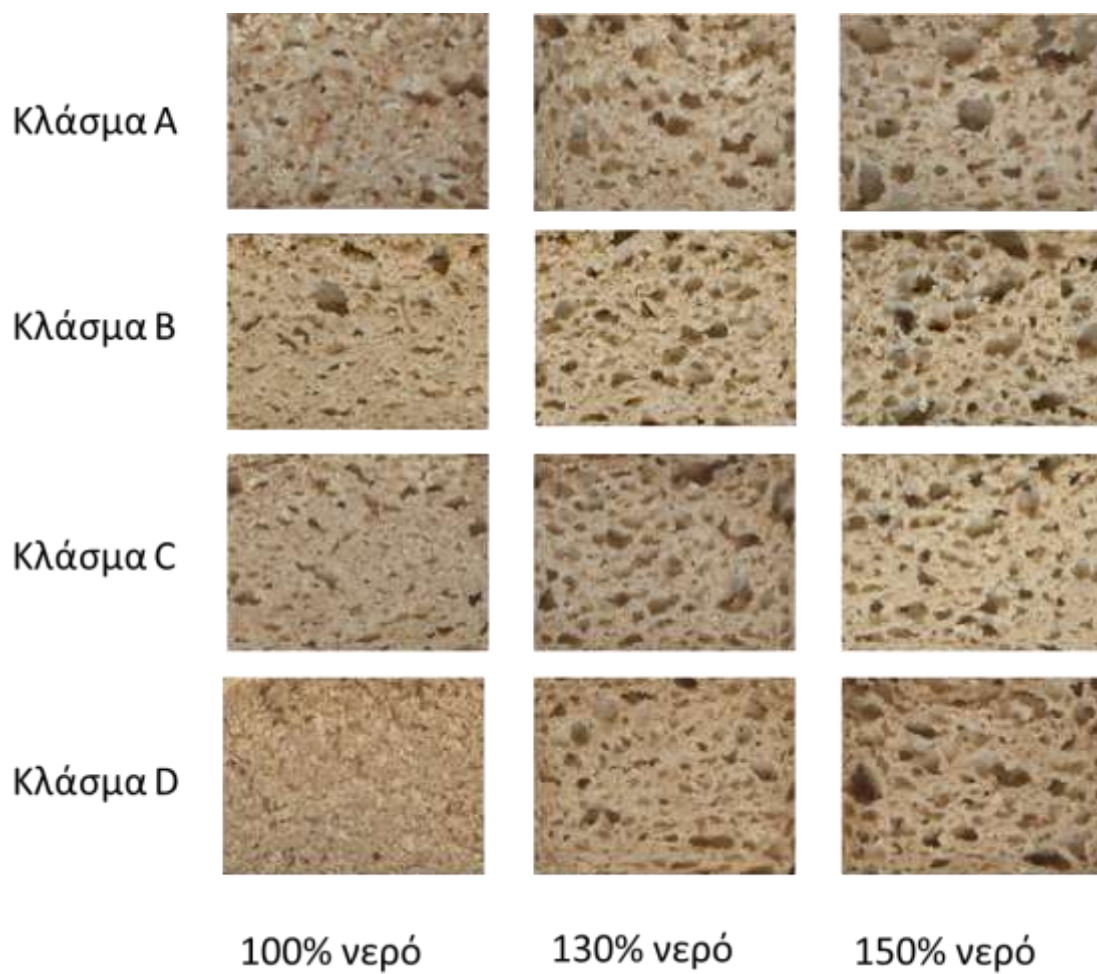
♦ Κλάσμα A, ■ Κλάσμα B, ▲ Κλάσμα C, ● Κλάσμα D.



Σχήμα 5.7.8 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στην πυκνότητα πόρων της ψίχας των άρτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. ♦ Κλάσμα A, ■ Κλάσμα B, ▲ Κλάσμα C, ● Κλάσμα D.



Σχήμα 5.7.9 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στον δείκτη ομοιομορφίας των πόρων της ψίχας των άρτων. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι τριών επαναλήψεων και οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. ♦ Κλάσμα A, ■ Κλάσμα B, ▲ Κλάσμα C, ● Κλάσμα D.



Σχήμα 5.7.10 Επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των άρτων.

5.7.3 Συμπεράσματα

Η χρήση διαφορετικών κοκκομετρικών κλασμάτων χαρουπάλευρου για την ανάπτυξη άρτων ελεύθερων γλουτένης, απαιτεί κατάλληλη ρύθμιση του περιεχόμενου νερού στο ζυμάρι, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη διόγκωση της ζύμης κατά την επώαση και τα τελικά προϊόντα να χαρακτηρίζονται από βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Σχετικά με την διόγκωση των ζυμαριών των άρτων παρατηρήθηκε ένα βέλτιστο σημείο περιεκτικότητας σε νερό διαφορετικό για κάθε κοκκομετρία το οποίο οδήγησε στην υψηλότερη διόγκωση. Η περιεκτικότητα σε νερό και η κοκκομετρία του χαρουπάλευρου επηρέασαν στατιστικά σημαντικά και τις φυσικές ιδιότητες των άρτων. Αύξηση του περιεχόμενου νερού προκάλεσε μείωση της σκληρότητας της ψίχας, και αύξηση του πορώδους των άρτων, ωστόσο σημειώθηκε ένα πλατό στην αύξηση του πορώδους, όπου με περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό δεν παρατηρήθηκε βελτίωσή του. Υψηλή περιεκτικότητα σε νερό οδήγησε στον σχηματισμό μεγάλου μεγέθους πόρων, ενώ μείωσε και την ομοιομορφία της ψίχας. Η αξιολόγηση των φυσικών ιδιοτήτων των ψημένων αρτοσκευασμάτων επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της μελέτης της διόγκωσης των ζυμαριών, καθώς οι βέλτιστοι συνδυασμοί περιεκτικότητας σε νερό 150%, 140%, 120% και 130% και κοκκομετρίας A, B, C, D αντίστοιχα οδήγησαν στην παρασκευή τελικών προϊόντων με επιθυμητά δομικά χαρακτηριστικά όπως μειωμένη σκληρότητα ψίχας, υψηλό πορώδες και μεσαίου μεγέθους πόρους ομοιόμορφα κατανεμημένους. Οι συνδυασμοί αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στην 8^η πειραματική σειρά, ώστε να μελετηθεί η κινητική παλαίωσής τους και να προσδιοριστεί η καταλληλότερη κοκκομετρία του χαρουπάλευρου για χρήση σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης.

5.8 Συγκριτική μελέτη άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη (8^η σειρά πειραμάτων)

Με βάση τα αποτελέσματα της 7^{ης} πειραματικής σειράς, προσδιορίστηκε η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χαρουπάλευρου που παρελήφθη λαμβάνοντας υπ' όψιν την ικανότητα διόγκωσης του ζυμαριού των άρτων καθώς και τις δομικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων που παρασκευάστηκαν. Σκοπό της 8^{ης} πειραματικής σειράς αποτέλεσε η συγκριτική μελέτη των άρτων που παρασκευάστηκαν με κάθε κοκκομετρικό κλάσμα χαρουπάλευρου και την βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό ως προς τα δομικά χαρακτηριστικά (διόγκωση, υφή, μορφολογικά χαρακτηριστικά ψίχας) αλλά και την διατηρησιμότητα των άρτων. Επιπλέον, τα δείγματα που αξιολογήθηκαν ως βέλτιστα συγκρίθηκαν με εμπορικά διαθέσιμα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης, ώστε να προσδιοριστούν τα πιθανά ελαττώματα των εργαστηριακών άρτων για μελλοντική βελτίωσή τους και να αξιολογηθεί η καταναλωτική τους αποδοχή (οργανοληπτική αξιολόγηση).

5.8.1 1^ο στάδιο: Αξιολόγηση των φυσικών ιδιοτήτων άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας.

Η κωδικοποίηση των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν, η περιεκτικότητα σε νερό για κάθε συνταγή και τα χαρακτηριστικά της κάθε κοκκομετρίας χαρουπάλευρου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.8.1**. Ως δείγμα αναφοράς παρασκευάστηκε άρτος με 100% ρυζάλευρο (Rice), ενώ στα υπόλοιπα δείγματα ενσωματώθηκε χαρουπάλευρο σε αναλογία ρυζάλευρο/χαρουπάλευρο 85/15. Οι φυσικές ιδιότητες που αξιολογήθηκαν ήταν ο ειδικός όγκος, η ελαστικότητα της ψίχας, το χρώμα και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.8.2**.

Η ενσωμάτωση χαρουπάλευρου στα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης που παρασκευάστηκαν επηρεάζει στατιστικά σημαντικά τον ειδικό όγκο, με τα δείγματα που περιείχαν χαρουπάλευρο της υψηλότερης και της χαμηλότερης κοκκομετρίας να εμφανίζουν αυξημένη διόγκωση, σε σχέση με τις ενδιάμεσες κοκκομετρίες, οι οποίες δεν διέφεραν από το δείγμα αναφοράς (control). Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να αποδοθεί είτε στις διαφορές στη χημική σύνθεση των κλασμάτων του χαρουπάλευρου ή στην τεχνική μείωσης της κοκκομετρίας αλεύρων. Το κλάσμα A και D περιείχε αυξημένες ποσότητες διαλυτών διαιτητικών ινών (πολυσακχαρίτες από το ενδοσπέρμιο του σπόρου χαρουπιού). Έχει αναφερθεί η βελτίωση της διόγκωσης αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης με την προσθήκη διαλυτών φυτικών ινών, όπως τα υδροκολλοειδή (Lazaridou et al., 2007). Όσον αφορά την κοκκομετρία του χαρουπάλευρου, η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων με την τεχνική της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα σε σχέση με την τεχνική της κοσκίνισης ήταν πιο αποτελεσματική στην αύξηση του ειδικού όγκου του άρτου, σε αντίθεση με τα αρτοσκευάσματα σίτου, όπου έχει αναφερθεί μείωση του όγκου με την ενσωμάτωση διαιτητικών ινών μειωμένου μεγέθους (Noort et al., 2010).

Πίνακας 5.8.1 Κωδικοποίηση των συνταγών.

Κωδικός δείγματος	Κλάσμα χαρουπάλευρου	Περιεκτικότητα σε νερό (%) επί του βάρους του αλεύρου	d ₅₀ (μm)
Rice	-	120	255.84 (1.54) ^b
CFa	A	150	258.55 (0.68) ^a
CFb	B	140	174.73 (0.45) ^c
CFc	C	120	126.37 (2.10) ^d
CFd	D	130	80.36 (6.38) ^e

Πίνακας 5.8.2 Φυσικές ιδιότητες άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας.

Κωδικός δείγματος	Ειδικός όγκος cm ³ /g	L*	a*	b*	Ελαστικότητα ψίχας REL %	Μέση επιφάνεια πόρων (mm ²)	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)
Rice	1.62 (0.16) ^a	81.7 (0.92) ^d	-4.89 (0.36) ^a	14.7 (0.38) ^a	52.05 (1.45) ^d	0.23 (0.07) ^a	64 (5) ^c
CFa	2.22 (0.07) ^b	63.3 (2.38) ^c	2.36 (0.01) ^b	15.1 (1.49) ^a	45.95 (1.39) ^{bc}	2.61 (1.36) ^c	17 (6) ^a
CFb	1.70 (0.07) ^a	61.7 (1.06) ^{bc}	4.43 (0.28) ^c	19.6 (0.71) ^b	44.60 (0.81) ^b	2.01 (0.83) ^c	21 (3) ^{ab}
CFc	1.61 (0.12) ^a	61.0 (2.05) ^b	4.16 (0.48) ^c	19.4 (0.66) ^b	49.23 (0.93) ^{cd}	1.43 (0.21) ^b	25 (3) ^b
CFd	2.21 (0.13) ^b	56.6 (2.06) ^a	5.37 (0.35) ^d	21.5 (0.56) ^c	39.81 (2.00) ^a	1.97 (0.67) ^c	19 (2) ^a

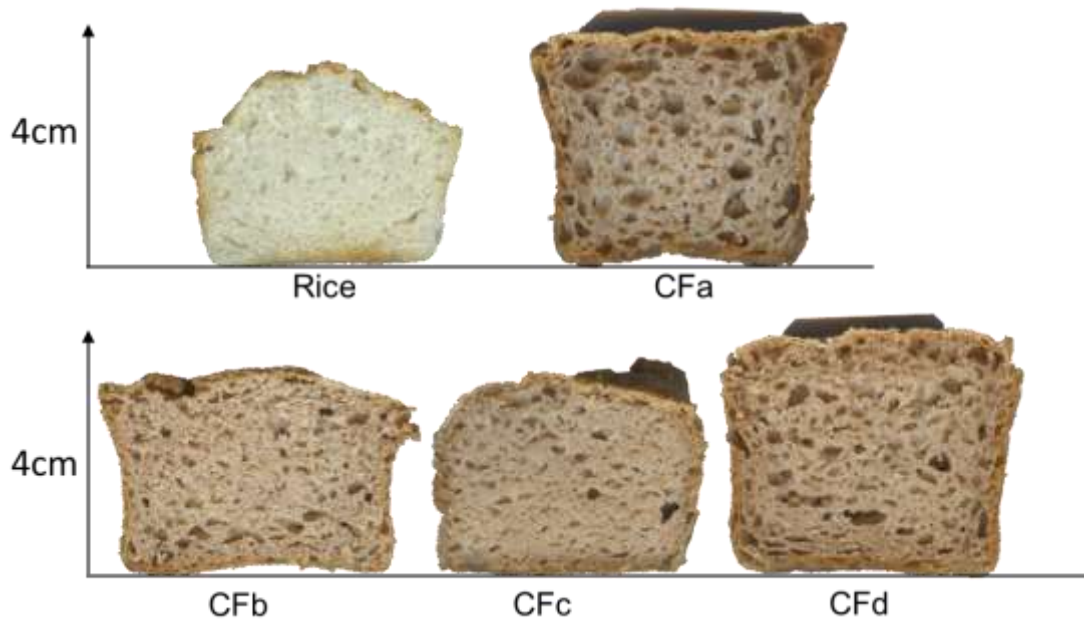
Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

Η προσθήκη χαρουπάλευρου τροποποιηθεί σημαντικά το χρώμα της ψίχας των άρτων (**Πίνακας 5.8.2**). Πιο συγκεκριμένα, τα παραγόμενα ψωμιά που περιείχαν χαρουπάλευρο παρουσίασαν πιο σκούρο χρώμα σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (rice), όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τη μείωση της φωτεινότητας (L^*). Η μείωση της φωτεινότητας είναι επιθυμητή για τα αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη, ιδιαίτερα για αυτά που έχουν ως βασικό συστατικό το ρυζάλευρο, καθώς τείνουν να έχουν πιο ανοιχτό χρώμα από το λευκό ψωμί σίτου (Gallagher et al., 2003a). Η μείωση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου προκάλεσε την αύξηση των τιμών a^* και b^* σε σχέση με το δείγμα αναφοράς, λόγω του φυσικού σκούρου χρώματος του χαρουπάλευρου. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου που παρελήφθη με κοσκίνιση οδήγησε σε αύξηση του πρωτεϊνικού περιεχομένου του αλεύρου από το φύτρο χαρουπιού, το οποίο είναι κίτρινου χρώματος σε σύγκριση με το περίβλημα του σπόρου, το οποίο είναι καφέ. Ως εκ τούτου στα αρτοσκευάσματα αυτά (CFa, CFb και CFc), παρατηρείται αύξηση της τιμής του b^* , με την μείωση της κοκκομετρίας, λόγω της αύξησης της περιεχόμενης πρωτεΐνης. Ο άρτος που παρασκευάστηκε με χαρουπάλευρο της μικρότερης κοκκομετρίας (CFd) παρουσίασε το πιο σκούρο χρώμα ψίχας, με αυξημένη τιμή a^* , η οποία μπορεί να αποδοθεί στην εφαρμογή της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα για την μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα οδήγησε σε χαρουπάλευρο με ομοιογενές χρώμα ελαφρώς κοκκινωπό, όπου τα τρία συστατικά των σπόρων της χαρουπιάς (φλοιός, ενδοσπέρμιο, φύτρο) δεν μπορούν να διαχωριστούν οπτικά βάσει του διαφορετικού χρώματός τους (καφέ, υποκίτρινο-λευκό και κίτρινο) (**Σχήμα 5.8.1**).

Η προσθήκη του χαρουπάλευρου προκάλεσε μείωση της σχετικής ελαστικότητας της ψίχας (REL%) σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (Rice). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από την προσθήκη πίτυρων ρυζιού σε ποσοστό 10% σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης με βάση το ρυζάλευρο (Phimolsiripol et al., 2012).

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των παραγόμενων άρτων και συγκεκριμένα η μέση επιφάνεια πόρων και η πυκνότητα πόρων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.8.2**. Ο άρτος αναφοράς (Rice) παρουσίασε υψηλό αριθμό πολύ μικρού μεγέθους πόρων σχηματίζοντας μια πυκνή και συνεκτική δομή (**Σχήμα 5.8.1**). Σε γενικές γραμμές, η προσθήκη χαρουπάλευρου αύξησε το μέγεθος του πόρων, μειώνοντας συγχρόνως τον αριθμό τους. Πιο συγκεκριμένα, οι άρτοι CFa και CFd παρουσίασαν μια ανοικτή και ετερογενή δομή ψίχας με μεσαίου μεγέθους πόρους, ενώ ο άρτος CFc εμφάνισε στατιστικά σημαντικά μικρότερο μέγεθος πόρων και αύξηση της πυκνότητας τους (**Σχήμα 5.8.1, Πίνακας 5.8.2**). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το μέγεθος των πόρων των άρτων μπορεί να καταταχθεί διαστασιολογικά στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες με βάση την επιφάνειά τους σε: μικρούς $<0.8 \text{ mm}^2$; μεσαίους: $0.8 - 4.0 \text{ mm}^2$; μεγάλους $> 4.0 \text{ mm}^2$ (Mariotti et al, 2013). Η παρουσία υψηλού αριθμού μεγάλου μεγέθους πόρων έχει συνδεθεί με μείωση του όγκου των αρτοσκευασμάτων, ενώ μεγάλος αριθμός μεσαίου μεγέθους πόροι (και μικρότερου) έχουν συνδεθεί με την παραγωγή άρτων υψηλού ειδικού όγκου (Gallagher et al, 2003a; Mariotti et al., 2013). Σε αυτό το πλαίσιο η μέτρηση της πυκνότητας των πόρων επιχειρεί μια τυποποίηση των διακυμάνσεων του ειδικού όγκου. Ωστόσο, η τυποποίηση αυτή έχει την τάση να

μειώνει τις ποιοτικές διαφορές στα τελικά προϊόντα και επομένως η οπτική παρατήρηση των άρτων δεν θα πρέπει να παραμεληθεί (Trappey et al., 2015). Όσον αφορά τον άρτο CFc, αν και η αριθμητική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της ψίχας του απέδειξε την παρουσία μικρού μεγέθους και ομοιόμορφα κατανεμημένων πόρων δεν μπορεί να συνδεθεί με αύξηση του ειδικού όγκου. Αντιθέτως τα αρτοσκευάσματα CFa και CFd παρουσίασαν αυξημένη πυκνότητα πόρων, μεσαίου μεγέθους και ταυτόχρονα υψηλότερο ειδικό όγκο. Συμπερασματικά, η τελική ποιότητα των άρτων που παρασκευάστηκαν πρέπει να αξιολογηθεί ως συνάρτηση όλων των φυσικών ιδιοτήτων (δομικές, υφή) που μετρήθηκαν σε συνδυασμό με οπτική αξιολόγηση.



Σχήμα 5.8.1 Ενδεικτικές όψεις τις ψίχας των άρτων που παρασκευάστηκαν.

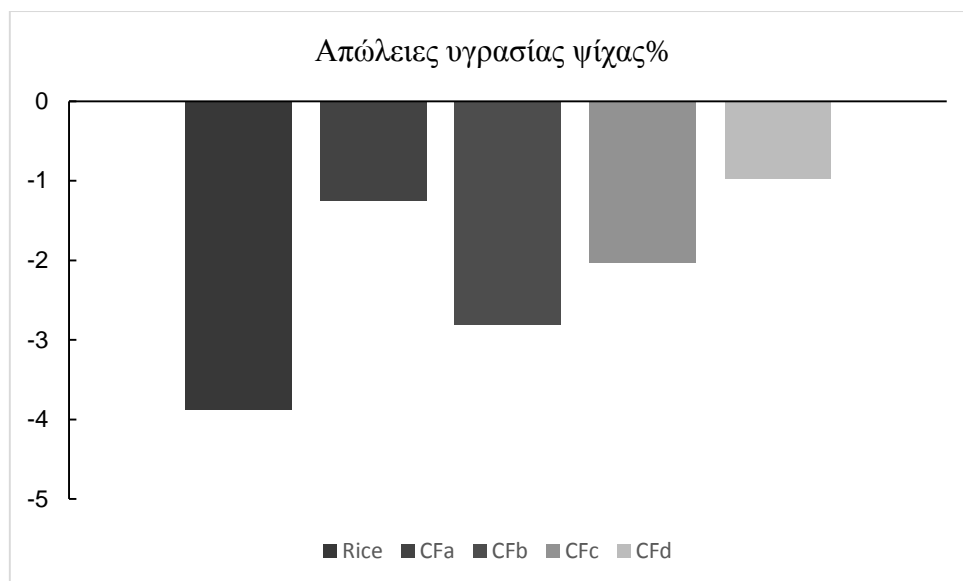
5.8.2 Μελέτη παλαίωσης άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας

Ένα σημαντικό πρόβλημα των άρτων ελεύθερων γλουτένης είναι ο υψηλός ρυθμός παλαίωσής τους. Οι διαιτητικές ίνες μπορούν να δράσουν ως παράγοντες κατά της ποιοτικής υποβάθμισης των άρτων, λόγω της ικανότητας δέσμευσης νερού, η οποία εμποδίζει την αναδιάταξη του αμύλου. Η επίδραση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στον ρυθμό παλαίωσης των αρτοσκευασμάτων αξιολογήθηκε με την μέτρηση της μεταβολής της υγρασίας και της σκληρότητας της ψίχας των άρτων στην διάρκεια αποθήκευσής τους για 3 ημέρες στους 25°C και 60% RH. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης οι πιο εμφανείς αλλαγές σχετίζονται με την απώλεια υγρασίας από την ψίχα του ψωμιού και την αύξηση της σκληρότητας της ψίχας κυρίως λόγω της αναδιάταξης του αμύλου και την απώλειας υγρασίας από την ψίχα. Στο **Σχήμα 5.8.2** παρουσιάζεται η απώλεια υγρασίας της ψίχας των αρτοσκευασμάτων κατά την αποθήκευση. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα αρτοσκευάσματα με προσθήκη χαρουπάλευρου εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερες απώλειες υγρασίας της ψίχας σε σχέση με τον άρτο αναφοράς (Rice), υψηλότερη συγκράτηση νερού, πιθανώς λόγω της

υψηλότερης ικανότητας δέσμευσης νερού του χαρουπάλευρου έναντι του ρυζάλευρου. Τα αρτοσκευάσματα CFa και CFd εμφάνισαν τους μικρότερους ρυθμούς αφυδάτωσης της ψίχας μεταξύ των αρτοσκευασμάτων με προσθήκη χαρουπάλευρου, που μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη ικανότητα δέσμευσης νερού των κλάσμάτων αυτών. Η υψηλή ικανότητα δέσμευσης νερού του χαρουπάλευρου σε σύγκριση με το ρυζάλευρο επηρέασε και την αρχική υγρασία της ψίχας των άρτων (**Πίνακας 5.8.3**), η οποία ήταν σημαντικά χαμηλότερη για το δείγμα αναφοράς.

Η αύξηση της σκληρότητας της ψίχας των άρτων με το χρόνο αποθήκευσης παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.8.4**. Ο άρτος αναφοράς (Rice) παρουσίασε την υψηλότερη αρχική σκληρότητα (ημέρα 0, 1 h μετά τον κλιβανισμό), ενώ η προσθήκη χαρουπάλευρου οδήγησε στην μείωση της σκληρότητας της ψίχας των άρτων. Η μαλακότερη υφή ψίχας επιτεύχθηκε για τα αρτοσκευάσματα CFa και CFd, σε σχέση με τα CFc και CFb, τα οποία παρουσίασαν αυξημένη σκληρότητα της ψίχας. Η κλίση της καμπύλης της σκληρότητας ως προς το χρόνο αποθήκευσης αποτελεί δείκτη του ρυθμού μπαγιατέματος των άρτων. Συνεπώς το δείγμα αναφοράς εμφάνισε τον υψηλότερο ρυθμό μπαγιατέματος, όπως μπορεί να συναχθεί από την κλίση της καμπύλης σκληρότητας της ψίχας (**Πίνακας 5.8.4**). Η προσθήκη χαρουπάλευρου στα αρτοσκευάσματα ανεξαρτήτως του κλάσματος που χρησιμοποιήθηκε μείωσε σημαντικά τον ρυθμό παλαίωσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή ικανότητα δέσμευσης νερού του χαρουπάλευρου, με αποτέλεσμα την παρουσία λιγότερου διαθέσιμου νερού για το άμυλο, μειώνοντας τον ρυθμό ανακρυστάλλωσης του κατά την αποθήκευση. Σύμφωνα με τους Zeleznak και Hosenev (1987) ο ρυθμός ανακρυστάλλωσης του αμύλου ελέγχεται από την παρουσία του νερού κατά τη διάρκεια της αναδιάταξής του. Συμπερασματικά, το χαρουπάλευρο μπορεί να δράσει ως παράγοντας κατά της ποιοτικής υποβάθμισης των αρτοσκευασμάτων με την αποθήκευση. Πιο συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση του πλέον χοντρόκοκκου κλάσματος χαρουπάλευρου (CFa) και η χρήση της τεχνολογίας άλεσης με πεπιεσμένο αέρα για την μείωση της κοκκομετρίας του αλεύρου έναντι της τεχνικής της κοσκίνισης (CFd), οδήγησε στην παραγωγή άρτου χωρίς γλουτένη με μαλακή ψίχα και μειωμένο ρυθμό παλαίωσης.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ανωτέρω αποτελέσματα, τα αρτοσκευάσματα CFa και CFd εμφάνισαν αυξημένη διόγκωση, μαλακή ψίχα και μειωμένο ρυθμό παλαίωσης, επομένως επιλέχθηκαν για να συγκριθούν με εμπορικά διαθέσιμα αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης.



Σχήμα 5.8.2 Απώλειες υγρασίας της ψίχας των άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας κατά την αποθήκευση.

Πίνακας 5.8.3 Υγρασία της ψίχας των φρέσκων άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας (0 ημέρα).

Κωδικός δείγματος	Υγρασία ψίχας (ημέρα 0) (%) επί υγρού
Rice	58.27 (1.13) ^a
CFa	65.36 (2.63) ^{cd}
CFb	65.89 (0.27) ^d
CFc	61.69 (1.02) ^b
CFd	63.11 (1.13) ^{bc}

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

Πίνακας 5.8.4 Μεταβολή της σκληρότητας της ψίχας των άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας με το χρόνο αποθήκευσης.

Κωδικός δείγματος	Σκληρότητα ψίχας (N)				Κλίση (N/ημέρα)	R ²
	1 ^η ημέρα	2 ^η ημέρα	3 ^η ημέρα	4 ^η ημέρα		
Rice	17.9 (3.6) ^b	22.4 (1.7)	31.3 (1.9)	40.1 (3.7)	7.51 (2.32) ^b	0.980
CFa	5.1 (0.1) ^a	7.2 (0.4)	8.9 (0.6)	9.6 (0.6)	1.54 (0.19) ^a	0.957
CFb	9.4 (0.7) ^a	11.1 (0.7)	12.1 (0.1)	12.5 (0.9)	1.02 (0.21) ^a	0.931
CFc	16.1 (0.1) ^b	17.0 (0.8)	18.8 (0.9)	19.7 (1.5)	1.27 (0.48) ^a	0.974
CFd	5.7 (0.6) ^a	6.1 (0.1)	7.2 (0.6)	8.4 (0.8)	0.94 (0.42) ^a	0.949
Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)	p-value					
Χρόνος αποθήκευσης	0.0443					
Κοκκομετρία χαρουπάλευρου	0.0000					

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

5.8.3 2^ο στάδιο: Συγκριτική μελέτη αρτοσκευασμάτων με χαρουπάλευρο και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη. Αξιολόγηση των φυσικών ιδιοτήτων των αρτοσκευασμάτων.

Για την συγκριτική αξιολόγηση των διαφοροποιήσεων των άρτων με χαρουπάλευρο με εμπορικά διαθέσιμα αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη χρησιμοποιήθηκαν τρία μίγματα αλεύρων, τα οποία κυκλοφορούν στην ελληνική αγορά και οι άρτοι παρασκευάστηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες τους. Στον **Πίνακα 5.8.5, 5.8.6** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μιγμάτων των αλεύρων με χαρουπάλευρο και των εμπορικών και οι φυσικές ιδιότητες των αρτοσκευασμάτων που παρασκευάστηκαν. Μπορούν να παρατηρηθούν σημαντικές διαφορές ως προς τον ειδικό όγκο, το χρώμα και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των αρτοσκευασμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μεγάλη διακύμανση του ειδικού όγκου μεταξύ των εμπορικών δειγμάτων και των άρτων με χαρουπάλευρο (CFa και CFd). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην διαφορετική σύσταση των εμπορικών δειγμάτων. Όλα τα εμπορικά μίγματα περιείχαν περισσότερα από ένα υδροκολλοειδές, τα οποία μπορούν να δράσουν συνεργικά στην διόγκωση των άρτων. Σύμφωνα με τους Mohammadi et al. (2014) έχει αναφερθεί αύξηση του πορώδους άρτων χωρίς γλουτένη που περιείχαν μείγμα υδροκολλοειδών (ξανθάνης και καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη-CMC). Ωστόσο, οι τιμές του ειδικού όγκου των αρτοσκευασμάτων με χαρουπάλευρο και των εμπορικών δειγμάτων συμφωνούν με αυτές που έχουν αναφερθεί σε άλλες μελέτες για αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης (Marco & Rosell, 2008a; Matos & Rosell, 2013).

Όσον αφορά το χρώμα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων, οι τιμές των παραμέτρων L^* , a^* και b^* παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$) μεταξύ των δειγμάτων (**Πίνακας 5.8.6**), οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στα διαφορετικά συστατικά κάθε συνταγής. Οι μικρότερες τιμές φωτεινότητας L^* σημειώθηκαν για το αρτοσκεύασμα με χαρουπάλευρο CFd, ακολουθούμενο από τα αρτοσκευάσματα CFa και GF3, στα οποία περιέχετε κόμμι χαρουπιού αλλά και διαιτητικές ίνες από χαρουπάλευρο και φαγόπυρο αντίστοιχα. Παρόμοιες τιμές L^* και b^* για το αρτοσκεύασμα GF3 έχουν αναφερθεί για αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης παρασκευασμένα από εμπορικά μίγματα με προσθήκη αλεύρου φαγόπυρου (Mariotti et al., 2013). Όσον αφορά το αρτοσκεύασμα GF1, εμφάνισε τις υψηλότερες τιμές b^* (κίτρινο χρώμα), λόγω του αλεύρου αραβοσίτου που περιείχε. Όσον αφορά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των παραγόμενων άρτων, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην μέση επιφάνεια πόρων και στην πυκνότητα πόρων με εξαίρεση το αρτοσκεύασμα GF1, το οποίο εμφάνισε το μικρότερο μέγεθος πόρων. Ωστόσο σύμφωνα με την διαστασιολογική κατανομή των πόρων, όπως έχει αναφερθεί από τους Mariotti et al., (2013), όλα τα αρτοσκευάσματα παρουσίασαν μια ανοικτή δομή με αυξημένο αριθμό μεσαίου μεγέθους πόρους (**Πίνακας 5.8.6, Σχήμα 5.8.3**).

Πίνακας 5.8.5 Χαρακτηριστικά των μιγμάτων αλεύρων με χαρουπάλευρο και εμπορικών μιγμάτων.

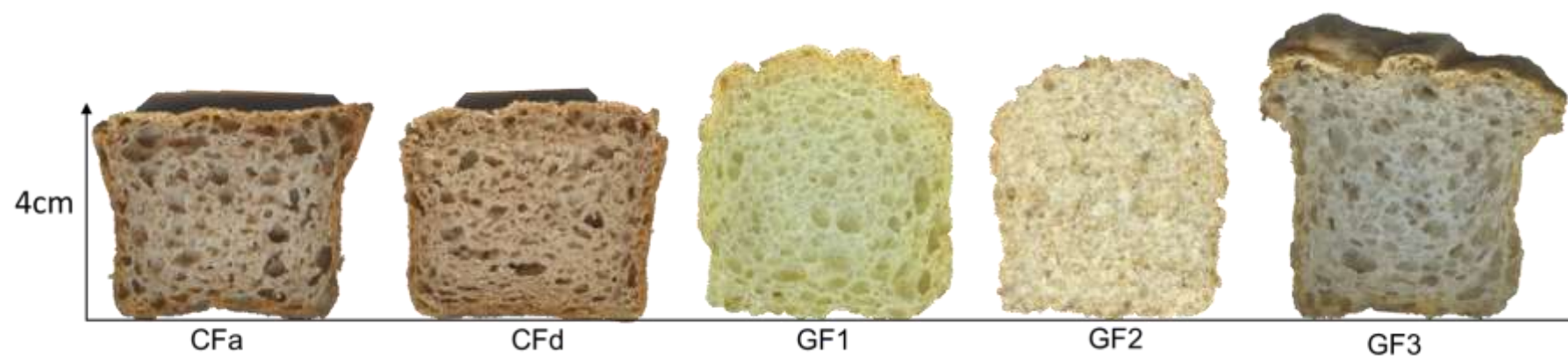
Κωδικός	Υγρασία (%)	WBC (g νερού/ g αλεύρου)
CFa	12.59 (0.02) ^b	2.10 (0.03) ^c
CFb	12.55 (0.05) ^b	2.13 (0.12) ^c
GF1	16.61 (0.94) ^c	1.53 (0.12) ^b
GF2	11.77 (0.08) ^a	0.87 (0.04) ^a
GF3	12.21 (0.05) ^{ab}	1.41 (0.11) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

Πίνακας 5.8.6 Φυσικές ιδιότητες άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικών άρτων.

Κωδικός δείγματος	Ειδικός όγκος cm ³ /g	L*	a*	b*	Μέση επιφάνεια πόρων (mm ²)	Πυκνότητα πόρων (πόροι/cm ²)
CFa	2.22 (0.07) ^a	63.3 (2.38) ^b	2.36 (0.01) ^d	15.1 (1.49) ^b	2.61 (1.36) ^b	17 (6) ^b
CFd	2.21 (0.13) ^a	56.6 (2.06) ^a	5.37 (0.35) ^e	21.5 (0.56) ^c	1.97 (0.67) ^{ab}	19 (2) ^a
GF1	3.37 (0.19) ^c	74.42 (1.70) ^c	-9.20 (0.42) ^a	29.17 (0.86) ^d	1.43 (0.71) ^a	17 (7) ^b
GF2	2.96 (0.03) ^b	76.37 (1.13) ^c	-3.06 (0.42) ^b	21.11 (1.90) ^c	2.65 (0.89) ^b	14 (3) ^{ab}
GF3	3.95 (0.12) ^d	62.98 (2.66) ^b	-2.22 (0.15) ^c	12.51(0.60) ^a	2.93 (0.93) ^b	14 (2) ^{ab}

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)



Σχήμα 5.8.3 Ενδεικτικές όψεις τις ψίχας άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικών άρτων χωρίς γλουτένη

5.8.4 Μελέτη παλαίωσης άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη

Τα αρτοσκευάσματα που παρασκευάστηκαν αποθηκεύτηκαν στους 25 °C και 60% RH για 3 ημέρες, ώστε να προσδιοριστεί ο ρυθμός παλαίωσής τους. Η αρχική υγρασία της ψίχας (ημέρα 0) και η απώλεια υγρασίας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.8.7** και στο **Σχήμα 5.8.4** αντίστοιχα. Στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$) παρατηρήθηκαν στην αρχική υγρασία των αρτοσκευασμάτων, με τα εμπορικά δείγματα να παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερες τιμές σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο. Οι διαφορές αυτές μπορούν να αποδοθούν στα διαφορετικά συστατικά κάθε συνταγής και στις διαφορετική ικανότητα δέσμευσης νερού των συστατικών αυτών (**Πίνακας 5.8.5**). Η παρουσία του χαρουπάλευρου οδήγησε στην αύξηση της ικανότητας δέσμευσης νερού των μιγμάτων, προκαλώντας αύξηση της αρχικής υγρασίας της ψίχας (**Πίνακας 5.8.6**). Οι απώλειες υγρασίας κατά την αποθήκευση των αρτοσκευασμάτων για 3 ημέρες παρουσιάστηκε σημαντικά αυξημένη για τα εμπορικά δείγματα. Συγκεκριμένα για τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο Cfa και CFd κυμάνθηκε στο 1%, και για τα εμπορικά δείγματα μεταξύ του 3.3% και 4.5% για τα εμπορικά δείγματα GF2 και GF3 αντίστοιχα. Παρόμοιες τιμές απώλειας υγρασίας κατά την αποθήκευση τριών ημερών στους 20 °C για τον άρτο GF3, ο οποίος περιέχει αλεύρι φαγόπυρου έχουν αναφερθεί για αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης από εμπορικά μίγματα αλεύρων με προσθήκη αλεύρου φαγόπυρου ($\approx 5.4\%$) (Mariotti et al., 2013).

Η μεταβολή της σκληρότητας της ψίχας των άρτων με τον χρόνο αποθήκευσης παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.8.8**. Η αρχική σκληρότητα της ψίχας των αρτοσκευασμάτων παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$), που αντικατοπτρίζουν τη μεγάλη ποικιλομορφία των συστατικών των άρτων που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα η σκληρότητα των φρέσκων αρτοσκευασμάτων (ημέρα 0) με χαρουπάλευρο Cfa και CFd ήταν σημαντικά υψηλότερη συγκριτικά με τα εμπορικά δείγματα, σύμφωνα και με τις τιμές του ειδικού όγκου. Έχει βρεθεί αρνητική συσχέτιση μεταξύ της σκληρότητας της ψίχας και του ειδικού όγκου των αρτοσκευασμάτων (Sciarini et al., 2010). Ωστόσο, παρά τις αρχικές χαμηλές τιμές σκληρότητας των εμπορικών άρτων, μετά τις τρεις ημέρες αποθήκευσης, η σκληρότητά τους εξισώνεται με των άρτων με χαρουπάλευρο Cfa και CFd. Επιπλέον, ο ρυθμός παλαίωσης, μετρούμενος ως η κλίση της καμπύλης σκληρότητας-χρόνου ήταν υψηλότερος για το αρτοσκευάσμα GF1, ενώ τα υπόλοιπα αρτοσκευάσματα παρουσίασαν σημαντικά μικρότερους ρυθμούς παλαίωσης, οι οποίοι δεν διέφεραν σημαντικά. Η αύξηση της σκληρότητας της ψίχας κατά την αποθήκευση των αρτοσκευασμάτων οφείλεται στην αναδιάταξη της αμυλοπηκτίνης και στην αφυδάτωση της ψίχας, καθώς η αναδιάταξη της αμυλοπηκτίνης επηρεάζεται από την παρουσία του νερού στην ψίχα του άρτου. 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. Ως εκ τούτου, ο

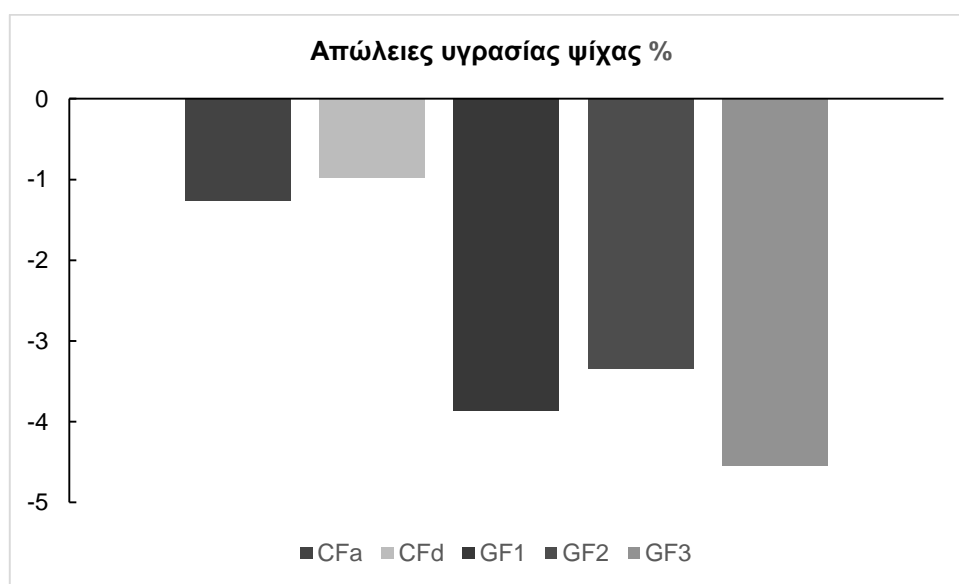
ρυθμός παλαίωσης των εμπορικών αρτοσκευασμάτων είναι σημαντικά υψηλότερος σε σχέση με τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο, λόγω των υψηλότερων απωλειών υγρασίας. Τα αρτοσκευάσματα που μελετήθηκαν περιείχαν διάφορους τύπους υδροκολλοειδών (κυτταρίνες ή γαλακτομαννάνες), τα οποία αναστέλλουν την παλαίωση, καθώς η παρουσία τους επηρεάζει τον ρυθμό αναδιάταξης του αμύλου περιορίζοντας την διάχυση και την απώλεια του νερού στην ψίχα των αρτοσκευασμάτων (Davidou et al., 1996). Συνεπώς, ο χαμηλότερος ρυθμός παλαίωσης των αρτοσκευασμάτων με χαρουπάλευρο μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη αρχική υγρασία και στην παρουσία του υδροκολλοειδούς (κόμμι χαρουπιού) και των διαιτητικών ινών στην συνταγή.

Συμπερασματικά, η προσθήκη χαρουπάλευρου στα αρτοσκευάσματα χωρίς γλουτένη οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων με μειωμένο ρυθμό παλαίωσης σε σύγκριση με εμπορικά διαθέσιμα αρτοσκευάσματα.

Πίνακας 5.8.7 Υγρασία της ψίχας των φρέσκων άρτων με χαρουπάλευρο και των εμπορικών άρτων (0 ημέρα).

Κωδικός δείγματος	Υγρασία ψίχας (ημέρα 0) (%) επί υγρού
CFa	65.36 (2.63) ^b
CFd	63.11 (1.13) ^b
GF1	53.30 (1.22) ^a
GF2	53.77 (0.76) ^a
GF3	54.13 (1.98) ^a

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)



Σχήμα 5.8.4 Απώλειες υγρασίας της ψίχας των άρτων κατά την αποθήκευση.

Πίνακας 5.8.8 Μεταβολή της σκληρότητας της ψίχας των άρτων με χαρουπάλευρο και των εμπορικών άρτων με το χρόνο αποθήκευσης.

Κωδικός δείγματος	Σκληρότητα ψίχας (N)				Κλίση (N/ημέρα)	R ²
	1 ^η ημέρα	2 ^η ημέρα	3 ^η ημέρα	4 ^η ημέρα		
CFa	5.1 (0.1) ^c	7.2 (0.4) ^c	8.9 (0.6) ^c	9.6 (0.6) ^b	1.54 (0.19) ^{ab}	0.957
CFd	5.7 (0.6) ^c	6.1 (0.1) ^{bc}	7.2 (0.6) ^{bc}	8.4 (0.8) ^{ab}	0.94 (0.42) ^a	0.949
GF1	0.6 (0.1) ^a	3.7 (0.6) ^a	6.1 (1.7) ^{ab}	9.8 (1.1) ^b	3.01 (0.42) ^c	0.990
GF2	3.8 (0.6) ^b	5.7 (0.1) ^b	8.1 (0.8) ^{bc}	9.6 (0.5) ^b	1.95 (0.44) ^b	0.994
GF3	0.6 (0.2) ^a	3.2 (0.6) ^a	5.1 (0.1) ^a	7.4 (0.1) ^a	2.22 (0.06) ^{bc}	0.994

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

5.8.5 Οργανοληπτική αξιολόγηση και διατροφική αξία άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη.

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των αρτοσκευασμάτων διεξήχθη με σκοπό τον προσδιορισμό της οργανοληπτικής αποδοχής των άρτων με χαρουπάλευρο σε σχέση με τα εμπορικά αρτοσκευάσματα. Διενεργήθηκε δοκιμή ηδονικής εκτίμησης από 50 δοκιμαστές (μη εκπαιδευμένους) χωρίς προηγούμενη εμπειρία και τα αρτοσκευάσματα αξιολογήθηκαν με χρήση 9-βάθμιας ηδονικής κλίμακας 1-9 (1: δεν αρέσει καθόλου, 9: αρέσει πάρα πολύ), ενώ θεωρούνταν αποδεκτά αν οι μέσοι όροι για την ολική αποδοχή ήταν πάνω από 5. Η βαθμολογία των δειγμάτων ως προς κάθε οργανοληπτικό χαρακτηριστικό (εμφάνιση, χρώμα, άρωμα (οσμή, γεύση), υφή και συνολική αποδοχή) παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.8.9**. Η βαθμολογία των άρτων με χαρουπάλευρο δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά από τα εμπορικά αρτοσκευάσματα, με εξαίρεση το δείγμα GF3, το οποίο σημείωσε τις υψηλότερες τιμές σε όλα τα χαρακτηριστικά που αξιολογήθηκαν. Παρά το γεγονός ότι τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο εμφάνισαν μικρότερο ειδικό όγκο σε σύγκριση με τα εμπορικά δείγματα, η βαθμολογία τους ως προς την εμφάνιση δεν διέφερε σημαντικά από των εμπορικών, πιθανώς επειδή όχι μόνο η διόγκωση αλλά και η ομοιομορφία της ψίχας έπαιξε σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση τους από τους δοκιμαστές. Σύμφωνα με τις αντικειμενικές μεθόδους μέτρησης των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ψίχας, το μέγεθος και η πυκνότητα πόρων δεν εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές για όλα τα αρτοσκευάσματα (**Πίνακας 5.8.6**). Όσον αφορά το χρώμα των άρτων, την μικρότερη αποδοχή σημείωσε το δείγμα GF1, ωστόσο στατιστικά μη σημαντική, κυρίως λόγω της ιδιαιτερότητας της συνταγής, η οποία περιείχε ρυζάλευρο και άλευρο αραβοσίτου. Τα δύο αυτά είδη αλεύρων προσέδωσαν στο τελικό προϊόν ένα ανοικτό κίτρινο χρώμα ψίχας, το οποίο έδωσε στους δοκιμαστές την εντύπωση ενός άψητου άρτου. Παρόλο που το χαρουπάλευρο έχει έντονη και ξεχωριστή γεύση και άρωμα, οι δοκιμαστές προτίμησαν εξίσου τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο και τα εμπορικά δείγματα ως προς το άρωμα και την υφή, με εξαίρεση το δείγμα GF3, για το οποίο αναφέρθηκε σπογγώδης δομή, όπως του κέικ αντί για την τυπική υφή του άρτου. Όλα τα αρτοσκευάσματα κρίθηκαν αποδεκτά από τους καταναλωτές, καθώς σημείωσαν βαθμολογία υψηλότερη του 5 στην συνολική αποδοχή. Αν και οι δοκιμαστές δεν ήταν πάσχοντες από κοιλιοκάκη, σύμφωνα με τους Laureati et al., (2012), τα άτομα με κοιλιοκάκη ή μη χρησιμοποιούν όμοια αισθητηριακά κριτήρια για να εκφράσουν την αποδοχή τους για προϊόντα ελεύθερα γλουτένης.

Συμπερασματικά, το γεγονός ότι τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο δεν εμφάνισαν στατιστικά διαφορετικά οργανοληπτικά προφίλ από τα εμπορικά αρτοσκευάσματα θεωρήθηκε θετικό εύρημα, καθώς η χρήση του χαρουπάλευρου για την παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης οδήγησε σε τελικά προϊόντα τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν και να εκπληρώσουν τις ανάγκες των καταναλωτών.

Επιπλέον στον **Πίνακα 5.8.10** παρουσιάζεται η διατροφική αξία των αρτοσκευασμάτων με χαρουπάλευρο και ενδεικτικά για τον εμπορικό άρτο GF2.

Μπορεί να παρατηρηθεί, πως τα αρτοσκευάσματα με προσθήκη χαρουπάλευρου παρουσίασαν αντίστοιχα ή και υψηλότερα ποσοστά διαιτητικών ινών και πρωτεΐνης σε σχέση με τον εμπορικό άρτο. Επιπλέον εμφάνισαν χαμηλότερα ποσοστά υδατανθράκων και μειωμένη θερμιδική αξία.

Πίνακας 5.8.9 Οργανοληπτική βαθμολογία των άρτων με χαρουπάλευρο και των εμπορικών άρτων.

Κωδικός δείγματος	Εμφάνιση	Χρώμα	Άρωμα (Οσμή- Γεύση)	Υφή	Ολική αποδοχή
CFa	6.23 (1.76) ^a	6.23 (1.67) ^a	5.23 (1.94) ^a	5.73 (2.03) ^a	5.67 (1.82) ^a
CFd	6.21 (1.63) ^a	6.34 (1.59) ^a	5.15 (1.82) ^a	5.58 (1.91) ^a	5.71 (1.64) ^a
GF1	6.50 (1.36) ^a	5.84 (1.26) ^a	5.02 (1.65) ^a	5.08 (1.40) ^a	5.26 (1.51) ^a
GF2	6.82 (1.73) ^{ab}	6.50 (1.97) ^a	5.28 (1.81) ^a	5.39 (1.78) ^a	5.41 (1.70) ^a
GF3	7.23 (1.30) ^b	7.47 (1.34) ^b	7.21 (2.17) ^b	7.60 (1.75) ^b	7.26 (1.97) ^b

Στις παρενθέσεις αναγράφονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης. Δείγματα με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη διαφέρουν σημαντικά ($p < 0.05$)

Πίνακας 5.8.10 Διατροφική αξία των άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικού άρτου

Κωδικός δείγματος	Πρωτεΐνη (%)	Διαιτητικές ίνες (%)	Λίπος (%)	Υδατάνθρακες (%)	Ενέργεια (kcal/100g)
CFa	6.74	4.91	1.45	26.0	160
CFd	6.87	6.11	1.47	27.4	171
GF2*	4.20	4.70	1.90	45.0	223
GF3	3.50	4.70	1.00	48.0	216

*Διατροφική ανάλυση με βάση τον προμηθευτή

5.8.6 Συμπεράσματα

Η κοκκομετρία του χαρουπάλευρου και η τεχνική μείωσης του μεγέθους των κόκκων του αλεύρου (κοσκίνιση ή άλεση με πεπιεσμένο αέρα) επηρεάζει την ποιότητα των άρτων χωρίς γλουτένη, κυρίως λόγω της επίδρασης της κοκκομετρίας στην χημική σύσταση των κλασμάτων. Η προσθήκη χαρουπάλευρου της υψηλότερης ($d_{50}=258.55\mu\text{m}$) και της χαμηλότερης κοκκομετρίας ($d_{50}=80.36\mu\text{m}$) οδήγησαν στην παρασκευή άρτων με αυξημένη διόγκωση και υψηλή πυκνότητα μεσαίου μεγέθους πόρων, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς τους σε διαιτητικές ίνες από το ενδοσπέρμιο και το φλοιό σε σχέση με τα χαμηλότερα κλάσματα, τα οποία ήταν πλούσια σε πρωτεΐνη. Επιπλέον τα αρτοσκευάσματα αυτά χαρακτηρίστηκαν από χαμηλά ποσοστά απώλειας υγρασίας και μικρούς ρυθμούς παλαίωσης κατά την αποθήκευσή τους.

Στην συγκριτική μελέτη μεταξύ των άρτων με χαρουπάλευρο και εμπορικών άρτων καταδεικνύεται η υψηλότερη διόγκωση των εμπορικών δειγμάτων, ωστόσο τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας των δειγμάτων δεν διέφεραν σημαντικά. Επιπλέον, η προσθήκη χαρουπάλευρου στα αρτοσκευάσματα οδήγησε σε μειωμένα ποσοστά απώλειας υγρασίας και μικρότερους ρυθμούς παλαίωσης των άρτων κατά την αποθήκευση. Από την οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των άρτων με χαρουπάλευρο και των εμπορικών δειγμάτων, με εξαίρεση ένα εμπορικό δείγμα το GF3, για το οποίο όμως αναφέρθηκαν από τους δοκιμαστές ποιοτικά χαρακτηριστικά ανάλογα των κέικ, ενώ όλα τα δείγματα βαθμολογήθηκαν ως αποδεκτά. Επομένως τα βέλτιστα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο που παρήχθησαν μπορούν να καλύψουν τις διατροφικές και οργανοληπτικές απαιτήσεις των καταναλωτών και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από την αρτοβιομηχανία για την παρασκευή χαμηλού κόστους και υψηλής διατροφικής αξίας αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης.

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η παρούσα διατριβή εστίασε στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης υψηλής διατροφικής αξίας και ποιοτικών χαρακτηριστικών. Για τον διατροφικό εμπλουτισμό των αρτοσκευασμάτων επιλέχθηκε η προσθήκη αλεύρου από σπόρους χαρουπιού, ως χαμηλού κόστους πρώτη ύλη πλούσια σε διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνη. Επιπλέον, μελετήθηκε η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου, το οποίο παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με τις διαλυτές φυτικές ίνες και ανήκει στην κατηγορία των πρεβιοτικών. Τα αρτοσκευάσματα που αναπτύχθηκαν ήταν άρτος και κέικ. Ως βασικό συστατικό για την παρασκευή των αρτοσκευασμάτων χρησιμοποιήθηκε το ρυζάλευρο και για την διατροφική ενίσχυση του άρτου χρησιμοποιήθηκε χαρουπάλευρο και ανθεκτικό άμυλο, ενώ στα κέικ έγινε ενσωμάτωση μόνο ανθεκτικού αμύλου. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην μελέτη της επίδρασης της προσθήκης χαρουπάλευρου σε άρτο, με ταυτόχρονη μεταβολή του περιεχόμενου νερού στο ζυμάρι, στα ποιοτικά του χαρακτηριστικά. Ακολούθως έγινε βελτιστοποίηση της συνταγής για την προσθήκη ανθεκτικού αμύλου και συνδυασμού ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου σε άρτο ελεύθερο γλουτένης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην μελέτη και κατανόηση της επίδρασης της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στις ρεολογικές ιδιότητες και στην ικανότητα επώασης των ζυμαριών των άρτων, ιδιότητες οι οποίες επιδρούν άμεσα στα τελικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων, ώστε να προαχθεί η παραγωγή υψηλής ποιότητας άρτου χωρίς γλουτένη πλούσιου σε διαιτητικές ίνες. Τα βέλτιστα αρτοσκευάσματα που παρήχθησαν μπορούν να καλύψουν τις διατροφικές και οργανοληπτικές απαιτήσεις των καταναλωτών ενώ θα μπορούσαν να παραχθούν από την αρτοβιομηχανία ως χαμηλού κόστους και υψηλής διατροφικής αξίας αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης.

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διατριβή είναι τα ακόλουθα:

✓ Μελέτη λειτουργικών ιδιοτήτων χαρουπάλευρου

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου στις ιδιότητες ενυδάτωσης του, καθώς το χαρουπάλευρο αποτελεί συστατικό πλούσιο σε διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνη και η προσθήκη του μεταβάλλει τις ρεολογικές ιδιότητες των ζυμαριών των άρτων. Η γνώση των ιδιοτήτων ενυδάτωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρασκευή αρτοσκευασμάτων, όπου το νερό μετέχει στην ζελατινοποίηση του αμύλου, στη μετουσίωση των πρωτεϊνών και στην ενεργοποίηση της μαγιάς κατά τα στάδια της ανάμιξης και του ψησίματος. Η μείωση του μεγέθους σωματιδίων του χαρουπάλευρου από τα 258.55 μm στα 126.37 μm με κοσκίνηση οδήγησε σε μείωση της ικανότητας δέσμευσης νερού. Αντιθέτως μείωση του μεγέθους σωματιδίων με χρήση μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα στα 80.36 μm οδήγησε σε αύξηση της ικανότητας δέσμευσης νερού.

✓ Επίδραση της προσθήκης χαρουπάλευρου στις θερμορρολογικές ιδιότητες του ρυζάλευρου

Το ρυζάλευρο αποτελεί το βασικό συστατικό της συνταγής των άρτων και η υποκατάσταση του με χαρουπάλευρο επηρέασε τις θερμορρολογικές ιδιότητες του. Η προσθήκη χαρουπάλευρου σε ποσοστό 15% μεγάλου μεγέθους σωματιδίων (258.55 και 174.73 μm) οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου ιξώδους, ενώ δεν επέδρασε στην σταθερότητα της πάστας αμύλου (setback), σε αντίθεση με την προσθήκη λεπτόκοκκων κλασμάτων χαρουπάλευρου (126.37 και 80.36 μm), η οποία αύξησε την σταθερότητα της πάστας αμύλου σε σχέση με το δείγμα αναφοράς (μόνο ρυζάλευρο). Η υποκατάσταση χαρουπάλευρου σε υψηλά ποσοστά (15%) οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας σχηματισμού πάστας των μιγμάτων σε σχέση με το δείγμα αναφοράς.

✓ Επίδραση της προσθήκης συστατικών-μιμητών της γλουτένης

Η ανάπτυξη αρτοσκευασμάτων ελεύθερων γλουτένης απαιτεί την προσθήκη ποικίλων συστατικών, τα οποία μπορούν να δράσουν ως μιμητές της γλουτένης, όπως πρωτεΐνες, γαλακτωματοποιητές και υδροκολλοειδή. Η ενσωμάτωση πρωτεϊνικών πηγών (γάλακτος και αλβουμίνης αυγού σε ποσοστό 8% επί του αλεύρου και σε αναλογία πρωτεϊνών 1:1) βελτίωσε τα δομικά χαρακτηριστικά των αρτοσκευασμάτων με ρυζάλευρο και χαρουπάλευρο, μειώνοντας την σκληρότητα της ψίχας και αυξάνοντας το πορώδες, ενώ με επιπλέον προσθήκη κόμμεος χαρουπιού ενισχύθηκε η διόγκωση των άρτων. Η προσθήκη γαλακτωματοποιητή μείωσε περαιτέρω την σκληρότητα της ψίχας δημιουργώντας ωστόσο κατάρρευση της δομής, η οποία αποκαταστάθηκε με την χρήση ενζύμων στην συνταγή.

✓ Επίδραση του ποσοστού ενσωμάτωσης χαρουπάλευρου και του περιεχόμενου νερό στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ζυμαριών και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών άρτων

Η ενσωμάτωση χαρουπάλευρου επηρεάζει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ζυμαριών των άρτων και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων. Λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης νερού του χαρουπάλευρου είναι απαραίτητη η κατάλληλη ρύθμιση του νερού στην συνταγή. Ο κατάλληλος συνδυασμός περιεκτικότητας σε νερό και χαρουπάλευρο οδήγησε σε ισορροπία του ιξώδους και του ελαστικού χαρακτήρα των ζυμαριών, προϋπόθεση απαραίτητη για την παρασκευή υψηλής ποιότητας άρτου. Από τα ρεολογικά πειράματα τονίζεται ο ρόλος του νερού ως πλαστικοποιητή, συμβάλλοντας στον ιξώδη χαρακτήρα του ζυμαριού, ενώ η προσθήκη χαρουπάλευρου ενίσχυσε την ελαστικότητα των ζυμαριών. Οι συνδυασμοί χαρουπάλευρο/νερό 10/110, 15/130 και 15/140 οδήγησαν στην παρασκευή ζυμαριών με ικανοποιητικές ιξωδοελαστικές ιδιότητες, ενώ και οι άρτοι που παρήχθησαν σημείωσαν επαρκή διόγκωση, υψηλό πορώδες και μειωμένη σκληρότητα ψίχας. Επιπλέον τα αρτοσκευάσματα με 15% περιεκτικότητα σε χαρουπάλευρο μπορούν να

θεωρηθούν υψηλής διατροφικής αξίας, καθώς είναι εμπλουτισμένα σε διαιτητικές ίνες, ενώ περιέχουν και υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών.

✓ Συνδυασμένη προσθήκη ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου σε άρτο χωρίς γλουτένη

Η συνδυασμένη χρήση ανθεκτικού αμύλου και χαρουπάλευρου για την παρασκευή άρτου χωρίς γλουτένη βελτιστοποιήθηκε με την μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης. Η βέλτιστη συνταγή που μπορεί να προταθεί περιείχε 15 % χαρουπάλευρο, 140 % νερό, 15% ανθεκτικό άμυλο και 10 % πρωτεΐνες (ορού γάλακτος και αλβουμίνης αυγού σε αναλογία 1:1) και το τελικό προϊόν χαρακτηρίστηκε από μαλακή και αφράτη ψίχα. Η προσθήκη του ανθεκτικού αμύλου, ακόμα και σε υψηλά ποσοστά (15%) δεν οδήγησε σε αύξηση της σκληρότητας της ψίχας. Σημαντική επίδραση στις δομικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων είχε η περιεκτικότητα σε νερό, καθώς επηρέασε την σκληρότητα και τα χαρακτηριστικά της ψίχας (πυκνότητα πόρων). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό οδήγησε σε μείωση της σκληρότητας της ψίχας και σε μια ανοικτή δομή με ομοιόμορφη κατανομή κυψελίδων αέρα, σε αντίθεση με το χαρουπάλευρο που δεν επέδρασε σημαντικά σε καμία από τις μετρούμενες ιδιότητες.

✓ Προσθήκη ανθεκτικού αμύλου σε κέικ

Η ενσωμάτωση ανθεκτικού αμύλου σε ποσοστά μέχρι 20% σε κέικ ελεύθερα γλουτένης οδήγησε σε τελικά προϊόντα με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθεκτικό άμυλο προκάλεσε μείωση του ιξώδους της ζύμης του κέικ. Η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου οδήγησε σε αύξηση του ειδικού όγκου των κέικ, μείωση της σκληρότητας της ψίχας και μειωμένο ρυθμό παλαίωσης κατά την αποθήκευση των κέικ, ιδιαίτερα για το κέικ με 20% ανθεκτικό άμυλο. Σύμφωνα με την οργανοληπτική αξιολόγηση, η προσθήκη ανθεκτικού αμύλου δεν επηρέασε τα περιγραφικά δεδομένα των κέικ, ενώ όλα τα κέικ θεωρήθηκαν αποδεκτά με τους δοκιμαστές να προτιμούν αυτό με 20% ανθεκτικό άμυλο.

✓ Επίδραση της κοκκομετρίας του χαρουπάλευρου και της περιεκτικότητας σε νερό στην επώαση των ζυμαριών και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών άρτων

Η ενσωμάτωση χαρουπάλευρου διαφορετικής κοκκομετρίας στο ζυμάρι των άρτων απαιτεί κατάλληλη ρύθμιση του περιεχόμενου νερού στο ζυμάρι, λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων ενυδάτωσης του χαρουπάλευρου με την κοκκομετρία, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη διόγκωση της ζύμης κατά την επώαση και τα τελικά προϊόντα να χαρακτηρίζονται από βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Στην διόγκωση των ζυμαριών των άρτων παρατηρήθηκε ένα βέλτιστο σημείο περιεκτικότητας σε νερό διαφορετικό για κάθε κοκκομετρία το οποίο οδήγησε στην υψηλότερη διόγκωση και ήταν αντίστοιχα 150%, 140%, 120% και 130% περιεκτικότητα σε νερό για κοκκομετρία χαρουπάλευρου 258.55, 174.73, 126.37 και

80.36 μm). Οι συνδυασμοί αυτοί οδήγησαν στην ανάπτυξη άρτων με μειωμένη σκληρότητα ψίχας, υψηλό πορώδες και μεσαίου μεγέθους πόρους ομοιόμορφα κατανεμημένους.

✓ Συγκριτική μελέτη άρτων με χαρουπάλευρο διαφορετικής κοκκομετρίας και εμπορικά διαθέσιμων άρτων χωρίς γλουτένη

Οι βέλτιστοι συνδυασμοί περιεκτικότητας σε νερό για κάθε κοκκομετρία χαρουπάλευρου (150%, 140%, 120% και 130% περιεκτικότητα σε νερό για κοκκομετρία χαρουπάλευρου 258.55, 174.73, 126.37 και 80.36 μm αντίστοιχα) συγκρίθηκαν ως προς τα δομικά χαρακτηριστικά και τον ρυθμό παλαίωσής τους. Τα αρτοσκευάσματα με προσθήκη χαρουπάλευρου της υψηλότερης (258.55 μm) και της χαμηλότερης κοκκομετρίας (80.36 μm) παρουσίασαν αυξημένη διόγκωση και υψηλή πυκνότητα μεσαίου μεγέθους πόρων, ενώ χαρακτηρίστηκαν από μικρούς ρυθμούς παλαίωσης κατά την αποθήκευση τους. Επομένως επιλέχθηκαν ως τα βέλτιστα δείγματα για συγκριτική μελέτη με εμπορικά διαθέσιμους άρτους χωρίς γλουτένη. Τα εμπορικά διαθέσιμα αρτοσκευάσματα εμφάνισαν υψηλότερη διόγκωση έναντι των άρτων με χαρουπάλευρο, ωστόσο τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ψίχας όλων των άρτων δεν διέφεραν σημαντικά. Επιπλέον, τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο σημείωσαν μικρότερους ρυθμούς παλαίωσης έναντι των εμπορικών άρτων κατά την αποθήκευση. Από την οργανοληπτική αξιολόγηση, όλα τα αρτοσκευάσματα βαθμολογήθηκαν ως αποδεκτά, ενώ και η διατροφική αξία των άρτων με χαρουπάλευρο μπορεί να θεωρηθεί υψηλότερη των εμπορικών. Τα αρτοσκευάσματα με χαρουπάλευρο μπορούν να καλύψουν τις διατροφικές και οργανοληπτικές προσδοκίες των καταναλωτών.

Προτάσεις

Μελέτες που θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά αφορούν:

✓ Μελέτες in vitro και in vivo προκειμένου να προσδιοριστεί η βιοδραστικότητα και η βιοδιαθεσιμότητα των συστατικών του χαρουπάλευρου (διαιτητικές ίνες, πρωτεΐνη, φυτοχημικά) στην φυσιολογία του οργανισμού.

✓ Μελέτη της τεχνικής επώασης του ζυμαριού με χρήση προζυμιού (ζύμωση με γαλακτικά βακτήρια), η οποία θεωρείται πως βελτιώνει την διόγκωση, την οργανοληπτική αποδοχή και την διάρκεια ζωής των άρτων χωρίς γλουτένη.

✓ Ενζυματική κατεργασία ή κατεργασία με εξώθηση του χαρουπάλευρου, ώστε να αυξηθεί το ποσοστό ενσωμάτωσής του στα αρτοσκευάσματα, χωρίς την υποβάθμιση των ποιοτικών και οργανοληπτικών τους χαρακτηριστικών.

✓ Εφαρμογή της τεχνικής της υψηλής πίεσης σε ζυμάρι άρτου ελεύθερου γλουτένης με χαρουπάλευρο, με σκοπό την αύξηση του ποσοστού προσθήκης χαρουπάλευρου.

Η έρευνα, επίσης, θα μπορούσε να συνεχιστεί με:

- ✓ Την μελέτη της προσθήκης χαρουπάλευρου σε άλλους τύπους προϊόντων ελεύθερων γλουτένης, όπως τα μπισκότα ή τα κράκερ, τα οποία προτιμώνται από τους καταναλωτές ως σνακ. Μελέτη υποκατάστασης του υψηλού ποσοστού λίπους των μπισκότων με χαρουπάλευρο, ώστε τα προϊόντα αυτά να αποτελέσουν εναλλακτικές υγιεινές προτάσεις.
- ✓ Την μελέτη της προσθήκης άλλων χαμηλού κόστους πηγών διαιτητικών ινών, όπως παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων (π.χ. πούλπες φρούτων και λαχανικών) σε αρτοσκευάσματα ελεύθερα γλουτένης.

7. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

AACC (American Association of Cereal Chemists). 2001. The definition of dietary fiber. Report of the Dietary Fiber Definition Committee to the Board of Directors of the American Association of Cereal Chemists. *Cereal Foods World*, 46 (3), 112–126.

Abrams S.A., Griffin I.J., Hawthorne K.M., Liang L., Gunn A.K., Darlington G., Ellis K.J. 2005. A combination of prebiotic short- and long-chain inulin type fructans enhances calcium absorption and bone mineralization in young adolescents. *American Journal of Clinical Nutrition*, 82, 471–476.

Akobeng A. K., Ramanan A. V., Buchan I., Heller R. F. 2006. Effect of breast feeding on risk of coeliac disease: a systematic review and meta-analysis of observational studies. *Archives of Disease in Childhood*, 91, 39–43.

Alencar N.M.M., Steel C.J., Alvim I.D., de Moraes E.C., Bolini H.M.A. 2015. Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 1011-1018.

Alloncle M., Doublier J.L. 1991. Viscoelastic properties of maize starch/hydrocolloid pastes and gels. *Food Hydrocolloids*, 5, 455–467.

Alloncle M., Lefebvre J., Llamas G., Doublier J. L. 1989. A Rheological Characterization of Cereal Starch-Galactomannan Mixtures. *Cereal Chemistry*, 66, 90-93.

Almeida E.L., Chang Y.K., Steel C.J. 2013. Dietary fiber sources in bread: Influence on technological quality. *LWT- Food Science and Technology* 50, 545-553.

Alvarez-Jubete L., Arendt E. K., Gallagher E. 2009. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 60 (1), 240-257.

Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. 2010a. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional glutenfree ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 106-113.

Alvarez-Jubete L., Auty M., Arendt E., Gallagher E. 2010b. Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free formulations. *European Food Research and Technology*, 230, 437-445.

Anderson J., Holdoway A. 2011. Limited micronutrient data for gluten-free bread products prevents accurate dietary analysis. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 24, 375–407.

Andrews A. 1999. Osteoporosis and coeliac disease. *Nutrition and Food Science*, 6, 285–287.

Angioloni A., Collar C. 2009a. Gel, dough and fibre enriched fresh breads: Relationships between quality features and staling kinetics. *Journal of Food Engineering Volume*, 91 (4), 526–532.

- Angioloni A.**, Collar C. 2009b. Bread crumb quality assessment: a plural physical approach. *European Food Research and Technology*, 229 (1), 21-30.
- Anton A.**, Artfield S. 2008. Hydrocolloids in gluten-free breads: a review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 59 (1), 11–23. doi: 10.1080/09637480701625630.
- AOAC** 1998. Method 925.10 Solids (Total) and Moisture in Flour. In: Horwitz, W. (Ed.), 17th Ed. Official Method of Analysis of AOAC International. Maryland, USA.
- Arendt E.K.**, Ryan L.A.M., Dal Bello F. 2007. Impact of sourdough on the texture of bread. *Food Microbiology*, 24 (2), 165–174.
- Avallone R.**, Plessi M., Baraldi M., Monzani A. 1997. Determination of Chemical Composition of Carob (*Ceratonia siliqua*): Protein, Fat, Carbohydrates, and Tannins. *Journal of Food Composition and Analysis*, 10 (2), 166–172.
- Babin P.**, Della Valle G., Chiron H., Cloetens P., Hoszowska J., Pernot P., Réguerre A.L., Salvo L., Dendievel R. 2006. Fast X-ray tomography analysis of bubble growth and foam setting during breadmaking. *Journal of Cereal Science*, 43 (3), 393–397
- Baixauli R.**, Salvador A., Fiszman S.M. 2008a. Textural and color changes during storage and sensory shelf life of muffins containing resistant starch. *European Food Research and Technology*, 226, 523–530.
- Baixauli R.**, Sanz T., Salvador A., Fiszman S.M. 2008b. Muffins with resistant starch: Baking performance in relation to the rheological properties of the batter. *Journal of Cereal Science* 47, 502–509.
- Barada K.**, Bitar A., Mokadem M.AR., Hashash JG., Green P. 2010. Celiac disease in Middle Eastern and North African countries: A new burden? *World Journal of Gastroenterology*, 16(12), 1449-1457.
- Barak S.**, Mudgil D. 2014. Locust bean gum: Processing, properties and food applications—A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 66, 74–80.
- Batham J.**, Sharma G.K., Khan M.A., Govindaraj T. 2013. Effect of Micronisation on properties of Buckwheat Seed (*Fagopyrum esculentum*). *International Journal of Agriculture and Food Science*, 3 (1), 22-27.
- Battle I.**, Tous J. 1997. Carob tree. *Ceratonia siliqua* L. IPGRI. Rome. Italy.
- Bdioui F.**, Sakly, N., Hassine, M., Saffar, H. 2006. Prevalence of celiac disease in
- Bengoechea C.**, Romero A., Villanueva A., Moreno G., Alaiz M. 2008. Composition and structure of carob (*Ceratonia siliqua* L.) germ proteins. *Food Chemistry*, 107, 675–683.
- Bennion E.B.**, Bamford G.S. 1997. The technology of cake making. Blackie Academic and Professional, London, UK.
- Berghofer E.**, Schoenlechner R. 2002. Grain amaranth. In P. S. Belton, & J. R. N. Taylor (Eds.), *Pseudocereals and less common cereals: Grain properties and utilization potential* (p. 219-260). Berlin: Springer Verlag.

- Bodinham** C.L., Frost G.S., Robertson M.D. 2010. Acute ingestion of resistant starch reduces food intake in healthy adults. *British Journal of Nutrition*, 103, 917–922.
- Bonamico** M., Mariani, P., Danesi, H. M. et al. (2001). Prevalence and clinical picture of celiac disease in Italian Down syndrome patients: a multicenter study. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 33, 139–143.
- Book** L., Hart, A., Black, J., Feolo, M., Zone, J. J., Neuhausen, S. L. 2001. Prevalence and clinical characteristics of celiac disease in Down's syndrome in a U.S. study. *American Journal of Medical Genetics*, 98, 70–74.
- Boudraa** G., Hachelaf W., Benbouabdellah M., Belkadi M., Benmansour F.Z., Touhami M. 1996. Prevalence of coeliac disease in diabetic children and their first-degree relatives in west Algeria: screening with serological markers. *Acta Paediatrica*, 412, 58-60.
- Brady** P.L., Mayer S.M. 1985. Correlations of sensory and instrumental measures of bread texture, *Cereal Chemistry*, 62, 70–72.
- Brites** C., Trigo M., Santos C., Collar C., Rosell C. 2010. Maize-based gluten-free bread: influence of processing parameters on sensory and instrumental quality. *Food Bioprocess Technology* 3 (5), 707–715. doi: 10.1007/s11947-008-0108-4.
- Brooker** B.E. 1996. The role of fat in the stabilisation of gas cells in bread dough. *Journal of Cereal Science*, 24, p.187–198.
- Buttriss** J. L., Stokes C. S. 2008. Dietary fibre and health: An overview. *British Nutrition Foundation, Nutrition Bulletin* 33, 186–200.
- Cappa** C., Lucisano M., Mariotti M. 2013. Influence of psyllium, sugar beet fibre and water on gluten-free dough properties and bread quality. *Carbohydrate Polymers* 98 (2), 1657–1666. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.08.007.
- Capriles** V.D., Arêas J.A.G. 2013. Effects of prebiotic inulin-type fructans on ^ structure, quality, sensory acceptance and glycemic response of gluten-free breads. *Food & Function*, 4 (1), 104–10. doi: 10.1039/c2fo10283h.
- Catassi** C., Fabiani E., Iacono G., D'Agate C., Francavilla R., Biagi F., Volta U., Accomando S., Picarelli A., DeVitis I., Pianelli G., Gesuita R., Carle F., Mandolesi A., Bearzi I., Fasano A. 2007. A prospective, doubleblind, placebo-controlled trial to establish a safe gluten threshold for patients with celiac disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 85, 160-166.
- Catassi** C., Fasano A. 2008. GLUTEN-FREE CEREAL PRODUCTS AND BEVERAGES. Chapter 1: celiac disease. *Food Science and Technology International Series*, 1-22.
- Catassi** C., Kryszak D., Bhatti B., Sturgeon C., Helzlsouer K., Clipp S.L., et al. 2010. Natural history of celiac disease autoimmunity in a USA cohort followed since 1974. *Annals of Medicine* 42, 530–538.
- Catassi** C., Rättsch I.M., Gandolfi L., Pratesi R., Fabiani E., El Asmar R., Frijia M., Bearzi I., Vizzoni L. 1999. Why is coeliac disease endemic in the people of Sahara? *Lancet*, 354, 647–648.

- Cauvain S.P.** 1998. Other cereals in breadmaking. *Technology of Breadmaking*. Blackie Academic and Professional, London, 330–346.
- Cauvain S.**, Young L. 1999. *Technology of breadmaking*. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, Inc. p 295.
- Cauvain S.**, Young L. 2006. *Baked Products: Science, Technology and Practice*. Wiley-Blackwell
- Chang M. S.**, Rubin M., Lewis S.K., Green P.H. 2012. Diagnosing celiac disease by video capsule endoscopy (VCE) when esophogastroduodenoscopy (EGD) and biopsy is unable to provide a diagnosis: a case series. *BMC Gastroenterology* 12(90) doi:10.1186/1471-230X-12-90.
- Chartrand L.J.**, Russo P.A., Dulhaime A.G., Seidman E.G. 1997. Wheat starch intolerance in patients with coeliac disease. *Journal of the American Dietetic Association*, 97, 612–618.
- Chen P.**, Whitney L.F., Peleg M. 1994. Some tensile characteristics of bread crumb. *Journal of Texture Studies*, 25, 299–310.
- Chenlo F.**, Moreira R., Pereira G., Silva C.C. 2007. Evaluation of the rheological behaviour of chestnut (*castanea sativa* mill) flour pastes as function of water content and temperature. *Electronic Journal of Environmental Agriculture and Food Chemistry*, 6 (2), 1794–1802.
- Chorzelski T.P.**, Beutner E.H., Sulej J., Tchorzewska H., Jablonska S., Kumar V., Kapuscinska A. 1984. IgA anti-endomysium antibodies: a new immunological marker of dermatitis herpetiformis and celiac disease. *British Journal of Dermatology*, 111, 395–402.
- Ciclitira P.J.**, Johnson M.W., Dewar D.H., Ellis H.J. 2005. The pathogenesis of coeliac disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 26 (6), 421–458.
- Coda R.**, Rizzello C., Gobbetti M. 2010. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of gamma-aminobutyric acid (GABA). *International Journal of Food Microbiology*, 137 (2–3), 236–245. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.010.
- Codex Alimentarius Commission.** 2008. Codex Standards 118-1979. Joint FAO/WHO Food Standards Programme. In Codex Standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten, adopted in 1979, amended in 1983, revised in 2008.
- Codex Alimentarius Commission.** 2009a. Commission Regulation (EC) No 41/2009 of 20 January 2009 concerning the composition and labelling of foodstuffs suitable for people intolerant to gluten. OJ L16, p3, Accessed 21/01/2009. Available at: https://www.fsai.ie/uploadedFiles/labelling_gluten_free_foods_update.pdf
- Codex Alimentarius Commission.** 2009b. Report of the 31st Session of the Codex Committee on Nutrition and Foods for Special Dietary Uses. Düsseldorf, Germany, 2–6 November, 2009. ALINORM 10/33/26. Accessed December 2009
- Collar C.** 2003. Significance of viscosity profile of pasted and gelled formulated wheat doughs on bread staling. *European Food Research and Technology*, 216, 505–513.

Collar C., Santos E., Rosell C. M. 2006. Significance of Dietary Fiber on the Viscometric Pattern of Pasted and Gelled Flour-Fiber Blends. *American Association of Cereal Chemists*, 83, (4), 370-376.

Collar C., Santos E., Rosell C.M. 2007. Assessment of the rheological profile of fibre-enriched bread doughs by response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 78, 820–826.

Collin P., Thorell L., Kaukinen K., Maki M. 2004. The safe threshold for gluten contamination in gluten-free products. Can trace amounts be accepted in the treatment of celiac disease? *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 19, 1277-1283.

Conforti F.D. 2006. Cake manufacture, In Y.H. Hui (ed.). *Bakery Products: Science and Technology*, Vol. 22. Ames. Blackwell Publishing, USA, p. 393–410.

Córdoba A., 2010. Quantitative fit of a model for proving of bread dough and determination of dough properties *Journal of Food Engineering*, 96, 440–448.

Dakia P. A., Bleckerb C., Roberta C., Watheleta B., Paquota M. 2008. Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment. *Food Hydrocolloids*, 22, 807–818.

Dakia P.A., Wathelet B., Paquot M., 2007. Isolation and chemical evaluation of carob (*Ceratonia siliqua L.*) seed germ. *Food Chemistry*, 102, 1368–1374.

Davidou S., Le Meste M., Debever E., Bekaert D. 1996. A contribution to the study of staling of white bread: effect of water and hydrocolloid. *Food Hydrocolloids*, 10, 375–383.

de la Barca A., Rojas-Martinez M., Islas-Rubio A., Cabrera-Chavez F. 2010. Gluten-free breads and cookies of raw and popped amaranth flours with attractive technological and nutritional qualities. *Plant Foods for Human Nutrition* 65 (3), 241–6. doi: 10.1007/s11130-010-0187-z.

de la Hera E., Martinez M., Gomez M. 2013a. Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *LWT- Food Science and Technology* 54 (1), 199–206.

de la Hera E., Talegon M., Caballero P., Gomez M. 2013b. Influence of maize flour particle size on gluten-free breadmaking. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93 (4), 924–32. doi: 10.1002/jsfa.5826.

Demirkesen I., Mert B., Sumnu G., Sahin S. 2010a. Utilization of chestnut flour in gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering* 101(3), 329–336.

Demirkesen L., Mert B., Sumnu G., Sahin S. 2010b. Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 96 (2), 295–303.

Dewar D.H., Ciclitira P.J. 2005. Clinical features and diagnosis of celiac disease. *Gastroenterology*, 128 (4), 19–24

Di Cagno R., De Angelis M., Auricchio S., Greco L., Clarke C., De Vincenzi M., Giovannini C., D'Archivio M., Landolfo F., Parrilli G., Minervini F., Arendt E., Gobbetti M. 2004. Sourdough bread made from wheat and nontoxic flours and strated with selected lactobacilli is tolerated in celiac sprue patients. *Applied Environmental Microbiology*, 70, 1088–1096.

- Di Cagno R.**, De Angelis M., Lavermicocca P., De Vincenzi M., Giovannini C., Faccia M., Gobbetti M. 2002. Proteolysis by sourdough lactic acid bacteria: effects on wheat flour protein fractions and gliadin peptides involved in human cereal intolerance. *Applied Environmental Microbiology*, 68, 623–633.
- Dieterich W.**, Ehnis T., Bauer M., Donner P., Volta U., Riecken E., Schuppan D. 1997. Identification of tissue transglutaminase as the autoantigen of celiac disease. *Nature Medicine*, 3, 797–801.
- Diplock A.T.**, Aggett P.J., Ashwell M., Bornet F., Fern E.B., Roberfroid M.B. 1999. Scientific concepts of functional foods in Europe: Consensus document. *British Journal of Nutrition*, 81, 1–27.
- do Nascimento A.B.**, Fiates G.M., Dos Anjos A., Teixeira E. 2013. Analysis of ingredient lists of commercially available gluten-free and gluten-containing food products using the text mining technique. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64 (2), 217-22.
- Dobraszczyk B.J.** 2004. Wheat-dough rheology. In: *Encyclopedia of Grain Science*. Eds. Wrigley, C.W., H. Corke and C.E. Walker, Elsevier Ltd. Oxford, UK p. 400-416.
- Donovan W.** 1977. Study of baking process by differential scanning calorimetry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 28, 571–578.
- Drago S.**, El Asmar R., Di Pierro M. R. et al. 2006. Gliadin, zonulin and gut permeability: Effects on celiac and non-celiac intestinal mucosa and intestinal cell lines. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, 41, 408–419.
- Durazzo A.**, Turfani V., Narducci V., Azzini E., Maiani G., Carcea M. 2014. Nutritional characterisation and bioactive components of commercial carobs flours. *Food Chemistry*, 153, 109–113.
- Edwards N. M.**, Mulvaney S. J., Scanlon M. G., Dexter J. E. 2003. Role of gluten and its components in determining durum semolina dough viscoelastic properties. *Cereal Chemistry*, 80, 755–763.
- EFSA.** 2010. Dietary reference values and dietary guidelines. Accessed March, 2010. <http://www.efsa.europa.eu/>
- El Batal H.**, Hasib A. 2013. Optimization of Extraction Process of Carob Bean Gum Purified from Carob Seeds by Response Surface Methodology. *Chemical and Process Engineering Research*, 12, 1-8.
- Elgeti D.**, Nordlohne S.D., Föste M., Besl M., Linden M.H., Heinz V., Jekle M., Becker T. 2014. Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour. *Journal of Cereal Science*, 59 (1), 41–47.
- Eliasson A.C.**, Larsson K. 1993. *Cereals in Breadmaking: A Molecular Colloidal Approach*. New York: Marcel Dekker.
- Elleuch M.**, Bedigian D., Roiseux O., Besbes S., Blecker C., Attia H. 2011. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry*, 124, (2), 411–421.

- Elsurer R.**, Tatar G., Simsek H., Balaban YH., Aydinli M., Sokmensuer C. 2005. Celiac disease in the Turkish population. *Digestive Diseases and Sciences*, 50, 136-142.
- El-Shatnawi M.K.J.**, Ereifej K.I. 2001. *Journal of Range Management Archives*, 54 (6), 669-673.
- FAO/WHO**. 2001. Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria. Cordoba, Argentina, October 1-4. FAO/WHO, 2006. FAO JECFA Monographs 3-JECFA 67/19. R,T. Accessed October, 2001.
- Fasano A.**, Berti I., Gerarduzzi T., Not T., Colletti R.B., Drago S., Elitsur Y., Green P.H.R., Guandalini S., Hill I.D., Pietzak M., Ventura A., Thorpe M., Kryszak D., Fornaroli F., Wasserman S.S., Murray J.A., Horvath K.. 2003. Prevalence of celiac disease in at-risk and not-at-risk groups in the United States: a large multicenter study. *Archives of Internal Medicine*, 163, 286-292.
- Fasano A.**, Catassi, C. 2001. Current approaches to diagnosis and treatment of celiac disease: an evolving spectrum. *Gastroenterology* 120, 636-651.
- FDA**. 2013. FDA Facts: Gluten-free Labelling, Federal Register / Vol. 78, No. 150. Accessed August 5, 2015. Available at: <https://www.federalregister.gov/articles/2013/08/05/2013-18813/food-labeling-gluten-free-labeling-of-foods>
- Feighery C.F.** 1999. Coeliac disease. *British Medical Journal*, 319, 236-239.
- Feillet P.**, Roulland T. 1998. Caroubin: a gluten-like protein isolated from carob bean germ. *Cereal Chemistry*, 75, 488-492.
- Freeman H. J.**, Chopra A., Clandinin MT., Thomson A. BR. 2011. Recent advances in celiac disease. *World Journal of Gastroenterology*, 17(18), 2259-2272.
- Fu J.**, Mulvaney S.J., Cohen C. 1997. Effect of added fat on the rheological properties of wheat flour doughs. *Cereal Chemistry*, 74, 304-311.
- Fuentes-Zaragoza E.**, Riquelme-Navarrete M.J., Sanchez-Zapata E., Perez-Alvarez J.A. 2010. Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, 43, 931-942.
- Gallagher E.**, Gormley T., Arendt E. 2003a. Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*, 56 (2-3), 153-161.
- Gallagher E.**, Kunkel A., Gormley T. R., Arendt E. K. 2003b. The effect of dairy and rice powder addition on loaf and crumb characteristics, and on shelf life (intermediate and long-term) of gluten-free breads stored in a modified atmosphere. *European Food Research and Technology*, 218 (1), 44-48.
- Gallagher E.**, Gormley T.R, Arendt E.K. 2004. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 15 (3-4), 143-152.
- Gan Z.**, Ellis P. R., Schofield J. D. 1995. Gas Cell Stabilisation and Gas Retention in Wheat Bread Dough. *Journal of Cereal Science*, 2 , 215-230.

- Gibson G.R.**, Beatty E.R., Wang X., Cummings J.H. 1995. Selective stimulation of bifidobacteria in the human colon by oligofructose and inulin. *Gastroenterology*, 108 (4), 975–982.
- Gil M. J.**, Callejo M. J., Rodríguez G.. 1997. Effect of water content and storage time on white pan bread quality: instrumental evaluation. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 205, 268– 273.
- Goesaert H.**, Brijs K., Veraverbeke W.S., Courtin C.M., Gebruers K., Delcour J.A. 2005. Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 16 (1–3), 12–30.
- Goh S.M.**, Charalambides M.N., Williams J.G. 2000. Fracture mechanics of food products. I: Proceedings of the 2nd International Symposium on Food Rheology and Structure, p. 259–263.
- Gómez M.**, Ronda F., Caballero P.A., Blanco C.A., Rosell C.M. 2007. Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. *Food Hydrocolloids*, 21 (2), 167–173.
- Gómez M.**, Moraleja A., Oliete B., Ruiz E., Caballero P.A. 2010. Effect of fiber size on the quality of fibre-enriched layer cakes. *LWT- Food Science and Technology*, 43, 33–38.
- Gómez M.**, Ronda F., Blanco C.A., Caballero P.A., Apesteguia A. 2003. Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *European Food Research and Technology*, 216, 51–56.
- Gorgonio C.M.D.S.**, Pumar M., Mothe C.G. 2011. Macroscopic and physiochemical characterization of a sugarless and gluten-free cake enriched with fibers made from pumpkin seed (*Cucurbita maxima*, L.) flour and cornstarch. *Food Science and Technology (Campinas)*, 31, 109–118. doi.org/10.1590/S0101-20612011000100015.
- Gray J.**, Bemiller J. 2003. Bread staling: molecular basis and control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2 (1), 1–21. doi: 10.1111/j.1541-4337.2003.tb00011.x.
- Greco L.**, Romino R., Coto I., Di Cosmo N., Percopo S., Maglio M., Paparo F., Gasperi V., Limongelli M.G., Cotichini R., D'Agate C., Tinto N., Sacchetti L., Tosi R., Stazi M.A. 2002. The first large population based twin study of coeliac disease. *Gut* 50, 624–628.
- Green P.H.**, Rostami K., Marsh M.N. 2005. Diagnosis of coeliac disease. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 19, 389–400.
- Green P.H.**, Shane E., Rotterdam H., Forde K.A., Grossbard L. 2000. Significance of unsuspected celiac disease detected at endoscopy. *Gastrointestinal Endoscopy*, 51, 60–65.
- Gujral H.**, Guardiola I., Carbonell J., Rosell C. 2003a. Effect of cyclodextrinase on dough rheology and bread quality from rice flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51 (13), 3814–3818. doi: 10.1021/jf034112w.
- Gujral H.**, Haros M., Rosell C. 2003b. Starch hydrolyzing enzymes for retarding the staling of rice bread. *Cereal Chemistry*, 80 (6), 750–754.

- Gujral H., Rosell C.** 2004a. Functionality of rice flour modified with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 39 (2), 225–230.
- Gujral H., Rosell C.** 2004b. Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*, 37 (1), 75–81.
- Gularte M.A., de la Hera E., Gómez M., Rosell C.M.** 2012a. Effect of different fibers on batter and gluten-free layer cake properties. *LWT - Food Science and Technology*, 48 (2), 209–214.
- Gularte M.A., Gómez M., Rosell C.M.** 2012b. Impact of Legume Flours on Quality and In Vitro Digestibility of Starch and Protein from Gluten-Free Cakes. *Food and Bioprocess Technology*, 5 (8), 3142-3150
- Haboubi N.Y., Taylor S., Jones S.** 2006. Coeliac disease and oats: a systematic review. *Postgraduate Medical Journal*, 82, 672–678.
- Hager A., Wolter A., Czerny M., Bez J., Zannini E., Arendt E.** 2012. Investigation of product quality, sensory profile and ultrastructure of breads made from a range of commercial gluten-free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research and Technology* 235 (2), 333–344. doi: 10.1007/s00217-012-1763-2.
- Hager A.S., Arendt E.K.** 2013. Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 32 (1), 195–203.
- Hähnel W., Jussofie I., Muller F.** 1995. Investigations into the properties of emulsifiers in yeast-leavened dough by means of infrared-spectroscopy. 2. Experiments on the interaction of emulsifiers with starch and flour and in dough. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und Lebensmittelforschung*, 200, 244–246.
- Hailemariam L., Okos M., Campanella O.** 2007. A mathematical model for the isothermal growth of bubbles in wheat dough. *Journal of Food Engineering*, 82 (4), 466–477.
- Haque A., Morris E.,** 1994. Combined use of ispaghula and HPMC to replace or augment gluten in breadmaking. *Food Research International*, 2, 379-393
- Harmsen H. J. M., Raangs G.C., Franks A.H., Wildeboer-Veloo A. C. M., Welling G.W.** 2002. The Effect of the Prebiotic Inulin and the Probiotic *Bifidobacterium longum* on the Fecal Microflora of Healthy Volunteers Measured by FISH and DGGE. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 14, 211–219.
- Hasjim J., Li E., Dhital S.** 2013. Milling of rice grains: Effects of starch/flour structures on gelatinization and pasting properties. *Carbohydrate Polymers*, 92 (1), 682–690.
- Hausch F., Shan L, Santiago N.A., Gray G.M., Khosla C.** 2002. Intestinal digestive resistance of immunodominant gliadin peptides. *American Journal Physiology - Gastrointestinal and Liver Physiology*, 283, 996–1003.
- He H., Hosney R.C.** 1990. Changes in Bread Firmness and Moisture During Long-Term Storage. *Cereal Chemistry*, 67, 603-605.
- Hee Cho I., Peterson D.G.** 2010. Chemistry of bread aroma: A review. *Food Science and Biotechnology*, 19 (3), 575-582.

- Higgins** J.A. 2004. Resistant starch: metabolic effects and potential health benefits. *Journal of AOAC International*, 87, 761–768.
- Hipsley** E.H. 1953. Dietary fibre and toxemia of pregnancy. *British Medical Journal*, 22 (2), 420–422.
- Hischenhuber** C., Creval R., Jarry B., Maki M., Moneret-Vautrin D.A., Romano A., Troncone R., Ward R. 2006. Review article: Safe amounts of gluten for patients with wheat allergy or coeliac disease. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 23, 559–575.
- Hlynka** I. 1962. Influence of temperature, speed of mixing, and salt on some rheological properties of dough in the farinograph. *Cereal Chemistry*, 39, 286–303.
- Holmes**, G. K. T. 2002. Screening for coeliac disease in type 1 diabetes. *Archives of Disease in Childhood*, 87, 495–499.
- Hoseney** R. C. 1994. *Principles of Cereal Science and Technology*, 2nd edn. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, p. 40, 147–148, 194–195, 197, 342–343.
- Houben** A., Gotz H., Mitzscherling M., Becker T. 2010. Modification of the rheological behavior of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) dough. *Journal of Cereal Science* 51 (3):350–356.
- Houben** A., Hochstotter A., Becker T. 2012. Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. *European Food Research and Technology*, 235 (2), 195–208. doi: 10.1007/s00217-012-1720-0.
- Hue** S., Mention J.J., Monteiro R.C., Zhang S., Cellier C., Schmitz J., Verkarre V., Fodil N., Bahram S., Cerf-Bensussan N., Caillat-Zucman S. 2004. A direct role for NKG2D/MICA interaction in villous atrophy during celiac disease. *Immunity*, 21, 367–377.
- Huebner** F.R., Bietz J.A., Webb B.D., Juliano B.O. 1990. Rice cultivar identification by high- performance liquid chromatography of the endosperm proteins. *Cereal Chemistry* 67, 129–135
- Huebner** F.R., Bietz J.A., Webb B.D., Juliano B.O. 1990. Rice cultivar identification by high- performance liquid chromatography of the endosperm proteins. *Cereal Chemistry*, 67, 129–135.
- Huttner** E., Arendt E. 2010a. Recent advances in gluten-free baking and the current status of oats. *Trends in Food Science & Technology* 21 (6), 303–312.
- Huttner** E., Dal Bello F., Arendt E. 2010b. Rheological properties and bread making performance of commercial wholegrain oat flours. *Journal of Cereal Science* 52 (1):65–71.
- Hwang** M.P., Hayakawa K.I. 1980. Bulk density of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science*, 45, 1400–1402.
- Iipumbu** L. 2008. Compositional analysis of locally cultivated carob (*Ceratonia siliqua*) cultivars and development of nutritional food products for a range of market sectors. Master of Science in Food Science, Department of Food Science, Faculty of AgriSciences, Stellenbosch University.

- ISO.** 1993. Sensory analysis. General guidance for the selection, training and monitoring of assessors. Part 1: Selected assessors (ISO 8586). Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization.
- ISO.** 1994. Sensory analysis- Methodology- Texture profile. (ISO 11036). Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization
- ISO.** 1994. Sensory analysis. General guidance for the selection, training and monitoring of assessors. Part 2: Experts (ISO 8586). Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization
- Ivarsson A., Myléus A., Norström F., van der Pals M., Rosén A., Högberg L., et al.** 2013. Prevalence of childhood celiac disease and changes in infant feeding. *Pediatrics*, 131, 687–694.
- Jabri B., Sollid L.M.** 2006. Mechanisms of disease: Immunopathogenesis of celiac disease. *Nature Clinical Practice Gastroenterology & Hepatology*, 3, 516-525.
- Janatuinen E.K., T.A. Kemppainen, R. Julkunen, V.M. Kosma, M. Mäki, M. Heikkinen.** 2002. No harm from five year ingestion of oats in coeliac disease. *Gut*, 50, 332–335
- Ji Y., Zhu K., Qian H., Zhou H.** 2007. Staling of cake prepared from rice flour and sticky rice flour. *Food Chemistry*, 104, 53–58.
- Jones J.M.** 2014. CODEX-aligned dietary fiber definitions help to bridge the ‘fiber gap’. *Nutrition Journal*, 13:34 doi:10.1186/1475-2891-13-34.
- Juszczak L., Witczak T., Ziobro R., Korus J., Cieslik E., Witczak M.** 2012. Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate Polymers*, 90 (1), 353–60.
- Kadan R., Robinson M., Thibodeaux D., Pepperman A.** 2001. Texture and other physicochemical properties of whole rice bread. *Journal of Food Science* 66 (7), 940–944. doi: 10.1111/j.1365-2621.2001.tb08216.x.
- Kagnoff M.** 2005. Overview and pathogenesis of celiac disease. *Gastroenterology* 128 (4), 10–18.
- Karababa E., Coşkuner Y.** 2013. Physical properties of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.): An industrial gum yielding crop. *Industrial Crops and Products*, 42, 440–446.
- Karim A.A., Norziah M.H., Seow C.C.** 2000. Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*, 71, 9–36.
- Kaushal P., Kumar V., Sharma, H. K.** 2012. Comparative study of physicochemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeonpea (*Cajanus cajan*) flour and their blends. *LWT— Food Science and Technology*, 48, 59–68.
- Kawamura-Konishi Y., Shoda K., Koga H., Honda Y.** 2013. Improvement in gluten-free rice bread quality by protease treatment. *Journal of Cereal Science*, 58 (1), 45–50.
- Khatkar B. S., Schofield J. D.** 2002. Dynamic rheology of wheat flour dough. I. Non-linear viscoelastic behaviour. *Journal of Science Food and Agricultural*, 82, 827–829.

- Kim C.S.**, Walker C.E. 1992. Effects of sugars and emulsifiers on starch gelatinization evaluated by differential scanning calorimetry. *Cereal Chemistry*, 69, 212–217.
- Kiosseoglou V.**, Paraskevopoulou A. (2006). Eggs. In Y. H. Hui, H. Corke, I. De Leyn, W. Nip, & N. Cross (Eds.), *Bakery products: Science and technology* Oxford, UK: Blackwell, Publishing, p. 161-172.
- Kiskini A.**, Kapsokefalou M., Yanniotis S., Mandala I. 2012. Effect of iron fortification on physical and sensory quality of gluten-free bread. *Food and Bioprocess Technology* 5 (1), 385–390. doi: 10.1007/s11947-011-0651-2.
- Kohajdová Z.**, Karovičová J., Schmidt S. 2009. Significance of Emulsifiers and Hydrocolloids in Bakery Industry. *Acta Chimica Slovaca*, 2 (1), 46 – 61.
- Korus J.**, Grzelak K., Achremowicz K., Sabat R. 2006. Influence of Prebiotic Additions on the Quality of Gluten-free Bread and on the Content of Inulin and Fructooligosaccharides. *Food Science and Technology International* 12 (6), 489–495
- Korus J.**, Juszczak L., Ziobro R., Witczak M., Grzelak K., SOJka M. 2012. Defatter strawberry and blackcurrant seeds as functional ingredients of gluten-free bread. *Journal Of Texture Study*, 43 (1), 29–39. doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00314.x
- Korus J.**, Witczak M., Ziobro R., Juszczak L. 2009. The impact of resistant starch on characteristics of gluten-free dough and bread. *Food Hydrocolloids*, 23 (3), 988–995.
- Krupa-Kozak U.**, Altamirano-Fortoul R., Wronkowska M., Rosell C. 2012. Breadmaking performance and technological characteristic of gluten-free bread with inulin supplemented with calcium salts. *European Food Research and Technology*, 235 (3), 545–54. doi: 10.1007/s00217-012-1782-z.
- Krupa-Kozak U.**, Troszynska A., Baczek N., Soral-Smietana M. 2011a. Effect of organic calcium supplements on the technological characteristic and sensory properties of gluten-free bread. *European Food Research and Technology*, 232 (3), 497–508. doi: 10.1007/s00217-010-1421-5.
- Kupper C.** 2005. Dietary guidelines and implementation for celiac disease. *Gastroenterology*, 128 (4), 121-127.
- Laureati M.**, Giussani B., Pagliarini E. 2012. Sensory and hedonic perception of gluten-free bread: Comparison between celiac and non-celiac subjects. *Food Research International*, 46 (1), Pages 326–333.
- Laurikainen T.**, Harkonen H., Autio K., Poutanen K. 1998. Effects of enzymes in fibre-enriched baking. *Journal of Science and Food Agriculture*, 76, 239–249.
- Lawton J.W.** 1992. Viscoelasticity of zein-starch doughs. *Cereal Chemistry*, 69, 351–355
- Lazaridou A.**, Duta D., Papageorgiou M., Belc N., Biliaderis C. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering* 79 (3), 1033–47.
- 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 Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*, 204 (4), 316-320.

- Lim** S-T., Lee J-H., Shin D.H., Lim H.S. 1999. Comparison of protein extraction solutions for rice starch isolation and effects of residual protein content on starch pasting properties. *Starch*, 51, 120–125.
- Linko** Y.Y., Javanainen P., Linko S. 1997. Biotechnology of bread baking. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 339-343.
- Lionetti** E., Gatti S., Pulvirentic A., Catassi C. 2015. Celiac Disease From A Global Perspective. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*. In Press, Accepted Manuscript. doi:10.1016/j.bpg.2015.05.004
- Liu** Z., Scanlon M. G. 2003. Predicting mechanical properties of bread crumb. *Food and Bioproducts Processing*, 81 (3), 224–238.
- Lohiniemi** S., Maki M., Kaukinen K., Laippala P., Collin P. 2000. Gastrointestinal symptoms rating scale in coeliac patients on wheat starch-based gluten-free diets. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, 35, 947–949.
- Lopez** A., Pereira A., Junqueira R.. 2004. Flour mixture of rice flour, corn and cassava starch in the production of gluten-free white bread. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 47 (1), 63–70.
- Lupton** J.R. 2010. Codex Definition of Dietary Fibre and Issues Requiring Resolution. In: *Dietary fibre: New Frontiers for Food and Health*, Van der Kamp, J.W., Jones, J., McCleary, B. & Topping, D. (eds.). Wageningen Academic Publishers, the Netherlands, pp.15-25-79.
- Luthria** D. 2006. Significance of sample preparation in developing analytical methodologies for accurate estimation of bioactive compounds in functional foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 2266–2272.
- Luyten** H., van Vliet T., Walstra P. 1992. Comparison of various methods to evaluate fracture phenomena in food materials. *Journal of Texture Studies*, 23, 245–266.
- Majzoobi** M., Hedayati S., Habibi M., Ghiasi F., Farahnaky A. 2014. Effects of Corn Resistant Starch on the Physicochemical Properties of Cake. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16, 569-576.
- Maki** K.C., Pelkman C.L., Finocchiaro E.T., Kelley K.M., Lawless A.L., Schild A.L., Rains T.M. 2012. Resistant starch from high-amylose maize increases insulin sensitivity in overweight and obese men. *Journal of Nutrition*, 142, 717-723.
- Mankaï** A., Landolsi H., Chahed A., Gueddah L., Limem M., Ben Abdesslem M., Yacoub-Jemni S., Ghannem H., Jeddi M., Ghedira I. 2006. Celiac disease in Tunisia: serological screening in healthy blood donors. *Pathologie Biologie*, 54, 10-13.
- Marakis** S. 1996. Carob bean in food and feed: current status and future potentials: a critical appraisal. *Journal of Food Science and Technology*, 33 (5), 365-383.
- Marco** C., Rosell C. M. 2008a. Breadmaking performance of protein enriched, gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 227, 1205–1213.
- Marco** C., Rosell C.M. 2008b. Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. *Journal of Food Engineering*, 84, 132–139.

- Marcone** M. F., Kakuda Y., Yada R. Y. 1998. Salt-soluble seed globulins of various dicotyledonous and monocotyledonous plants-Isolation/purification and characterization. *Food Chemistry*, 62 (1), 27–47.
- Marechal** P.A, Martinez de Marañon I., Molin P., Gervais P. 1995. Yeast cell responses to water potential variations. *International Journal of Food Microbiology* 28, 277-287.
- Mariani** P., Viti M.G., Montuori M., La Vecchia A., Cipolletta E., Calvani L., Bonamico M. 1998. The gluten-free diet: a nutritional risk factor for adolescents with celiac disease? *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 27, 519–523.
- Mariotti** M., Lucisano M., Pagani M., Ng P. 2009. The role of corn starch, amaranth flour, pea isolate, and psyllium flour on the rheological properties and the ultrastructure of gluten-free doughs. *Food Research International* 42 (8), 963–975.
- Mariotti** M., Pagani M.A., Lucisano M. 2013. The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*, 30 (1), 393–400.
- Marketsandmarkets.com 2013.** Gluten-free products market by type, sales channel and geography: global trends and forecasts to 2018. Accessed October, 2013 <http://www.marketsandmarkets.com/MarketReports/gluten-free-products-market-738.html>
- Martínez-Cervera** S., Sanz T., Salvador A., Fiszman S.M. 2012. Rheological, textural and sensorial properties of low-sucrose muffins reformulated with sucralose/polydextrose. *LWT- Food Science and Technology*, 45, 213-220.
- Mastromatteo** M., Danza A., Guida M., Del Nobile M.A. 2012. Formulation optimisation of vegetable flour-loaded functional bread. Part II: effect of the flour hydration on the bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 47 (10), 1-8. doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03077.x
- Matkovic** K. 2013. Leveraging the Functional Attributes of Fiber in Bakery Product Development. *Functional Fiber, Gluten-Free Bakery*, available online at: <http://www.preparedfoods.com/articles/112988-functional-fiber-gluten-free-bakery>
- Matos** M.E., Rosell C.M. 2011. Chemical composition and starch digestibility of different gluten-free breads. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66, 224-230.
- Matos** M.E., Rosell C.M. 2013. Quality Indicators of Rice-Based Gluten-Free Bread-Like Products: Relationships Between Dough Rheology and Quality Characteristics. *Food Bioprocess Technology*, 6, 2331–2341.
- Matos** M.E., Sanz T., Rosell C.M. 2014. Establishing the function of proteins on the rheological and quality properties of rice based gluten free muffins. *Food Hydrocolloids*, 35, 150–158.
- McCarthy** D., Gallagher E., Gormley T., Schober T., Arendt E. 2005. Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, 82 (5), 609–615.
- McCleary** B.V. 2010. Development of an integrated total dietary fiber method consistent with the Codex Alimentarius definition. *Cereal Foods World*, 55 (1), 24–28.

- Meiske** D.P., Jones M.F., Jones E.M. 1960. The effect of various sugars on the formation and character of gluten. *Cereal Chemistry*, 37, 483–488.
- Mezger** G.T. 2006. *The rheology handbook*. Vincentz Network GmbH & Co KG, Hannover, Germany.
- Mills** E.N.C., Wilde P.J., Salt L.J., Skeggs P. 2003. Bubble Formation and Stabilization in Bread Dough. *Food and Bioproducts Processing*, 81 (3), 189–193.
- Miñarro** A., Albanell E., Aguilar N., Guamis B., Capellas M. 2012. Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 56 (2), 476–481.
- Miranda** J., Lasa A., Bustamante M. A., Churrua I., Simon E. 2014. Nutritional Differences Between a Gluten-free Diet and a Diet Containing Equivalent Products with Gluten. *Plant Foods for Human Nutrition*, 69, 182–187.
- Miś** A. 2011. Interpretation of mechanical spectra of carob fibre and oat wholemeal-enriched wheat dough using non-linear regression models. *Journal of Food Engineering*, 102, 369–379.
- Miyazaki** M., van Hung P., Maeda T., Morita N. 2006. Recent advances in application of modified starches for breadmaking. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 591–599.
- Mohammadi** M., Sadeghnia N., Azizi M.H., Neyestani T., Mortazavian A.M. 2014. Development of gluten-free flat bread using hydrocolloids: Xanthan and CMC. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (4), 1812–1818.
- Molberg** O., Uhler, A.K., Jensen, T., Ftaete, N.S., Burkard, F., Arentz-Hansen, H., Lundin, K.E.A., Sollid, L.M. 2005. Mapping of gluten T-cell epitopes in the bread wheat ancestors; implications for coeliac disease. *Gastroenterology*, 128 (2), 393–401.
- Moore** M., Heinbockel M., Dockery P., Ulmer H., Arendt E. 2006. Network formation in gluten-free bread with application of transglutaminase. *Cereal Chemistry*, 83 (1), 28–36.
- Moore** M., Schober T., Dockery P., Arendt E. 2004. Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads *Cereal Chemistry*, 81, 567–575.
- Morais** E.C., Cruz A.G, Faria J.A.F., Bolini H.M.A. 2014. Prebiotic gluten-free bread: Sensory profiling and drivers of liking. *LWT - Food Science and Technology*, 55 (1), 248–254.
- Moreira** R., Chenlo F., Torres M.D. 2013. Effect of chia (*Sativa hispanica* L.) and hydrocolloids on the rheology of gluten-free doughs based on chestnut flour. *LWT-Food Science and Technology* 50 (1), 160–66. doi: 10.1016/j.lwt.2012.06.008.
- 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.
- Murphy** M.M., Douglass S.J., Birkett A. 2008. Resistant starch intakes in the United States. *Journal of American American Association*, 108, 67–78

- Mustalahti K.**, Catassi C., Reunanen A., Fabiani E., Heier M., McMillan S., Murray L., Metzger M.H., Gasparin M., Bravi E., Mäki M. 2010. The prevalence of CD in Europe: results of a centralized, international mass screening project. *Annals of Medicine* 42, 587–595.
- National Starch**, Hi-Maize 260 Technical Service Bulletin. Ingredion , Westchester, IL, USA. <http://www.foodinnovation.com>
- Ngarize S.**, Adams A., Howell N.K. 2004. Studies on egg albumen and whey protein interactions by FT-Raman spectroscopy and rheology. *Food Hydrocolloids*, 18, 49–59.
- Niewinski M.M.** 2008. Advances in Celiac Disease and Gluten-Free Diet. *Journal of the American Dietetic Association*, 108 (4), 661–672.
- Nonaka M.**, Tanaka H., Okiyama A., Motoki M., Ando H., Umeda K., Matsura A. 1989. Polymerization of several proteins by Ca²⁺-independent transglutaminase derived from microorganism. *Agricultural and Biological Chemistry*, 53, 2619-2623.
- Noort M.W.J.**, van 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*, 52 (1), 59–64.
- Norris J.M.**, Barriga K., Hoffenberg E.J., Taki, Miao D., Haas J.E., Emery L.M., Sokol R.J., Erlich H.A., Eisenbarth G.S., Rewers M. 2005. Risk of celiac disease autoimmunity and timing of gluten introduction in the diet of infants at increased risk of disease. *JAMA*, 293, 2343-2351.
- Nugent A. P.** 2005. Health properties of resistant starch. *British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin*, 30, 27–54.
- Nunes M.**, Moore M., Ryan L., Arendt E. 2009. Impact of emulsifiers on the quality and rheological properties of gluten-free breads and batters. *European Food Research and Technology*, 228 (4), 633–642. doi: 10.1007/s00217-008- 0972-1.
- Nussinovitch A.**, Roy I., Peleg M. 1990. Testing bread slices in tension mode. *Cereal Chemistry*, 67, 101–103.
- Onyango C.**, Mutungi C., Unbehend G., Lindhauer M. 2011. Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *LWT- Food Science and Technology* 44 (3), 681–686.
- Onyango C.**, Unbehend G., Lindhauer M.G. 2009a. Effect of cellulose-derivatives and emulsifiers on creep-recovery and crumb properties of gluten-free bread prepared from sorghum and gelatinised cassava starch. *Food Research International*, 42, 949–955.
- Onyango C.**, Mutungi C., Unbehend G., Lindhauer M. G. 2009b. Creep-recovery parameters of gluten-free dough and crumb properties of bread prepared from pregelatinised cassava starch, sorghum and selected proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2493–2499.
- Onyango C.**, Mutungi C., Unbehend G., Lindhauer M. G. 2010. Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pregelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase. *Journal of Food Engineering*, 97, 465-470.

- O'Shea N.**, Arendt E., Gallagher E. 2014. State of the Art in Gluten-Free Research. *Journal of Food Science*, 79, 1067-1076.
- O'Shea N.**, Röbke C., Arendt E., Gallagher E. 2015. Modelling the effects of orange pomace using response surface design for gluten-free bread baking. *Food Chemistry*, 166, 223-230.
- Owen R.W.**, Haubner R., Hull W.E., Erben G., Spiegelhalder B., Bartsch H., Haber B. 2003. Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *Food and Chemical Toxicology*, 41 (12), 1727–1738.
- Pareyt B.**, Finnie S.M., Putseys J.A, Delcour J.A. 2011. Lipids in bread making: Sources, interactions, and impact on bread quality. *Journal of Cereal Science*, 54 (3), 266–279
- Park S. J.**, Ha K.Y., Shin M. 2012. Properties and qualities of rice flours and gluten-free cupcakes made with higher-yield rice varieties in Korea. *Food Science and Biotechnology*, 21, 365-372.
- Pasqualone A.**, Caponio F., Summo C., Paradiso V., Bottega G., Pagani M. 2010. Gluten-free bread making trials from cassava (*Manihot esculenta* Crantz) flour and sensory evaluation of the final product. *International Journal of Food Properties*, 13 (3), 562–73. doi: 10.1080/10942910802713172.
- Peräaho M.**, Collin P., Kaukinen K., Kekkonen L., Miettinen S., Mäki M. 2004. Oats can diversify a gluten-free diet in celiac disease and dermatitis herpetiformis. *Journal of the American Dietetic Association*, 104, 1148–1150.
- Persaud J.N.**, Faubion J.M., Ponte J.G. 1990. Dynamic rheological properties of bread crumb. I. Effects of storage time, temperature, and position in the loaf. *Cereal Chemistry*, 67, 92–96.
- Phimolsiripol Y.**, Mukprasirt A., Schoenlechner R. 2012. Quality improvement of rice-based gluten-free bread using different dietary fibre fractions of rice bran. *Journal of Cereal Science*, 56 (2), 389–395.
- Praznik W.**, Cieslik E., Filipiak-Florkiewicz A. 2002. Soluble dietary fibres in Jerusalem artichoke powders: Composition and application in bread. *Nahrung*, 46 (3), 151–157.
- Protonotariou S.V.**, Karali E., Evageliou V., Yanniotis S., Mandala I. 2013. Rheological and sensory attributes of cream caramel desserts containing fructooligosaccharides as substitute sweeteners. *International Journal of Food Science & Technology*, 48, 663-669.
- Pruska-Kedzior A.**, Kedzior Z., Goracy M., Pietrowska K., Przybylska A., Sychalska K. 2008. Comparison of rheological, fermentative and baking properties of gluten-free dough formulations. *European Food Research and Technology* 227, (5), 1523–1536. doi: 10.1007/s00217-008-0875-1.
- 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.
- Pyler E.J.** 1998. *Baking science & technology* (3rd ed.). Sosland Publishing Company, Kansas City, MO.

- Raben A.**, Tagliabue A., Christensen N. J., Madsen J., Holst J. J., Astrup A. 1994. Resistant starch: The effect on postprandial glycemia, hormonal response and satiety. *American Journal of Clinical Nutrition*, 60, 544–551.
- Ragaee S.**, Abdel-Aal E. M. 2006. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry*, 95, 9–18.
- Rao M.A.**, Kash S.F., Coole H.J., Barnard J. 1987. Desktop computer based collection and analysis of creep-compliance data on fluid foods. *Journal of Texture Studies*, 18, 405–413.
- Rätsch I. M.**, Catassi, C. 2001. Coeliac disease: a potentially treatable health problem
- Reader D.**, Johnson M. L., Hollander P., Franz M. 1997. Response of resistant starch in a food bar vs. two commercially available bars in persons with type II diabetes mellitus. *Diabetes*, 46 (1), 254.
- Renzetti S.**, Arendt E. 2009a. Effects of oxidase and protease treatments on the breadmaking functionality of a range of gluten-free flours. *European Food Research and Technology*, 229 (2), 307–317. doi: 10.1007/s00217-009-1048-6.
- Renzetti S.**, Arendt E. 2009b. Effect of protease treatment on the baking quality of brown rice bread: From textural and rheological properties to biochemistry and microstructure. *Journal of Cereal Science*, 50 (1), 22–28.
- Renzetti S.**, Dal Bello F., Arendt E. 2008. Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science* 48 (1), 33–45.
- Ribotta P.**, Ausar S., Morcillo M., Perez G., Beltramo D., Leon A. 2004. Production of gluten-free bread using soybean flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (14), 1969–1974. doi: 10.1002/jsfa.1915.
- Ribotta P.D.**, Colombo A., León A.E, Añón M.C. 2007. Effects of Soy Protein on Physical and Rheological Properties of Wheat Starch. *Starch/Stärke*, 59, 614–623.
- Rizzello C.G.**, De Angelis M., Di Cagno R., Camarca A., Silano M., Losito I., De Vincenzi M., De Bari M.D., Palmisano F., Maurano F., Gianfrani C., Gobbetti M. 2007. Highly efficient gluten degradation by lactobacilli and fungal proteases during food processing: new perspectives for celiac disease. *Applied Environmental Microbiology* 73, 4499–4507.
- Roehrig K.L.** 1988. The physiological effects of dietary fiber. *Food Hydrocolloids*, 2, 1–18.
- Rojas J.A.**, Rosell C.M., Benedito de Barber C. 1999. Pasting properties of different wheat flour-hydrocolloid systems. *Food Hydrocolloids*, 13 (1), 27–33.
- Roka V.**, Potamianos S.P., Kapsoritakis A.N., Yiannaki E.E., Koukoulis G.N., Stefanidis I., Koukoulis G.K., Germenis A.E. 2007. Prevalence of coeliac disease in the adult population of central Greece. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, 19, 982–987.
- Roma E.**, Panayiotou J., Karantana H., Constantinidou C., Siakavellas S.I, Krini M., Syriopoulou V.P., Bamias G. 2009. Changing Pattern in the Clinical Presentation of

Pediatric Celiac Disease: A 30-Year Study. *Digestion*, 80, 185–191. DOI: 10.1159/000227275

Romano A., Toraldo G., Cavella S., Masi P. 2007. Description of leavening of bread dough with mathematical modeling. *Journal of Food Engineering*, 83 (2), 142–148.

Ronda F., Oliete B., Gómez M., Caballero P.A., Pando V. 2011. Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *Journal of Food Engineering*, 102, 272–277.

Ronda F., Perez-Quirce S., Angioloni A., Collar C. 2013. Impact of viscous dietary fibres on the viscoelastic behaviour of gluten-free formulated rice doughs: a fundamental and empirical rheological approach. *Food Hydrocolloids* 32 (2), 252–62.

Rosell C.M., Rojas J.A., Benito de Barber C., 2001. Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, 15, 75–81.

Rosell C.M., Santos E., Collar C. 2006. Mixing properties of fibre-enriched wheat bread doughs: a response surface methodology study. *European Food Research and Technology*, 223, 333–340.

Rostom A., Dubé C., Cranney A., Saloojee N., Sy R., Garritty C., Sampson M., Zhang L., Yazdi F., Mamaladze V., Pan I., MacNeil J., Mack D., Patel D., Moher D. 2005. The diagnostic accuracy of serologic tests for celiac disease: a systematic review. *Gastroenterology*, 128, 38-46.

Sabanis D., Tzia C., Papadakis S. 2008. Effect of Different Raisin Juice Preparations on Selected Properties of Gluten-Free Bread. *Food and Bioprocess Technology*, 1 (4), 374-383.

Sabanis D., Lebesi D., Tzia C. 2009a. Effect of dietary fibre enrichment on selected properties of gluten-free bread. *LWT- Food Science and Technology* 42 (8), 1380–1389.

Sabanis D., Lebesi D., Tzia C. 2009b. Development of fibre-enriched gluten-free bread: a response surface methodology study. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60 (4), 174-190.

Sabanis D., Tzia C. 2011. Selected Structural Characteristics of HPMC-Containing Gluten Free Bread: A Response Surface Methodology Study for Optimizing Quality. *International Journal of Food Properties*, 14 (2), 417-431.

Sacchetti G., Pinnavaia G.G., Guidolin E., Dalla-Rosa M. 2004. Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. *Food Research International*, 37, 527–534

Sadowska J., Blaszczyk W., Fornai J., Vidal-Valverde C., Frias J. 2003. Changes of wheat dough and bread quality and structure as a result of germinated pea flour addition. *European Food Research and Technology*, 216, 46–50.

Sahi S.S., Alava J.M. 2003. Functionality of emulsifiers in sponge cake production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83 (14), 1419–1429.

Sahin S. 2008. Food engineering aspects of baking sweet goods, Chapter 5. Cake Batter Rheology. CRC Press, Taylor and Francis Group, p 99-100.

- Sahlström** W., Park D.R., Shelton. 2004. Factors influencing yeast fermentation and the effect of LMW sugars and yeast fermentation on hearth bread quality. *Cereal Chemistry*, 81 (3), 328–335.
- Sajilata** M. G., Singhai R. S., Kulkarni P. R. 2006. Resistant starch a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Technology*, 5, 1–17.
- Sakač** M., Torbica A., Sedej I., Hadnađev M. 2011. Influence of breadmaking on antioxidant capacity of gluten free breads based on rice and buckwheat flours. *Food Research International*, 44, 2806–2813.
- Salt** L.J., Wilde P.J., Georget D., Wellner N., Skeggs P.K., Mills E.N.C. 2006. Composition and surface properties of dough liquor. *Journal of Cereal Science*, 43, 284–292.
- Sanchez** H., Osella C., de la Torre M. 2002. Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch. *Journal of Food Science* 67 (1), 416–419. doi: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb11420.x.
- Sanchez** H., Osella C., de la Torre M. 2004. Use of response surface methodology to optimize gluten-free bread fortified with soy flour and dry milk. *Food Science and Technology International*, 10 (1), 5–9. doi: 10.1177/1082013204042067.
- Sangnark** A., Noomhorm A. 2003. Effect of particles sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse. *Food Chemistry*, 80, 221–229.
- Sangnark** A., Noomhorm A. 2004. Chemical, physical and baking properties of dietary fiber prepared from rice straw. *Food Research International*, 37 (1), 66–74.
- Sanz-Penella** J.M., Wronkowska M., Soral-Smietana M., Collar C., Haros M. 2010. Impact of the addition of resistant starch from modified pea starch on dough and bread performance. *European Food Research and Technology*, 231, 499–508.
- Sategna-Guidetti** C., Volta, U., Ciacci, C. et al. 2001. Prevalence of thyroid disorders
- Scanlon** M.G., Fahloul D., Sapirstein H.D. 1997. A measure of fracture toughness of bread crumb. *Cereal Chemistry*, 74, 612–616.
- Scanlon** M.G., Zghal M.C. 2001. Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34, 841–86.
- Schober** T., Bean S., Boyle D. 2007. Gluten-free sorghum bread improved by sourdough fermentation: Biochemical, rheological, and microstructural background. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (13), 5137–5146. doi: 10.1021/tjf0704155.
- Schober** T.J., Messerschmidt M, Bean S.R., Park S.-H., Arendt E.K. 2005. Gluten-Free Bread from Sorghum: Quality Differences Among Hybrids. *Cereal Chemistry*, 82 (4), 394–404.
- Schober** T.J., Bean S.R., Boyle D.L., Park S.H. 2008. Improved viscoelastic zein-starch doughs for leavened gluten-free breads: Their rheology and microstructure. *Journal of Cereal Science*, 48 (3), 755–767
- Schoenlechner** R., Mandala I., Kiskini A., Kostaropoulos A., Berghofer E. 2010. Effect of water, albumen and fat on the quality of gluten-free bread containing amaranth.

International Journal of Food Science & Technology, 45 (4), 661–669. doi: 10.1111/j.1365-2621.2009.02154.x.

Scholz-Ahrens E., Ade P., Marten B., Weber P., Timm W., Yahya A. 2007. Prebiotics, probiotics, and synbiotics affect mineral absorption, bone mineral content, and bone structure. *Journal of Nutrition*, 137, 838–846.

Schuppan D., Esslinger B., Dieterich W. 2003. Innate immunity and celiac disease. *Lancet*, 362, 3-4.

Schuppan D., Junker Y., Barisani D. 2009. Celiac Disease: From Pathogenesis to Novel Therapies. *Gastroenterology*, 137:1912–1933.

Schwarzlaff S.S., Johnson J.M., Barbeau W.E., Duncan S. 1996. Guar and locust bean gums as partial replacers of all-purpose flour in bread: an objective and sensory evaluation. *Journal of Food Quality*, 19, 217–229.

Sciarini L. S., Ribotta P.D, León A.E., Pérez G.T. 2010. Effect of hydrocolloids on gluten-free batter properties and bread quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 45 (11), 2306–2312.

Sciarini L., Ribotta P., Leon A., Perez G. 2012. Incorporation of several additives into gluten free breads: effect on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*, 111 (4), 590–597.

Segura M.E., Rosell C.M. 2011. Chemical composition and starch digestibility of different gluten free breads. *Plant Foods and Human Nutrition*, 66 (3), 224-30.

Shahbazkhani B., Malekzadeh R., Sotoudeh M., Moghadam K.F., Farhadi M., Ansari R., Elahyfar A., Rostami K. 2003. High prevalence of coeliac disease in apparently healthy Iranian blood donors. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, 15, 475-478.

Shamir R., Lerner A., Shinar E., Lahat N., Sobel E., Bar-or R., Kerner H., Eliakim R. 2002. The use of a single serological marker underestimates the prevalence of celiac disease in Israel: a study of blood donors. *The American Journal of Gastroenterology*, 97, 2589-2594.

Shan L., Molberg O., Parrot I., Hausch F, Filiz F., Gray G.M., Sollid L.M., Koshla C. 2002. Structural basis for gluten intolerance in coeliac sprue. *Science*, 297, 2275–2279.

Shan L., Qiao S.W., Arentz-Hansen H., Molberg O., Gray G.M., Sollid L.M., Khosla C. 2005. Identification and analysis of multivalent proteolytically resistant peptides from gluten: Implications for celiac sprue. *Journal of Proteome Research*, 4, 1732-1741.

Sharma A., Yadav B.S., Ritika A. 2008. Resistant starch: physiological roles and food applications. *Food Reviews International*, 24,193–234.

Shepherd I.S., Yoell R. 1976. Cake emulsions. S. Friberg (Ed.), *Food emulsions*, Marcel Dekker, New York, NY, USA, p. 216–275.

Shih C.K., Chen S.H., Hou W.C., Cheng H.H. 2007. A high-resistance-starch rice diet reduces glycosylated hemoglobin levels and improves the antioxidant status in diabetic rats. *Food Research International*, 40, 842–847.

- Singh J.**, Whelan K. 2011. Limited availability and higher cost of gluten-free foods. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 24, 479-486
- Siqueira M.P.**, Sandri L.T.B., Capriles V.D. 2013. Optimization of sensory properties of unripe banana flour-based gluten-free bread: a mixture experimental design approach. X Latin American Symposium of Food Science. Sao Paulo, Brazil. 3-6 November 2013. Campinas. Proceedings of ~ X Latin American Symposium of Food Science.
- Sivaramakrishnan H. P.**, Senge B., Chattopadhyay P. K. 2004. Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, 62, 37-45.
- Skendi A.**, Biliaderis C.G., Lazaridou A., Izydorczyk M.S. 2003. Structure and rheological properties of water soluble β -glucans from oat cultivars of *Avena sativa* and *Avena bysantina*. *Journal of Cereal Science*, 38, 15-31.
- Skendi A.**, Papageorgiou M., Biliaderis C.G. 2009. Effect of barley β -glucan molecular size and level on wheat dough rheological properties. *Journal of Food Engineering*, 91, 594-601.
- Skerritt J.H.**, Hill A.S. 1992. How 'free' is 'gluten-free'? Relationship between Kjeldahl nitrogen values and gluten protein content for wheat starches. *Cereal Chemistry*, 69, 110-112.
- Smith B.M.** 2009. Characterization and functionality of carob germ proteins. [MS thesis]. Manhattan, KS: Kansas State Univ. 89 p. Available from: <http://krex.k-state.edu>.
- Smith B.M.**, Bean S., Schober T., Tilley M., Herald T., Aramouni F. 2010. Composition and molecular weight distribution of carob germ protein fractions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 7794-7800.
- Smith B.M.**, Bean S.R., Herald T.J., Aramouni F.M. 2012. Effect of HPMC on the Quality of Wheat-Free Bread Made from Carob Germ Flour-Starch Mixtures. *Journal of Food Science*, 77 (6), 684-689. doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02739.x.
- Sollid L.M.** 2000. Molecular basis of celiac disease. *Annual Review of Immunology*, 18, 53-81.
- Steffe J. F.** 1996. *Rheological methods in food process engineering* (2nd ed.). East Lansing, MI, USA: Freeman Press
- Stevens L.**, Rashid M. 2008. Gluten-Free and Regular Foods: A Cost Comparison. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research*, 69 (3), 147-150, DOI: 10.3148/69.3.2008.147.
- Stojceska V.**, Ainsworth P. 2008. The effect of different enzymes on the quality of high-fibre enriched brewer's spent grain breads. *Food Chemistry*, 110, 865-872.
- Storck C.**, Zavareze E., Gularte M., Elias M., Rosell C., Dias A. 2013. Protein enrichment and its effects on gluten-free bread characteristics. *LWT- Food Science and Technology*, 53 (1), 346-354.
- Sudha M.L.**, Baskaran V., Leelavathi K. 2007. Apple pomace as a source of dietary fibre and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making. *Food Chemistry*, 104, 686-692.

- Sun X.**, Qiao Y. 2012. Effect of Ginkgo protein on moisture content and hardness of bread. *Advanced Materials Research*, 531, 395-398
- Symons L. J.**, Brennan C. S. 2004. The Effect of Barley β -Glucan Fiber Fractions on Starch Gelatinization and Pasting Characteristics. *Journal of Food Science*, 69 (4), 257–261.
- Tabilo-Munizaga G.**, Barbosa-Canovas G.V. 2005. Rheology in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67, 147–156.
- Tasha K.**, Mohsin R. 2014. Assessment of Nutritional Adequacy of Packaged Gluten-Free Food Products. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research*, 75 (4), 186-190
- Tatar G.**, Elsurer R., Simsek H., Balaban Y.H., Hascelik G., Ozcebe O.I., Buyukasik Y., Sokmensuer C. 2004. Screening of tissue transglutaminase antibody in healthy blood donors for celiac disease screening in the Turkish population. *Digestive Diseases and Sciences*, 49, 1479-1484.
- Taylor J. R. N.**, Parker M. L. 2002. Quinoa. In P. S. Belton, & J. R. N. Taylor (Eds.), *Pseudocereals and less common cereals: Grain properties and utilization* (p. 93-122).
- Taylor J.**, Emmambux M., Arendt E., Dal Bello F. 2008. Gluten-free foods and beverages from millets. In: Arendt EK, Dal Bello F, editors. *Gluten-free cereal products and beverages*. USA: Academic Press. p. 119–148.
- Thompson T.** 2000. Folate, iron, and dietary fiber contents of the gluten-free diet. *Journal of the American Dietetic Association*, 100, 1389-1395.
- Thompson T.**, Dennis M., Higgins L.A., Lee A.R., Sharrett M.K. 2005. Gluten-free diet survey: are Americans with coeliac disease consuming recommended amounts of fibre, iron, calcium and grain foods? *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 18, 163–169
- Tommasini A.**, Not T., Kiren V., Baldas V., Santon D., Trevisiol C., Berti I., Neri E., Gerarduzzi T., Bruno I., Lenhardt A., Zamuner E., Spano A., Crovella S., Martellossi, G. Torre, D. Sblattero, R. Marzari, A. Bradbury, G. Tamburlini, A. Ventura S. 2004. Mass screening for coeliac disease using antihuman transglutaminase antibody assay. *Archives of Disease in Childhood*, 89, 512–515.
- Topping D. L.**, Anthony M. F., Bird F. (2003). Resistant starch as prebiotic and synbiotic: State of the art. *Proceedings of the Nutrition Society* 62: 171–176
- Topping D.L.**, Clifton P.M. 2001. Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and nonstarch polysaccharides. *Physiological Reviews*, 81, 1031–1064.
- Torbica A.**, Hadnadev M., Dapčević T. 2010. Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, 24 (6–7), 626–632.
- Trappey E.F.**, Khouryieh H., Aramouni F., Herald T. 2015. Effect of sorghum flour composition and particle size on quality properties of gluten-free bread. *Food Science and Technology International*, 21 (3), 188-202.

- Trowell H.C.**, Southgate D.A.T., Wolever T.M.S., Leeds A.R., Gassull M.A., Jenkins, D. J. A. 1976. Dietary fibre redefined. *Lancet*, 1, 967.
- Tsukui M.** 2003. Analysis of properties and chemical structure of mucilage from yam (*Dioscorea opposita* THUNB). *Food Preservation Science* 29, 229-236
- Turabi E.**, Sumnu G., Sahin S. 2008a. Optimization of baking of rice cakes in infrared-microwave combination oven by response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 64-73.
- Turabi E.**, Sumnu G., Sahin S. 2008b. Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food Hydrocolloids*, 22, 305–312.
- Turabi E.**, Sumnu G., Sahin S. 2010. Quantitative analysis of macro and micro-structure of gluten-free rice cakes containing different types of gums baked in different ovens. *Food Hydrocolloids* 24, 755-762.
- Vader LW**, Stepniak DT, Bunnik EM, Kooy YM, de Haan W, Drijfhout JW, Van Veelen PA, Konig F. 2003. Characterization of cereal toxicity for celiac disease patients based on protein homology in grains. *Gastroenterology*, 125, 1105-1113.
- Van Bockstaele F.**, De Leyn I., Eeckhout M., Dewettinck K. 2011. Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the viscoelastic properties of wheat flour dough. *Journal of Food Engineering*, 107, 50–59.
- Viebke C.**, Al-Assaf S., Phillips G.O. 2014. Food hydrocolloids and health claims. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 4 (2), 101–114.
- Villanacci V.**, Ceppa P., Tavani E., Vindigni C., Volta U. 2011. Coeliac disease: The histology report. *Digestive and Liver Disease*, 43, 385–395.
- Vittadini E.**, Vodovotz Y. 2003. Changes in the physicochemical properties of wheat- and soy-containing breads during storage as studied by thermal analyses. *Journal of Food Science*, 68, 2022–2027.
- Wang F.C.**, Sun X.S. 2002. Creep-recovery of wheat flour dough and relationship to other physical dough tests and breadmaking performance. *Cereal Chemistry*, 79, 567–571.
- Wang J.**, Rosell C.M, Benedito de Barber C. 2002. Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. *Food Chemistry*, 79, 221–226.
- Wang Y.**, Belton P.S., Bridon H., Garanger E., Wellner N., Parker M.L., Grant A., Feillet P., Noel, T.R. 2001. Physicochemical studies of caroubin: a gluten-like protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 3414–3419
- Watanabe A.**, Yokomizo K., Eliasson A.C. 2003. Effect of physical states of nonpolar lipids on rheology, ultracentrifugation, and microstructure of wheat flour dough *Cereal Chemistry*, 80, 281–284.
- Weber C.W.**, Gentry H.S., Kohlhepp E.A, McCrohan P.R. 1991. The nutritional and chemical evaluation of Chia seeds. *Ecology of Food and Nutrition*, 26 (2), 119-125.

- Weipert D.** 2006. Fundamentals of rheology and spectrometry. In Popper, L., Schafer, W. and Freund, W. Future of flour: A compendium of flour improvement. Agrimedia. Hamburg, Germany p117-168.
- White L.E., Merrick V.M., Bannerman E., Russell R.K., Basude D., Henderson P., et al.** 2013. The rising incidence of Celiac Disease in Scotland. *Pediatrics*, 132, 924–931.
- WHO.** 2012. Celiac Disease, World Gastroenterology Organisation Global Guidelines. Accessed April, 2012
- Wilderjans E., Kerckhofs G., Lagrain B., Brijs K., Wevers M., Delcour J. A.** 2010. Baking gradients cause heterogeneity in starch and proteins in pound cake. *Cereal Chemistry*, 87, 475-480.
- Wilderjans E., Luyts A., Brijs K., Delcour J.A.** 2013. Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in Food Science & Technology*, 30 (1), 6–15.
- Wilderjans E., Pareyt B., Goesaert H., Brijs K., Delcour J. A.** 2008. The role of gluten in a pound cake system: a model approach based on gluten-starch blends. *Food Chemistry*, 110, 909-915.
- Willhoft E.M.A.** 1973. Mechanism and theory of staling of bread and baked goods, and associated changes in textural properties. *Journal Of Texture Study*, 4, 292-322.
- Winter J., Nyskohus L., Young G.P., Hu Y., Conlon M.A., Bird A.R., Topping D.L., Le Leu R.K.** 2011. Inhibition by resistant starch of red meat-induced promutagenic adducts in mouse colon. *Cancer Prevention Research*, 4, 1920–1928.
- Youssef M. K.E., El-Manfaloty M. M., Ali H.M.** 2013. Assessment of proximate chemical composition, nutritional status, fatty acid composition and phenolic compounds of carob (*Ceratonia Siliqua L.*). *Food and Public Health*, 3 (6), 304-308.
- Yousif A.K., Alghzawi H.M.** 2000. Processing and characterization of carob powder. *Food Chemistry*, 69 (3), 283–287.
- Yue P., Waring S.** 1998. Functionality of resistant starch in food applications. *Food Australia*, 50, 615–621.
- Zelezna K.J., Hoseney R.C.** 1987. The glass transition in starch. *Cereal Chemistry*, 64 (2), 121–124.
- Ziobro R., Witczak T., Juszczak L., Korus J.** 2013. Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids*, 32 (2), 213–220.
- Zobel H. E., Kulp K.** 1996. The staling mechanisms. In: *Baked Goods Freshness: Technology Evaluation, and Inhibition of Staling*. New York: Marcel Dekker, p. 1–64.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Μιμίδης Κ.** 2014. Παρουσίαση στα πλαίσια του μαθήματος ΕΙΔΙΚΗ ΝΟΣΟΛΟΓΙΑ (4ου έτους), Ιατρική Σχολή Αλεξανδρούπολης.
- Σαμπάνης Δ.** 2010. Παραγωγή αρτοποιημάτων ελεύθερων γλουτένης. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Χημικών Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

8. Παράρτημα

Έντυπο οργανοληπτικού ελέγχου άρτου ελεύθερου γλουτένης

Φύλο:	Ημερομηνία:
-------	-------------

1: Δεν μου αρέσει καθόλου 5: Ούτε μ'αρέσει, ούτε δεν μ'αρέσει 9: Μου αρέσει πάρα πολύ

Κωδικός δείγματος:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Εμφάνιση(Ομοιομορφία)									
Χρώμα									
Γεύση-Αρωμα									
Υφή ψίχας									
Συνολική αποδοχή									

Κωδικός δείγματος:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Εμφάνιση(Ομοιομορφία)									
Χρώμα									
Γεύση-Αρωμα									
Υφή ψίχας									
Συνολική αποδοχή									

Κωδικός δείγματος:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Εμφάνιση(Ομοιομορφία)									
Χρώμα									
Γεύση-Αρωμα									
Υφή ψίχας									
Συνολική αποδοχή									

Κωδικός δείγματος:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Εμφάνιση(Ομοιομορφία)									
Χρώμα									
Γεύση-Αρωμα									
Υφή ψίχας									
Συνολική αποδοχή									

Κωδικός δείγματος:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Εμφάνιση(Ομοιομορφία)									
Χρώμα									
Γεύση-Αρωμα									
Υφή ψίχας									
Συνολική αποδοχή									

Παρατηρήσεις:.....

Ευχαριστούμε για την συμμετοχή σας!

Έντυπο οργανοληπτικού ελέγχου κέικ

<i>Όνοματεπώνυμο:</i>	<i>Ημερομηνία:</i>
-----------------------	--------------------

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:

εμφάνιση	Διόγκωση φέτας (κυψελωτό-πόροι) [1:μη ικανοποιητικό, 9:ικανοποιητικό]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
χρώμα	Χρώμα κόρας [1:σκούρο, 9:ανοιχτό]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Χρώμα ψίχας [1:σκούρο, 9:ανοιχτό]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
γεύση	Μετάγευση [1:μη έντονη, 9: έντονη]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
υφή	Σκληρότητα 1: ανθότυρο, 4: γραβιέρα, 9: καραμέλα	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Συνεκτικότητα 1: corn flakes, 4: κουλούρι Θεσσαλονίκης, 9:τσίχλα	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Ελαστικότητα 1: corn flakes, 4: καραμέλα ζαλεδάκι, 9:τσίχλα	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Συνολική εντύπωση	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Σκληρότητα: δύναμη για παραμόρφωση τροφίμου

Συνεκτικότητα: ποσοστό παραμόρφωσης τροφίμου πριν σπάσει

Ελαστικότητα: βαθμός επαναφοράς στην αρχική κατάσταση

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

Ευχαριστούμε για την συμμετοχή σας!