ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών

Μελέτη ιδιοτήτων τροφίμων εκβολής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ανδριάνας Ε. Λάζου

ΑΘΗΝΑ 2011

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κροκίδα Μαγδαληνή, Επίκουρη καθηγήτρια ΕΜΠ (Επιβλέπουσα καθηγήτρια)

Μαρίνος-Κουρής Δημήτριος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Μαρούλης Ζαχαρίας, Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μαρίνος-Κουρής Δημήτριος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Μαρούλης Ζαχαρίας, Καθηγητής ΕΜΠ

Κροκίδα Μαγδαληνή, Επίκουρη καθηγήτρια ΕΜΠ

Τζιά Κωνσταντίνα, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Καραθάνος Βάϊος, Καθηγητής Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθήνας

Μηνιάδου-Μεϊμαρόγλου Σοφία, Αναπλ. Καθηγήτρια Εθν. & Καποδ. Πανεπιστημίου Αθηνών

Ταούκης Πέτρος, Καθηγητής ΕΜΠ

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα»

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε με χρηματοδότηση από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών (ΕΣΑΔ) της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη της Επίκουρης Καθηγήτριας κ. Μ. Κροκίδα, κατά τη χρονική περίοδο 2005-2011 και με χορήγηση υποτροφίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του Ε.Μ.Π., τον οποίο και ευχαριστώ.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στην Επικ. Καθηγήτρια Μαγδαληνή Κροκίδα, όχι μόνο για την καθοριστική συμβολή της ως επιβλέπουσας της διατριβής, αλλά και για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξή της σε όλους τους τομείς καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής. Επίσης εκφράζω θερμές ευχαριστίες και στα άλλα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, καθηγητή Δ. Μαρίνο-Κουρή και καθηγητή Ζ. Μαρούλη για την ανάθεση της διδακτορικής διατριβής, καθώς και για τη συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή τους.

Ευχαριστώ πολύ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για τη διάθεση των οργάνων του εργαστηρίου για την μέτρηση των λειτουργικών ιδιοτήτων των τροφίμων εκβολής, καθώς και του χώρου των οργανοληπτικών δοκιμών. Θα ήθελα δε ξεχωριστά να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Κ. Τζιά για τις χρήσιμες συμβουλές της και τις πολύτιμες υποδείξεις σε όλες τις φάσεις της διατριβής.

Για τις σημαντικές του συμβουλές και υποδείξεις ευχαριστώ τον καθηγητή του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου κ. Βάϊο Καραθάνο.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται στις Εταιρίες Μύλοι Μάρρα Α.Ε. και την Agrino ΕΥΓΕ Πιστιόλας για την διάθεση των πρώτων υλών.

Ευχαριστώ πολύ τον κ. Παναγιώτη Μιχαηλίδη, μέλος του εργαστηρίου, για την σημαντική βοήθειά του κατά την παραγωγή των τροφίμων εκβολής και την καθοριστική συμβολή του στην πραγματοποίηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ειδικές ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Δρ. Χρήστο Σούκουλη για τη βοήθειά του στις στατιστικές μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων, καθώς και για τις χρήσιμες συζητήσεις και ανταλλαγές απόψεων.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Ηλιάδη και την κ. Έφη Σταματέλου για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης των μεταπτυχιακών τους εργασιών.

Ευχαριστώ πολύ τα μέλη του Εργαστηρίου Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών, κ. Νίκο Παναγιώτου και κ. Χρήστο Μπουκουβάλα για τη βοήθειά τους σε τεχνικά θέματα, καθώς και για την καλή τους διάθεση καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής μου.

Εκφράζω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Υ. Διδάκτορα και φίλο κ. Κωνσταντίνο Καββαδία για τη συμπαράσταση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής, καθώς και για τη βοήθειά του σε θέματα χειρισμού και προγραμμάτων Η/Υ.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τις συναδέλφους και φίλες Πένυ Ελένη, Ιωάννα Κατσαβού, Σπυριδούλα Ντεμίρη και Βάσια Οικονομοπούλου για τη συμπαράστασή τους, τη βοήθειά τους, τη συνεχή υποστήριξη και πάνω απ' όλα τη φιλία τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ καρδίας τον πατέρα μου για την συνεχή ενθάρρυνση, συμπαράσταση, υποστήριξη και σημαντική συνεισφορά που απλόχερα μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Ανδριάνα Λάζου

Αθήνα 2011

Περίληψη

Κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης της πρώτης ύλης στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ποιότητας των τροφίμων εκβολής, με βάση μίγματα αλεύρων αραβοσίτου και φακής (0-50%). Για το σκοπό αυτό παρήχθησαν τρόφιμα εκβολής κάτω από διάφορες συνθήκες εκβολής, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας εκβολής και της παροχής του υλικού τροφοδοσίας. Μελετήθηκαν οι δομικές ιδιότητες (φαινόμενη πυκνότητα, πραγματική πυκνότητα, συντελεστής διόγκωσης), οι ιδιότητες υφής (μέτρο ελαστικότητας και αριθμός θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης), οι λειτουργικές ιδιότητες (ικανότητα απορρόφησης νερού και ελαίου και ικανότητα διαλυτότητας σε νερό), τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (εμφάνιση, γεύση, υφή, ολική αποδοχή) και οι μεταπτώσεις φάσεων των τροφίμων εκβολής. Βρέθηκε ότι οι ιδιότητες που σχετίζονται και καθορίζουν την ποιότητα των προϊόντων εκβολής επηρεάζονται σημαντικά από τις παραμέτρους της διεργασίας. Αναπτύχθηκαν μαθηματικά πρότυπα τα οποία επιτρέπουν την πρόβλεψη των ιδιοτήτων από τις συνθήκες εκβολής και τη σύσταση της πρώτης ύλης. Επίσης έγινε συσχετισμός μεταξύ των ιδιοτήτων και μελέτη των σχέσεων που τις επηρεάζουν, ώστε να καταστεί εφικτή η επιλογή και ο σχεδιασμός προϊόντων εκβολής με συγκεκριμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Abstract

The main objective of this dissertation is to study the effects of extrusion conditions and feed composition on properties and quality attributes of extruded products made by mixtures of lentil and corn flours. For this purpose extruded foods were produced under various processing conditions, including extrusion temperature and raw material feeding rate. The mixtures studied contained maize and lentil flour ratios at various levels (0-50%). The properties investigated were structural (apparent density, real density, expansion ratio), textural (elasticity modulus and number of fractures during compression) and functional (water and oil absorption index and water solubility index) properties, sensory characteristics (appearance, flavour, texture, total acceptance) and phase transition of extruded foods. It was found that process parameters significantly affected the properties related to extruded food products quality. Furthermore, mathematic models were developed, which allow prediction of properties based on processing conditions and raw material composition. In addition, correlations between properties were made, as well as further investigation of relationships that influence them. These correlations permit the selection and design of extruded foods with acceptable quality characteristics.

Εκτεταμένη περίληψη

Τα τελευταία χρόνια μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στη Μεσογειακή διατροφή, καθώς επίσης και στην κατανάλωση φυτικών βιοενεργών συστατικών τα οποία προάγουν την υγεία. Βασικό συστατικό της Μεσογειακής διατροφής αποτελούν τα όσπρια, τα οποία περιέχουν σημαντικά ποσά υδατανθράκων και πρωτεϊνών, ενώ συγχρόνως αποτελούν και μια σπουδαία πηγή βιοενεργών συστατικών. Η εκβολή είναι μια διεργασία τροφίμων η οποία μπορεί να παράγει μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων από απλές πρώτες ύλες και ενδείκνυται για την επεξεργασία πρωτεϊνούχων πρώτων υλών. Η αποδοχή των προϊόντων εκβολής από μέρους των καταναλωτών βασίζεται στο σωστό σχεδιασμό των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν την ποιότητά τους. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης της πρώτης ύλης στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ποιότητας των τροφίμων εκβολής, με βάση μίγματα αλεύρων αραβοσίτου και φακής.

Για το σκοπό αυτό παρήχθησαν τρόφιμα εκβολής κάτω από διάφορες συνθήκες εκβολής, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας εκβολής και της παροχής του υλικού τροφοδοσίας. Τα μίγματα που εξετάσθηκαν περιείχαν μίγμα αλεύρου αραβόσιτου και φακής, με την αναλογία αλεύρου αραβοσίτου προς φακή να κυμαίνεται σε επίπεδα 0 έως 50%. Οι ιδιότητες που εξετάσθηκαν περιλαμβάνουν τις δομικές ιδιότητες (φαινόμενη πυκνότητα, πραγματική πυκνότητα, συντελεστής διόγκωσης), τις ιδιότητες υφής (μέτρο ελαστικότητας και αριθμός θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης), τις λειτουργικές ιδιότητες (ικανότητα απορρόφησης νερού και ελαίου και ικανότητα διαλυτότητας σε νερό), τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (εμφάνιση, γεύση, υφή, ολική αποδοχή) και τις μεταπτώσεις φάσεων των τροφίμων εκβολής. Περαιτέρω αναπτύχθηκαν απλά μαθηματικά πρότυπα τα οποία επιτρέπουν την πρόβλεψη των ιδιοτήτων από τις συνθήκες εκβολής και τη σύσταση της πρώτης ύλης. Επίσης έγινε συσχετισμός μεταξύ των ιδιοτήτων και μελέτη των σχέσεων που τις επηρεάζουν. Ακόμα μελετήθηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν το μέσο χρόνο παραμονής κατά τη διάρκεια της εκβολής, ώστε να αναπτυχθεί ένα μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψής του. Ο χρόνος παραμονής αποτελεί σημαντική παράμετρο του συστήματος και επηρεάζει την έκταση των διαφόρων φυσικοχημικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα κατά την εκβολή των τροφίμων.

Για την πρόβλεψη του μέσου χρόνου παραμονής αναπτύχθηκε ένα εκθετικό μαθηματικό πρότυπο. Έχοντας ως συνθήκες αναφοράς N_0=200 rpm, F_0=0,001 kg/s, T_0=200°C και X_0=10% υ.β., βρέθηκε ότι ο μέσος χρόνος παραμονής επηρεαζόταν σημαντικά από το e_{f0} κενό κλάσμα εκβολέα στις συνθήκες αναφοράς, την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, την παροχή τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Βρέθηκε ακόμη ότι με αύξηση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας συμβαίνει μείωση του μέσου χρόνου παραμονής.

Οι ιδιότητες δομής των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκαν σημαντικά από τις συνθήκες εκβολής και τη σύσταση των πρώτων υλών. Η φαινόμενη πυκνότητα μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και αυξήθηκε με την παροχή τροφοδοσίας, την υγρασία

τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Το πορώδες επηρεάσθηκε κατά αντίστροφο τρόπο από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Ο συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο. Η πραγματική πυκνότητα των τροφίμων εκβολής επηρεάζεται μόνο από τη σύσταση του τροφίμου. Για την πρόβλεψη των δομικών ιδιοτήτων από τις συνθήκες εκβολής και τη σύσταση της πρώτης ύλης αναπτύχθηκε εκθετικό μαθηματικό πρότυπο, το οποίο περιγράφει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα.

Οι ιδιότητες υφής των τροφίμων εκβολής εξαρτώνται από τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύσταση των πρώτων υλών. Το μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή τροφοδοσίας. Ο αριθμός των θραύσεων κατά τη συμπίεση των τροφίμων εκβολής αυξήθηκε με την αύξηση της παροχής τροφοδοσίας και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Με βάση τις επιδράσεις των συνθηκών εκβολής και της σύστασης της πρώτης ύλης αναπτύχθηκε ένα εκθετικό μαθηματικό πρότυπο, το οποίο επιτρέπει την πρόβλεψη των ιδιοτήτων υφής.

Οι συνθήκες εκβολής και η σύσταση της πρώτης ύλης επηρέασαν σημαντικά τις λειτουργικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο. Η ικανότητα απορρόφησης νερού αυξήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία εκβολής και μειώθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Η ικανότητα διαλυτότητας σε νερό μειώθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και την υγρασία τροφοδοσίας και αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής. Η ικανότητα απορρόφησης ελαίου αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και μειώθηκε με την παροχή, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Συγκριτικά, τα τρόφιμα εκβολής από αραβοσιτάλευρο παρουσίασαν υψηλότερες τιμές λειτουργικών ιδιοτήτων από αυτές των τροφίμων από μίγματα φακής. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται, για την παραγωγή ενός προϊόντος τροφίμου, συστατικό με υψηλή συνδετική ικανότητα, δηλαδή υψηλός βαθμός ζελατινοποίησης, και υψηλός βαθμός ψησίματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παραχθέντα τρόφιμα εκβολής. Οι συνθήκες που εξασφαλίζουν την επιθυμητή λειτουργικότητα είναι η παροχή τροφοδοσίας να κυμαίνεται από 2,52 kg/h έως 4,68 kg/h και το μίγμα να μην περιέχει περισσότερο από 30% άλευρο φακής.

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκαν σημαντικά από τις συνθήκες εκβολής και τη σύσταση των πρώτων υλών. Τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης (ομοιογενής δομή, πορώδες και διάμετρος) μειώθηκαν με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία του υλικού τροφοδοσίας και την προσθήκη αλεύρου φακής και βελτιώθηκαν με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Η αλευρώδης γεύση-οσμή (flavour) των τροφίμων εκβολής μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Η καμμένη γεύση-οσμή αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και μειώθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Τα χαρακτηριστικά της οργανοληπτικής υφής των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκαν

σημαντικά από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Η τραγανότητα των τροφίμων μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και την υγρασία τροφοδοσίας και αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Το αφρώδες των προϊόντων αυξήθηκε με τη θερμοκρασία και μειώθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας. Η σκληρότητα των τροφίμων εκβολής αυξήθηκε με την αύξηση την παροχής και της υγρασίας τροφοδοσίας και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής. Η ενυδάτωση των τροφίμων εκβολής χειροτέρευσε με την παροχή και την υγρασία του υλικού τροφοδοσίας και βελτιώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής. Η προσθήκη του αλεύρου φακής είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκοτεινόχρωμων προϊόντων, τα οποία δεν ήταν ιδιαιτέρως ελκυστικά στους δοκιμαστές. Η ολική αποδοχή των προϊόντων εκβολής γενικά μειώθηκε με την προσθήκη του αλεύρου φακής σε ποσοστό 50%. Τα πιο αποδεκτά τρόφιμα εκβολής ήταν αυτά που περιείχαν 13% αρχική υγρασία, ποσοστό φακής μικρότερο από 50% και επεξεργάσθηκαν σε θερμοκρασία 170°C. Επιπροσθέτως τα τρόφιμα αυτά εμφανίζουν ομοιόμορφη και διογκωμένη δομή , είναι τραγανά, αφράτα, σχετικά μαλακά και έχουν καλή ενυδάτωση κατά τη μάσηση. Η συσχέτιση μεταξύ των δειγμάτων με βάση τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά έδειξε ότι η τραγανότητα συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης και την ολική αποδοχή των προϊόντων. Επιπροσθέτως, η σκληρότητά τους συσχετίζεται θετικά με την αλευρώδη γεύση-οσμή και αρνητικά με το αφρώδες, την ενυδάτωση και την καμένη γεύση-οσμή. Αποδεικνύεται ότι τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής καθορίζονται από το συνδυασμό των συνθηκών εκβολής και της σύστασης των πρώτων υλών.

Οι μεταπτώσεις φάσεων των τροφίμων εκβολής χαρακτηρίζουν την σταθερότητα τους και επηρεάζονται σημαντικά από το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας. Η ισόθερμη προσρόφησης υγρασίας για όλα τα δείγματα περιγράφηκε ικανοποιητικά από την εξίσωση GAB. Από την μελέτη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης προκύπτει ότι αυτή επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες εκβολής και την αναλογία φακής/αραβοσιτάλευρο. Σε όλα τα τρόφιμα το νερό έδρασε σαν πλαστικοποιητής. Η πλαστικοποιητική δράση του νερού περιγράφηκε καλά από την εξίσωση Gordon-Taylor. Κατά τη διάρκεια της εκβολής των μιγμάτων αραβοσιτάλευρου και φακής σχηματίσθηκαν σύμπλοκα μεταξύ αμυλόζης και λιπιδίων, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την ενδόθερμη κορυφή του θερμογραφήματος DSC. Η γνώση της πλαστικοποιητικής δράσης του νερού και των χαρακτηριστικών ροφήσεως είναι απαραίτητες για την επιλογή των συνθηκών αποθήκευσης και τη βελτίωση της σταθερότητας των τροφίμων.

Η συσχέτιση των ενόργανων και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών δομής και υφής παρείχε σημαντικές πληροφορίες για το σχεδιασμό των προϊόντων εκβολής. Η οργανοληπτική διάμετρος συσχετίσθηκε με το συντελεστή διόγκωσης και η τραγανότητα με τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση και το συντελεστή διόγκωσης. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι όσο καλύτερα διογκωμένο είναι το προϊόν τόσο μεγαλύτερη διάμετρο έχει και τόσο αυξάνεται η τραγανότητά του. Δηλαδή η διόγκωση των τροφίμων εκβολής σχετίζεται άμεσα και επηρεάζει θετικά την τραγανότητά τους. Επιπρόσθετα η φαινόμενη πυκνότητα συσχετίσθηκε θετικά με το μέτρο ελαστικότητας. Δηλαδή όσο πιο πυκνή είναι η δομή των διογκωμένων προϊόντων εκβολής, τόσο αυξάνεται η σκληρότητά τους. Με βάση τα παραπάνω καθίσταται εφικτή πρόβλεψη των

οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής με προσθήκη αλεύρου φακής. Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα και καθορίζουν την αποδοχή των προϊόντων αυτών από τους καταναλωτές, ενώ η πρόβλεψη μπορεί να γίνει με τη χρήση των εξισώσεων συσχέτισης που αναπτύχθηκαν μεταξύ ενόργανων μετρήσεων και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών. Γενικά τα προϊόντα που παρήχθησαν σε χαμηλές παροχές και περιεκτικότητες υγρασίας και ενδιάμεσα επίπεδα θερμοκρασιών είναι τραγανά, αφράτα και έχουν μαλακή υφή.

Summary

During past few years, much attention has been given to the Mediterranean diet, as well as to the consumption of plant bioactive components which promotes human health. A basic part of Mediterranean diet is legumes, which contain significant amounts of carbohydrates and proteins, while simultaneously they constitute an important source of bioactive components. Extrusion is a food processing method which can produce a great variety of products using simple raw materials and is suitable for processing of protein rich raw materials. Consumer acceptance of the extruded products is based on sound design of attributes that define their quality. The basic objective of this dissertation is to study the effects of extrusion conditions and feed composition on properties and quality attributes of extruded products made by mixtures of lentil and corn flours.

For this purpose extruded foods were produced under various processing conditions, including extrusion temperature and raw material feeding rate. The mixtures studied contained maize and lentil flour ratios at various levels. The properties investigated were structural (apparent density, real density, expansion ratio), textural (elasticity modulus and number of fractures during compression) and functional (water and oil absorption index and water solubility index) properties, sensory characteristics (appearance, flavour, texture, total acceptance) and phase transition of extruded foods. Furthermore, simple mathematic models were developed, which allow prediction of properties based on processing conditions and raw material composition. In addition, correlations between properties were made, as well as further investigation of relationships that influence them. Furthermore, the parameters which influences the mean residence time were studied, in order to develop a mathematical model for its prediction. The mean residence time is an important system parameter that influences the extent of the physicochemical reactions that take place during extrusion cooking.

A power model was developed for the prediction of mean residence time. Mean residence time was affected be the e_{f0} void fraction of the extruder at reference conditions (N_0=200 rpm, F_0=0,001 kg/s, T_0=200°C and X_0=10% w.b.), the screw speed, the feed rate, the extrusion temperature and the feed moisture. The increase in feed rate decreases the mean residence time.

Structural properties of expanded corn-legume snacks produced on a twin screw extruder were significantly affected by process conditions and feed composition. Apparent density decreased with temperature and increased with feed rate, moisture content and lentil/corn ratio. Porosity was affected by independent variables in an opposite manner. Expansion ratio of the extruded products was increased with feeding rate and was decreased with extrusion temperature, feed moisture and lentil/corn ratio. True density of extruded products was affected only by feed composition. A simple mathematical model was developed which permits prediction of structural properties on the basis of extrusion conditions and raw material composition.

Textural properties of extruded foods are depended on independent variables. Elasticity modulus was increased with feed moisture and lentil to corn flour ratio, while it was decreased with extrusion temperature and feeding rate. The number of fractures during compression of the extruded foods was increased with an increase in feeding rate and was decreased with extrusion temperature, feed moisture and lentil/corn ratio. Based on the effect of extrusion conditions and feed composition, an exponential mathematical model was developed, which permits the prediction of textural properties.

Extrusion conditions and raw material composition considerably affected the functional properties of extruded foods made lentil and corn grits. Water absorption index of extrudates increased with extrusion temperature and feed moisture content and decreased with feed rate and lentil/corn ratio. The water solubility index of extrudates increased with temperature, but decreased with feed moisture content and feed rate. The oil absorption index of extrudates increased with extrusion temperature and decreased with feed rate, feed moisture content and lentil/corn ratio. Generally, the use of lentil flour led to products with lower values for functional properties. Extruded products made using corn grits exhibited higher values for the functional properties studied. Principal component analysis of functional properties discriminated samples with appropriate functionality based on industrial use. It is possible to produce extruded products with high degree of cooking and gelatinization. These products can be used as raw materials in various food products and can be produced using feed rates between 2.52 kg/h and 4.68 kg/h and lentil flour level not higher than 30%.

Sensory characteristics of corn and corn–lentil extrudates produced on a twin screw extruder depended both on the process conditions and the raw material characteristics. Extrusion temperature, feed moisture and lentil flour addition decreased the appearance attributes (homogeneous structure, porosity and diameter) of the products, while an improvement was observed with feeding rate. Mealy flavour of the extruded products was decreased with extrusion temperature and was increased with feeding rate. Burnt flavour was increased with extrusion temperature and decreased with feeding rate. Textural characteristics of the extruded products were significantly affected by independent variables. Extrusion temperature and feed moisture content decreased crunchiness, while feeding rate led to an increase in crunchiness. Crispness of the extrudates was increased with temperature and decreased with feed moisture content. Hardness of the extruded products was increased with an increase in feeding rate and moisture content, while it was decreased with extrusion temperature. Feed rate and feed moisture content were negatively affected melting of the extruded products, while extrusion temperature led to an improvement of this attribute. The addition of lentil flour resulted in darker products, which were not very appealing. The overall acceptability of the extrudates decreased with lentil flour addition at a level of 50%. The most acceptable extrudates were obtained with feed moisture content 13%, lentil flour level lower than 50% and extrusion temperature at 170°C. It should be noted that these extrudates were homogeneous with well expanded structure; they were crunchy, crispy, relatively soft and exhibited good hydration during mastication. The correlation of sensory properties showed that crunchiness can be related with appearance attributes of the extrudates and overall acceptability. Furthermore, the

hardness of the extrudates was correlated with mealy flavour and negatively correlated with crispness, melting and burnt flavour. By manipulating the process conditions during extrusion, one can generate products of any desired sensory attributes.

Phase transitions determine extrudate stability and are affected mainly by moisture content. Moisture sorption isotherms for all samples examined were accurately described by the GAB model. In corn–lentil extrudates phase transitions was found to significantly be affected by moisture content. Glass transition temperature was affected by processing conditions and lentil/corn ratio. The plasticizing effect of water was evident for all extrudates. The experimental data have been successfully correlated by the Gordon-Taylor equation. The sharpness of the glass transition decreased as the moisture content decreased. The formation of amylose–lipid complexes was confirmed by the presence of and endothermic peak, during the differential scanning of the extruded corn–lentil products. The knowledge of water plasticisation and sorption characteristics of extruded products are useful for the selection of storage conditions and stability improvement.

The correlation of instrumental and sensorial characteristics of structure and texture gives very important information for extruded products design. Sensorial diameter is related with expansion ratio and crunchiness with the number of peaks and expansion ratio. This fact indicates that the well expanded extruded products also have increased diameter and crunchiness. Extruded products expansion is related and also improves their crunchiness. Furthermore the apparent density is positively correlated with elasticity modulus. The hardness of extruded products increases as they become denser. It is possible to predict sensorial characteristics of corn-lentil extrudates, which are critical for consumer acceptance, via instrumental measurements using obtained correlation equations. Generally, extrudates produced at low feed rates and moisture contents and intermediate levels of temperature had a crunchy, crispy and soft texture.

Πίνακες Περιεχομένων

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **1**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **3**

ABSTRACT **4**

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ **5**

SUMMARY **9**

1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ **23**

1.1 Στόχοι 25

2 ΕΚΒΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ **27**

2.1 Εξοπλισμός 29

2.1.1 Εκβολείς μονού κοχλία 29

2.1.2 Εκβολείς διπλού κοχλία 30

2.2 Κατανάλωση ισχύος στον εκβολέα 33

2.3 Κατανομή του χρόνου παραμονής των εκβολέων 34

2.4 Πρώτες Ύλες Εκβολής 37

2.4.1 Τα δημητριακά 37

2.4.2 Τα όσπρια 40

2.4.3 Άμυλο 43

2.4.3.1 Αμυλόζη και Αμυλοπηκτίνη 43

2.4.4 Πρωτεΐνες 46

2.4.4.1 Λειτουργικότητα των Πρωτεϊνών 47

2.4.4.2 Πρωτεΐνες και Εκβολή 48

2.5 Χημικές και θρεπτικές μεταβολές των τροφίμων κατά την εκβολή 50

2.5.1 Υδατάνθρακες - Άμυλο 51

2.5.2 Διαιτητικές Ίνες 52

2.5.3 Πρωτεΐνες 52

2.5.4 Λιπίδια 53

2.5.5 Βιταμίνες 54

2.5.6 Ανόργανα Συστατικά 54

2.5.7 Γευστικά-οσμηρά συστατικά (Flavors) 55

2.6 Συμπερασματικές Επισημάνσεις 56

3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ **59**

3.1 Εισαγωγή 59

3.2 Δομικές Ιδιότητες 61

3.3 Ιδιότητες υφής 64

3.4 Λειτουργικές ιδιότητες 69

3.5 Οπτικές ιδιότητες 70

3.6 Ενεργότητα ύδατος και ιδιότητες προσρόφησης τροφίμων 72

3.7 Μεταπτώσεις φάσεων τροφίμων εκβολής 77

3.7.1 Υαλώδης μετάπτωση 77
3.7.1.1 Εξάρτηση από το μοριακό βάρος 78
3.7.1.2 Εξάρτηση από τη χημική δομή 78
3.7.1.3 Εξάρτηση από τη θερμική ιστορία 79
3.7.1.4 Επίδραση της κρυσταλλικότητας 79
3.7.1.5 Πλαστικοποίηση από την υγρασία 80
3.7.2 Τήξη και ζελατινοποίηση 81
3.7.3 Σύμπλοκα αμυλόζης - λιπιδίων 82
3.8 Ποιότητα - Οργανοληπτικές ιδιότητες 82
3.8.1 Προβλήματα και προκλήσεις 84
3.8.2 Συμπερασματικές επισημάνσεις 86

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ 88
4.1 Αντικείμενο και στόχοι 88
4.2 Προετοιμασία δειγμάτων 89
4.3 Εκβολέας 90
4.4 Πειραματικός Σχεδιασμός 93
4.5 Μέσος χρόνος παραμονής 96
4.6 Συσχέτιση ιδιοτήτων τροφίμων εκβολής 101

5 ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ 105
5.1 Αντικείμενο και στόχοι 105
5.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 105
5.3 Μαθηματικό Πρότυπο 107
5.4 Πειραματική Διαδικασία 109
5.4.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων 109
5.4.2 Προσδιορισμός δομικών ιδιοτήτων 109
5.4.2.1 Φαινόμενη πυκνότητα 109
5.4.2.2 Πραγματική πυκνότητα 110
5.4.2.3 Πορώδες 110
5.4.2.4 Συντελεστής διόγκωσης 111
5.4.2.5 Στερεοσκοπία 111
5.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων 111
5.5.1 Φαινόμενη πυκνότητα 111
5.5.2 Πραγματική πυκνότητα 112
5.5.3 Συντελεστής διόγκωσης 113
5.5.4 Πορώδες 117
5.5.5 Στερεοσκοπία 117
5.6 Συμπεράσματα 121

6 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΦΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ 122
6.1 Αντικείμενο και στόχοι 122
6.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 123
6.3 Μαθηματικό Πρότυπο 125
6.4 Πειραματική διαδικασία 128

6.4.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων 128
6.4.2 Προσδιορισμός ιδιοτήτων υφής 129
6.4.2.1 Δοκιμή συμπίεσης 129
6.4.2.2 Μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης 129
6.4.2.3 Οργανοληπτική εκτίμηση υφής 130
6.4.2.4 Στατιστική επεξεργασία 131
6.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων 131
6.5.1 Δοκιμή συμπίεσης 131
6.6 Μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης 136
6.7 Οργανοληπτική αξιολόγηση της υφής και διαμέτρου των προϊόντων εκβολής 139
6.8 Συσχέτιση ενόργανων και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής 142
6.9 Συμπεράσματα 145

7 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ 147
7.1 Αντικείμενο και στόχοι 147
7.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 147
7.3 Πειραματική διαδικασία 148
7.3.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων 148
7.3.2 Προσδιορισμός λειτουργικών ιδιοτήτων 149
7.3.2.1 Ικανότητα απορρόφησης νερού και διαλυτότητα σε νερό 149
7.3.2.2 Ικανότητα απορρόφησης ελαίου 149
7.3.3 Στατιστική ανάλυση 150
7.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων 150
7.4.1 Ικανότητα απορρόφησης νερού (ΙΑΝ) 150
7.4.2 Ικανότητα διαλυτότητας σε νερό (ΙΔΝ) 152
7.4.3 Ικανότητα απορρόφησης ελαίου (ΙΑΕ) 154
7.4.4 Ομαδοποίηση δειγμάτων και διαλογή 155
7.5 Συμπεράσματα 158

8 ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΧΗ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ 159
8.1 Αντικείμενο και στόχοι 159
8.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 159
8.3 Πειραματική διαδικασία 161
8.3.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων 161
8.3.2 Οργανοληπτικός έλεγχος τροφίμων εκβολής 161
8.3.3 Στατιστική ανάλυση 163
8.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων 163
8.4.1 Χαρακτηριστικά εμφάνισης 163
8.4.2 Γεύση-οσμή (Flavor) 164
8.4.3 Υφή 168
8.4.4 Ολική αποδοχή των προϊόντων εκβολής 173
8.4.5 Συσχέτιση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών 177
8.5 Συμπεράσματα 180

9 ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΦΑΣΕΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ 182
9.1 Αντικείμενο και στόχοι 182
9.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 182
9.3 Πειραματική διαδικασία 184
9.3.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων 184
9.3.2 Προσδιορισμός ισόθερμου ροφήσεως νερού 184
9.3.3 Θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης 184
9.3.4 Ειδική μηχανική ενέργεια 185
9.3.5 Πειραματικός Σχεδιασμός 185
9.3.6 Προσαρμογή δεδομένων και στατιστική ανάλυση 186
9.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων 186
9.4.1 Ειδική μηχανική ενέργεια 186
9.4.2 Ισόθερμοι Ροφήσεως Νερού 189
9.4.3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης 190
9.4.4 Τήξη συμπλόκου αμυλόζης-λιπιδίων 194
9.5 Συμπεράσματα 196
10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ 197
11 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ 201
12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 203
13 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 227

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1-1 Σύγκριση των εκβολέων μονού και διπλού κοχλία. 33

Πίνακας 2-2 Ιδιότητες της αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης (Zobel, 1988) 45

Πίνακας 2-3 Φυσικές διαστάσεις (μέγεθος και σχήμα) μερικών ειδών αμύλου από όσπρια (Hoover et al., 1990) 45

Πίνακας 2-4 Δομικές μεταβολές των πρωτεϊνών κατά την εκβολή (Arêas, 1992). 49

Πίνακας 2-5 Επίδραση των συνθηκών εκβολής επί των θρεπτικών προϊόντων εκβολής (όπου: + αύξηση, - απώλεια, ο καμία επίδραση, * υψηλή θερμοκρασία, ** υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή υγρασία) (Bjorck et al., 1983). 55

Πίνακας 3-1 Ιδιότητες τροφίμων εκβολής, που χαρακτηρίζουν την ποιότητά τους 60

Πίνακας 3-2 Ενόργανες μέθοδοι μέτρησης της υφής σε προϊόντα εκβολής (Smith, 2003). 67

Πίνακας 3-3 Μέθοδοι προσδιορισμού ισόθερμων ρόφησης. 73

Πίνακας 4-1 Χημική σύσταση πρώτων υλών (%) 89

Πίνακας 4-2 Κοκκομετρική ανάλυση πρώτων υλών. 90

Πίνακας 4-3 Συνθήκες εκβολής και κωδικοποίηση δειγμάτων. 93

Πίνακας 4-4 Πειραματικός σχεδιασμός.....94

Πίνακας 4-5 Πειραματικός σχεδιασμός για τον προσδιορισμό του μέσου χρόνου παραμονής.....97

Πίνακας 4-6 Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης μέσου χρόνου παραμονής. 99

Πίνακας 4-7 Αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης προτύπου μέσου χρόνου παραμονής (R^2=0,937).....100

Πίνακας 4-8 Συντεταγμένες κυρίων συνιστωσών, με βάση τις συσχετίσεις, που προκύπτουν από την ΑΚΣ. 104

Πίνακας 5-1 Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης δομικών ιδιοτήτων τροφίμων εκβολής.109

Πίνακας 5-2 Τιμές όγκων V_C και V_R για κυψελίδα micro.....110

Πίνακας 5-3 Αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων του εκθετικού προτύπου με ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis). 112

Πίνακας 5-4 Πραγματική πυκνότητα προϊόντων εκβολής. 113

Πίνακας 5-5 Εικόνες τροφίμων εκβολής, όπου παρατηρείται η μακροδομή. 119

Πίνακας 6-1 Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης των ιδιοτήτων υφής των τροφίμων εκβολής. 128

Πίνακας 6-2 Χαρακτηριστικά υφής τροφίμων εκβολής. 130

Πίνακας 6-3 Αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων του εκθετικού προτύπου με ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis). 132

Πίνακας 6-4 Συσχέτιση ιδιοτήτων ($y = a \cdot x^b$) 144

Πίνακας 7-1 Συντεταγμένες παραγόντων των κυρίων συνιστωσών, με βάση τις συσχετίσεις. 157

Πίνακας 8-1 Χαρακτηριστικά, ορισμοί και άξονες που χρησιμοποιήθηκαν στην περιγραφική ανάλυση των τροφίμων εκβολής. 162

Πίνακας 9-1 Πειραματικός σχεδιασμός (κεντρικού σημείου) 185

Πίνακας 9-2 Ειδική μηχανική ενέργεια κατά τη διάρκεια της εκβολής. 187

Πίνακας 9-3 Αποτελέσματα παλινδρόμησης του προτύπου GAB για τα τρόφιμα εκβολής. 190

Πίνακας 9-4 Τιμές της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα εξεταζόμενα τρόφιμα εκβολής. 194

Πίνακας 9-5 Ενδόθερμη κορυφή τροφίμων εκβολής. 196

Πίνακας 13-1 Μέσος χρόνος παραμονής (πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές) με βάση το πρότυπο του Πίνακα 4-5. 227

Πίνακας 13-2 Δομικές ιδιότητες τροφίμων εκβολής (φαινόμενη πυκνότητα, συντελεστής διόγκωσης και πορώδες). 228

Πίνακας 13-3 Ιδιότητες υφής τροφίμων εκβολής (μέτρο ελαστικότητας και αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση). 230

Πίνακας 13-4 Χαρακτηριστικά εμφάνισης προϊόντων εκβολής. 232

Πίνακας 13-5 Χαρακτηριστικά γεύσης-οσμής τροφίμων εκβολής. 234

Πίνακας 13-6 Χαρακτηριστικά υφής τροφίμων εκβολής. 236

Πίνακας 13-7 Λειτουργικές ιδιότητες τροφίμων εκβολής. 238

Πίνακας 13-8 Δεδομένα προσρόφησης νερού των προϊόντων εκβολής για θερμοκρασία 25°C. 240

Πίνακας 13-9 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο. 241

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1-1 Διάγραμμα εκβολέα μονού κοχλία 30

Σχήμα 2.1-2 Ζώνες επεξεργασίας σε εξωθητήρες μονού και διπλού κοχλία (Wenger Manufacturing, Inc.). 30

Σχήμα 2.1-3 Εκβολέας διπλού κοχλία. 31

Σχήμα 2.1-4 Σχέδια εκβολέα διπλού κοχλία. Α. Διατομή διαμόρφωσης των κοχλιών. Β. Γραμμικό σχέδιο του εκβολέα διπλού κοχλία με σύστημα κίνησης. 1-τροχαλία με ταινία V, 2-κιβώτιο ταχυτήτων, 3-σφράγιση τροφίμου, 4-φλάντζα βίδας συσφίξεως, 5-πλάκα μήτρας, 6-μήτρα, 7-δύο διαμερίσματα του θαλάμου του εκβολέα, 8-κοχλίες του εκβολέα. Γ. Πρόσθιο μέρος του χιτωνίου το οποίο δείχνει τις θέσεις για τους θερμαντήρες και τους αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης. 1-θέση θερμαντήρων, 2-φλάντζες άκρων, 3-πλευρικές φλάντζες για το χιτώνιο, 4-οπή για τον αισθητήρα πίεσης, 5-δίδυμες οπές σχηματισμού του χιτωνίου. Δ. Θέση των αισθητήρων θερμοκρασίας και πίεσης πάνω στο χιτώνιο του εκβολέα. 1-μανόμετρα τάσης στον αισθητήρα πίεσης, 2-υποστήριγμα για τη στήριξη του εμβόλου, 3-αισθητήρας θερμοκρασίας (Senanayake & Clarke, 1999). 32

Σχήμα 2.3-1 Κατανομή χρόνου παραμονής για διάφορα είδη εκβολέων (Levine et al., 2007). 35

Σχήμα 2.3-2 Σχηματική παράσταση της εκβολής των τροφίμων που δείχνει τις επιδράσεις των μεταβλητών της διεργασίας πάνω στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος εκβολής (Choudhury et al., 1998b). 36

Σχήμα 2.4-1 Κατά προσέγγιση συγκέντρωση αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης ορισμένων δημητριακών (Στοιχεία από Taggart (2000)).....38

Σχήμα 3.1-1 Διάγραμμα παραγωγής διογκωμένων προϊόντων εκβολής. Όπου ρ_α φαινόμενη πυκνότητα, ρ_t πραγματική πυκνότητα, V_s όγκος, m μάζα, d διάμετρος, L μήκος, Exp συντελεστής διόγκωσης, ε πορώδες, σ_B τάση θραύσης, ε_B παραμόρφωση στη θραύση, E μέτρο ελαστικότητας, WAI ικανότητα απορρόφησης νερού, WSI δείκτης διαλυτότητας σε νερό, OAI ικανότητα απορρόφησης ελαίου, L, a και b χρωματικές μεταβολές, α_w ενεργότητα ύδατος, Br βαθμός αμαυρώσεως, Bur καμένο, Cr τραγανότητα, H οργανοληπτική σκληρότητα, SV ειδικός όγκος, t_i χρόνος θέρμανσης, T_e θερμοκρασία θέρμανσης, F ρυθμός τροφοδοσίας, rpm ταχύτητα περιστροφής.....60

Σχήμα 3.2-1 Πυκνόμετρο συμπίεσης αέρα (Michailidis et al., 2009). 61

Σχήμα 3.2-2 Διάγραμμα ροής πολυπυκνόμετρου Quantachrome (Michailidis et al., 2009). 63

Σχήμα 3.3-1 Σχέση φορτίου-παραμόρφωσης πολυμερών. Α. εύθρυπτη θραύση, Β. όλκιμη κατάρρευση, Γ. Ψυχρή διέλκυση, Δ. Ελαστική συμπεριφορά. (Ward, 1983).....65

Σχήμα 3.3-2 Δισδιάστατη σχηματική αναπαράσταση της αυξανόμενης διαίρεσης μιας πορώδους δομής (εξωτερικής διάστασης «L») και σταθερή ολική και ποσοστιαία επιφάνεια πόρων (64%). Σε κάθε αναπαράσταση, οι πόροι είναι ίσου μεγέθους και ομοιόμορφα κατανεμημένοι, έτσι ώστε το πάχος των τοιχωμάτων των πόρων (θ) να μην

μεταβάλλεται σε όλη τη δομή. Φαίνεται η μείωση του πάχους των τοιχωμάτων με την αύξηση του αριθμού των πόρων. 68

Σχήμα 3.3-3 Τυπική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης προϊόντος εκβολής από αραβοσιτάλευρο. 69

Σχήμα 3.5-1 Οι διαστάσεις της κλίμακας Hunter Lab. 72

Σχήμα 3.7-1Τυπική καμπύλη DSC για μερικώς κρυσταλλικά υλικά. 78

Σχήμα 4.1-1 Παράγοντες που καθορίζουν τις ιδιότητες των τροφίμων εκβολής. 89

Σχήμα 4.3-1 Δεξιά πλάγια όψη εκβολέα. Διακρίνεται το χιτώνιο, ο κινητήρας και η οθόνη τύπου touch screen. 91

Σχήμα 4.3-2 Κάτοψη χιτωνίου εκβολής διπλού κοχλία. α. Κλειστό, β. Ανοικτό. Διακρίνονται τα θερμαντικά στοιχεία κατά μήκος του χιτωνίου. 91

Σχήμα 4.3-3 Κάτοψη χιτωνίου εκβολέα διπλού κοχλία. Διακρίνονται οι κοχλίες. 92

Σχήμα 4.3-4 Μήτρα εξόδου του προϊόντος από τον εκβολέα. 92

Σχήμα 4.3-5 Πρόσθια και οπίσθια όψη προσασμογέα μήτρας. 92

Σχήμα 4.4-1 Σχεδιασμός πειραματικών μετρήσεων. 94

Σχήμα 4.5-1 Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές του μέσου χρόνου παραμονής συναρτήσει της παροχής του υλικού τροφοδοσίας. 100

Σχήμα 4.6-1 Διάγραμμα ιδιοτιμών (eigenvalue) - αριθμού ιδιοδιανύσματος (eigenvalue number) για την επιλογή των απαιτούμενων κυρίων συνιστωσών. 103

Σχήμα 5.4-1 Στερεοπυκνόμετρο Quantachrome. 110

Σχήμα 5.4-2 Στερεοσκόπιο Olympus SZ61. 111

Σχήμα 5.5-1 Φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. 114

Σχήμα 5.5-2 Συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. 116

Σχήμα 5.5-3 Πορώδες των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. 118

Σχήμα 6.3-1 Διδιάστατο πρότυπο μορφής κυψέλης για τη προσομοίωση της δομής των διογκωμένων προϊόντων (l=μήκος κυψέλης, θ=πάχος τοιχώματος). 125

Σχήμα 6.3-2 Χαρακτηριστική καμπύλη συμπίεσης τροφίμων εκβολής. 126

Σχήμα 6.4-1 Εικόνα του Zwick Universal Testing Machine. 129

Σχήμα 6.5-1 Τυπική καμπύλη συμπίεσης προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αραβοσιτάλευρου και φακής. 132

Σχήμα 6.5-2 Μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. 134

Σχήμα 6.5-3 Αριθμός των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. 135

Σχήμα 6.6-1 Επίδραση αναλογίας φακής/αραβοσιτάλευρο στη κυψελοειδή δομή των τροφίμων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί σε 200°C, 4,68 kg/h και 16% υγρασία τροφοδοσίας για: α. C = 0%, β. C = 10%, γ. C = 30% και δ. C = 50%..... 136

Σχήμα 6.6-2 Επίδραση υγρασίας τροφοδοσίας στην κυψελοειδή δομή των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί: από α-γ. *C* = 0%, στους 200°C, 4,68 kg/h σε υγρασίες από 13 έως 19%, και από δ-στ. *C* = 30%, στους 200°C, 4,68 kg/h σε υγρασίες από 13 έως 19%. 137

Σχήμα 6.6-3 Επίδραση θερμοκρασίας εκβολής στην κυψελοειδή δομή των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί σε παροχή τροφοδοσίας 4,68 kg/h για α-γ. *C* = 0% και *X* = 13% και *T*: 170-230°C και δ-στ. *C* = 30% και *X* = 16% και *T*: 170-230°C. 138

Σχήμα 6.6-4 Επίδραση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας στην κυψελοειδή δομή των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί σε *T*: 170°C, *X*: 13% για α-β. C=10% και F: 2,52-4,68 kg/h και γ-δ. *C*=50% και *F*=2,52-4,68 kg/h..... 138

Σχήμα 6.7-1 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην οργανοληπτική διάμετρο των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$). 139

Σχήμα 6.7-2 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην τραγανότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).... 140

Σχήμα 6.7-3 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στο αφρώδες των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$). 141

Σχήμα 6.7-4 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη σκληρότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$) 142

Σχήμα 6.7-5 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη συγκολητικότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).... 143

Σχήμα 6.8-1 Διάγραμμα ΑΚΣ των 2 πρώτων κυρίων συνιστωσών των δομικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων υφής των τροφίμων εκβολής (ενόργανες και οργανοληπτικές).....144

Σχήμα 6.8-2 ΑΚΣ των ενόργανων και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής όπως επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η κωδικοποίηση των δειγμάτων είναι αυτή που περιγράφεται στον Πίνακα 4-3. 146

Σχήμα 7.4-1 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην ΙΑΝ των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$). 151

Σχήμα 7.4-2 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην ΙΔΝ των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$). 153

Σχήμα 7.4-3 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην ΙΑΕ των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$). 156

Σχήμα 7.4-4 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών των λειτουργικών ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής όπως αυτές επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. 157

Σχήμα 8.4-1 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας X=13% και F=2,52 kg/h. 165

Σχήμα 8.4-2 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας X=13% και F=4,68 kg/h. 166

Σχήμα 8.4-3 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας X=13% και F=6,84 kg/h. 167

Σχήμα 8.4-4 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας X=16% και F=2,52 kg/h. 170

Σχήμα 8.4-5 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας X=16% και F=4,68 kg/h. 171

Σχήμα 8.4-6 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας X=16% και F=6,84 kg/h. 172

Σχήμα 8.4-7 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=19% και *F*=2,52 kg/h. 174

Σχήμα 8.4-8 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=19% και *F*=4,68 kg/h. 175

Σχήμα 8.4-9 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=19% και *F*=6,84 kg/h 176

Σχήμα 8.4-10 Ολική αποδοχή των τροφίμων εκβολής ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. α) F= 2,52kg/h, β) F=4,68 kg/h, γ) F=6,84 kg/h. 177

Σχήμα 8.4-11 Διάγραμμα ΑΚΣ των 2 πρώτων κυρίων συνιστωσών των οργανοληπτικών ιδιοτήτων και της ολικής αποδοχής των τροφίμων εκβολής. 178

Σχήμα 8.4-12 ΑΚΣ των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και της ολικής αποδοχής των προϊόντων εκβολής όπως επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η κωδικοποίηση των δειγμάτων είναι αυτή που περιγράφεται στον Πίνακα 4-3. 180

Σχήμα 9.3-1 Συσκευή θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης και πρέσα συμπίεσης δείγματος. 185

Σχήμα 9.4-1 Ισόθερμοι ροφήσεως (25°C) των τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο (Πρότυπο GAB). 188

Σχήμα 9.4-2 Θερμογράφημα DSC που υποδεικνύει την υαλώδη μετάπτωση των τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο (*X*=16%, *T*=200°C, *F*=4,68kg/h, α_w=0,75). 190

Σχήμα 9.4-3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τροφίμων εκβολής ως συνάρτηση των συνθηκών επεξεργασίας, της σύστασης και της ενεργότητας νερού. 193

Σχήμα 9.4-4 Βηματική μεταβολή ροής θερμότητας για διαφορετικές ενεργότητες νερού (θερμογράφημα DSC). Παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή στα υψηλότερα επίπεδα ενεργότητας νερού. 194

Σχήμα 9.4-5 Ενδόθερμη κορυφή προϊόντων εκβολής για α_w=0,33, με *X*=16% και *C*=30%, επεξεργασμένα σε *T*=200°C. 195

1 Αντικείμενο και στόχοι

Η θερμή εκβολή είναι μία διεργασία τροφίμων, που προσφέρει συνεχή κατεργασία και ευκαμψία, η οποία επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων τροφίμων με μια ποικιλία υφής και σχήματος. Κατά τη θερμή εκβολή, το υλικό μεταφέρεται και συγχρόνως υποβάλλεται σε θέρμανση, μηχανικό έργο και συμπίεση και κατόπιν εξαναγκάζεται να διέλθει μέσα από μια μήτρα απόρριψης. Στον εκβολέα λαμβάνουν χώρα ανάμιξη, θέρμανση (μαγείρεμα), διάτμηση, ψύξη και μορφοποίηση. Επί δεκαετίες, έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες τόσο ερευνητικές όσο και ανάπτυξης εξοπλισμού και της διεργασίας της εκβολής και πάντα σύμφωνα με τις νέες τάσεις της αγοράς, τις απαιτήσεις των καταναλωτών και τις διαθέσιμες πρώτες ύλες. Σήμερα παράγεται μια ποικιλία προϊόντων εκβολής τόσο για ανθρώπινη κατανάλωση, όσο και για ζωοτροφές (Cheng & Friis, 2010).

Παρ' όλο που έρευνα πάνω στην εκβολή έχει διεξαχθεί κατά το παρελθόν, η κατανόηση, τόσο των μεταβολών που συμβαίνουν στα χρησιμοποιούμενα υλικά εντός του εκβολέα, όσο και των επιδράσεων των παραμέτρων της διεργασίας πάνω στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής συνεχίζει να είναι ακόμη πολύ περιορισμένη (Bruin & Jongen, 2003; Bruin, Zuilichem & Stolp, 1978; Cheng et al., 2010; Kokini, Ho & Karwe, 1992). Συχνά κατά την ανάπτυξη προϊόντων και την αναλογική αύξηση της διεργασίας (process scale-up) επικρατούν μέθοδοι δοκιμής και σφάλματος. Οι εφαρμογές της διεργασίας περιορίζονται στη μελέτη πολύ εξειδικευμένων περιπτώσεων και είναι πολύ δύσκολο να επεκταθούν σε νέες συνταγές κατά τη θερμή εκβολή. Αποτέλεσμα αυτού είναι, παρά την προσπάθεια από πλευράς βιομηχανίας να βασίσει την παραγωγή στις αρχές και πορίσματα της καθαρής επιστήμης – με επιτυχία σε πολλούς τομείς -, η εκβολή να συνεχίζει να αποτελεί ένα τομέα ο οποίος ακόμη στηρίζεται σημαντικά στις αρχές της τέχνης (Cheng et al., 2010; Moraru & Kokini, 2003).

Κατά τη διεργασία της θερμής εκβολής, η διόγκωση του προϊόντος λαμβάνει χώρα εκτός του βασικού εξοπλισμού, δηλαδή μετά την έξοδο από τη μήτρα. Στα προϊόντα εκβολής η διόγκωση είναι μια πολύ σημαντική βασική ιδιότητα, η οποία περιγράφει την ποιότητα του προϊόντος και σχετίζεται άμεσα από το βαθμό θέρμανσης (μαγειρέματος). Γενικά, το προϊόν δεν είναι αποδεκτό, εκτός και η τιμή της διόγκωσης αυτού βρίσκεται σε κάποια αποδεκτή περιοχή (προδιαγραφή προϊόντος). Έτσι, η κατανόηση των επιδράσεων των παραμέτρων της διεργασίας πάνω στη διόγκωση του προϊόντος καθίσταται κρίσιμη για τη διεργασία της θερμής εκβολής. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα μαθηματικά πρότυπα για την περιγραφή της διόγκωσης των προϊόντων εκβολής (Alvarez-Martinez, Kondury & Harper, 1988; Bruin et al., 2003; Moraru et al., 2003; Tayeb, Della Valle, Barrès & Vergnes, 1992), ενώ μερικοί ερευνητές χρησιμοποιούν εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται (Altan, McCarthy & Maskan, 2008; Cai & Diosady, 1993; Ding, Ainsworth, Plunkett, Tucker & Marson, 2006). Οι τελευταίες γίνονται με τη χρήση κατάλληλων στατιστικών μεθόδων. Τόσο τα θεωρητικά, όσο και τα εμπειρικά πρότυπα συχνά αντιπροσωπεύουν ειδικές διεργασίες εκβολής και δεν μπορούν να επεκταθούν και δεν ισχύουν σε άλλες περιπτώσεις. Το ίδιο παρατηρείται και για τις δομικές ιδιότητες, τις

ιδιότητες υφής, καθώς και για τις λοιπές λειτουργικές ιδιότητες, οι οποίες ισχύουν για την περίπτωση που έχουν μελετηθεί και εξαχθεί.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σύσταση, ο εξοπλισμός παραγωγής και οι παράμετροι της διεργασίας επηρεάζουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των διογκωμένων προϊόντων εκβολής. Τα τελευταία θα πρέπει να καλύπτουν τις προτιμήσεις των καταναλωτών. Εφ' όσον αυτές ποικίλουν με την ομάδα των καταναλωτών απαιτείται μοναδικός σχεδιασμός. Η δημιουργία γεύσης και οσμής κατά τη θερμή εκβολή των δημητριακών οφείλεται στην επιτέλεση θερμικά βοηθούμενων αντιδράσεων και μέχρι σήμερα έχουν βρεθεί ότι περισσότερες από 220 ενώσεις συμβάλλουν στη διαμόρφωση της γεύσης-οσμής των προϊόντων αυτών. Η γεύση-οσμή μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή των παραμέτρων της εκβολής (Bredie, Mottram & Guy, 1998), και εξαρτάται πολύ από τη σύσταση της πρώτης ύλης.

Κατά τα πρόσφατα έτη υπάρχει η τάση μεταξύ των καταναλωτών για κατανάλωση θρεπτικών τροφίμων με υψηλή περιεκτικότητα βιοενεργών συστατικών και διαιτητικών ινών. Οι τελευταίες μειώνουν τη διόγκωση των προϊόντων εκβολής και καθιστούν τα προϊόντα πιο σκληρά. Η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής σε προϊόντα που προέρχονται από πρώτες ύλες με υψηλές περιεκτικότητες ινών και φυτικών πρωτεϊνών, όπως τα όσπρια. Η έρευνα στον τομέα αυτό είναι περιορισμένη, με εξαίρεση τη σόγια και μερικά είδη φασολιών (Anton, Gary Fulcher & Arntfield, 2009; Lazou, Michailidis, Thymi, Krokida & Bisharat, 2007).

Η αποδοχή των διογκωμένων προϊόντων εκβολής καθορίζεται κυρίως με βάση την ευθρυπτότητα και τραγανότητά τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να εκτιμηθούν με οργανοληπτικές και ενόργανες μετρήσεις και είναι συναρτήσεις των υλικών και των παραμέτρων της διεργασίας. Η ευθρυπτότητα και η τραγανότητα είναι όροι που αντιπροσωπεύουν αισθητήρια αντίληψη και περιγράφουν την αντίληψη της υφής στα διογκωμένα προϊόντα εκβολής. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά οφείλονται στην εύθρυπτη, σαν αφρού κυψελοειδή δομή, ενώ η με τις αισθήσεις αντίληψη συνδέεται με τις ιδιότητες θραύσης. Για την ενόργανη μέτρηση της υφής των προϊόντων αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί οι μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνονται με συμπίεση ή διάτρηση (Vincent, 1998). Σχετικά πιο πρόσφατα, η έρευνα έχει εστιασθεί στη συμβολή των παραμέτρων μικροδομής πάνω στις μηχανικές ιδιότητες των διογκωμένων τροφίμων εκβολής (Agbisit, Alavi, Cheng, Herald & Trater, 2007; Barrett, Cardello, Lesher & Taub, 1994a; Barrett & Peleg, 1992a; Van Hecke, Allaf & Bouvier, 1998; Warburton, Donald & Smith, 1992). Παρ' όλα αυτά δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης πρόβλεψη των ιδιοτήτων αυτών με βάση τις επιδράσεις των μεταβλητών της διεργασίας και της σύστασης της πρώτης ύλης. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η έλλειψη επαναληψιμότητας στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (Corradini & Peleg, 2008a).

Κατά τα πρόσφατα έτη μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στη Μεσογειακή διατροφή, στην οποία σημαντική συνεισφορά έχουν τα όσπρια. Μεταξύ των οσπρίων οι φακές αποτελούν μια σπουδαία πηγή υδατανθράκων και φθηνής πρωτεΐνης, ενώ αλληλοσυμπληρώνουν τα δημητριακά από την άποψη των απαραίτητων αμινοξέων. Η εκβολή μπορεί να δώσει μια ποικιλία προϊόντων με φακή, τα οποία θα έχουν υψηλή αποδοχή από τους καταναλωτές

και ιδίως τους νέους. Κατά την παραγωγή προϊόντων εκβολής με βάση τα όσπρια ακολουθούνται μερικά πρότυπα και η παραγωγή είναι κυρίως εμπειρική και εφαρμόζεται η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος (Berrios, Tang & Swanson, 2008). Έτσι, απαραίτητη είναι η μελέτη της διεργασίας, αλλά κυρίως των ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής, ώστε να καταστεί δυνατός τόσο ο σχεδιασμός όσο και η παραγωγή προϊόντων με συγκεκριμένη αποδεκτή ποιότητα που θα βασίζονται σε κατάλληλα μαθηματικά πρότυπα.

Λόγω της πολύπλοκης σύστασης της πρώτης ύλης, καθώς επίσης και του μεγάλου αριθμού των λειτουργικών παραμέτρων που περιλαμβάνονται στη διεργασία της εκβολής, η λήψη προϊόντων με επιθυμητές ιδιότητες, όπως άριστη διόγκωση, υφή και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, αποτελεί ερευνητική πρόκληση.

1.1 Στόχοι

Η παρούσα έρευνα αποσκοπεί στο να παρέχει βασική γνώση πάνω στις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής, όπως αυτές επηρεάζονται από τη σύσταση του υλικού τροφοδοσίας (πρώτες ύλες) και τις παραμέτρους της διεργασίας. Επίσης, μελετάται η επίδραση των παραγόντων αυτών στα χαρακτηριστικά ποιότητας των παραγομένων προϊόντων και η δυνατότητα πρόβλεψης αυτών.

Κατά τη μελέτη ως πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκαν αραβοσιτάλευρο και μίγματα αραβοσιτάλευρου και αλεύρου φακής σε διάφορα ποσοστά που έφθαναν το 50%. Επίσης έγινε διαμόρφωση της υγρασίας των δειγμάτων ώστε να καλύπτεται μια ευρεία περιοχή. Μελετήθηκαν ακόμη οι επιδράσεις των μεταβλητών που επηρεάζουν περισσότερο τις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής, όπως η θερμοκρασία, η παροχή του υλικού τροφοδοσίας και η αρχική υγρασία του υλικού σε εκβολέα διπλού κοχλία συστροφής με σταθερή ταχύτητα περιστροφής κοχλιών (rpm) και σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα των προϊόντων εκβολής χρησιμοποιήθηκε πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 4(αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο) x 3(υγρασία τροφοδοσίας) x 3(θερμοκρασία εκβολής) x 3(παροχή υλικού τροφοδοσίας). Μετρήθηκαν και μελετήθηκαν οι δομικές ιδιότητες, οι ιδιότητες υφής, οι λειτουργικές ιδιότητες, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, οι ισόθερμες ρόφησης και οι μεταπτώσεις φάσεων και αναπτύχθηκαν μαθηματικά πρότυπα τα οποία περιγράφουν την επίδραση των παραμέτρων και της σύστασης πάνω στις ιδιότητες των προϊόντων.

Πιο αναλυτικά πραγματοποιήθηκε μελέτη και χαρακτηρισμός:

- της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στις δομικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής, όπως η φαινόμενη πυκνότητα, η πραγματική πυκνότητα, το πορώδες, και ο συντελεστής διόγκωσης, καθώς επίσης και των μηχανισμών που διέπουν τη δημιουργία της διογκωμένης-αφρώδους δομής, καθώς επίσης και ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων δομής και το σχεδιασμό διογκωμένων τροφίμων εκβολής.

- της μηχανικής συμπεριφοράς διογκωμένων προϊόντων εκβολής όπως επηρεάζεται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Επίσης αναπτύχθηκαν μαθηματικά πρότυπα για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, καθώς επίσης και για το σχεδιασμό διογκωμένων τροφίμων εκβολής με επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Επίσης έγινε συσχέτιση των δομικών και μηχανικών ιδιοτήτων και συμβολή στην κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την μηχανική συμπεριφορά των διογκωμένων προϊόντων εκβολής.

- των μεταβολών των λειτουργικών ιδιοτήτων, όπως η ικανότητα απορρόφησης νερού, η διαλυτότητα σε νερό και η ικανότητα απορρόφησης ελαίου μιγμάτων αραβοσιτάλευρου και φακής, όπως αυτές επηρεάζονται από τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύστασης της πρώτης ύλης. Περαιτέρω, έγινε συσχετισμός των λειτουργικών ιδιοτήτων ώστε να ληφθούν προϊόντα με επιθυμητή λειτουργικότητα.

- των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών, όπως η εμφάνιση, η γεύση, η υφή και η αποδοχή σε σχέση με τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, και συσχέτιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών ώστε να καταστεί δυνατή η διαφοροποίηση μεταξύ των προϊόντων εκβολής, κάτω από διάφορες συνθήκες εκβολής.

- της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης του υλικού τροφοδοσίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και στη θερμοκρασία τήξης των συμπλόκων προϊόντων εκβολής μιγμάτων αλεύρου φακής και αραβοσιτάλευρου και επίσης των φαινομένων προσρόφησης νερού των τροφίμων εκβολής και εκτιμήθηκε η πλαστικοποιητική επίδραση του νερού στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

Η διατριβή αυτή προσφέρει ποσοτική και ποιοτική γνώση πάνω στις επιδράσεις της σύστασης των πρώτων υλών και τη χρήση της φακής στην παραγωγή διογκωμένων προϊόντων εκβολής και επίσης συμβάλει στην κατανόηση της καταλληλότητας της φακής, αλλά και των οσπρίων γενικότερα, στην επεξεργασία και παραγωγή καινοτόμων προϊόντων τροφίμων με επιθυμητές ιδιότητες και αποδεκτή ποιότητα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περαιτέρω βελτίωση της διεργασίας και της τεχνολογίας της εκβολής, στην ανάπτυξη νέων τροφίμων και στην αύξηση της αξίας των γεωργικών προϊόντων. Αυτό θα έχει ως συνέπεια υψηλότερη προστιθέμενη αξία για διάφορα αγροτικά προϊόντα, όπως ο αραβόσιτος και τα όσπρια.

2 Εκβολή τροφίμων

Τα δημητριακά και τα προϊόντα δημητριακών αποτελούν και θα συνεχίσουν να αποτελούν ένα σημαντικό και βασικό μέρος της διατροφής του ανθρώπου. Μεταξύ των προϊόντων δημητριακών, πολύ σπουδαία είναι τα δημητριακά πρωινού και τα προϊόντα σνακ (διογκωμένα και μη). Τα τελευταία περιλαμβάνουν τρόφιμα για ελαφριά γεύματα ή για φαγητό μεταξύ των γευμάτων (πρόχειρο φαγητό). Στην Ελλάδα, όπως και στις άλλες χώρες του κόσμου, καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες προϊόντων σνακ και διογκωμένων προϊόντων σνακ. Η συνολική Ευρωπαϊκή αγορά προϊόντων σνακ ανήλθε στα 12,6 δισεκατομμύρια Ευρώ το 2007, ενώ για την περίοδο 2007-2012 αναμένεται μια πραγματική ετήσια αύξηση 1,04%. Πιο ειδικά, η αγορά των προϊόντων σνακ παντός είδους στην Ευρώπη έχει πετύχει τον οικονομικό στόχο των 12,4 δισεκατομμυρίων το 2009 ή 1,1% της συνολικής αγοράς των τροφίμων και ποτών των 1.111 δισεκατομμυρίων Ευρώ. Σε όλες τις χώρες της Ευρώπης στη βιομηχανία των σνακ δραστηριοποιούνται περισσότερες από 391 εταιρείες, ενώ η βιομηχανία των διογκωμένων προϊόντων εκβολής καταλαμβάνει το 26% της συνολικής αγοράς ή 3,3 δισεκατομμύρια Ευρώ (FFT(Food_For_Thought), 2011). Στις ΗΠΑ η αντίστοιχη τεχνολογία εκβολής καταλαμβάνει μια αγορά 40 δισεκατομμυρίων δολαρίων.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη βιομηχανία των προϊόντων σνακ είναι αφ' ενός πολυάριθμες και αφ' ετέρου μεταβάλλονται συνεχώς. Τα σνακ εκβολής παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατότητα ανάπτυξης μεταξύ των προϊόντων της κατηγορίας αυτής. Η τεχνολογία της εκβολής προσφέρει δυνατότητες για ανάπτυξη διεργασιών για την παραγωγή μιας ποικιλίας προϊόντων με διαφορετικά σχήματα, υφή και χρώμα, τα οποία θα είναι υψηλά αποδεκτά από την καταναλωτή.

Η εκβολή είναι μια διεργασία η οποία συνδυάζει μια σειρά από βασικές φυσικές διεργασίες, όπως ανάμιξη, θέρμανση, μάλαξη, σχηματοποίηση και μορφοποίηση. Ο κύριος σκοπός της εκβολής είναι να αυξήσει την ποικιλία των τροφίμων με παραγωγή προϊόντων διαφορετικού σχήματος, υφής, χρώματος και γεύσεως-οσμής από βασικά συστατικά. Η θερμή εκβολή είναι μια διεργασία υψηλής θερμοκρασίας-βραχέος χρόνου (HTST) η οποία μειώνει το μικροβιακό φορτίο και αδρανοποιεί τα ένζυμα. Τόσο στην ψυχρή όσο στην θερμή εκβολή η συντήρηση των τροφίμων επιτυγχάνεται από την χαμηλή ενεργότητα νερού του προϊόντος.

Η εκβολή είναι ένα παράδειγμα διεργασίας αύξησης μεγέθους, στην οποία μικρά κοκκώδη ή κονιοποιημένα σωματίδια αναδιαμορφώνονται προς μεγαλύτερα κομμάτια. Τα τελευταία χρόνια έχει διαδοθεί λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, όπως: α) Ευκαμψία, ως προς την παραγωγή προϊόντων, β) Μειωμένο κόστος, μέσω εξοικονόμησης πρώτων υλών, ενέργειας, εργατικών και κεφαλαίου, και γ) Υψηλοί ρυθμοί παραγωγής, αυτοματοποιημένη παραγωγή και απουσία αποβλήτων (Guy, 2001).

Η θερμή εκβολή είναι η μόνη από τις μεθόδους θερμικής κατεργασίας των τροφίμων κατά την οποία το υλικό υποβάλλεται σε έντονη μηχανική καταπόνηση. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη φύση των προϊόντων εκβολής είναι οι συνθήκες λειτουργίας του εκβολέα και οι ρεολογικές ιδιότητες του τροφίμου. Οι πιο σπουδαίες λειτουργικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η διάμετρος του ανοίγματος της μήτρας μορφοποίησης, η παροχή του υλικού τροφοδοσίας και η ταχύτητα διατμήσεως. Η ταχύτητα διατμήσεως επηρεάζεται από τον εσωτερικό σχεδιασμό του χιτωνίου (barrel) και την ταχύτητα και τη γεωμετρία του κοχλία (ή κοχλιών). Οι ιδιότητες του υλικού τροφοδοσίας επηρεάζουν σημαντικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής. Οι πιο σπουδαίοι παράγοντες είναι η περιεκτικότητα υγρασίας, η φυσική κατάσταση των υλικών και η χημική τους σύνθεση, ιδιαιτέρως το ποσό και ο τύπος του αμύλου, των πρωτεϊνών, των λιπών και των σακχάρων (Guy, 1994).

Η θερμή εκβολή είναι μια HTST διεργασία, η οποία ελαχιστοποιεί την απώλεια θρεπτικών από τα τρόφιμα και μειώνει το μικροβιακό φορτίο. Ο μεγάλος χρόνος ζωής των προϊόντων αυτών οφείλεται στην μικρή ενεργότητα ύδατος, συνήθως στην περιοχή του 0,1 με 0,4.

Κατά τη θερμή εκβολή αμυλούχων τροφίμων η περιεκτικότητα υγρασίας αυξάνεται με την προσθήκη νερού και το άμυλο υπόκειται σε έντονες διατμητικές δυνάμεις σε ανυψωμένες θερμοκρασίες. Οι κόκκοι του αμύλου διογκώνονται, απορροφούν νερό και ζελατινοποιούνται. Η μακρομοριακή δομή του αμύλου ανοίγει και παράγεται μια ιξώδης πλαστικοποιημένη μάζα. Το άμυλο διαλυτοποιείται, όμως δεν υποβαθμίζεται σημαντικά (Mercier, Linko & Harper, 1989). Οι μεταβολές στη διαλυτότητα κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας διατμήσεως παρακολουθούνται με μέτρηση της Ικανότητας Απορρόφησης Νερού (Water Absorption Index, WAI) και της Ικανότητας Διαλυτότητας σε Νερό (Water Solubility Index, WSI). Η ικανότητα απορρόφησης νερού των προϊόντων δημητριακών γενικώς αυξάνεται με τη δριμύτητα της διεργασίας, φθάνοντας ένα μέγιστο στους 180-200°C. Η ικανότητα διαλυτότητας σε νερό μειώνεται καθώς η WAI αυξάνει. Κατά την επεξεργασία των δημητριακών, το ιξώδες της πάστας που σχηματίζεται παρακολουθείται *in situ* για να εκτιμηθεί η δριμύτητα της διεργασίας και σε εργασίες επιπέδου pilot plant, για να καθοριστούν οι συνθήκες εκβολής (Fellows, 2000).

Κατά την θερμή εκβολή πρωτεϊνούχων τροφίμων πραγματοποιείται διάνοιξη της τεταρτοταγούς δομής των πρωτεϊνών, λόγω των θερμών και υγρλων συνθηκών, και παράγεται μια ιξώδης πλαστικοποιημένη μάζα. Κατόπιν οι πρωτεΐνες πολυμερίζονται, συνδέονται μεταξύ τους και επαναπροσανατολίζονται για να σχηματίζουν την ινώδη δομή των δομημένων φυτικών πρωτεϊνών (Texturised Vegetable Proteins, TVP). Ο δείκτης διαλυτοποιήσεως αζώτου είναι ένα μέτρο εκτιμήσεως της εκτάσεως της μετουσιώσεως των πρωτεϊνών. Γενικώς, μειώνεται κατά τη θερμή εκβολή και έτσι τα

υλικά τροφοδοσίας θα πρέπει να περιέχουν κυρίως μη μετουσιωμένες πρωτεΐνες (Harper, 1986).

2.1 Εξοπλισμός

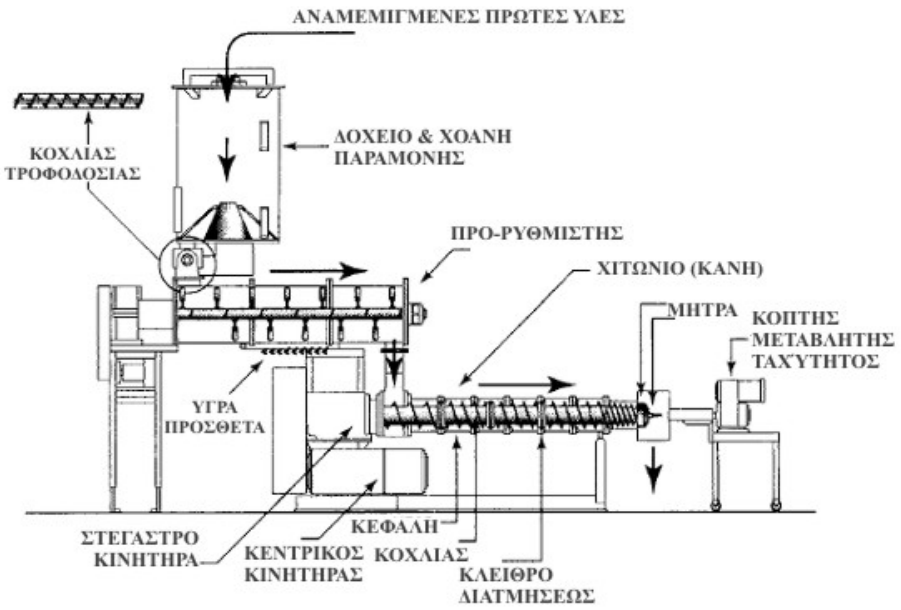
Οι εκβολείς ταξινομούνται σύμφωνα με τη μέθοδο λειτουργίας, ως ψυχροί και θερμοί, και σύμφωνα με τη μέθοδο κατασκευής, ως μονού ή διπλού κοχλία. Οι αρχές λειτουργίας είναι οι ίδιες για όλους τους τύπους και γενικώς περιλαμβάνουν: Το υλικό τροφοδοσίας με κοκκώδη μορφή τροφοδοτείται στο χιτώνιο του εκβολέα. Κατόπιν, ο κοχλίας (ή κοχλίες) το μεταφέρουν, το συμπιέζουν και το "δουλεύουν" (διάτμηση ή μάλαξη) έτσι ώστε να μετατραπεί από κοκκώδες σε μια ημιστερεή πλαστικοποιημένη μάζα. Η μάζα αυτή εξαναγκάζεται (εξωθείται) να διέλθει μέσω του στενού ανοίγματος ή της μήτρας και κατά την έξοδο κόβεται είτε με περιστρεφόμενα μαχαίρια ή με λαιμητόμο, για να δημιουργηθούν διάφορα σχήματα όπως ράβδοι, σφαίρες, "λουκουμάδες", σωλήνες, λωρίδες, στριφτάρια ή κοχύλια. Μερικά προϊόντα εκβολής είναι κατάλληλα να δεχθούν επικάλυψη (Mercier et al., 1989).

2.1.1 Εκβολείς μονού κοχλία

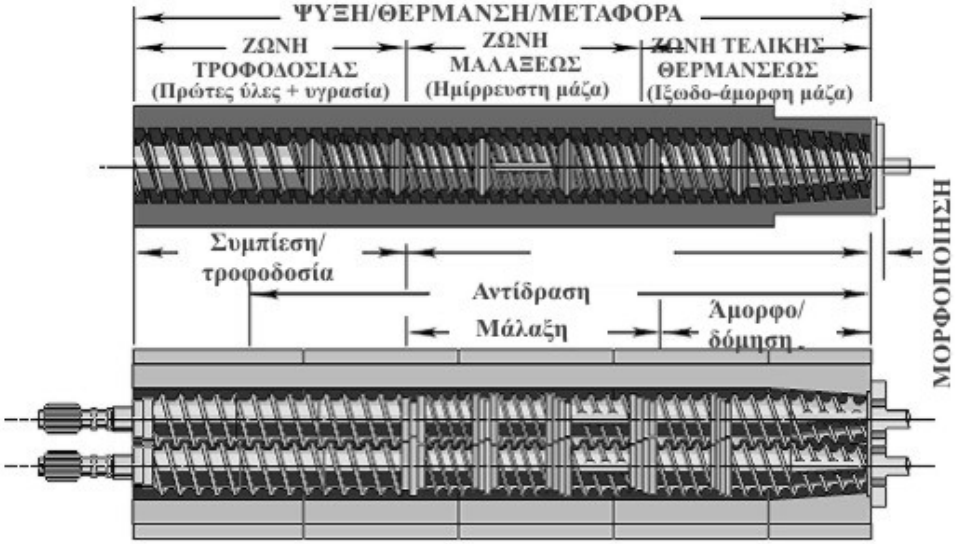
Οι εκβολείς αυτοί έχουν ένα μόνο κοχλία και μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με την έκταση της διατμητικής δράσεως επί του τροφίμου σε (Fellows, 2000; Frame, 1994):

1. Υψηλής διατμήσεως (δημητριακά πρωινού και snack)
2. Ενδιαμέσου διατμήσεως (breadings και ενδιαμέσου υγρασίας τροφές κατοικιδίων)
3. Χαμηλής διατμήσεως (πάστα και προϊόντα κρέατος)

Ο κοχλίας διαθέτει ένα αριθμό τμημάτων, όπως το τμήμα τροφοδοσίας (Σχήμα 2.1-1, Σχήμα 2.1-2) το οποίο συμπιέζει τα σωματίδια του τροφίμου προς μία ομογενή μάζα, το τμήμα μαλάξεως για τη συμπίεση, ανάμιξη και διάτμηση του πλαστικοποιημένου τροφίμου και στους εκβολείς υψηλής διατμήσεως το τμήμα θερμάνσεως. Το τελευταίο τμήμα καλείται επίσης και τμήμα μετρήσεως και το οποίο βρίσκεται πιο κοντά στην έξοδο του εκβολέα και συχνά έχει πολύ ρηχά πτερύγια. Τα τελευταία επιφέρουν την αποτελεσματική ταχύτητα διατμήσεως με την κλίση που διαθέτουν και μάλιστα τη μεγιστοποιούν για μια δεδομένη ταχύτητα περιστροφής του κοχλία. Λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας διατμήσεως στο τμήμα αυτό, η εσωτερική ανάμιξη είναι πολύ έντονη. Επίσης, υπάρχει απότομη αύξηση στη θερμοκρασία του μίγματος λόγω μετατροπής του μηχανικού έργου σε θερμική ενέργεια. Η μεταβολή της θερμοκρασίας δείχνει μια σχεδόν γραμμική αύξηση με το χρόνο κατά την προρύθμιση/ανάμιξη του μίγματος, καθώς επίσης και μια απότομη αύξηση στους 180°C ακριβώς πριν την έξοδο από το στενό άνοιγμα, όπου συχνά συμβαίνει εκτόνωση και διόγκωση του προϊόντος.



Σχήμα 2.1-1 Διάγραμμα εκβολέα μονού κοχλία

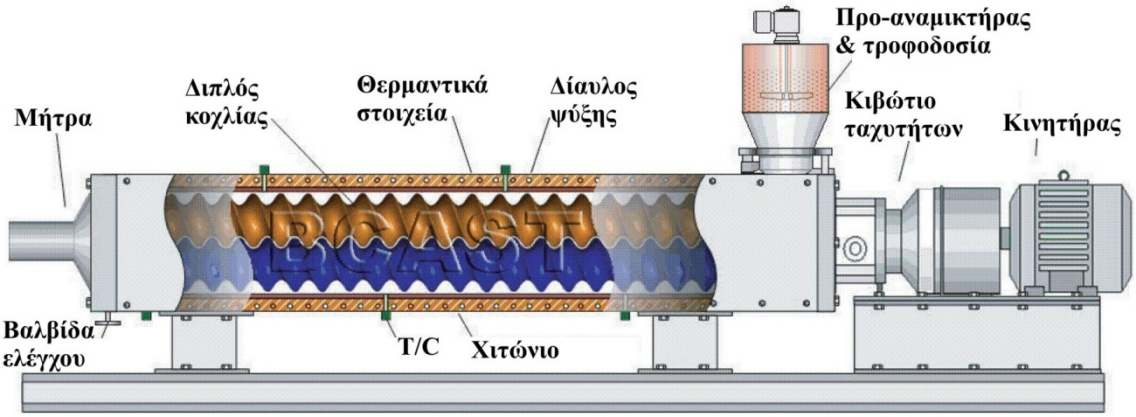


Σχήμα 2.1-2 Ζώνες επεξεργασίας σε εξωθητήρες μονού και διπλού κοχλία (Wenger Manufacturing, Inc.).

2.1.2 Εκβολείς διπλού κοχλία

Οι εκβολείς διπλού κοχλία φέρουν εντός του χιτωνίου δύο ισομήκεις κοχλίες. Παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκαμψία και καλύτερο έλεγχο της διεργασίας κατά την εκβολή από ότι οι εκβολείς μονού κοχλία. Μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες τους αντιθέτου περιστροφής και αυτούς της συστροφής. Ο βαθμός στον οποίο οι δύο κοχλίες εμπλέκονται εξαρτάται από το σχεδιασμό των εκβολέων. Οι αυτοκαθαριζόμενοι ή αυτοσκουπιζόμενοι εκβολείς συστροφής αποτελούν τον πλέον κοινό εξοπλισμό ο οποίος χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων, καθώς επιτρέπουν μια πιο αποτελεσματική ανάμιξη (Mercier et al., 1989). Στο Σχήμα 2.1-3 φαίνεται ένας εκβολέας

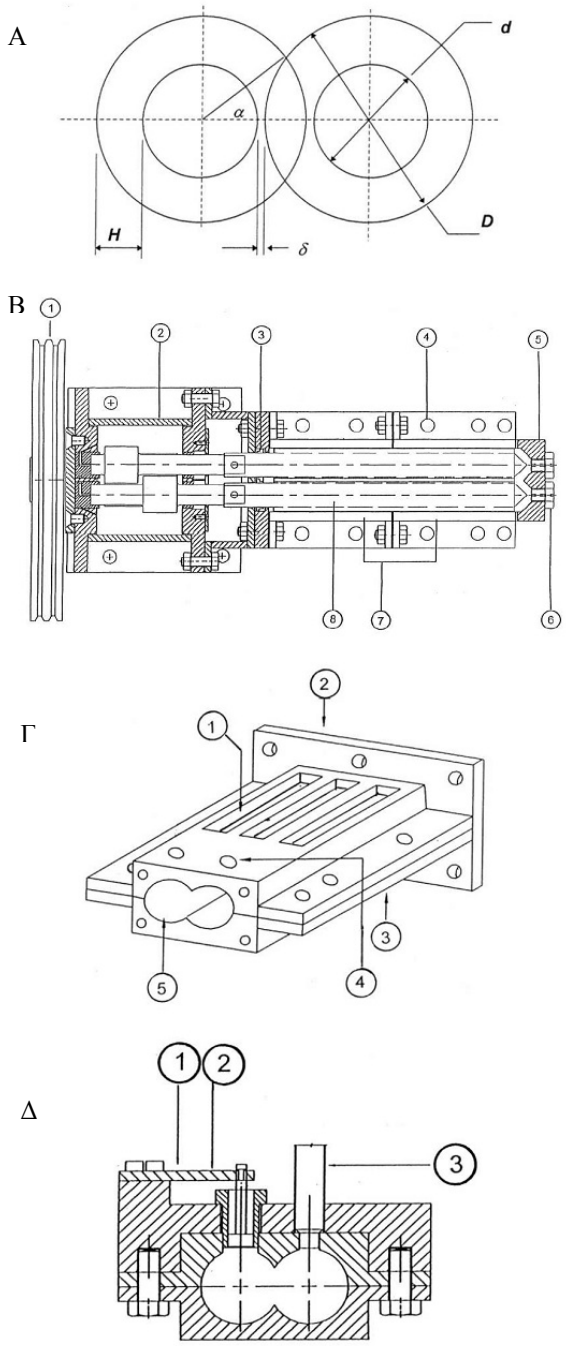
διπλού κοχλία και στο Σχήμα 2.1-2 οι διαμορφώσεις κοχλία οι οποίες χρησιμοποιούνται σε τέτοιους εκβολείς.



Σχήμα 2.1-3 Εκβολέας διπλού κοχλία.

Ο εκβολέας διπλού κοχλία περιλαμβάνει μια διπλότοιχη κεφαλή, ένα περιστρεφόμενο άξονα ο οποίος φέρει τους κοχλίες, το χιτώνιο (περίβλημα), τη μήτρα ή καλούπι και το μηχανισμό κοπής (Riaz, 2000) (Σχήμα 2.1-4). Στους εκβολείς διπλού κοχλία, υπάρχουν βασικά τρεις ζώνες επεξεργασίας, ονομαστικά: τροφοδοσίας, μάλαξης και τελικής επεξεργασίας (Mercier et al., 1989). Στη ζώνη τροφοδοσίας, παραλαμβάνονται τα προρυθμισμένα ή ξηρά υλικά πριν να μεταφερθούν στη ζώνη μάλαξης. Στο σημείο αυτό μπορεί να εισαχθεί νερό ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη υγρασία και επίσης για να σχηματισθεί η ζύμη εντός του χιτωνίου του εκβολέα πριν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Μετά τη ρύθμιση της υγρασίας, τα υλικά μεταφέρονται στη ζώνη μάλαξης. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, η μάζα των υλικών αποκτά μεγάλη πυκνότητα λόγω της προσθήκης νερού και ατμού. Στη ζώνη αυτή, τα υλικά υποβάλλονται σε συμπίεση και διάτμηση και επίσης δέχονται θερμική ενέργεια, με συνέπεια την απώλεια της κοκκώδους διαμόρφωσης. Ο μηχανισμός διάτμησης παίζει σπουδαίο στη ζώνη αυτή. Το προς εκβολή υλικό (εξώθημα) δέχεται τη μέγιστη συμπίεση στη ζώνη μάλαξης και έχουν ελαστική υφή και στη συνέχεια διέρχονται από τη ζώνη τελικής θέρμανσης. Τα πτερύγια των κοχλιών στη ζώνη αυτή είναι ρηχά και το βήμα βραχύ. Η ζώνη αυτή χρησιμοποιείται για τη συμπίεση και άντληση του υλικού με τη μορφή πλαστικοποιημένης μάζας στη μήτρα (καλούπι). Ο μηχανισμός διάτμησης στη ζώνη αυτή και η θερμοκρασία βρίσκονται στο μέγιστό της (Harper, 1980). Για την παραγωγή προϊόντων σνακ, η πλαστικοποιημένη μάζα παραμένει στη ζώνη αυτή για λιγότερο από 5 sec πριν εξαναγκασθεί να διέλθει μέσω της μήτρας (Riaz, 2000).

Οι εκβολείς διπλού κοχλία παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι αυτών του μονού κοχλία όπως, ρυθμός απόδοσης ανεξάρτητος του ρυθμού τροφοδοσίας, μπορούν να δεχθούν ελαιώδη, κολλώδη ή πολύ υγρά υλικά, έλεγχο της πιέσεως με μεταφορά μπρος – πίσω, ανάπτυξη υψηλής πιέσεως στο βραχύ τελευταίο τμήμα (αποφυγή φθοράς) και μπορούν να δεχθούν μίγμα μεγέθους σωματιδίων (Fellows, 2000). Στον Πίνακα 2.1-1 φαίνεται μια σύγκριση των εκβολέων μονού και διπλού κοχλία (Harper, 1986).



Σχήμα 2.1-4 Σχέδια εκβολέα διπλού κοχλία. Α. Διατομή διαμόρφωσης των κοχλιών. Β. Γραμμικό σχέδιο του εκβολέα διπλού κοχλία με σύστημα κίνησης. 1-τροχαλία με ταινία V, 2-κιβώτιο ταχυτήτων, 3-σφράγιση τροφίμου, 4-φλάντζα βίδας συσφίξεως, 5-πλάκα μήτρας, 6-μήτρα, 7-δύο διαμερίσματα του θαλάμου του εκβολέα, 8-κοχλίες του εκβολέα. Γ. Πρόσθιο μέρος του χιτωνίου το οποίο δείχνει τις θέσεις για τους θερμαντήρες και τους αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης. 1-θέση θερμαντήρων, 2-φλάντζες άκρων, 3-πλευρικές φλάντζες για το χιτώνιο, 4-οπή για τον αισθητήρα πίεσης, 5-δίδυμες οπές σχηματισμού του χιτωνίου. Δ. Θέση των αισθητήρων θερμοκρασίας και πίεσης πάνω στο χιτώνιο του εκβολέα. 1-μανόμετρα τάσης στον αισθητήρα πίεσης, 2-υποστήριγμα για τη στήριξη του εμβόλου, 3-αισθητήρας θερμοκρασίας (Senanayake & Clarke, 1999).

Πίνακας 2.1-1 Σύγκριση των εκβολέων μονού και διπλού κοχλία.

Μέρος	Μονός κοχλίας	Διπλός κοχλίας
Σχετικό κόστος κεφαλαίου/μονάδα		
Εκβολέας	1,0	1,5-2,0
Σύστημα	1,0	0,9-1,3
Σχετική συντήρηση	1,0	1,0-2,0
Ενέργεια		
Με προρυθμιστή	Μισό από ατμό	Δεν χρησιμοποιείται
Χωρίς προρυθμιστή	Μηχανική ενέργεια	Μίγμα μηχανικής ενέργειας & θερμικής εναλλαγής
Κοχλίας		
Γωνία μεταφοράς	>>10°	>>30°
Θετική εκτόπιση	Όχι	Όχι
Αυτοκαθαρισμός/σκούπισμα	Όχι	Ναι
Μεταβλητό ύψος πτερυγίου	Ναι	Όχι
Μήκος/διάμετρος κοχλία	4-25	10-25
Ανάμιξη	Φτωχή	Καλή
Σχετική RTD[α]	1,5	1,0
Κινητήρας		
Σχετική ροπή/πίεση	5,0	1,0
Μειωτήρας (μηχανισμός)	Απλός	Πολύπλοκος
Σχετική ταχύτητα κοχλιών	1,0-3,0	1,0
Μετάδοση θερμότητος	Φτωχή	Καλύτερη στα γεμάτα μέρη
Λειτουργία		
Υγρασία	12-35	6 έως πολύ υψηλή
Συστατικά	Ρέοντα κοκκώδη υλικά	Ευρεία περιοχή
Ευκαμψία	Περιορισμένη	Μεγαλύτερη

[α]Κατανομή χρόνου παραμονής

2.2 Κατανάλωση ισχύος στον εκβολέα

Γενικά υπάρχουν πολλοί λόγοι οι οποίοι καθιστούν αναγκαία την πρόβλεψη της κατανάλωσης ισχύος σε έναν εκβολέα, εκτός από την ανάγκη προσδιορισμού του κινητήρα. Σε όλες τις περιπτώσεις καθορίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία εκβολής. Συνήθως το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που παράγεται σε έναν εκβολέα είναι αποτέλεσμα της ιξώδους διασποράς της ισχύος του κινητήρα. Επιπρόσθετα έχει προταθεί ότι η ειδική μηχανική ενέργεια (Wh/g) από τους κοχλίες του εκβολέα είναι καθοριστικός παράγοντας που διαμορφώνει τις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής (Della Valle, Kozlowski & Tayeb, 1989; Levine & Miller, 2007; Mercier et al., 1989).

Η ειδική μηχανική ενέργεια (Specific Mechanical Energy-SME) σε έναν εκβολέα υπολογίζεται από την σχέση (Frame, 1994):

$$SME = \frac{N \cdot T \cdot K_w}{Q} \qquad \textbf{2-1}$$

όπου N η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, T η ροπή, Kw η ισχύς του κινητήρα και Q η παροχή.

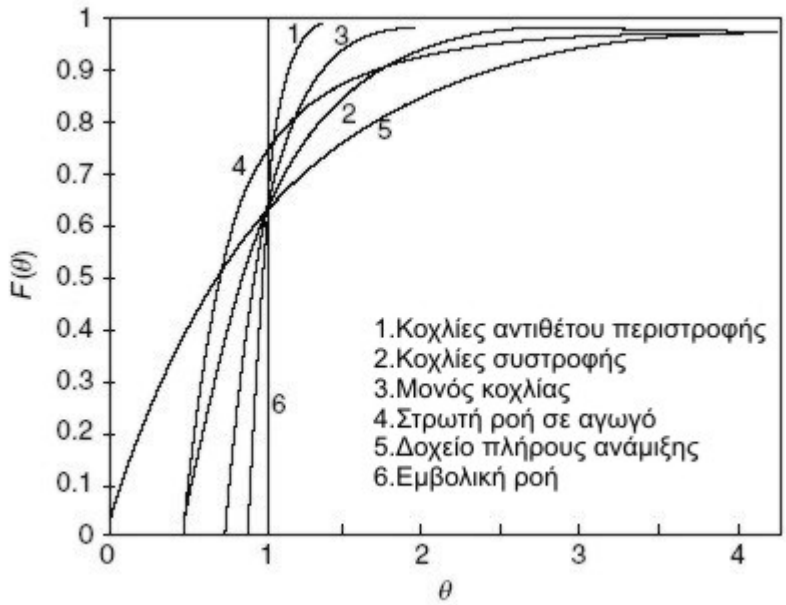
Η παραπάνω σχέση συσχετίζει την ειδική εισροή έργου από τον κινητήρα στο υλικό που υφίσταται εκβολή. Εν τούτοις σε πολλές εφαρμογές, και ειδικά σε υπολογισμούς κλιμάκωσης μεγέθους, η τιμή της ειδικής μηχανικής ενέργειας μπορεί να μείνει η ίδια ενώ η ποιότητα του προϊόντος να αλλάζει σημαντικά. Για παράδειγμα, αν αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, η τιμή της ροπής θα μειωθεί επειδή θα μειωθεί ο βαθμός πλήρωσης του χιτωνίου. Επίσης, λόγω του αυξημένου ρυθμού διάτμησης μπορεί να μειωθεί το ιξώδες του υλικού. Κατ' αυτόν τον τρόπο είναι πολύ πιθανό η τιμή της ειδικής μηχανικής ενέργειας να παραμείνει ίδια αλλά να έχει αλλάξει η ρεολογία και η ποιότητα του προϊόντος. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική μηχανική ενέργεια εξαρτάται από την συνταγή. Κατά την εκβολή διογκωμένων δημητριακών η μείωση της περιεχόμενης υγρασίας θα αυξήσει την τιμή της ειδικής μηχανικής ενέργειας, αφού θα μειωθεί η ροπή (Frame, 1994).

2.3 Κατανομή του χρόνου παραμονής των εκβολέων

Η διέλευση του υλικού, που υφίσταται επεξεργασία, μέσω του εκβολέα προκαλεί σε αυτό χημικές και φυσικές μεταβολές. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η γνώση των κατανομών του χρόνου παραμονής στους διάφορους τύπους εκβολέων. Η συνάρτηση της αθροιστικής κατανομής προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση (Levine et al., 2007):

$$F_\theta = 1 - \exp\left\{-\left[\left(\frac{1}{1-P}\right)\cdot(\theta - P)\right]\right\} \qquad \textbf{2-2}$$

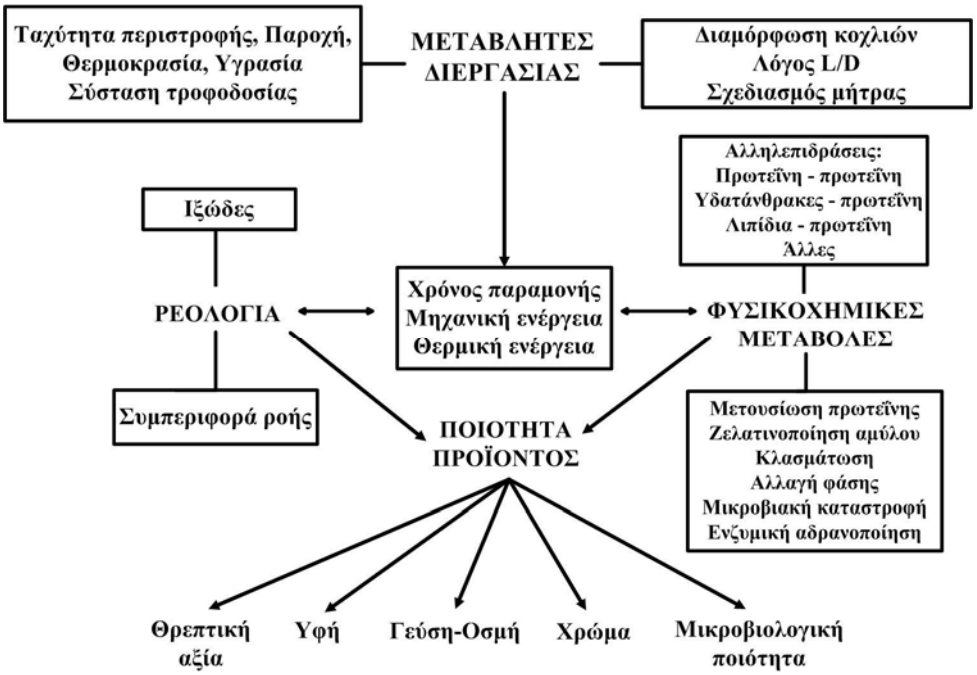
Η παράμετρος P αναπαριστά το κλάσμα της ολικής παραμονής που παρατηρείται ως καθαρός νεκρός χρόνος. Τυπικές τιμές του P είναι 0,75 (Bruin et al., 1978) για εκβολέα μονού κοχλία, 0,50 (Altomare & Ghossi, 1986) για εκβολέα πλήρους εμπλοκής διπλού κοχλία συστροφής και 0,90 (Lin & Armstrong, 1990) για εκβολέα πλήρους εμπλοκής διπλού κοχλία αντιθέτου περιστροφής. Αυτές οι κατανομές μαζί με αυτές για δοχείο πλήρους ανάμιξης, για στρωτή ροή σε αγωγό και για αντιδραστήρα εμβολικής ροής αναπαρίστανται στο Σχήμα 2.3-1.



Σχήμα 2.3-1 Κατανομή χρόνου παραμονής για διάφορα είδη εκβολέων (Levine et al., 2007).

Ο βαθμός ανάμιξης που επιτυγχάνεται είναι ελάχιστος για τον εκβολέα αντιθέτου περιστροφής και μέγιστος για τον εκβολέα συστροφής. Ο εκβολέας αντιθέτου περιστροφής προσεγγίζει την κατανομή του χρόνου παραμονής του αντιδραστήρα εμβολικής ροής, ενώ ο εκβολέας συστροφής προσεγγίζει αυτήν ενός αγωγού στρωτής ροής. Η κατανομή του χρόνου παραμονής δεν επηρεάζεται από την διαμόρφωση των κοχλιών ενός εκβολέα διπλού κοχλία.

Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η έκταση των χημικών αντιδράσεων και των φυσικών μεταβολών καθορίζεται από τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και του χρόνου. Ο χρόνος παραμονής σε ένα εκβολέα τροφίμων αποτελεί μια ενδιάμεση μεταβλητή της διεργασίας (Σχήμα 2.3-2), η οποία ελέγχει την έκταση των αντιδράσεων που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του υλικού που υφίσταται εκβολή. Τα δεδομένα της κατανομής του χρόνου παραμονής (RTD) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έκτασης της ανάμιξης (Lin et al., 1990; Wolf, Holin & White, 1986; Wolf & White, 1976), την υπό κλίμακα αύξηση (scale-up) και τη βελτίωση του σχεδιασμού του εξοπλισμού (Todd, 1975). Οι επιδράσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών της διεργασίας όπως η διαμόρφωση των κοχλιών, η παροχή, η ταχύτητα περιστροφής, η περιεκτικότητα υγρασίας και η θερμοκρασία του χιτωνίου (Σχήμα 2.3-2) πάνω στο μέσο χρόνο παραμονής σε εκβολείς διπλού κοχλία έχει μελετηθεί εκτεταμένα κατά το παρελθόν (Altomare et al., 1986; Gogoi & Yam, 1994; Kao & Allison, 1984; Van Zuilichem, Jager, Stolp & de Swart, 1988; Yeh, Hwang & Guo, 1992). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μέσος χρόνος παραμονής μειώνεται με αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας και της ταχύτητας περιστροφής και με μείωση της περιεκτικότητας υγρασίας. Τη μεγαλύτερη επίδραση επί του RTD έχουν η διαμόρφωση των κοχλιών και ο ρυθμός τροφοδοσίας των υλικών (Choudhury & Gautam, 1998b).



Σχήμα 2.3-2 Σχηματική παράσταση της εκβολής των τροφίμων που δείχνει τις επιδράσεις των μεταβλητών της διεργασίας πάνω στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος εκβολής (Choudhury et al., 1998b).

Η διόγκωση των προϊόντων εκβολής κατά τη θερμή εκβολή σχετίζεται με πολλές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία στις διάφορες ζώνες, η θερμοκρασία και η πίεση στη μήτρα, η ικανότητα της διεργασίας, η ταχύτητα περιστροφής, η ροπή, η περιεκτικότητα υγρασίας, το ιξώδες, η ειδική μηχανική ενέργεια κλπ (Cheng et al., 2010). Τα διαφορετικά συστατικά των χρησιμοποιουμένων υλικών επίσης επηρεάζουν τη διόγκωση. Το άμυλο, οι πρωτεΐνες, τα λίπη και οι διαιτητικές ίνες συμπεριφέρονται διαφορετικά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ώστε να προσδώσουν (δημιουργήσουν) τα επιθυμητά χαρακτηριστικά στο προϊόν κάτω από διαφορετικές συνθήκες εκβολής. Έτσι, αποτελεί πρόκληση η μελέτη της διόγκωσης των προϊόντων εκβολής, καθώς συμπεριλαμβάνονται τόσο η πολυπλοκότητα της σύνθεσης και της δομής των υλικών, όσο και ένα μεγάλος αριθμός λειτουργικών παραμέτρων της διεργασίας.

Κατά τη διεργασία της εκβολής, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα υγρασίας παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη επίδραση πάνω στη διόγκωση των προϊόντων (Cheng et al., 2010). Η περιεκτικότητα υγρασίας διατηρεί το πλέγμα του αμύλου στην ελαστική κατάσταση και κατόπιν την κατάσταση ελεύθερης ροής σε διαφορετικές θερμοκρασίες της διεργασίας, η οποία επιτρέπει αφ' ενός τη δημιουργία φυσαλίδων και αφ' ετέρου να λάβει χώρα η διόγκωση. Η θερμοκρασία επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες των τηγμάτων αμύλου και επιτρέπει το σχηματισμό υπέρθερμου ατμού, ο οποίος αποτελεί την κινούσα δύναμη για τη διόγκωση (Moraru et al., 2003). Η ειδική μηχανική ενέργεια (SME) και ο χρόνος παραμονής (ο σχετικός με την ταχύτητα περιστροφής) αποτελούν άλλες δύο παραμέτρους και χρησιμοποιούνται ευρέως για την προτυποποίηση της εκβολής (Cheng et al., 2010). Η σύσταση των πρώτων υλών, η κατανομή μεγέθους των

σωματιδίων και οι συνθήκες προ-ανάμιξης των πρώτων υλών επίσης επηρεάζουν τη διόγκωση.

Για την απλοποίηση του προβλήματος συνήθως οι παράμετροι αυτές ομαδοποιούνται όπως για παράδειγμα, στις ομάδες των πρώτων υλών (ανάμιξη, μέγεθος σωματιδίων), συστατικών των πρώτων υλών και λειτουργικές παράμετροι του εκβολέα. Για την περαιτέρω απλοποίηση κάποιοι από τους παράγοντες διατηρούνται σταθεροί. Για παράδειγμα, οι Cheng and Friis, (2010) έλαβαν ως μεταβλητές τη θερμοκρασία στη μήτρα, τη θερμοκρασία στη ζώνη τροφοδοσίας, το ρυθμό τροφοδοσίας, την ταχύτητα περιστροφής, την πίεση στη μήτρα και την πυκνότητα του προϊόντος εκβολής.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές φορές γίνεται η παραδοχή ότι η πυκνότητα του υλικού παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εκβολής, η οποία δεν είναι έγκυρη. Επίσης σε πολλούς πειραματισμούς δεν είναι δυνατή η μελέτη της διαμόρφωσης των κοχλιών, οι οποίοι συνδυάζονται άμεσα με το χρόνο παραμονής, λόγω του διατιθέμενου εργαστηριακού εξοπλισμού. Με δεδομένο ότι αυτός αποτελεί ενδιάμεση μεταβλητή της διεργασίας (Choudhury et al., 1998b), σε αρκετές περιπτώσεις πρόβλεψης των ιδιοτήτων των τροφίμων εκβολής, οι οποίες συνδέονται και με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτών, χρησιμοποιείται η παροχή αντί του μέσου χρόνου παραμονής, η οποία συσχετίζεται καλύτερα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των διογκωμένων προϊόντων.

2.4 Πρώτες Ύλες Εκβολής

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εκβολή πρέπει να είναι καλής ποιότητας, κατάλληλης καθαρότητας και τα χρησιμοποιούμενα πρόσθετα εντός των επιτρεπτών ορίων. Η εκβολή είναι μια διεργασία που λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές υγρασίες, περίπου στο 10 με 40% σε υγρή βάση. Τα κοκκώδη υλικά μετατρέπονται σε τήγματα λόγω των υψηλών ποσών μηχανικής ενέργειας και θερμότητας που εφαρμόζονται (Colonna, Tayeb & Mercier, 1989). Με τον τρόπο αυτό, μερικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων υλικών όπως, η επιφανειακή τριβή, η σκληρότητα και η συνεκτικότητα των σωματιδίων έχουν σημαντική συμβολή στη συμπεριφορά του τήγματος. Επίσης η παρουσία πλαστικοποιητών και λιπαντικών στο επεξεργαζόμενο τήγμα προκαλεί σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους της διεργασίας.

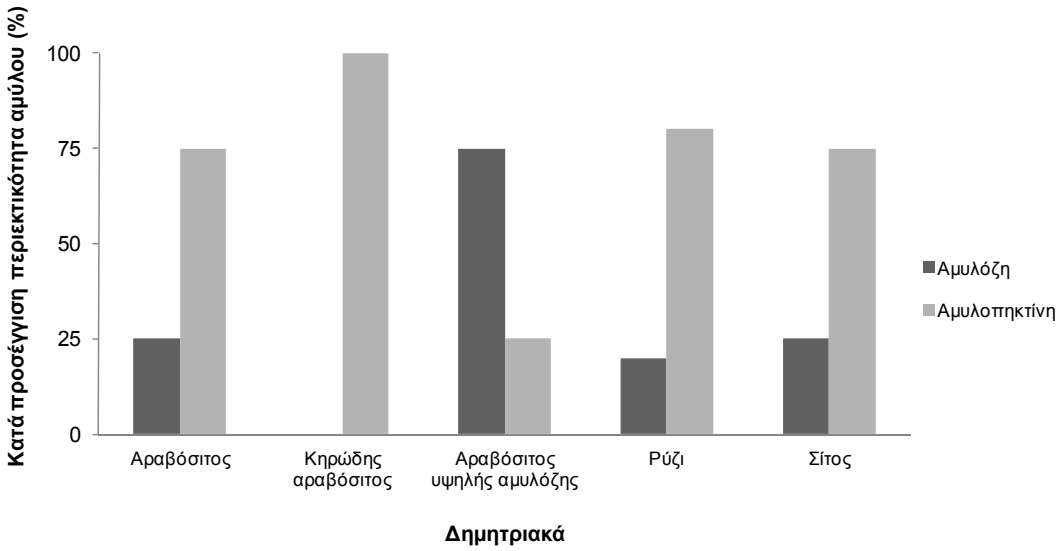
2.4.1 Τα δημητριακά

Η βασική δομή των προϊόντων εκβολής σχηματίζεται με μετατροπή και χειρισμό φυσικών βιοπολυμερών, όπως το άμυλο ή διάφοροι τύποι πρωτεϊνών. Οι συνηθέστερες πηγές αμύλου είναι τα δημητριακά, όπως το σιτάρι, ο αραβόσιτος και το ρύζι, και παράγωγα πατάτας, όπως άλευρα και κόκκοι. Σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιούνται άλλα δημητριακά και αμυλούχα υλικά, όπως η σίκαλη, το κριθάρι, η βρώμη, το σόργο, η ταπιόκα, ο αρακάς και παρόμοια υλικά. Σε προϊόντα που η βασική δομή σχηματίζεται από τις πρωτεΐνες, οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν ελαιούχους σπόρους, όπως η σόγια ή ο ηλιόσπορος, φασόλια, φάβα ή απομονωμένες πρωτεΐνες δημητριακών όπως η γλουτένη του σίτου (Stanley, 1989).

Τα δημητριακά είναι εδώδιμοι σπόροι και ανήκουν στην οικογένεια των αγρωστωδών. Τα πλέον καλλιεργούμενα περιλαμβάνουν το σιτάρι, το ρύζι, τη σίκαλη, τη βρώμη, το κριθάρι, τον αραβόσιτο, το κεχρί και το σόργο. Σε παγκόσμια κλίμακα το σιτάρι και το ρύζι είναι οι σημαντικότεροι σπόροι, προσεγγίζοντας το 50% της παγκόσμιας παραγωγής δημητριακών.

Τα δημητριακά συχνά κατατάσσονται στα τρόφιμα που είναι πλούσια σε υδατάνθρακες, αφού περιέχουν περίπου 75% υδατάνθρακες. Το άμυλο, το κύριο συστατικό των δημητριακών, βρίσκεται από την μορφή κόκκων στο ενδοσπέρμιο. Οι κόκκοι του αμύλου αλλάζουν σε μέγεθος και σχήμα, καθώς και η αναλογία αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης, ανάλογα με τη βοτανική πηγή. Στις κανονικές ποικιλίες δημητριακών το 25-27% του αμύλου αποτελείται από αμυλόζη, ενώ στις κηρώδεις (waxy) ποικιλίες (πχ. ρύζι ή αραβόσιτος) το μεγαλύτερο μέρος του αμύλου αποτελείται από αμυλοπηκτίνη (Σχήμα 2.4-1). Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα μέρος του αμύλου των δημητριακών δεν χωνεύεται και δεν απορροφάται στο λεπτό έντερο. Είναι δε γνωστό ως «ανθεκτικό» άμυλο (RS1-RS4) και φαίνεται να δρα παρόμοια με τις διαιτητικές ίνες (Baghurst, Baghurst & Record, 1996).

Τα δημητριακά επίσης περιέχουν μικρό ποσοστό σακχάρων (~1-2%), κυρίως ως σακχαρόζη, αλλά επίσης περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις μαλτόζης και πολύ χαμηλά ποσοστά φρουκτόζης και γλυκόζης.



Σχήμα 2.4-1 Κατά προσέγγιση συγκέντρωση αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης ορισμένων δημητριακών (Στοιχεία από Taggart (2000)).

Το πρωτεϊνικό περιεχόμενο των δημητριακών κυμαίνεται περίπου στο 6-15%. Οι κύριες αποθηκευτικές πρωτεΐνες στο σιτάρι είναι οι γλοιαδίνες και οι γλουτενίνες, στο ρύζι οι

γλουτελίνες (ορυζοζεΐνες), στον αραβόσιτο οι προλαμίνες (ζεΐνες), στο κριθάρι οι χορδεΐνες και οι γλουτελίνες και στη βρώμη υπάρχουν αλβουμίνες και γλοβουλίνες (Kulp & Ponte, 2000). Παρ' όλο που τα δημητριακά παρέχουν ένα καλό εύρος αμινοξέων μερικά υπάρχουν σε πολύ χαμηλά ποσοστά. Το περιοριστικό αμινοξύ στα δημητριακά είναι η λυσίνη, εκτός από τη σίκαλη όπου το πρώτο περιοριστικό αμινοξύ είναι η θρυπτοφάνη. Την πιο ευνοϊκή σύσταση από πλευράς απαραίτητων αμινοξέων παρουσιάζει το ρύζι, η σίκαλη και οι ποικιλίες υψηλές σε λυσίνη, όπως πχ. αραβόσιτος, σόργο και κριθάρι (Macrae, Robinson & Sadler, 1993). Ο συνδυασμός των δημητριακών με άλλα φυτικά τρόφιμα (πχ. όσπρια) μπορεί να συμπληρώσει τα απαραίτητα αμινοξέα.

Παρ' όλο που το φύτρο των δημητριακών είναι μια από τις πλουσιότερες πηγές λιπιδίων, συνολικά τα δημητριακά έχουν πολύ χαμηλά ποσοστά λιπιδίων. Το κριθάρι, το ρύζι και το σιτάρι περιέχουν περίπου 1-3% και ο αραβόσιτος και η βρώμη περίπου 5-9%. Το κλάσμα των λιπιδίων είναι πλούσιο σε λινελαϊκό οξύ, που ανήκει στα απαραίτητα λιπαρά οξέα.

Τα δημητριακά περιέχουν και συμβάλλουν στη πρόσληψη βιταμινών και μεταλλικών στοιχείων, παρ' όλο που το διατροφικό τους περιεχόμενο σε μικροσυστατικά εξαρτάται από το ποσοστό που περιέχει ο σπόρος, το πίτυρο και το ενδοσπέρμιο. Οι κυριότερες βιταμίνες που περιέχονται στα δημητριακά ανήκουν στην ομάδα Β. Ειδικότερα περιέχονται θειαμίνη, ριβοφλαβίνη και νιασίνη και σημαντικά ποσά βιταμίνης Ε (Holland, Unwin & Buss, 1988; Kulp et al., 2000). Σε ότι αφορά τα μεταλλικά στοιχεία, τα δημητριακά περιέχουν σημαντικά ποσά καλίου, σιδήρου, μαγνησίου και ψευδαργύρου, καθώς επίσης και ιχνοστοιχεία, όπως το σελήνιο.

Όλα τα δημητριακά είναι πλούσιες πηγές μη αμυλούχων πολυσακχαριτών – NSP (Non-starch polysaccharides). Τα είδη των μη αμυλούχων πολυσακχαριτών είναι δύο, οι αδιάλυτοι και οι διαλυτοί. Το περιεχόμενο των αδιάλυτων μη αμυλούχων πολυσακχαριτών στα περισσότερα δημητριακά είναι παρόμοιο, ενώ το περιεχόμενο των διαλυτών μπορεί να ποικίλλει. Οι αραβινοξυλάνες είναι οι βασικοί υδατοδιαλυτοί μη αμυλούχοι πολυσακχαρίτες στο σιτάρι, τη σίκαλη και το κριθάρι, ενώ στη βρώμη είναι οι β-γλυκάνες. Τα ποσοστά των β-γλυκανών και των αραβινοξυλανών είναι υψηλότερα στο κριθάρι, τη βρώμη και τη σίκαλη, συγκριτικά με αυτές του σιταριού (Wood, 1997).

Επίσης τα δημητριακά περιέχουν ένα εύρος ουσιών που μπορεί να έχουν θετικές επιδράσεις στην υγεία, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως «φυτοχημικά» ή φυτικές βιοδραστικές ουσίες (Liu, 2007; Okarter & Liu, 2010). Παρ' όλο που τα φλαβονοειδή απαντώνται στα δημητριακά σε πολύ μικρές ποσότητες, περιέχεται ένας αριθμός άλλων αντιοξειδωτικών, συμπεριλαμβανομένων των τοκοτριενολών, των τοκοφερολών και των καροτενοειδών. Εργαστηριακά έχει βρεθεί ότι τα δημητριακά περιέχουν παρόμοιες ποσότητες αντιοξειδωτικών με τα φρούτα και τα λαχανικά (Miller, Rigelhof, Marquart,

Prakash & Kanter, 2000). Οι λιγνάνες είναι ένα είδος φυτοοιστρογόνων (phytoestrogen) που απαντώνται στα δημητριακά και παρ' όλο που τα ποσοστά τους είναι χαμηλά, τα δημητριακά μπορούν να καταστούν σημαντικές πηγές λόγω της μεγάλης ημερήσιας κατανάλωσης τους.

Τα δημητριακά περιέχουν ένα πλήθος διαφόρων αντιθρεπτικών παραγόντων. Οι τανίνες, οι οποίες για παράδειγμα βρίσκονται στο καστανό σόργο, μπορούν να συνδέονται και να καταβυθίζουν τις πρωτεΐνες, μειώνοντας την ευπεπτότητά τους. Επίσης, στα δημητριακά έχει παρατηρηθεί η ύπαρξη αναστολέων της θρυψίνης, οι οποίοι καταστρέφουν την ευπεπτότητα των πρωτεϊνών (Bender & Bender, 1999). Οι περισσότεροι αντιθρεπτικοί παράγοντες που περιέχονται στα δημητριακά απομακρύνονται κατά την επεξεργασία ή καταστρέφονται κατά το μαγείρεμα ή ψήσιμο.

Στη χώρα μας, το σύνολο των καλλιεργούμενων εκτάσεων με δημητριακά ανέρχεται περίπου σε 12.000.000 στρέμματα και η εσωτερική ζήτηση καλύπτεται κυρίως από εισαγωγές που φτάνουν τους 1.700.000 τόνους περίπου. Η καλλιέργεια αραβοσίτου στη χώρα μας καταλαμβάνει μια έκταση 2272312 στρεμμάτων, ενώ η παραγωγή του ανέρχεται σε 2043250 τόνους. Οι εξαγωγές ανέρχονται σε 118188,10 tn, ενώ οι εισαγωγές είναι κατά πολύ μεγαλύτερες ανερχόμενες στους 526335,58 tn (Υπ.Α.Α.Τ., 2007b). Τα στοιχεία που δίνονται προκύπτουν με βάση τους μέσους όρους τις πενταετίας 2002-2006.

2.4.2 Τα όσπρια

Τα όσπρια ανήκουν στην οικογένεια των ψυχανθών και περιλαμβάνουν τα είδη φασόλια, ρεβίθια, φακές, κουκιά, λαθούρι και μπιζέλια. Τα όσπρια προμηθεύουν στον άνθρωπο τις ίδιες περίπου θερμίδες που προμηθεύει μία ίση ποσότητα δημητριακών. Είναι τροφές πλούσιες σε υδατάνθρακες (κυρίως άμυλο) και πρωτεΐνες (17-30%), φτωχές σε λάδι (1-2%) και πλούσιες σε σίδηρο και ασβέστιο.

Τα όσπρια περιέχουν σχετικά υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών, κυρίως αποθηκευτικές πρωτεΐνες (Casey, Domoney & Ellis, 1986), ενώ περιέχουν και μερικές συγκριτικά μικρότερες πρωτεΐνες, όπως οι αναστολείς της πρωτεάσης και της αμυλάσης, οι λεκτίνες, οι λιποξυγενάσες, οι προστατευτικές πρωτεΐνες και άλλες, οι οποίες για διάφορους λόγους σχετίζονται με τη διατροφική και λειτουργική ποιότητα του σπόρου και οι οποίες μπορούν επίσης να χαρακτηρισθούν αποθηκευτικές (Murray, 1979).

Οι πρωτεΐνες των οσπρίων αντιπροσωπεύουν περίπου το 20% του σπόρου για τα μπιζέλια και τα φασόλια και πάνω από το 38-40% στη σόγια και το λούπινο (Gueguen & Cerlettiand, 1994). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα όσπρια είναι από τις πλουσιότερες πηγές πρωτεϊνών και αμινοξέων στη διατροφή των ανθρώπων και των ζώων.

Οι περισσότερες αποθηκευτικές πρωτεΐνες στα όσπρια είναι οι γλοβουλίνες. Αυτές συνήθως ταξινομούνται ως 7S και 11S (συντελεστής καθίζησης Svedberg). Οι 7S και 11S γλοβουλίνες του μπιζελιού καλούνται vicilin και legumin, αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες πρωτεΐνες άλλων οσπρίων ως vicilin- and legumin-οειδείς γλοβουλίνες. Οι πρωτεΐνες 7S είναι ολιγομερείς πρωτεΐνες (συνήθως τριμερή). Οι 11S πρωτεΐνες είναι επίσης ολιγομερείς, αλλά συνήθως σχηματίζουν εξαμερή (Duranti & Gius, 1997). Έχει αναφερθεί η παρουσία μεγαλύτερων ομάδων, 15S και 18S στις τύπου legumin πρωτεΐνες τις σόγιας (Koshiyama, 1983). Υπό συνθήκες αποσύνδεσης, οι γλοβουλίνες 7S και 11S απελευθερώνουν τις βασικές τους υπομονάδες. Αυτές οι πολυπεπτιδικές αλυσίδες είναι φυσικά ετερογενείς. Ο ετερογένεια είναι εμφανής σε επίπεδο μεγέθους και φορτίου (Horstaman, Schlesier, Otto, Kostka & Muntz, 1993; Tucci, Capparelli, Costa & Rao, 1991), και προκύπτει από το συνδυασμό διαφόρων παραγόντων, όπως η πολυγονιδιακή προέλευση των αποθηκευτικών γλοβουλινών και τις τροποποιήσεις που συμβαίνουν μετά την μετάφραση των προϊόντων έκφρασης (Casey et al., 1986; Wright, 1986).

Από τη διατροφική άποψη, οι αποθηκευτικές πρωτεΐνες των οσπρίων περιέχουν χαμηλά ποσοστά θειούχων αμινοξέων, μεθειονίνη, κυστεΐνη και θρυπτοφάνη, ενώ τα ποσοστά των άλλων απαραίτητων αμινοξέων, όπως η λυσίνη, είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά των δημητριακών (Ampe, Van Damme, De Castro, Sampaio, Van Montagu & Vanderkerckhove, 1986). Έτσι, από την άποψη των ποσοστών της λυσίνης και των θειούχων αμινοξέων, τα όσπρια και τα δημητριακά είναι διατροφικά συμπληρωματικά. Ο βαθμός της αμοιβαίας συμπλήρωσης μπορεί ακόμη να εξαρτάται από τα ποσοστά των δευτερευόντων απαραιτήτων αμινοξέων, πχ. θρεονίνη στα δημητριακά και θρυπτοφάνη στα όσπρια. Η έλλειψη των αμινοξέων παραδοσιακά έχει αντιμετωπισθεί με συνδυασμό γευμάτων, ήτοι όσπρια με δημητριακά. Παρ' όλα αυτά, η σύσταση των αμινοξέων αντιπροσωπεύει τη δυνητική ποιότητα της πρωτεΐνης, θέτοντας τη βιοδιαθεσιμότητα κρίσιμο παράγοντα για την προμήθεια αμινοξέων μέσω της διατροφής. Η έλλειψη της διαθεσιμότητας μπορεί να αποβεί σοβαρό εμπόδιο για την πλήρη αξιοποίηση των πρωτεϊνών αυτών. Έχει αποδειχθεί ότι οι φυτικές πρωτεΐνες έχουν χαμηλότερη ολική διατροφική αξία από τις ζωικές. Αυτό μπορεί να συσχετισθεί με τη χαμηλή συγκέντρωση σε θειούχα αμινοξέα (Sarwar & Peace, 1986), την πυκνή τους φυσική δομή, η οποία εμποδίζει την πρωτεόλυση (Shpande & Nielsen, 1987) και την παρουσία διαφόρων αντιθρεπτικών ουσιών, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ευπεπτότητα των πρωτεϊνών και άλλων συστατικών (Aw & Swanson, 1985; Bressani, Elias & Braham, 1982). Μεταξύ των αντιθρεπτικών παραγόντων περιλαμβάνονται πρωτεϊνικοί αναστολείς όπως π.χ. οι αναστολείς της υδρολάσης, καθώς επίσης και μη πρωτεϊνικοί. Στην περίπτωση των οσπρίων, αρκετά συστατικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως nutraceutical προέρχονται από ενώσεις οι οποίες επίσης χαρακτηρίζονται ως αντιθρεπτικά. Αυτό εξηγεί την αναζωογόνηση του ενδιαφέροντος για τη μελέτη των ενώσεων αυτών (Scarafoni &

Duranti, 2002). Πρέπει να σημειωθεί ότι η αντιθρεπτική δράση αφορά στην αναστολή των ενζύμων της πέψης, όπως η θρυψίνη, η χυμοθρυψίνη και η αμυλάση (Duranti, 2006). Η δράση αυτή αναφέρεται στα ωμά υλικά, ενώ εξαφανίζεται κατά το μαγείρεμα ή τη θέρμανση και έτσι μπορούν να έχουν θετικό διατροφικό ρόλο, λόγω του υψηλού ποσοστού θειούχων αμινοξέων που περιέχουν (Ryan, 1990).

Η κατανάλωση των οσπρίων έχει ευεργετική επίδραση στην υγεία του ανθρώπου. Ενδεικτικό της φυτοθεραπευτικής δράσης των οσπρίων αποτελεί η μεσογειακή διατροφή, της οποίας βασικό συστατικό είναι τα όσπρια και η οποία δέχεται εκτεταμένη θεώρηση (De Feo, Aquino, Menghini, Ramundo & Senatore, 1992; Guarrera, 2005). Η κατανάλωση των οσπρίων μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο εμφάνισης καρδιαγγειακών ασθενειών και καρκίνου, έχουν χαμηλό γλυκαιμικό δείκτη βοηθώντας την αντιμετώπιση του διαβήτη τύπου ΙΙ και βοηθούν στη διατήρηση του σωματικού βάρους αποτρέποντας την παχυσαρκία (Panagiotakos, 2005; Trichopoulou, Bamia & Trichopoulos, 2009). Επιπρόσθετα, έχει βρεθεί ότι οι πρωτεΐνες των οσπρίων έχουν θετικές δράσεις στην ανθρώπινη διατροφή και συγκεκριμένες βιολογικές δράσεις.

Στην Ελλάδα, σε ότι αφορά την καλλιέργεια των οσπρίων, το σύνολο της καλλιεργούμενης έκτασης ανέρχεται σε 150.000 στρέμματα περίπου, με μέση παραγωγή τους 29.000 τόνους, εκ των οποίων τα φασόλια καλύπτουν το 64% των εκτάσεων και το 73% της συνολικής παραγωγής. Η καλλιέργεια της φακής καταλαμβάνει μια έκταση 7870,40 στρεμμάτων, ενώ η παραγωγή τους ανέρχεται σε 971,00 tn. Η εξαγόμενη ποσότητα φακής ανέρχεται στους 315,38 tn και οι εισαγωγές στους 11467,22. Παρατηρείται μια υποτίμηση στην καλλιέργεια της φακής, καθώς έχει πέσει και η κατανάλωση της, ιδίως μεταξύ του νέου πληθυσμού της χώρας. Η παραγωγή προϊόντων με βάση τη φακή, όπως τα διογκωμένα προϊόντα εκβολής θα συμβάλει στην αύξηση της κατανάλωσης και επανενσωμάτωση του οσπρίου αυτού στη δίαιτα του Έλληνα (Υπ.Α.Α.Τ., 2007a). Τα στοιχεία που δίνονται προκύπτουν με βάση τους μέσους όρους τις πενταετίας 2002-2006.

Τα φυσικά βιοπολυμερή είναι σημαντικά στο σχηματισμό της δομής των προϊόντων εκβολής. Αυτά και σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν το τήγμα πολυμερούς. Το τήγμα σχηματίζει μια συνεχή φάση η οποία εμπεριέχει όλα τα άλλα σωματίδια της διεσπαρμένης φάσης και βοηθά στη συγκράτηση των αερίων που απελευθερώνονται κατά τη διόγκωση, καθιστώντας δυνατό το σχηματισμό της αφρώδους διογκωμένης δομής. Το ποσοστό του πολυμερούς που συναντάται στη συνεχή φάση καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την εκτατότητα (extensibility) των τοιχωμάτων των κυψελίδων του αφρού και κατά συνέπεια την ολική διόγκωση του προϊόντος (Guy, 1994).

Από τις παραπάνω πρώτες ύλες τα υλικά τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία της δομής των προϊόντων εκβολής είναι το άμυλο και οι πρωτεΐνες και στα οποία θα αναφερθούμε εκτενέστερα.

2.4.3 Άμυλο

Οι υδατάνθρακες αποτελούν το πλέον άφθονο και ευρέως κατανεμημένο και σύνηθες συστατικό των τροφίμων. Καταλαμβάνουν περισσότερο από το 90% του ξηρού βάρους των φυτικών τροφίμων (BeMiller & Whistler, 1996) και δεν θεωρούνται τοξικοί. Συνεπώς, οι υδατάνθρακες χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες, τόσο για ανθρώπινη κατανάλωση όσο και ως συστατικό (πρώτη ύλη) κατά την επεξεργασία των τροφίμων (BeMiller et al., 1996). Το άμυλο αποτελεί την κύρια ενεργειακή αποθήκη των φυτών. Στα φυτά αποθηκεύεται σε διάφορα μέρη, όπως ρίζες, βολβοί, μίσχοι, φύλλα, σπόροι, φρούτα, κ.λπ., και με διαφορετικές μορφές κόκκων, όπως σφαίρες, ελλειψοειδή, πολύγωνα, πετάλια και ανώμαλοι σωληνίσκοι (Hoseney, 1994). Το άμυλο αποτελείται από δύο συστατικά μέρη, την αμυλόζη (ΜΒ 10^5-10^6) και την αμυλοπηκτίνη (ΜΒ 10^7-10^9) (Ellis et al., 1998; McWilliams, 1993).

Το άμυλο είναι ένα πολυμερές της γλυκόζης και επίσης είναι μια ομογλυκάνη. Στα φυτά εναποτίθεται με τη μορφή κόκκων κατά μια οργανωμένη, καλά διατεταγμένη διάταξη, η οποία περιλαμβάνει κρυσταλλικές περιοχές εναλλασσόμενες με άμορφες περιοχές. Οι κόκκοι του αμύλου αποτελούνται από μόρια αμυλόζης ή/και αμυλοπηκτίνης τα οποία είναι τακτοποιημένα ακτινικά. Η κρυσταλλικότητα του αμύλου επηρεάζεται πολύ από την περιεκτικότητα σε αμυλόζη, το μέσο μήκος των αλυσίδων της αμυλοπηκτίνης και το ποσοστό των κλασμάτων αμυλοπηκτίνης βραχείας αλυσίδας. Τα μόρια της αμυλόζης πιστεύεται ότι περιελίσσονται μαιανδρικά γύρω από το μόριο της αμυλοπηκτίνης και επίσης ότι προσανατολίζονται κατά το μάλλον ή ήττον ακτινικά εντός των κόκκων (Coultate, 2002).

Επομένως, η συνολική συμπεριφορά του αμύλου εξαρτάται πολύ από τις σχετικές ποσότητες της αμυλόζης και της αμυλοπηκτίνης μέσα στο πλέγμα του αμύλου. Καθένα από τα κλάσματα αυτά έχει διακριτές ιδιότητες που συνεισφέρουν στη συνολική λειτουργικότητα του αμύλου και σύμφωνα με την προέλευση αυτού (McWilliams, 1993). Η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του αμύλου από μια συγκεκριμένη φυτική πηγή επηρεάζουν τις φυσικές ιδιότητες των τροφίμων, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως συστατικό.

2.4.3.1 Αμυλόζη και Αμυλοπηκτίνη

Οι αμυλόκοκκοι είναι μερικώς κρυσταλλικά μόρια και κυρίως αποτελούνται από τα πολυμερή αμυλόζη και αμυλοπηκτίνη (Myllärinen, Buleon, Lahtinen & Forssell, 2002). Η αμυλόζη είναι ένα γραμμικό πολυμερές το οποίο δομείται με α-D-γλυκόζη, η οποία είναι συνδεδεμένη με 1,4-α-γλυκοζιτικούς δεσμούς (Hoseney, 1994; McWilliams, 1993).

Το πραγματικό μήκος των μορίων της αμυλόζης που υπάρχουν στα μόρια του αμύλου ποικίλλει σημαντικά και το μοριακό της βάρος κυμαίνεται από μερικές χιλιάδες έως πολύ υψηλά όπως 150.000 Da (McWilliams, 1993). Τα περισσότερα είδη αμύλου παρουσιάζουν μια περιεκτικότητα αμυλόζης 25% περίπου, αν και το άμυλο αραβοσίτου υψηλό σε αμυλόζη παρουσιάζει μια φαινομενική περιεκτικότητα αμυλόζης μεταξύ 52% και 70-75% (BeMiller et al., 1996). Η ικανότητα της αμυλόζης να σχηματίζει ένα σύμπλοκο ιωδίου-αμυλόζης με συνέπεια την παραγωγή ενός διακριτού κυανού χρώματος αποτέλεσε τη βάση πολλών μεθόδων προσδιορισμού της αμυλόζης (Martinez & Prodolliet, 1996; Morrison & Laignelet, 1983; Séne, Thévenot & Prioul, 1997; Yu, Houtman & Atalla, 1996). Εκτός των χρωματομετρικών μεθόδων, ο ποσοτικός προσδιορισμός της αμυλόζης μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με τη χρήση χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης αποκλεισμού-μεγέθους (HP-SEC).

Η αμυλοπηκτίνη, το άλλο κλάσμα του αμύλου, είναι ένα πολύ μεγάλο και διακλαδισμένο μόριο. Οι συνδέσεις στα σημεία διακλάδωσης αποτελούν περίπου το 4-5% των συνολικών συνδέσεων (BeMiller et al., 1996). Η αμυλοπηκτίνη είναι ένα πολυμερές της D-γλυκόζης που συνδέεται κυρίως με 1,4-α-γλυκοζιτικούς δεσμούς. Εκτός από τους 1,4-α-γλυκοζιτικούς δεσμούς, η παρουσία στην αμυλοπηκτίνη των 1,6-α-γλυκοζιτικών δεσμών, οδηγεί σε μια διαφορετική διάταξη σε σύγκριση με την αμυλόζη. Τα μόρια της αμυλοπηκτίνης είναι γραμμικά για ένα διάστημα 10 έως 25 περίπου μονάδων γλυκόζης. Μετά το σημείο αυτό, συμβαίνει διακλάδωση, η οποία οφείλεται στον 1,6-α-γλυκοζιτικό δεσμό (McWilliams, 1993). Η διακλάδωση συναντάται πολύ συχνά εντός του μορίου αμυλοπηκτίνης και έτσι αυτό αναφέρεται ως μη γραμμικό. Η αμυλοπηκτίνη υπάρχει σε όλα τα είδη αμύλου, συνήθως σε ποσοστό 75% περίπου. Τα είδη αμύλου τα οποία αποτελούνται μόνο από αμυλοπηκτίνη αναφέρονται ως κηρώδη. Οι σπόροι των οσπρίων περιέχουν άμυλο σε ποσοστά 22-45% περίπου (Hoover & Sosulski, 1990), από το οποίο το κλάσμα της αμυλόζης καταλαμβάνει το 29-45% περίπου.

Στον Πίνακα 2-1 αθροίζονται οι ιδιότητες της αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης του αμύλου. Ο βαθμός πολυμερισμού χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μοριακό μέγεθος με όρους τον αριθμό των μονάδων άνυδρης γλυκόζης που υπάρχουν στο πολυμερές του αμύλου, ενώ η ευπεπτότητα (με α-αμυλάση) χρησιμοποιείται για δείξει την επίδραση των σημείων διακλάδωσης πάνω στον περιορισμό της υποβάθμισης μετά την προσβολή των δύο κλασμάτων (αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης) από το ένζυμο (Zobel, 1988).

Το μοριακό βάρος (ΜΒ) της αμυλοπηκτίνης είναι γενικά πολύ μεγαλύτερο από εκείνο της αμυλόζης. Σε μερικά φυσικά μη υποβαθμισμένα είδη αμυλοπηκτίνης, όπως π.χ. αραβόσιτου, κηρώδους αραβοσίτου, σίτου, κριθαριού, ταπιόκας και πατάτας, είχε αναφερθεί ότι το ΜΒ ποικίλει από 50-500 εκατομμύρια Daltons. Οι τιμές αυτές είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν αναφερθεί για φυσικά πολυμερή (Zobel, 1988).

Το άμυλο που απομονώνεται από τα όσπρια παρουσιάζει κυμαινόμενες διαστάσεις αμυλοκόκκων, οι οποίες ποικίλουν από 4 έως 80 μm. Το σχήμα των αμυλοκόκκων ποικίλει από ωοειδές, σφαιρικό, στρογγυλό, ελλειπτικό έως ακανόνιστα διαμορφωμένο, εξαρτωμένου από τον τύπο και την πηγή. Στον Πίνακα 2-2 φαίνονται στοιχεία επί των αμυλοκόκκων των οσπρίων.

Η ανάπτυξη διογκωμένων προϊόντων εκβολής είναι ένα πεδίο όπου οι ιδιότητες του αμύλου παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό τόσο της ποιότητας του προϊόντος, όσο και της επιτυχίας της επιχείρησης. Ο ρόλος του αμύλου στα προϊόντα αυτά περιλαμβάνει τη βελτίωση της σύστασης, μεγαλύτερη διόγκωση, βελτιωμένη τραγανότητα, ελάχιστη θραύση, ενίσχυση του ζυμαριού, καθώς επίσης και βελτίωση της εμφάνισης της επιφάνειας (Huang, 2001). Συνεπώς, η γνώση σχετικών πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του αμύλου, όπως π.χ. οι λειτουργικές ιδιότητές του, επιτρέπει τη σύνταξη ενός οδηγού για την επιλογή του καταλληλότερου για κάθε περίπτωση αμύλου. Περαιτέρω, μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων προϊόντων με πρόβλεψη των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων που καθορίζουν την ποιότητα και όχι με εμπειρικές δοκιμές, καθ' όσον είναι χρονοβόρες και μεγαλύτερου κόστους.

Πίνακας 2-2 Ιδιότητες της αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης (Zobel, 1988)

Ιδιότητα	Αμυλόζη	Αμυλοπηκτίνη
Μοριακή δομή	Γραμμική (α-1,4)	Διακλαδισμένη (α-1,4 και α-1,6)
Πηκτή, σχηματισμός	Σφιχτή, μη αντιστρεπτή	Μαλακή, αντιστρεπτή
Ιώδιο, χρωματισμός	Κυανό	Ερυθροιώδης
Ευπεπτότητα, α-αμυλάση	100%	60%
Βαθμός πολυμερισμού	1500 – 6000	$3\times10^5 – 3\times10^6$
Μοριακό βάρος (Da)	10^6	10^7-10^9

Πίνακας 2-3 Φυσικές διαστάσεις (μέγεθος και σχήμα) μερικών ειδών αμύλου από όσπρια (Hoover et al., 1990)

Άμυλο	Εύρος (Διάμετρος)			Σχήμα
	Πλάτος (μm)	Μήκος (μm)	Μη εξειδικευμένο (μm)	
Φασόλια γίγαντες	16-42	16-60		Ελλειπτικό, ωοειδές
Φασόλια, ξερά μεγάλα λευκά	12-40	12-62		Ωοειδές
Φασόλια, ξερά μαύρα	8-34	8-55		Ωοειδές, σφαιρικό
Φασόλια, ξερά πράσινα	7-20	10-32		Ωοειδές, μη κανονικό, στρογγυλό
Αρακάς, λείος			20-40	Ωοειδές, στρογγυλό
Αρακάς, ρικνός			6-80	Στρογγυλό
Ρεβίθια			8-54	Ωοειδές, σφαιρικό
Φάβα	12-24	20-48		Ωοειδές, σφαιρικό
Φακές	15-30	10-36		Ωοειδές, στρογγυλό, ελλειψοειδές

2.4.4 Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες είναι βιοπολυμερή τα οποία δομούνται με βάση 20 διαφορετικά μονομερή, τα αμινοξέα, με πλευρικές ομάδες διαφορετικής δραστικότητας. Οι πρωτεΐνες εμπλέκονται σε ένα μεγάλο εύρος εξειδικευμένων φυσιολογικών λειτουργιών και κάθε πρωτεΐνη έχει συγκεκριμένη σύσταση και διαμόρφωση. Κάθε είδος πρωτεΐνης είναι μοναδικό. Ο αριθμός των ειδών που συναντώνται στη φύση πιθανώς ξεπερνάει το 1010. Η χημική τους δραστικότητα είναι εξίσου σημαντική με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Οι πρωτεΐνες στα τρόφιμα έχουν διάφορες λειτουργίες και ρόλους, με σημαντικότερη τη διατροφική αξία. Επίσης είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό των αρωματικών κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και της αποθήκευσης. Οι δραστηριότητες των πρωτεϊνών που είναι ένζυμα είναι προφανούς σπουδαιότητας (Walstra, 2003). Οι φυσικοχημικές και λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνών μπορούν να διαχωρισθούν σε δύο ομάδες:

1. Η ικανότητά τους να σχηματίζουν και να σταθεροποιούν γαλακτώματα και αφρούς και η σταθεροποίηση αιωρημάτων. Αυτές οι λειτουργίες εξαρτώνται από τάση των πρωτεϊνών να απορροφούνται στις περισσότερες διεπιφάνειες.

2. Η ικανότητα σχηματισμού οργανωμένων μακροσκοπικών δομών, ειδικά πηκτών. Αυτό προκύπτει από την τάση των πρωτεϊνών να συσσωματώνονται ή να σχηματίζουν διαμοριακές συνδέσεις μεταξύ αλυσίδων κατά τη θέρμανση, την αλλαγή του pH κλπ.

Τα αμινοξέα ενώνονται μεταξύ τους με πεπτιδικούς δεσμούς και σχηματίζουν την πρωτοταγή δομή των πρωτεϊνών, ενώ το είδος τους καθορίζει τη φύση της δευτεροταγούς και της τριτοταγούς δομής. Αυτές επηρεάζουν σημαντικά τις λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνών και τη συμπεριφορά τους κατά την επεξεργασία. Η δομή των πρωτεϊνών καθορίζει τη διάταξή τους στο χώρο και επίσης τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά. Οι περισσότερες ιδιότητες εξαρτώνται από την πρωτοταγή δομή, διότι καθορίζει τις ανώτερες δομές, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν τη σταθερότητα διαμόρφωσης και τη διαλυτότητα. Παρ' όλα αυτά είναι αδύνατο να προβλεφθούν οι ανώτερες δομές των πρωτεϊνών από την πρωτοταγή δομή, γιατί ο αριθμός των πιθανών πρωτοταγών δομών είναι άπειρος (Fennema, 1996; Walstra, 2003). Η δευτεροταγής δομή συνήθως έχει τη μορφή είτε της α-έλικας, είτε του β-πτυχωτού φύλλου, ενώ η τριτοταγής περιλαμβάνει την αναδίπλωση των αλυσίδων σε μια συμπαγή μονάδα, η οποία σταθεροποιείται με δεσμούς υδρογόνου, δυνάμεις van der Waals, δισουλφιδικούς δεσμούς και υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις. Η φύση της τριτοταγούς δομής διαφέρει ανάμεσα στις πρωτεΐνες, όπως διαφέρει και η αναλογία της α-έλικας και της τυχαίας έλικας (deMan, 1999).

2.4.4.1 Λειτουργικότητα των Πρωτεϊνών

Οι φυσικές, χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες των πρωτεϊνών καθορίζουν τη συμπεριφορά τους, η οποία αναμένεται να επηρεάσει τόσο τη διεργασία, όσο και τις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής. Η γνώση των επιδράσεων αυτών θα επιτρέψει την ανάπτυξη ή επιλογή υλικών τα οποία θα δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η απομόνωση, διαχωρισμός και οι λειτουργικές ιδιότητες των δημητριακών έχουν μελετηθεί εκτεταμένα και ιδιαιτέρως οι πρωτεΐνες του σίτου. Κατά παρόμοιο τρόπο έχουν μελετηθεί και οι πρωτεΐνες των οσπρίων. Οι λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνών της φακής έχουν ήδη μελετηθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακετυλίωση προκαλεί μετατόπιση του ισοηλεκτρικού pH (προς την ουδέτερη ή αλκαλική περιοχή) των ακετυλιωμένων γλοβουλινών της φακής. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της διαλυτότητας των γλοβουλινών σε ουδέτερο έως αλκαλικό pH, οδηγώντας σε βελτίωση της ικανότητας απορρόφησης νερού και μείωση της ικανότητας απορρόφησης ελαίου. Η ακετυλίωση βελτιώνει το σχετικό ιξώδες, τη γαλακτωματοποιητική δράση και την ικανότητα αφρισμού των γλοβουλινών της φακής (Bora, 2002; Bora, 2003). Η ευπεπτότητα των πρωτεϊνικών συστατικών των σπόρων φακής εκτιμήθηκε από τον Porres et al (2002). Η επεξεργασία σε αυτόκλειστο (υπό πίεση) γενικά δεν βελτίωσε την ευπεπτότητα της πρωτεΐνης και των αμινοξέων. Η απορρόφηση λευκίνης και λυσίνης αυξήθηκε, ενώ της τυροσίνης και μεθειονίνης μειώθηκε (Porres et al., 2002). Η εκβολή μετέβαλε το μοριακό βάρος και τη διαλυτότητα της πρωτεΐνης της φακής περισσότερο από ότι στις πρωτεΐνες του σίτου (Li & Lee, 2000).

Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός του αλεύρου των οσπρίων έχει γίνει διαχωρισμός και απομόνωση των πρωτεϊνών με απομάκρυνση του αμύλου. Ο διαχωρισμός περιλαμβάνει συνήθως υγρές μεθόδους. Χρησιμοποιείται άλκαλι το οποίο διαλυτοποιεί την πρωτεΐνη, γίνεται φυγοκέντριση για το διαχωρισμό των στερεών και κατόπιν καταβύθιση με οξύ σε pH 4.0 ή κοντά στο ισοηλεκτρικό σημείο (Dalgetty & Baik, 2003; Kodagoda, Yeung, Nakai & Powrie, 1973) και θέρμανση του διαλύματος για λίγα λεπτά σε θερμοκρασία μεταξύ 43°C και 93°C. Η πρωτεΐνη που τελικά απομονώνεται ξηραίνεται με ψεκασμό, με ξηραντήρα τυμπάνου ή με λυοφιλοποίηση (Sumner, Nielsen & Youngs, 1981). Στα ληφθέντα προϊόντα έχουν μελετηθεί ιδιότητες όπως η ικανότητα διασκορπισμού σαν συνάρτηση του pH. Μεγαλύτερος διασκορπισμός παρατηρείται σε αλκαλικό pH (π.χ. 80% σε pH 8.0) (Fan & Sosulski, 1974).

Οι λειτουργικές ιδιότητες των πρωτεϊνικών συστατικών (απομονώσεων) είναι επίσης πολύ σημαντικές. Από τις σημαντικότερες ιδιότητες των πρωτεϊνών είναι η γαλακτωματοποιητική ικανότητα, η γαλακτωματοποίηση, η διαλυτότητα, η ικανότητα συγκράτησης νερού (WHC), το ιξώδες, ο σχηματισμός πηκτής και οι αφριστικές ιδιότητες (Díaz, Pereira & Cobos, 2004; Hill, 1996; Morr et al., 1985; Patel & Kilara,

1990; Pearce & Kinsella, 1978; Pinnavaia & Pizzirani, 1998; Regenstein & Regenstein, 1984).

2.4.4.2 Πρωτεΐνες και Εκβολή

Αρκετά ακατέργαστα πρωτεϊνικά προϊόντα παρουσιάζουν καλά λειτουργικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται σε μια σειρά προϊόντων με γνωστή τεχνολογία. Για παράδειγμα, οι πρωτεΐνες του γάλακτος, του κρέατος, και των αυγών χρησιμοποιούνται ως γαλακτωματοποιητές και πηκτωματογόνα, ενώ συγχρόνως παρουσιάζουν καλό άρωμα και ευχάριστο χρώμα. Οι φυτικές πρωτεΐνες πολύ συχνά παρουσιάζουν φτωχή λειτουργικότητα και χρησιμοποιούνται περιορισμένα ως λειτουργικά συστατικά. Εξαίρεση αποτελούν οι πρωτεΐνες του σίτου, οι οποίες βρίσκουν και ευρεία εφαρμογή. Μέχρι σήμερα, αποτελούν τις μοναδικές φυτικές πρωτεΐνες στη βιομηχανία τροφίμων, οι οποίες χρησιμοποιούνται λόγω των λειτουργικών τους χαρακτηριστικών. Ακόμα και σήμερα είναι οι πρωτεΐνες με την μεγαλύτερη κατανάλωση στον κόσμο. Από τις λοιπές φυτικές πρωτεΐνες, η πρωτεΐνη της σόγιας χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη βιομηχανία τροφίμων λόγω της ικανότητας δημιουργίας υφής. Έτσι μπορεί να υποκαταστήσει μέρος του κρέατος, του γάλακτος ή των αυγών στα αναδομημένα προϊόντα και συνεπώς αποτελεί μια άλλη σημαντική λειτουργική φυτική πρωτεΐνη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της εκβολής των αμυλούχων και πρωτεϊνικών υλικών, οι οποίες έχουν αποδοθεί σε διαφορετικούς τύπους μακρομοριακών αλληλεπιδράσεων. Κατά την εκβολή των δημητριακών, ή και οποιασδήποτε άλλης αμυλούχας ή πλούσιας σε πολυσακχαρίτες πρώτης ύλης, λόγω της σημαντικής ομοιογένειας των πολυσακχαριτών όσον αφορά τη σύνθεση του μονομερούς, η ηλεκτροστατική έλξη των υπολειμμάτων σακχάρου που περιέχουν, μπορεί να υποστηριχθεί ότι αποτελεί την κύρια αλληλεπίδραση μεταξύ των μακρομορίων, η οποία οδηγεί στην τελική δομή του προϊόντος εκβολής (Arêas, 1992). Μια συνέπεια αυτού είναι ότι κατά τη διάρκεια της εκβολής το σύστημα μπορεί να παρουσιάσει μια εμφανή μετάβαση από τη συμπιεσμένη σκόνη σε μια ‘φάση τήγματος’ οφειλομένης στην ταυτόχρονη μείωση όλων των συνεργιστικών αλληλεπιδράσεων με παρόμοια ενέργεια. Κατά συνέπεια, οι επιδράσεις της τριβής και η συμπεριφορά κατά τη ροή μπορούν να θεωρηθούν ότι εξαρτώνται από τη συγκέντρωση, δηλ. εξαρτώνται από την υγρασία τροφοδοσίας, καθώς επίσης και μερικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, όπως ο λόγος διόγκωσης (Arêas, 1992; Guy & Home, 1988). Κατά την εκβολή των δημητριακών και ανεξάρτητα από τον τύπο αλεύρου, υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ περιεκτικότητας νερού και διόγκωσης των προϊόντων εκβολής των αμυλούχων υλικών. Επομένως, μπορούν ευκολότερα να προβλεφθούν η θερμοκρασία ‘τήξεως’, η συμπεριφορά κατά τη ροή και τα χαρακτηριστικά του προϊόντος. Οι σχετικά ασθενείς αλληλεπιδράσεις οι οποίες σταθεροποιούν το προϊόν εκβολής οδηγούν σε πολύ διογκωμένα προϊόντα με

εύθρυπτη δομή, η οποία μπορεί εύκολα να καταρρεύσει σε υδατικό περιβάλλον. Τα προϊόντα εκβολής των δημητριακών χρησιμοποιούνται με τη μορφή αυτή, και αφού έχουν χρωματισθεί και αρωματισθεί, ως προϊόντα σνακ ευρείας καταναλώσεως.

Η προσθήκη πρωτεϊνών σε πλούσια σε άμυλο άλευρα πάνω από ένα καθορισμένο επίπεδο μπορεί να μεταβάλει τη συμπεριφορά μετασχηματισμού σε προϊόν εκβολής 'τύπου πρωτεΐνης' (Arêas, 1992; Bhattacharya, Das & Bose, 1988; Faubion & Hoseney, 1982) όπου συμβαίνει μικρότερη διόγκωση και τα προϊόντα είναι σκληρότερα και πιο ανθεκτικά στην κατάρρευση σε υδατικό περιβάλλον και επίσης λιγότερο κατάλληλα για άμεση κατανάλωση. Τα τυπικά προϊόντα εκβολής πλούσια σε πρωτεΐνη χρησιμοποιούνται, μετά την ενυδάτωση και μετά το χρωματισμό και τον αρωματισμό, ως ανάλογα 'κρέατος' ή με τη μορφή σκόνης ως λειτουργικά συστατικά.

Λόγω της πολυμορφίας των μονομερών που απαρτίζουν τις πρωτεΐνες, απαιτείται ένα ευρύ ενεργειακό φάσμα για την αλληλεπίδραση τόσο μεταξύ πρωτεϊνών, όσο και με άλλα μακρομόρια. Έτσι, οι υδρόφοβες, οφειλόμενες σε κατιόντα ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις και οι ομοιοπολικοί δεσμοί, μπορούν γενικώς να συμβάλουν στη σταθεροποίηση του τρισδιάστατου πλέγματος που σχηματίζεται μετά την εκβολή των πρωτεϊνών (Stanley, 1986; Stanley, 1989). Οι πρωτεΐνες κατά την εκβολή συχνά δεν παρουσιάζουν μια εμφανή μετάβαση στη φάση του 'τήγματος' και έτσι παρατηρείται πολύπλοκη συμπεριφορά μεταξύ των μεταβλητών του προϊόντος (όπως π.χ. ο λόγος διόγκωσης) και των μεταβλητών της διεργασίας (όπως π.χ., η θερμοκρασία και η υγρασία τροφοδοσίας). Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε ποικίλες και πολύπλοκες μακρομοριακές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν κατά την εκβολή των πρωτεϊνών, πολλές από τις οποίες δεν είναι πλήρως κατανοητές και έτσι απαιτείται περαιτέρω έρευνα (Arêas, 1992).

Πίνακας 2-4 Δομικές μεταβολές των πρωτεϊνών κατά την εκβολή (Arêas, 1992).

Μετουσίωση
↓
Συνδυασμός
↓
Διάσπαση μέρους ή όλων των συνδυασμών από τη θερμότητα και τη διάτμηση και σχηματισμός μιας φάσης πυκνού διαλύματος ή τήγματος
↓
Πιθανός σχηματισμός ομοιοπολικών δεσμών σε υψηλή θερμοκρασία
↓
Σχηματισμός μη ομοιοπολικών και δισουλφιδικών δεσμών κατά την ψύξη
↓
Μετάπτωση των άμορφων περιοχών στην υαλώδη κατάσταση αν η περιεκτικότητα υγρασίας είναι επαρκώς χαμηλή

Κατά την επεξεργασία, οι κρίσιμοι μετασχηματισμοί των πρωτεϊνικών μορίων θεωρείται ότι επιτυγχάνονται στο τμήμα μετρήσεως (στον εκβολέα μονού κοχλία) ή τη ζώνη του αντιδραστήρα (εκβολέας διπλού κοχλία). Όμως, οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης πρωτεΐνης-πρωτεΐνης κατά την εκβολή, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία της τελικής υφής, παραμένουν σε κάποιο βαθμό αδιευκρίνιστοι. Αυτό αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα για τη χρήση της εκβολής στο μέγιστο των δυνατοτήτων της στην παραγωγή προϊόντων πρωτεΐνης. Παρ' όλα αυτά αποτελεί την πολλά υποσχόμενη τεχνική για την παραγωγή προϊόντων πλούσιων σε πρωτεΐνη, ιδίως με τη χρήση οσπρίων (Arêas, 1992; Bhattacharya et al., 1988; Harper, 1986; Oliveira, Moller-Holst, Haaland & Roselund, 1992).

Οι ιδανικές συνθήκες για την εκβολή των πρωτεϊνών περιλαμβάνουν την πλήρη αποσυσσωμάτωση του αλεύρου μέσω της μηχανικής ανάμιξης, του σχηματισμού ενός ομοιογενούς εναιωρήματος με μετουσίωση, διαχωρισμό, απεμπλοκή (ξεμπλέξιμο) των πρωτεϊνών και διευθέτηση (ευθυγράμμιση) των μετουσιωμένων πρωτεϊνών προς την κατεύθυνση της ροής και, τελικά, τη διασύνδεση των μορίων αυτών στο τέλος της μήτρας μέσω συγκεκριμένων συνδέσεων. Μετά τον αρχικό μηχανικό τεμαχισμό και την ανάμιξη του αλεύρου, η διεργασία μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενής σε ή κοντά στο μοριακό επίπεδο, με πλήρη διαχωρισμό των πρωτεϊνικών μορίων (ή κοντά σ' αυτό) και μοριακή διευθέτηση κατά την κατεύθυνση της ροής. Στον Πίνακα 2-3 φαίνονται οι δομικές μεταβολές των πρωτεϊνών κατά την εκβολή.

2.5 Χημικές και θρεπτικές μεταβολές των τροφίμων κατά την εκβολή

Στο χιτώνιο του εκβολέα λαμβάνουν χώρα μοναδικές φυσικοχημικές μετατροπές. Οι κυριότερες από αυτές περιλαμβάνουν: τη συνένωση, τον κατατεμαχισμό, την απώλεια της φυσικής διαμόρφωσης, τον ανασυνδυασμό των θραυσμάτων και τη θερμική υποβάθμιση (Camire, 2000). Η σύσταση του υλικού που τροφοδοτείται στον εκβολέα μεταβάλλεται λόγω των φυσικών απωλειών, ο οποίες περιλαμβάνουν τη διαρροή ελαίου και την εξάτμιση του νερού και των πτητικών συστατικών στην μήτρα. Οι περισσότερες χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στο τμήμα του χιτωνίου του εκβολέα πριν από τη μήτρα. Για τον λόγο αυτό τα θερμικά ασταθή συστατικά, όπως οι αρωματικές ουσίες και οι βιταμίνες, θα πρέπει να εισέρχονται σε αυτό το σημείο ώστε να ελαχιστοποιείται η έκθεσή τους στη θερμότητα και τη διάτμηση.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις φυσικοχημικές μεταβολές κατά την εκβολή είναι η σύσταση, η υγρασία και η κοκκομετρία της τροφοδοσίας, η παροχή της τροφοδοσίας, το μοντέλο του εκβολέα, η διαμόρφωση και η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, η θερμοκρασία εκβολής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μήτρας. Οι παράγοντες αυτοί με τη σειρά τους καθορίζουν το σύνολο των εξαρτημένων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων της ειδικής μηχανικής ενέργειας (SME), της θερμοκρασίας του

προϊόντος και της πίεσης. Τα προαναφερθέντα μεγέθη επηρεάζουν το ιξώδες του τροφίμου εντός του χιτωνίου του εκβολέα, το χρόνο παραμονής του υλικού και τη διάτμηση που εφαρμόζεται στο τρόφιμο.

2.5.1 Υδατάνθρακες - Άμυλο

Τόσο τα δημητριακά, όσο και τα όσπρια, όπως ήδη έχει αναφερθεί, είναι βασικές πηγές υδατανθράκων και συγχρόνως κύριες πηγές ενέργειας για τον άνθρωπο. Η κύρια διαφορά της εκβολής έναντι των άλλων μεθόδων επεξεργασίας είναι ότι η ζελατινοποίηση του αμύλου πραγματοποιείται σε πολύ μικρότερα ποσοστά υγρασίας (12-22%). Κατά την εκβολή υψηλής αμυλοπηκτίνης αμύλου αραβοσίτου κυριαρχεί η τήξη, η οποία ακολουθεί κινητική μηδενικής τάξης, έναντι της ζελατινοποίησης, η οποία ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης (Qu & Wang, 1994).

Κατά την εκβολή η αμυλοπηκτίνη εκτίθεται σε διάτμηση και μπορεί να συμβεί μείωση του μοριακού βάρους τόσο σ' αυτήν, όσο και στην αμυλόζη. Στο αλεύρι αραβοσίτου τα μεγαλύτερα μόρια της αμυλοπηκτίνης εμφανίζουν τις μεγαλύτερες μειώσεις στο μοριακό βάρος (Politz, Timpa & Wasserman, 1994). Το μοριακό βάρος του αμύλου σίτου βρέθηκε να παραμένει αμετάβλητο σε υψηλές θερμοκρασίες μήτρας (185°C) και τιμές υγρασίας (20%) (Politz, Timpa, White & Wasserman, 1994). Η έκταση της υποβάθμισης του αμύλου ήταν μεγαλύτερη στο άμυλο σίτου παρά στο άμυλο αραβοσίτου. Το μέρος του αμύλου με υψηλό μοριακό βάρος ($>10^7$) εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια της εκβολής, ενώ παρατηρείται μια γενική αύξηση στα μόρια του αμύλου με μοριακά βάρη από 10^5 έως 10^7.

Η εκβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοριακή υποβάθμιση του αμύλου και την παραγωγή δεξτρινών και γλυκόζης. Για τη μεγιστοποίηση της μετατροπής του αμύλου σε γλυκόζη απαιτούνται συνθήκες υψηλής διάτμησης. Η γλυκόζη μπορεί να παραχθεί με την εκβολή αμύλου κριθαριού, ταπιόκας, αραβοσίτου και αποβλήτων πατάτας. Παρ' όλο που τα ένζυμα αδρανοποιούνται κατά την εκβολή, η προσθήκη θερμοανθεκτικών ενζύμων στο υλικό πριν από την επεξεργασία αυξάνει το ρυθμό της αντίδρασης μέσα στο χιτώνιο.

Η υποβάθμιση του αμύλου έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διόγκωσης. Η διόγκωση σχετίζεται με την υφή του προϊόντος. Τα υψηλής διόγκωσης προϊόντα θρυμματίζονται εύκολα λόγω των λεπτών τοιχωμάτων των κυψελίδων, ενώ τα πιο πυκνά είναι συνήθως σκληρά (Chinnaswamy, 1993).

Η ευπεπτότητα του αμύλου εξαρτάται από την πλήρη ζελατινοποίηση. Η υψηλή ευπεπτότητα του αμύλου είναι αναγκαία για εξειδικευμένα τρόφιμα όπως οι βρεφικές τροφές και οι τροφές απογαλακτισμού. Η εκβολή δημιουργεί ανθεκτικό άμυλο (resistant starch) το οποίο μπορεί να έχει αξία στα προϊόντα μειωμένων θερμίδων.

Κατά τη διάρκεια της εκβολής μπορεί να δημιουργηθούν σύμπλοκα λιπιδίων και αμυλόζης. Ο τύπος του αμύλου και των λιπιδίων που βρίσκονται στο τρόφιμο επηρεάζουν την έκταση σχηματισμού των συμπλόκων. Τα μονογλυκερίδια και τα ελεύθερα λιπαρά οξέα είναι πιο πιθανό να σχηματίσουν σύμπλοκα από ότι τα τριγλυκερίδια, όταν προστίθενται σε άμυλο υψηλής αμυλόζης (Bhatnagar & Hanna, 1994a). Επίσης το υψηλό ιξώδες και ο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής μπορούν να ευνοήσουν τη δημιουργία του συμπλόκου.

2.5.2 Διαιτητικές Ίνες

Ο ρόλος των ινών στη διατροφή είναι ευρέως γνωστός, ειδικά η επιβοηθητική λειτουργία τους κατά τη διαδικασία της πέψης (κίνηση του εντέρου). Τα βασικά συστατικά των διαιτητικών ινών είναι οι πολυσακχαρίτες και η λιγνίνη και έχει βρεθεί ότι παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά κατά την εκβολή (Huth, Dongowski, Gebhardt & Flamme, 2000). Ο βαθμός υποβάθμισης των ινών εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης κατά την εκβολή. Οι Björck and Asp (1983) διαπίστωσαν ότι η διεργασία της εκβολής διπλασίασε σχεδόν την περιεκτικότητα των υδατοδιαλυτών ινών κατά την εκβολή του σιταριού. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι δεν βρέθηκε καμία στατιστικά σημαντική διαφορά στις περιεχόμενες ίνες πριν και μετά την εκβολή των δημητριακών (Moscicki & Wojtowicz, 2011; Varo, Veijalainen & Koivistoinen, 1984). Επίσης, κατά την εκβολή δεν είναι ξεκάθαρο αν οι διαλυτές ίνες που δημιουργούνται έχουν τα ίδια οφέλη στην υγεία όπως οι φυσικές διαλυτές ίνες. Κατά την εκβολή κριθαριού και βρώμης, όταν χρησιμοποιήθηκαν σπόροι οι οποίοι περιείχαν αυξημένο ποσοστό διαλυτών ινών και β-γλυκάνης, οι διαλυτές ίνες αυξήθηκαν (Wang & Klopfenstein, 1993). Τα συστατικά που προκύπτουν κατά την εκβολή μπορεί να γίνουν δύσπεπτα ή να μην είναι δυνατόν να χωνευθούν (Camire, 2000).

Η προσθήκη διαλυτών ινών στα τρόφιμα μπορεί να έχει οφέλη στην υγεία. Οι αδιάλυτες ίνες μπορεί επίσης να έχουν οφέλη στην υγεία. Μια πιθανή επίδραση είναι η προστασία έναντι του καρκίνου του παχέος εντέρου μέσω της σύνδεσης των διαιτητικών καρκινογόνων ουσιών (Camire, Zhao, Dougherty & Bushway, 1995). Η θετική επίδραση των διαιτητικών ινών έχει αποδειχθεί και στην περίπτωση των διαβητικών (Brodribb & Humphreys, 1976). Οι Nygren, Hallmans, Jonsson, και Asp (1982) κατά τη μελέτη προϊόντων εκβολής με πίτυρο και σίτο από άποψη διατροφής επιβεβαίωσαν την καταλληλότητά τους για τους διαβητικούς.

2.5.3 Πρωτεΐνες

Κατά τη διάρκεια της εκβολής οι πρωτεΐνες υφίστανται διάφορες μεταβολές. Η σπουδαιότερη από αυτές είναι η μετουσίωση. Τα περισσότερα ένζυμα χάνουν την δραστικότητά τους εκτός και είναι σταθερά στη θέρμανση και τη διάτμηση. Μετά την εκβολή μειώνεται η διαλυτότητα των πρωτεϊνών στο νερό ή σε διαλύματα αλάτων. Η

μετουσίωση και η απώλεια της διαλυτότητας επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής και από την ειδική μηχανική ενέργεια (SME).

Η εκβολή προκαλεί διάσπαση των δισουλφιδικών δεσμών των πρωτεϊνών και έτσι έχουν τη δυνατότητα να αναδιαμορφωθούν. Επίσης ευνοείται ο σχηματισμός αδιάλυτων συσσωματωμάτων μέσω ηλεκτροστατικών και υδροφοβικών αλληλεπιδράσεων. Η δημιουργία νέων πεπτιδικών δεσμών είναι αμφιλεγόμενη, ενώ η ευπεπτότητα των πρωτεϊνών βελτιώνεται. Οι Burgess και Stanley (1976) υπέθεσαν ότι κατά τις διαδικασίες μετάβασης της δομής των πρωτεϊνών σημαντικοί μπορεί να είναι οι διαμοριακοί ισοπεπτιδικοί δεσμοί. Στην περίπτωση του αλεύρου σίτου και αραβόσιτου, παρατηρήθηκε ότι η εκβολή επηρέασε τη μείωση του επιπέδου της αλβουμίνης, γλοβουλίνης, προλαμίνης και γλουτένης στο τελικό προϊόν. Μόνο το άλευρο σόργου έδειξε υψηλότερη περιεκτικότητα σε προλαμίνη.

Σε υψηλές θερμοκρασίες εκβολής και χαμηλές υγρασίες μπορεί να λάβουν χώρα οι αντιδράσεις μη ενζυμικής αμαύρωσης (αντιδράσεις Maillard). Τα ελεύθερα σάκχαρα που μπορούν να παραχθούν κατά την εκβολή αντιδρούν με την λυσίνη και άλλα αμινοξέα με ελεύθερες αμινομάδες. Τα τμήματα του αμύλου και των ινών καθώς και τα προϊόντα υδρόλυσης της σακχαρόζης είναι διαθέσιμα να λάβουν μέρος στις αντιδράσεις μη ενζυμικής αμαύρωσης.

2.5.4 Λιπίδια

Υλικά με πολύ υψηλό ποσοστό λιπιδίων συνήθως δεν μπορούν να υποστούν επεξεργασία με εκβολή. Επίπεδα λιπιδίων πάνω από 5-6% καθιστούν τη λειτουργία του εκβολέα προβληματική. Τα λιπαρά μειώνουν την ολίσθηση μέσα στο χιτώνιο και έτσι μειώνεται η ροπή. Συχνά η διόγκωση των προϊόντων είναι μικρή λόγω της ανεπαρκούς πίεσης κατά την εκβολή. Τα λιπαρά απελευθερώνονται από τα κύτταρα λόγω της θέρμανσης (ψησίματος) και της φυσικής αποδιοργάνωσης των κυτταρικών τοιχωμάτων.

Γενικά το ποσοστό των λιπιδίων εμφανίζεται μειωμένο μετά την εκβολή. Ένα ποσοστό λιπιδίων μπορεί να χάνεται στην μήτρα ως ελεύθερο λίπος, γεγονός που συμβαίνει σε υλικά με υψηλά ποσοστά λιπιδίων όπως η σόγια. Επίσης η μείωση του ποσοστού των λιπιδίων μπορεί να οφείλεται στο σχηματισμό συμπλόκων με την αμυλόζη ή τις πρωτεΐνες (Camire, 2000). Τα σύμπλοκα που σχηματίζονται ως συνέπεια της χημικής ένωσης της αμυλόζης με λιπαρά οξέα κατά την εκβολή μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ευπεπτότητα των προϊόντων εκβολής. Όμως, οι μεταβολές αυτές δεν είναι σημαντικές (Moscicki et al., 2011).

Τα ελεύθερα λιπαρά οξέα μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στα τρόφιμα γιατί είναι επιρρεπή στην οξείδωση περισσότερο από ότι τα τριγλυκερίδια. Τα ελεύθερα λιπαρά οξέα μπορεί να παράγουν κακές γεύσεις-οσμές (off-flavors). Θεωρητικά είναι εφικτή η υδρόλυση των τριγλυκεριδίων προς γλυκερόλη και ελεύθερα λιπαρά οξέα. Η αντίδραση

αυτή όμως δεν εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό. Στην πραγματικότητα η εκβολή μπορεί να εμποδίζει την απελευθέρωση ελεύθερων λιπαρών οξέων μέσω της μετουσίωσης των υδρολυτικών ενζύμων. Αυτή η δράση μπορεί να αξιοποιηθεί για τη σταθεροποίηση του πιτύρου από δημητριακά όπως π.χ. το ρύζι (Camire, 2000).

Η οξείδωση των λιπαρών μπορεί να μειώσει την οργανοληπτική και την θρεπτική ποιότητα των τροφίμων. Πιθανότατα η οξείδωση να μην λαμβάνει χώρα κατά την διάρκεια της εκβολής λόγω του μικρού χρόνου παραμονής. Όμως, η οξειδωτική τάγγιση μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την οξείδωση των λιπαρών είναι το υλικό κατασκευής των κοχλιών, η διόγκωση και η χαμηλή ενεργότητα ύδατος.

2.5.5 Βιταμίνες

Η σταθερότητα των βιταμινών κατά την εκβολή είναι μεταβλητή, καθώς έχουν αναφερθεί διακυμάνσεις στην συγκέντρωσή τους. Η μείωση της θερμοκρασίας και της διάτμησης προστατεύει τις περισσότερες βιταμίνες. Από τις λιποδιαλυτές βιταμίνες, οι βιταμίνες D και K είναι σχετικά σταθερές. Οι βιταμίνες A και E και τα ανάλογα συστατικά, καροτενοειδή και τοκοφερόλες αντίστοιχα, δεν είναι σταθερές παρουσία οξυγόνου και θέρμανσης. Η βιταμίνη A, πρόδρομο β-καροτένιο, προστίθεται στα τρόφιμα ως χρωστική και ως αντιοξειδωτικό. Παρατηρούνται απώλειες του β-καροτενίου κατά την εκβολή λόγω της θερμικής διάσπασης. Το ασκορβικό οξύ (βιταμίνη C) είναι εξίσου ευαίσθητο στην θέρμανση και την οξείδωση. Αυτή η βιταμίνη μειώθηκε κατά την εκβολή αλεύρου σίτου σε υψηλότερες θερμοκρασίες και χαμηλές υγρασίες (10%) (Andersson & Hedlund, 1990), ενώ έχουν αναφερθεί και απώλειες της τάξης του 50–60% (Maga & Sizer, 1978; Moscicki et al., 2011; Muelenaere & Buzzard, 1969).

Πρέπει να τονισθεί ότι παρατηρούνται ελάχιστες απώλειες κατά την εκβολή προϊόντων με χαμηλή υγρασία. Για την παραγωγή θρεπτικών προϊόντων, η προσθήκη βιταμινών γίνεται μετά την εκβολή. Στον Πίνακα 2-4 φαίνονται στοιχεία για τις μεταβολές βασικών θρεπτικών συστατικών τα οποία χρησιμοποιούνται κατά την εκβολή, καθώς επίσης και η εξάρτησή τους από τις παραμέτρους της διεργασίας.

2.5.6 Ανόργανα Συστατικά

Η σταθερότητα των ανόργανων συστατικών και ιδιαιτέρως των ιχνοστοιχείων κατά την εκβολή έχει μελετηθεί λίγο επειδή είναι σταθερά στις άλλες μεθόδους επεξεργασίας. Η έρευνα επικεντρώνεται σε δύο γενικά θέματα: τη σύνδεση των ιχνοστοιχείων με τις ίνες και άλλα μακρομόρια και την προσθήκη ιχνοστοιχείων από το υλικό των κοχλιών και του χιτωνίου του εκβολέα.

Το φυτικό οξύ δεσμεύει μεταλλικά στοιχεία. Η εκβολή μπορεί να επηρεάσει την απορρόφηση των μεταλλικών στοιχείων μεταβάλλοντας το άλας του φυτικού οξέος.

Βρέθηκε ότι μειώνει τα επίπεδα του άλατος του φυτικού οξέος στο άλευρο σίτου (Fairweather-Tait, Portwood, Symss, Eagles & Minski, 1989), ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο και στα όσπρια (Lombardi-Boccia, Lullo & Carnovale, 1991). Τα βραστά όσπρια και αυτά που έχουν υποστεί εκβολή σε υψηλές συνθήκες διάτμησης περιείχαν λιγότερο διαλυτοποιημένο σίδηρο από δείγματα που είχαν υποστεί εκβολή σε συνθήκες χαμηλής διάτμησης (Ummadi, Chenoweth & Uebersax, 1995). Παρόλο που το φυτικό οξύ ήταν λιγότερο σε όλες τις συνθήκες εκβολής, το συνολικό φυτικό άλας παρέμεινε σταθερό.

Τα τρόφιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες αυξάνουν τη μεταφορά μετάλλων στο τρόφιμο από τους κοχλίες του εκβολέα και το χιτώνιο. Τα επίπεδα του σιδήρου σε φλοιούς πατάτας αυξήθηκαν τουλάχιστον 38% με την εκβολή και τα υψηλότερα επίπεδα βρέθηκαν για δείγματα που κατεργάσθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (Camire, Zhao & Violette, 1993).

2.5.7 Γευστικά-οσμηρά συστατικά (Flavors)

Τα τρόφιμα εκβολής έχουν συνήθως ήπια γεύση και οσμή γιατί ο χρόνος για την ανάπτυξη τους είναι πολύ μικρός. Κατά την εκβολή συμβαίνει θερμική διάσπαση, ενώ κατά τη διέλευση του υλικού από τη μήτρα τα πτητικά συστατικά εξατμίζονται μαζί με τον ατμό (Camire, 2000).

Πίνακας 2-5 Επίδραση των συνθηκών εκβολής επί των θρεπτικών προϊόντων εκβολής (όπου: + αύξηση, - απώλεια, ο καμία επίδραση, * υψηλή θερμοκρασία, ** υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή υγρασία) (Bjorck et al., 1983).

Παράμετρος Διεργασίας	Πρωτεΐνη	Συστατικό Άμυλο		Διατήρηση Βιταμινών			
	Λυσίνη	Ζελατινοποίηση	Δεξτρινοποίηση	B_1	B_2	C	A
Θερμοκρασία	-	+	+	-ο	+ο	-	ο
Περιεκτικότητα υγρασίας	+	+*		+	-ο	-**	
Ταχύτητα κοχλία (rpm)	-ο	-		-ο	-	-	+
Γεωμετρία κοχλία	-		+	ο		-	
Διάμετρος μήτρας	+	-		+ο	ο	+	
Ροπή, πίεση εκβολής	-		+			ο	

Συνήθως η προσθήκη των γευστικών - οσμηρών συστατικών πραγματοποιείται μετά την εκβολή, ώστε να αυξηθεί η αποδοχή του προϊόντος. Διάφορες έρευνες έχουν εξετάσει την προσθήκη των συστατικών αυτών πριν την εκβολή ή κατά την διάρκειά της ώστε να μεγιστοποιηθεί η συγκράτησή τους. Η συγκράτηση των γευστικών - οσμηρών συστατικών ήταν μεγαλύτερη σε αμυλούχα προϊόντα όταν αυτά προστέθηκαν απευθείας στο χιτώνιο του εκβολέα σε σημείο πριν από τη μήτρα (Kollengode & Hanna, 1997b). Επίσης η συγκράτηση των γευστικών - οσμηρών συστατικών βελτιώνεται σε χαμηλές υγρασίες εκβολής και από τη χρήση φυσικού αμύλου έναντι του προζελατινοποιημένου.

Έχουν αναφερθεί ανακτήσεις τέτοιων ουσιών που φθάνουν σε επίπεδα 70-100% όταν αυτά προστίθενται πριν την εκβολή υπό μορφή συμπλόκων κυκλοδεξτρίνης (Kollengode & Hanna, 1997a). Το υψηλότερο κόστος της κυκλοδεξτρίνης μπορεί να αντισταθμιστεί από το μειωμένο κόστος της προσθήκης των γευστικών - οσμηρών συστατικών.

2.6 Συμπερασματικές Επισημάνσεις

Μεταξύ των συστατικών των αλεύρων αραβοσίτου και φακής, το άμυλο παίζει ένα ρόλο κλειδί κατά την εκβολή. Το άμυλο υφίσταται μερικές σημαντικές διαμορφωτικές μεταβολές, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τη ζελατινοποίηση, την τήξη και την κλασμάτωση. Οι διαμορφωτικές αυτές μεταβολές επηρεάζουν τις ρεολογικές ιδιότητες, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τη διόγκωση του τελικού προϊόντος εκβολής, καθώς επίσης και τις άλλες ιδιότητες.

Οι επιδράσεις της εκβολής πάνω στη διαλυτότητα σε νερό και την ικανότητα απορρόφησης νερού του αμύλου έχει μελετηθεί κατά το παρελθόν (Anderson, Conway, Pfeifer & Griffin, 1969; Colonna, Doublier, Melcion, de Monredon & Mercier, 1984; Colonna & Mercier, 1983; Gomez & Aguilera, 1984) και βρέθηκε ότι με την ελάττωση της υγρασίας εκβολής και υψηλές θερμοκρασίες, η διαλυτότητα σε νερό είναι μεγαλύτερη από εκείνην είτε του νωπού υλικού είτε του υλικού μετά την εκβολή σε υψηλότερες υγρασίες (χαμηλότερες θερμοκρασίες). Το νερό δρα ως πλαστικοποιητής και λιπαίνει το υλικό τροφοδοσίας, ενώ μειώνει την τριβή και τη θερμότητα που εμπλέκεται κατά την εκβολή. Η εκβολή βρέθηκε ότι αυξάνει τη διαλυτότητα του αμύλου αραβοσίτου χωρίς το σχηματισμό μαλτοδεξτρινών (Mercier & Feillet, 1975). Βρέθηκε ακόμη ότι συμβαίνει μείωση του μοριακού βάρους της αμυλοπηκτίνης μετά από εκβολή σε υψηλή θερμοκρασία (χαμηλή υγρασία). Το μοριακό βάρος της αμυλόζης επηρεάσθηκε ελάχιστα.

Η εκβολή λοιπόν μεταβάλει μερικές από τις λειτουργικές ιδιότητες του αμύλου, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τη σχέση αμυλόζης-αμυλοπηκτίνης, καθώς επίσης και από τις παραμέτρους της διεργασίας (υγρασία, θερμοκρασία, ταχύτητα περιστροφής και γεωμετρία κοχλιών). Εκτός του καθαρού αμύλου, η εκβολή των αμυλούχων προϊόντων οδηγεί σε ζελατινοποίηση, μερική ή πλήρη καταστροφή της κρυσταλλικής δομής και μοριακή κλασμάτωση των πολυμερών του αμύλου, καθώς επίσης και σε μετουσίωση των πρωτεϊνών και το σχηματισμό συμπλόκων μεταξύ αμύλου και λιπιδίων και μεταξύ πρωτεϊνών και λιπιδίων (Colonna et al., 1983).

Κατά τα πρόσφατα χρόνια, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τα οφέλη υγείας των διαιτητικών ινών και υπάρχει αύξηση της κατανάλωσης προϊόντων με υψηλές περιεκτικότητες σε ίνες. Πολυάριθμες μελέτες αποδεικνύουν τη σύνδεση των προβλημάτων υγείας και των διαιτητικών ινών (Decker, Beecher, Slavin, Miller & Marquart, 2002; Gordon, 1999; Jones, 2006). Οι διαιτητικές ίνες μπορούν να ληφθούν με

κατανάλωση προϊόντων ολικής άλεσης ή με προσθήκη. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει προηγουμένως τα όσπρια αποτελούν εξαιρετική πηγή ινών. Εκτός των ωφελημάτων υγείας, οι διαιτητικές ίνες και ανάλογα με την προέλευσή τους, παρουσιάζουν διαφορετική λειτουργικότητα στα τρόφιμα, όπως δίνουν όγκο, αυξάνουν το ιξώδες, σχηματίζουν πηκτές και αντικαθιστούν ή μιμούνται τα λίπη (Nelson, 2001).

Όμως, γενικά παρουσιάζουν περιορισμένη ή φτωχή λειτουργικότητα και επομένως αποτελεί πρόκληση η τυποποίηση προϊόντων με υψηλή περιεκτικότητα ινών. Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι η ενσωμάτωση ινών σε μια τυποποίηση οδηγεί σε χειροτέρευση της ποιότητας και τη μείωση της αποδοχής εκ μέρους του καταναλωτή. Η φυσικοχημική τροποποίηση των ινών με τη χρήση εκβολής υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και διάτμησης αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για τη βελτίωση των λειτουργικών ιδιοτήτων των ινών (Artz, Warren & Villota, 1990)(Artz et al. 1990; Gualberto et al. 1997; Sekhon et al. 1997). Η εκβολή των ινωδών συστατικών έχει προσθετική επίδραση πάνω στη βελτίωση της θρεπτικής αξίας των ινών. Σύμφωνα με τους Varo et al. (Varo, Laine & Koivistoinen, 1983) και Artz et al. (Artz et al., 1990), η θερμή εκβολή δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στις διαλυτές και αδιάλυτες ίνες, ενώ άλλοι (Fornal, Soral-Smietana, Smietana & Szpendowski, 1987) έχουν αναφέρει μείωση ή αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες (Theander & Westerlund, 1987) λόγω της θερμής εκβολής. Οι μελέτες αυτές είχαν επικεντρωθεί σε διαιτητικές ίνες από δημητριακά και πατάτες (Camire & Flint, 1991; Camire, Violette, Dougherty & McLaughlin, 1997).

Σε πολύ λίγες μελέτες περιλαμβάνεται έρευνα πάνω στη χρήση της εκβολής για την τροποποίηση των λειτουργικών και θρεπτικών ιδιοτήτων προϊόντων πλούσιων ή εμπλουτισμένων με ίνες και σε ακόμη λιγότερες αποτελεί το κεντρικό θέμα της έρευνας (Guan & Hanna, 2004).

Κατά τη διάρκεια της εκβολής οι πρωτεΐνες υφίστανται μεταξύ των άλλων μετουσίωση, η οποία αποτελεί την κυριότερη μεταβολή. Μετά την εκβολή μειώνεται η διαλυτότητα των πρωτεϊνών στο νερό ή σε διαλύματα αλάτων. Τόσο η μετουσίωση όσο και η απώλεια της διαλυτότητας επηρεάζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής και από την ειδική μηχανική ενέργεια (SME). Κατά την εκβολή παρατηρείται διάσπαση των δισουλφιδικών δεσμών των πρωτεϊνών και έτσι υπάρχει η δυνατότητα αναδιαμόρφωσης. Επίσης ευνοείται ο σχηματισμός αδιάλυτων συσσωματωμάτων μέσω ηλεκτροστατικών και υδροφοβικών αλληλεπιδράσεων.

Η έρευνα της εκβολής μιγμάτων δημητριακών και οσπρίων είναι περιορισμένη στη σόγια και μερικά είδη φασολιών. Για την περίπτωση της φακής είναι ιδιαιτέρως περιορισμένη (Lazou et al., 2007). Έτσι, η μελέτη των μηχανικών και δομικών ιδιοτήτων, των ιδιοτήτων υφής, των λειτουργικών ιδιοτήτων σε φυσικά συστήματα είναι ελλιπής και σε

συνδυασμό με τις παραμέτρους της διεργασίας θα επιτρέψει ή δώσει τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων προϊόντων τροφίμων υψηλής θρεπτικής αξίας, λειτουργικότητας και αποδοχής. Αρκεί να σημειωθεί ότι, μέχρι σήμερα, εξαιρετικά περιορισμένη είναι η έρευνα των προηγουμένων σε συνδυασμό με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και αποδοχή προϊόντων εκβολής από μίγματα αραβοσίτου και φακής.

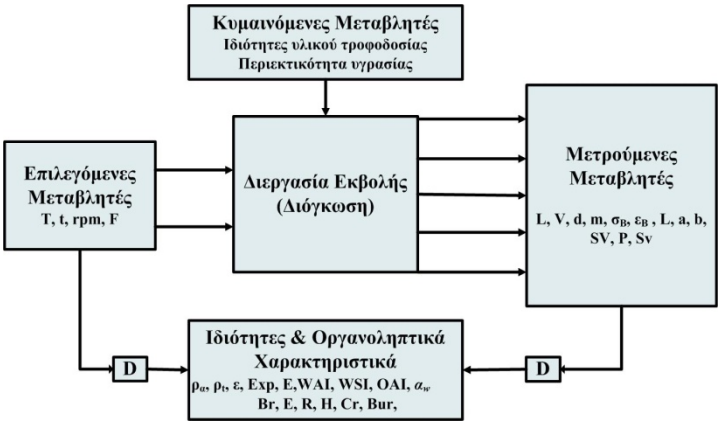
3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΕΚΒΟΛΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Η παρασκευή τροφίμων με επιθυμητές ιδιότητες και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά αποτελεί βασικό στόχο της βιομηχανικής παραγωγής των τροφίμων. Καθώς, τόσο οι ιδιότητες, όσο και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τροφίμων επηρεάζονται από τη διαδικασία παραγωγής, συχνά προτυποποιούνται ως συναρτήσεις ενόργανων μετρήσεων ή των μεταβλητών της διεργασίας. Βέβαια, το είδος και η σύνθεση των πρώτων υλών εμπλέκονται και επηρεάζουν ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Γενικά, οι δια των αισθήσεων προσλαμβανόμενες ανταποκρίσεις είναι μη γραμμικές (Naes & Risvik, 1996), ενώ οι διεργασίες παραγωγής τροφίμων είναι τυπικά πολύπλοκες (σύνθετες). Επομένως, απαραίτητες είναι οι μη γραμμικές τεχνικές για την περιγραφή τόσο των ιδιοτήτων, όσο κα των συσχετίσεων μεταξύ οργανοληπτικών και ενόργανων μεθόδων, καθώς επίσης και των μεταβλητών της διεργασίας (Kupongsak & Tan, 2006; Popescu, Popescu, Wilder & Karwe, 2001; Sablani & Rahman, 2003; Wang & Tan, 2000; Zhang, Yang, Mittal & Yi, 2002).

Τα πρότυπα που περιγράφουν την επίδραση των μεταβλητών της διεργασίας πάνω στις ιδιότητες και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά ως συναρτήσεις μετρήσεων με κατάλληλα κατά περίπτωση όργανα βοηθούν στον καθορισμό και ανάλυση των επιδράσεων αυτών πάνω στην ποιότητα των προϊόντων. Όμως, συνήθως τα πρότυπα αυτά δεν είναι τυπικά αντιστρεπτά ώστε να επιτρέψουν τον προσδιορισμό των συνθηκών της διεργασίας οι οποίες απαιτούνται για την παραγωγή μιας προκαθορισμένης επιθυμητής οργανοληπτικής ποιότητας. Σχετικά πρόσφατα οι Kupongsak και Tan (2006) πρότειναν τεχνικές για τη χαρτογράφηση των στόχων της οργανοληπτικής ποιότητας για καθορισμένες ενόργανες τιμές (σημεία). Επομένως, απαραίτητη είναι η έρευνα και ανάλυση η οποία θα επιτρέψει την αντιστροφή της χαρτογράφησης, ιδίως για περιπτώσεις πολλών μεταβλητών. Στο Σχήμα 3.1-1 φαίνεται ένα διάγραμμα παραγωγής με εκβολή διογκωμένων προϊόντων, μαζί με τις μεταβλητές και ιδιότητες, το οποίο μπορεί με κατάλληλη προτυποποίηση να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής καθορίζονται από ένα σύνολο ιδιοτήτων. Αυτό περιλαμβάνει τις δομικές ιδιότητες, τις ιδιότητες υφής, τις λειτουργικές ιδιότητες, τις οπτικές ιδιότητες, τις ιδιότητες προσρόφησης νερού, καθώς και τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 3-1 συνοψίζονται οι ιδιότητες των τροφίμων εκβολής.



Σχήμα 3.1-1 Διάγραμμα παραγωγής διογκωμένων προϊόντων εκβολής. Όπου ρ_a φαινόμενη πυκνότητα, ρ_t πραγματική πυκνότητα, V_s όγκος, m μάζα, d διάμετρος, L μήκος, Exp συντελεστής διόγκωσης, ε πορώδες, σ_B τάση θραύσης, ε_B παραμόρφωση στη θραύση, E μέτρο ελαστικότητας, WAI ικανότητα απορρόφησης νερού, WSI δείκτης διαλυτότητας σε νερό, OAI ικανότητα απορρόφησης ελαίου, L, a και b χρωματικές μεταβολές, α_w ενεργότητα ύδατος, Br βαθμός αμαυρώσεως, Bur καμένο, Cr τραγανότητα, H οργανοληπτική σκληρότητα, SV ειδικός όγκος, t_i χρόνος θέρμανσης, T_e θερμοκρασία θέρμανσης, F ρυθμός τροφοδοσίας, rpm ταχύτητα περιστροφής.

Πίνακας 3-1 Ιδιότητες τροφίμων εκβολής, που χαρακτηρίζουν την ποιότητά τους

Κατηγορία	Ιδιότητα
Δομικές ιδιότητες	Φαινόμενη πυκνότητα
	Πραγματική πυκνότητα
	Συντελεστής διόγκωσης
Ιδιότητες υφής	Τάση θραύσης
	Παραμόρφωση κατά τη θραύση
	Μέτρο ελαστικότητας
	Αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση
Λειτουργικές Ιδιότητες	Ικανότητα απορρόφησης νερού
	Ικανότητα διαλυτότητας σε νερό
	Ικανότητα απορρόφησης ελαίου
Θερμικές ιδιότητες	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης
	Θερμοκρασία τήξης
Οπτικές ιδιότητες	Παράγοντας L
	Παράγοντας a
	Παράγοντας b
Ενεργότητα ύδατος και χαρακτηριστικά προσρόφησης ύδατος	Ισόθερμες ροφήσεως
Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά	Εμφάνιση
	Χρώμα
	Γεύση-οσμή
	Υφή

3.2 Δομικές Ιδιότητες

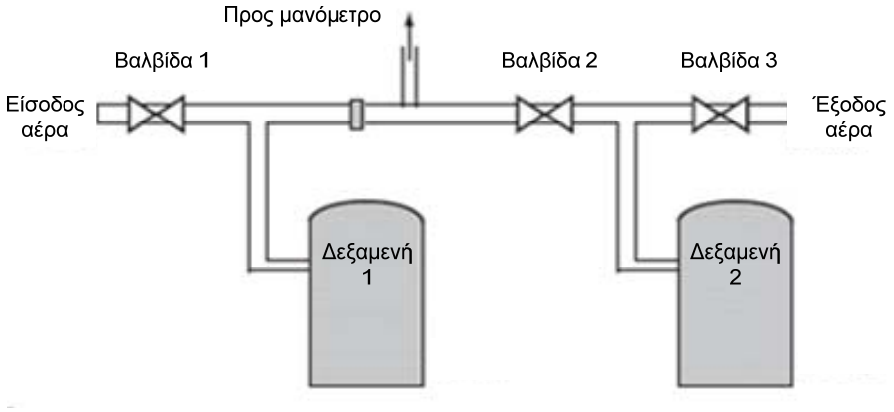
Οι δομικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως η φαινόμενη πυκνότητα, η πραγματική πυκνότητα, το πορώδες και ο συντελεστής διόγκωσης.

Η φαινόμενη πυκνότητα ενός τροφίμου περιλαμβάνει όλους του πόρους που υπάρχουν στο υλικό. Μπορεί να προσδιορισθεί, για ένα τρόφιμο που έχει ένα συγκεκριμένο σχήμα, μέσω της μάζας και του όγκου που προκύπτει από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις του (Rahman, 1995). Θεωρώντας ότι το προϊόν εκβολής έχει κυλινδρικό σχήμα, προκύπτει ότι η φαινόμενη πυκνότητα είναι:

$$\rho_a = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot L} \qquad \textbf{3-1}$$

όπου m η μάζα του τροφίμου (g), d η διάμετρος (cm) και L το μήκος του (cm).

Η πραγματική πυκνότητα ενός υλικού ή ενός σύνθετου υλικού υπολογίζεται από τις πυκνότητες των συστατικών που το αποτελούν, λαμβάνοντας υπόψη τη διατήρηση της μάζας και του όγκου. Στα τρόφιμα η πραγματική πυκνότητα είναι η πυκνότητα του υλικού χωρίς τους πόρους. Για το λόγο αυτό, πριν από τη μέτρηση της πυκνότητας του υλικού, το δείγμα πρέπει να είναι αλεσμένο, για να διασφαλισθεί ότι δεν θα παραμείνουν κλειστοί πόροι. Η πυκνότητα του υλικού μπορεί να προσδιορισθεί με διάφορες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένων της μεθόδου εκτόπισης υγρού, της μεθόδου του αερίου πυκνόμετρου, της ποροσιμετρίας υδραργύρου και της μεθόδου απορρόφησης αερίου (Michailidis, Krokida, Bisharat, Marinos-Kouris & Rahman, 2009). Η συνηθέστερη μέθοδος προσδιορισμού είναι το πυκνόμετρο αερίου. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ο αέρας, το άζωτο και το ήλιο. Από τα αναφερθέντα αέρια, το ήλιο είναι αυτό που συνήθως προτείνεται, λόγω της μικρής ατομικής του διαμέτρου. Η τεχνική αυτή εφαρμόζει την αρχή του Αρχιμήδη της εκτόπισης ρευστών για τον προσδιορισμό του όγκου. Στο Σχήμα 3.2-1 παρουσιάζεται η μέθοδος. Σύμφωνα με τη μέθοδο ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:



Σχήμα 3.2-1 Πυκνόμετρο συμπίεσης αέρα (Michailidis et al., 2009).

- Το δείγμα που πρόκειται να μετρηθεί τοποθετείται στην δεξαμενή 2 και ο αέρας τροφοδοτείται στη δεξαμενή 1, όταν η βαλβίδα 2 είναι κλειστή.
- Όταν επιτυγχάνεται η κατάλληλη πίεση, κλείνει η βαλβίδα 1 και καταγράφεται η πίεση ισορροπίας P_1.
- Κλείνει η βαλβίδα 3, ανοίγει η βαλβίδα 2 και καταγράφεται η πίεση P_3. Σε αυτές τις συνθήκες, ο όγκος του δείγματος μπορεί να μετρηθεί, ως V_s. Συγκεκριμένα, ο όγκος του δείγματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_s = V_1 \cdot \left[1 + \frac{P_3 - P_1}{P_3} \right] \qquad \textbf{3-2}$$

όπου V_1 είναι ο κενός όγκος μεταξύ των δεξαμενών 1 και 2. Η μέτρηση του όγκου των τροφίμων συνήθως γίνεται σε διάφορους τύπους εμπορικών αυτομάτων πυκνόμετρων αερίου με ήλιο. Στο Σχήμα 3.2-2 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του πολυπυκνόμετρου της εταιρίας Quantachrome. Το πυκνόμετρο προσδιορίζει την πυκνότητα του στερεού μετρώντας τη διαφορά πίεσης, όταν μια γνωστή ποσότητα ηλίου υπό πίεση αφήνεται να περάσει από έναν γνωστό όγκο αναφοράς μέσα στη κυψελίδα του δείγματος που περιέχει το προς μέτρηση υλικό. Η διαδικασία προσδιορισμού του όγκου είναι η ακόλουθη:

- Επιλέγεται ο σωστός όγκος αναφοράς, ανάλογα με τη κυψελίδα δείγματος που θα χρησιμοποιηθεί.
- Ανοίγεται η έξοδος του αερίου μέχρι να σταθεροποιηθεί η μηδενική ένδειξη.
- Κλείνει η βαλβίδα εξόδου του αερίου.
- Η βαλβίδα επιλογής στρέφεται στην ένδειξη «αναφορά».
- Η βαλβίδα εισροής αερίου ανοίγεται και όταν η βαλβίδα προσεγγίσει περίπου τα 17 psig, η βαλβίδα εισόδου του αερίου κλείνει.
- Όταν η ένδειξη σταθεροποιηθεί, καταγράφεται η πίεση P_1.
- Η βαλβίδα επιλογής στρέφεται στην ένδειξη «κυψελίδα».
- Όταν η ένδειξη σταθεροποιηθεί, καταγράφεται η πίεση P_2.
- Τέλος ανοίγεται η βαλβίδα εξόδου του αερίου αργά, για την εκτόνωση της πίεσης.
- Ο όγκος του δείγματος και η πυκνότητα του υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$V_s = V_c + V_R \cdot \left[\frac{P_1}{P_2} - 1 \right] \qquad \textbf{3-3}$$

$$\rho_t = \frac{m_s}{V_s} \qquad \textbf{3-4}$$

όπου V_C και V_R είναι οι σταθερές του μηχανήματος. Το πυκνόμετρο Quantachrome μπορεί να έχει τρεις κυψελίδες δείγματος διαφορετικού όγκου η καθεμία, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με τον όγκο του δείγματος που πρόκειται να προσδιορισθεί. Οι σταθερές της εξίσωσης 3-3 εξαρτώνται από την κυψελίδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση. Η βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται με τη χρήση μεταλλικών σφαιρών γνωστής διαμέτρου.

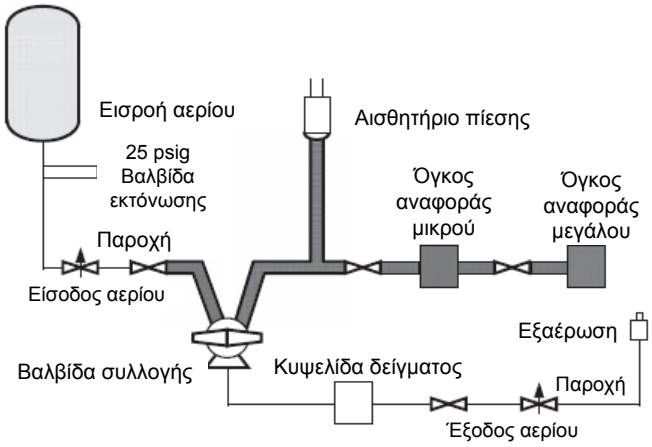
Τα προϊόντα εκβολής, συνήθως, υφίστανται άμεση διόγκωση κατά την έξοδο από τη μήτρα του εκβολέα. Η πίεση μέσα στο χιτώνιο είναι αυξημένη λόγω του περιορισμού από τη μήτρα και κυμαίνεται από 30-110 bars (Colonna et al., 1989). Κατά την έξοδο του υλικού από τη μήτρα, η πίεση μειώνεται απότομα και με αυτό τον τρόπο αποκτά την αφρώδη-κυψελοειδή δομή. Η διόγκωση, είναι κυρίως ακτινική (για κυλινδρική μήτρα) και εκφράζεται μέσω του συντελεστή διόγκωσης, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Exp = \frac{d}{d_{die}} \qquad \textbf{3-5}$$

όπου d είναι η διάμετρος του τροφίμου και d_{die} η διάμετρος της μήτρας στην έξοδο του εκβολέα.

Ένα άλλο μέγεθος που εκφράζει και περιγράφει την αφρώδη δομή των άμεσα διογκωμένων τροφίμων εκβολής είναι το πορώδες. Το πορώδες εκφράζει το κλάσμα όγκου του ελεύθερου χώρου ή αέρα στο υλικό και ορίζεται ως ο όγκος του αέρα ή του κενού όγκου προς το συνολικό όγκο. Το πορώδες μπορεί να εκτιμηθεί από τις πυκνότητες του υλικού, την φαινόμενη και την πραγματική, και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \qquad \textbf{3-6}$$

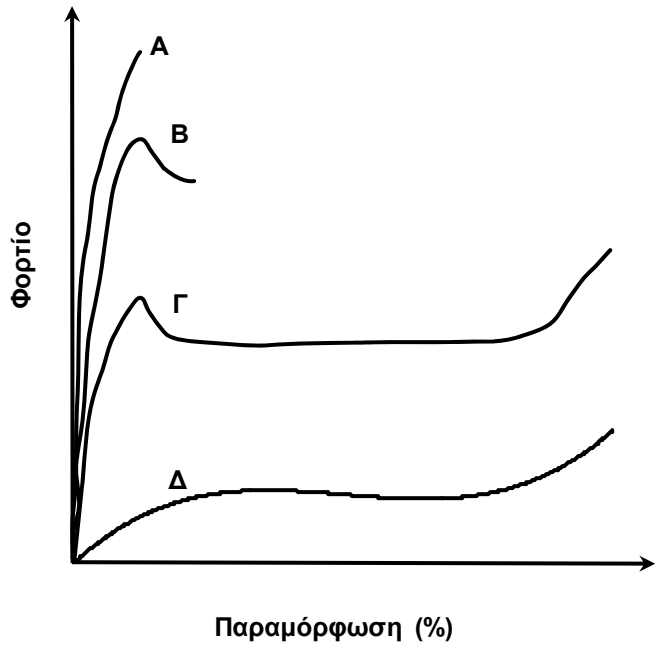


Σχήμα 3.2-2 Διάγραμμα ροής πολυπυκνόμετρου Quantachrome (Michailidis et al., 2009).

όπου ρ_a η φαινόμενη πυκνότητα και ρ_t η πραγματική πυκνότητα (Michailidis et al., 2009).

3.3 Ιδιότητες υφής

Τα δημητριακά είναι πολύπλοκα τρόφιμα και για την κατανόηση των χαρακτηριστικών υφής σημαντική είναι η μελέτη των μηχανικών τους ιδιοτήτων, καθώς αυτές μεταβάλλονται με την σύσταση και τη δομή. Ο συνδυασμός των πρωτεϊνών με το άμυλο και η προσθήκη διαφόρων συστατικών κατά την εκβολή, όπως νερό και σάκχαρα, αλλάζουν την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του συστήματος (T_g) (Levine & Slade, 1990; Levine & Slade, 1993). Η εκκίνηση της μοριακής κινητικότητας με αύξηση της θερμοκρασίας αντιστοιχεί στην αλλαγή φάσης από την υαλώδη στην ελαστική (Slade & Levine, 1993), γεγονός που εμπλέκεται στη μηχανική συμπεριφορά των βιοπολυμερών. Κατά τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και της T_g του αμύλου σίτου και αμυλοπηκτίνης, της γλουτένης και των μιγμάτων τους, ως συνάρτηση του περιεχόμενου νερού (Slade et al., 1993), βρέθηκε ότι η σκληρότητα μειώνεται περισσότερο ή λιγότερο απότομα στην υαλώδη μετάπτωση (Kalichevsky, Blanshard & Marsh, 1993a). Σε μεγάλες παραμορφώσεις η μετάπτωση από εύθραυστο σε όλκιμο σχετίζεται με την T_g. Η εύθραυστη ή όλκιμη συμπεριφορά καθορίζεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 3.3-1). Η εύθρυπτη θραύση απεικονίζεται από την κατάρρευση σε μια μέγιστη τάση (καμπύλη Α), ενώ η όλκιμη θραύση εμφανίζει ένα μέγιστο φορτίο πριν από τη κατάρρευση (καμπύλη Β). Οι άλλες δύο καμπύλες απεικονίζουν την ψυχρή διέλκυση (καμπύλη Γ) και την ελαστική συμπεριφορά, προοδευτικά πέρα από την T_g. Η διάκριση μεταξύ εύθραυστης και όλκιμης κατάρρευσης επίσης υποδεικνύεται από τις διαφορές στην ενέργεια που σπαταλάται κατά τη θραύση και την εμφάνιση της επιφάνειας θραύσης. Τα παραπάνω ισχύουν για τα ισότροπα πολυμερή. Το επόμενο στάδιο πολυπλοκότητας εμπλέκει τον προσανατολισμό των πολυμερών και την παρουσία άλλων φάσεων, δημιουργώντας μια ομάδα υλικών γνωστή ως σύνθετα (composites). Τα τρόφιμα είναι συνήθως σύνθετα περιλαμβάνοντας περισσότερα από ένα πολυμερή, παρουσία άλλων υλικών χαμηλού μοριακού βάρους και αδρανών πληρωτικών, περιλαμβανομένου του αέρα. Οι μηχανικές ιδιότητες και η δομή είναι οι βασικές δομικές μονάδες της φυσικής υφής. Αυτό προκύπτει από την ταξινόμηση των όρων υφής από τον Jowitt (1974), που περιλαμβάνει αυτούς που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των υλικών που υπόκεινται τάση ή παραμόρφωση και αυτούς που σχετίζονται με τη δομή.



Σχήμα 3.3-1 Σχέση φορτίου-παραμόρφωσης πολυμερών. Α. εύθρυπτη θραύση, Β. όλκιμη κατάρρευση, Γ. Ψυχρή διέλκυση, Δ. Ελαστική συμπεριφορά. (Ward, 1983).

Συνήθως θεωρείται ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ της οργανοληπτικής υφής και των ενόργανων μετρήσεων. Η προσέγγιση κατά Scott–Blair χωρίζει της ενόργανες μεθόδους μέτρησης της υφής σε τρεις τύπους: τις εμπειρικές, τις μιμητικές και τις θεμελιώδεις (Brennan & Jowitt, 1977; Szczesniak, 1963). Οι εμπειρικές δοκιμές έχουν αναπτυχθεί από την εφαρμογή στην πράξη και συχνά θεωρούνται αυθαίρετες, ελλιπώς ορισμένες, στερούμενες ενός απόλυτου προτύπου και είναι αποτελεσματικές μόνο για ένα περιορισμένο αριθμό τροφίμων (Bourne, 1994). Οι μιμητικές δοκιμές συχνά θεωρούνται ως ένα υποσύνολο των εμπειρικών δοκιμών, στις οποίες το τρόφιμο υπόκειται σε μια διαδικασία η οποία μιμείται τον καταναλωτή. Οι εμπειρικές δοκιμές δεν μπορούν εύκολα να εκφρασθούν με θεμελιώδεις όρους και εξαρτώνται από τη γεωμετρία της δοκιμής, την τριβή και το μέγεθος του δείγματος (Peleg, 1983). Οι θεμελιώδεις δοκιμές είναι αυστηρά καθορισμένες, συνήθως σε μονάδες μηχανικής, ενώ οι εμπειρικές δοκιμές συχνά είναι πιο επιτυχημένες από τις αντίστοιχες θεμελιώδεις. Πολλές θεμελιώδεις δοκιμές χρησιμοποιούν χαμηλές τάσεις, οι οποίες δεν προκαλούν τη θραύση του υλικού, καθώς επίσης και ευθύγραμμη κίνηση, ενώ η κίνηση των δοντιών είναι κατά μήκος ενός τόξου και είναι γρηγορότερη από τις ταχύτητες στα μηχανήματα μηχανικών δοκιμών (UTM). Οι φυσικές δοκιμές συνήθως παράγουν μοναδικές τιμές σήματος, ενώ οι καταναλωτές μπορεί να αλλάζουν τις τιμές βαθμολογίας και χειρίζονται το τρόφιμο κατά τη διάρκεια της μάσησης.

Οι δοκιμές των προϊόντων δημητριακών συνήθως στηρίζονται σε μηχανήματα μηχανικών δοκιμών (universal testing machine) και σε μερικές περιπτώσεις υπάρχει μια επικάλυψη με τις ενόργανες δόκιμες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μηχανικών ιδιοτήτων τελικά

είναι απόλυτες ιδιότητες, σε μονάδες μηχανικής, όπως η δύναμη, η δυσκαμψία και η σκληρότητα. Οι μηχανικές ιδιότητες των ιξωδοελαστικών υλικών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το ρυθμό παραμόρφωσης και την παρουσία πλαστικοποιητών. Η συμπεριφορά τους σε χαμηλές παραμορφώσεις περιγράφεται από τη γραμμική και μη-γραμμική ελαστικότητα, η οποία δεν περιλαμβάνει την κατάρρευση του υλικού. Επιπροσθέτως με τις μετρήσεις τάσης-παραμόρφωσης, η θερμομηχανική ανάλυση ή η μηχανική φασματοσκοπία επιτρέπει τη μέτρηση του πραγματικού, (storage, E′) και του φανταστικού (loss, E″) μέτρου από πειράματα ταλαντώσεων εφελκυσμού (tension) ή κάμψης. Ο λόγος E″/E′, που ορίζεται ως tanδ, εμφανίζει μέγιστο στη θερμοκρασία T_g. Τα πολυμερή μπορεί να εμφανίζουν και άλλες χαμηλότερης θερμοκρασίας μεταπτώσεις, με μικρότερες κορυφές στο tanδ και μικρές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας (Kalichevsky et al., 1993a; Slade et al., 1993; Ward, 1983).

Η συμπεριφορά σε υψηλές παραμορφώσεις μπορεί να είναι πολύπλοκη και περιλαμβάνει την πτύχωση (necking), το σημείο διαρροής ή τη θραύση. Η δύναμη και η δυσκαμψία μπορούν να προσδιορισθούν κατά τη συμπίεση, τον εφελκυσμό (tension) και τη διάτμηση. Ο προσανατολισμός των πολυμερών μπορεί να επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες. Παραδείγματος χάριν, η διέλκυση (drawing) των άμορφων ή ημικρυσταλλικών πολυμερών προκαλεί την ευθυγράμμιση των μορίων έτσι ώστε το μέτρο ελαστικότητας να εξαρτάται από την αναλογία έλξης (draw) και την κατεύθυνση τις δοκιμής. Η ευθυγράμμιση των στερεών αφρών έχει μελετηθεί, θεωρώντας ότι είναι επιμηκυμένα κελία, και βρέθηκε ότι οι μηχανικές ιδιότητες ήταν ανισότροπες, και ενισχύονται προς την κατεύθυνση της επιμήκυνσης (Huber & Gibson, 1988). Το μέτρο του Young είναι μεγαλύτερο κατά οκτώ φορές και η διαρροή ή η τάση θραύσης μεγαλύτερη κατά 2,6 φορές για τα κελία τα οποία είναι διπλάσια από το τετράγωνο της διατομής τους. Στον Πίνακα 3-2 συνοψίζονται οι ενόργανες μέθοδοι προσδιορισμού της υφής τροφίμων εκβολής.

Επίσης η υφή των τροφίμων εκβολής μπορεί να μετρηθεί με χρήση της τεχνικής ηχητικής εκπομπής (Acoustic emission) (Hayter, Kirby & Smith, 1989). Η μέτρηση αυτή στηρίζεται στην υπόθεση ότι η αίσθηση της ακοής εμπλέκεται στην αντίληψη της τραγανότητας των τροφίμων (Vickers, 1985; Vickers, 1988). Το μέσο για την εκτίμηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών, όπως η τραγανότητα, είναι η μέτρηση των ήχων που παράγονται κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του τροφίμου. Αυτό μπορεί να εφαρμοσθεί σε δείγματα που παραμορφώνονται είτε ενόργανα είτε χειροκίνητα ή κρατώντας ένα μικρόφωνο κοντά στο εξωτερικό τμήμα του αυτιού (Vickers, 1985).

Από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης λαμβάνονται μεγέθη όπως η τάση θραύσης (σ_B, kPa), η παραμόρφωση στη θραύση (ε_B) και το μέτρο ελαστικότητας (E, kPa). Το μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, και δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B} \qquad \textbf{3-7}$$

όπου σ_B η τάση θραύσης (kPa) και ε_B η αντίστοιχη παραμόρφωση (-).

Πίνακας 3-2 Ενόργανες μέθοδοι μέτρησης της υφής σε προϊόντα εκβολής (Smith, 2003).

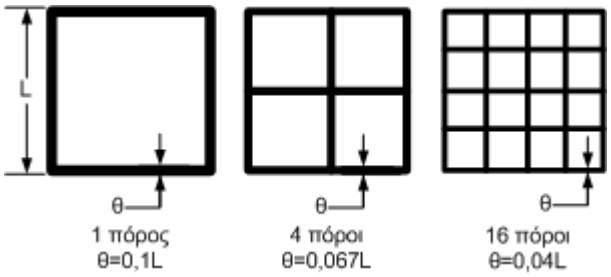
Δοκιμή	Μέτρηση [f( )][α]	Τυπικές ιδιότητες
Συμπίεση	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Μέτρο ελαστικότητας, ισχύς, παραμόρφωση θραύσης
Εφελκυσμός	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Μέτρο ελαστικότητας, ισχύς, παραμόρφωση θραύσης
Ευκαμψία (Flexure)	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Μέτρο ελαστικότητας, ισχύς, παραμόρφωση θραύσης
Πρόσκρουση (Charpy pendulum)	Απώλεια δυναμικής ενέργειας	Σκληρότητα, ισχύς
Συμπίεση	Εκτόπιση f(χρόνος)	Ισχύς
Χαλάρωση τάσης	Τάση f(χρόνος)	Μέτρο χαλάρωσης
Ολίσθηση (Creep)	Εκτόπιση f(χρόνος)	Συμμόρφωση με τις διαστάσεις ολίσθησης
Κελίο Warner–Bratzler	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Δύναμη διάτμησης, ή ‘‘ισχύς’’, έργο
Κελίο Kramer shear press	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Δύναμη θραύσης/διάτμησης μερικές φορές ως προς τη μάζα
Shortometer	Δύναμη, εκτόπιση	Δύναμη ή ‘‘σκληρότητα’’
Λεπίδα κοπής	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Δύναμη ή ‘‘ισχύς’’, έργο
Διείσδυση/διάτρηση	Δύναμη, εκτόπιση f(χρόνος)	Ισχύς
Ανάλυση υφής (TPA)	Δύναμη f(εκτόπιση)	Διάφορα χαρακτηριστικά

[α][f( )] συνάρτηση του...

Η εκβολή μπορεί να δημιουργήσει διογκωμένα τρόφιμα τα οποία έχουν μια πορώδη ανοικτή δομή. Η διόγκωση συμβαίνει και ακτινικά και αξονικά, και σε διαφορετικούς βαθμούς, εξαρτώμενους από τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του τήγματος (Alvarez-Martinez et al., 1988; Launay & Lisch, 1983). Η εξάτμιση της υγρασίας και η ψύξη των προϊόντων εκβολής προκαλούν τη μετάβαση του υλικού από την τήξη στην ελαστική φάση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον ξήρανση του προϊόντος ώστε να παραχθεί η εύθρυπτη τυπική υφή αυτών των προϊόντων.

Όμως, ο βαθμός διόγκωσης που επιτυγχάνεται κατά την εκβολή, καθώς και η ακριβής δομή του προϊόντος, ποικίλλει και εξαρτάται από τις συνθήκες εκβολής και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού που υφίσταται επεξεργασία. Αφού η διόγκωση συμβαίνει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης μυριάδων μεμονωμένων πόρων αέρα, είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι σε τέτοια προϊόντα ο χαρακτηρισμός πρέπει να γίνει με βάση τον αριθμό, το μέγεθος και την κατανομή των πόρων αυτών και επιπροσθέτως με τις γενικές φαινόμενες ιδιότητες όπως η πυκνότητα. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ότι ένας συγκεκριμένος όγκος και βάρος ενός πορώδους υλικού μπορεί να διαιρεθεί σε άπειρο αριθμό διευθετήσεων από συνεχή κελία. Σε μια ακραία περίπτωση, το υλικό μπορεί να περιλαμβάνει μια κούφια δομή που περιέχει ένα μόνο κελίο. Η προοδευτική διαίρεση του δείγματος σε «διαμερίσματα» - δύο, τρεις, τέσσερις κοκ. κενούς χώρους - θα περιλαμβάνει την κατασκευή ενός αυξανόμενου αριθμού τοιχωμάτων (Σχήμα 3.3-2). Καθώς η δομή καθίσταται συνεχώς αυξανόμενα πιο λεπτή, τα τοιχώματα των πόρων γίνονται όλο και πιο λεπτά, λόγω του μεγαλύτερού τους αριθμού, και μικρότερα, λόγω του μειούμενου αριθμού των μεμονωμένων κελίων. Στο σχηματισμό των πιθανών δομών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι δεν υπάρχει ομοιομορφία στο μέγεθος των πόρων. Για την ακριβή περιγραφή της δομής των τροφίμων εκβολής είναι απαραίτητη και

η προσεκτική μέτρηση του μεγέθους των πόρων και η στατιστική περιγραφή της κατανομής τους (Barrett, 2003).

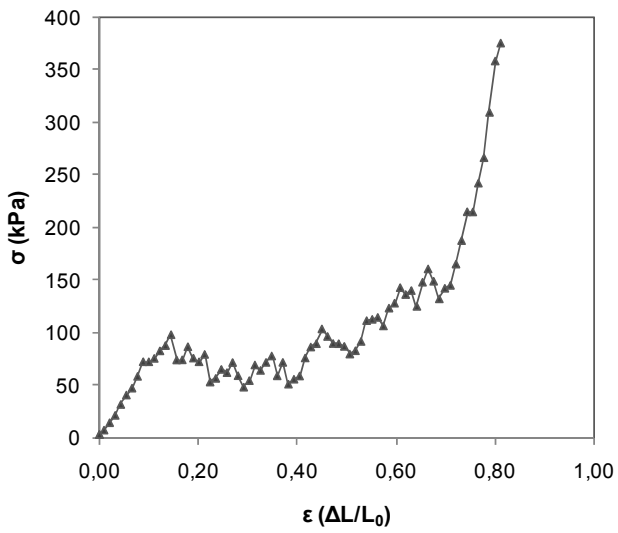


Σχήμα 3.3-2 Δισδιάστατη σχηματική αναπαράσταση της αυξανόμενης διαίρεσης μιας πορώδους δομής (εξωτερικής διάστασης «L») και σταθερή ολική και ποσοστιαία επιφάνεια πόρων (64%). Σε κάθε αναπαράσταση, οι πόροι είναι ίσου μεγέθους και ομοιόμορφα κατανεμημένοι, έτσι ώστε το πάχος των τοιχωμάτων των πόρων (θ) να μην μεταβάλλεται σε όλη τη δομή. Φαίνεται η μείωση του πάχους των τοιχωμάτων με την αύξηση του αριθμού των πόρων.

Η κυψελοειδής δομή καθορίζει την αντίληψη μας για τα προϊόντα εκβολής με βάση τις αισθήσεις. Ο αυξανόμενος αριθμός των πόρων και η διαδοχική λέπτυνση των τοιχωμάτων δημιουργεί μια πιο ντελικάτη, πιο αφρώδη δομή, η οποία είναι φωτεινότερη λόγω της σχετικά μεγαλύτερης διαφάνειας των τοιχωμάτων των πόρων. Ο αριθμός και η δύναμη των τοιχωμάτων που διαρρηγνύονται κατά τη μάσηση αυξάνει τον αριθμό και την ένταση των θραύσεων που γίνονται αντιληπτές με την ακοή. Αντίστοιχα, η συχνότητα και το μέγεθος αυτών των θραύσεων, οι οποίες γίνονται αντιληπτές οργανοληπτικά ως απότομες αλλαγές στο επίπεδο της απαιτούμενης δύναμης μάσησης, αποτελούν μια κρίσιμη ιδιότητα η οποία ονομάζεται τραγανότητα του προϊόντος.

Αυτή η χαρακτηριστική τραγανή υφή των προϊόντων εκβολής προκύπτει από την αυξητική δομική κατάρρευση η οποία συμβαίνει στα προϊόντα αυτά, ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης. Τέτοια προϊόντα όταν υφίστανται παραμόρφωση δεν καταρρέουν με μια κύρια θραύση. Λόγω της κυψελοειδούς δομής, η οποία υποδηλώνει ένα πλήθος από αλληλοσυνδεόμενες δομικές μονάδες, τα δείγματα προοδευτικά θραύονται και εμφανίζουν μια σειρά από θραύσεις που συμβαίνουν στις υπομονάδες του δικτύου. Η ευθραυστότητα είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της υφής των προϊόντων εκβολής, αλλά ο ακριβής τρόπος θραύσης ποικίλλει ευρύτατα μεταξύ των διαφόρων προϊόντων, ως συνέπεια της μεταβολής της φυσικής τους δομής.

Αυτή η αυξητική κατάρρευση της δομής των προϊόντων εκβολής οδηγεί στη δημιουργία μιας διακριτής «οδοντωτής» εμφάνισης στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 3.3-3). Η συμπίεση των κυψελοειδών στερεών δίνει μια καμπύλη τάσης παραμόρφωσης η οποία αποτελείται από τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι η γραμμική ελαστική περιοχή σε χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης, στη συνέχεια ακολουθεί η μη-αυξανόμενη περιοχή που υποδεικνύει είτε την πλαστική είτε την εύθρυπτη κατάρρευση των τοιχωμάτων των πόρων και τέλος η περιοχή αυξανομένης τάσης σε πολύ υψηλές



Σχήμα 3.3-3 Τυπική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης προϊόντος εκβολής από αραβοσιτάλευρο.

παραμορφώσεις, υποδεικνύοντας την πύκνωση (densification) της δομής (Gibson & Ashby, 1999). Τα πλαστικά κυψελοειδή υλικά εμφανίζουν μια λεία καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Τα εύθρυπτα κυψελοειδή υλικά παρουσιάζουν διακυμάνσεις λόγω της θραύσης που φαίνεται στην καμπύλη. Έχει αποδειχθεί ότι τα προϊόντα εκβολής παραμορφώνονται κατά αυτόν τον τρόπο και ότι η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης αλλάζει από εύθρυπτη σε πλαστική, όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία ισορροπίας (Barrett et al., 1992a; Barrett, Rosenberg & Ross, 1994b; Barrett, Normand, Peleg & Ross, 1992b; Rohde, Normand & Peleg, 1993).

Διάφοροι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ποσοτικοποιήσουν την ευθραυστότητα των προϊόντων εκβολής. Για το σκοπό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του οδοντωτού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης η ανάλυση fractal και η ανάλυση Fourier (Barrett et al., 1994a; Barrett et al., 1992b; Peleg & Normand, 1993). Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες τεχνικές για την ανάλυση του οδοντωτού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Αυτές περιλαμβάνουν την καταμέτρηση των αριθμών των θετικών κορυφών του οδοντωτού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης ή την καταμέτρηση των τοπικών ακρότατων της οδοντωτής περιοχής (Corradini & Peleg, 2006; Dogan & Kokini, 2007; Lazou & Krokida, 2010b).

3.4 Λειτουργικές ιδιότητες

Ο όρος λειτουργικότητα (functionality) για τα τρόφιμα ορίζεται ως το σύνολο των ιδιοτήτων, εκτός από τις θρεπτικές, οι οποίες επηρεάζουν τη χρησιμοποίηση τους σε διάφορες εφαρμογές. Οι λειτουργικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής είναι εκείνες οι φυσικοχημικές ιδιότητες που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους, όταν χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα τροφίμων, και επηρεάζουν την ποιότητα και την αποδοχή των τροφίμων. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζονται από τη λειτουργικότητα των συστατικών του τροφίμου εκβολής, δηλαδή των πρωτεϊνών, των υδατανθράκων κλπ.

Στα προϊόντα εκβολής οι σπουδαιότερες λειτουργικές ιδιότητες είναι αυτές που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του τροφίμου με το νερό και τα λιπαρά. Αυτές περιλαμβάνουν την ικανότητα απορρόφησης νερού, την ικανότητα διαλυτότητας σε νερό και την ικανότητα απορρόφησης ελαίου.

Η ικανότητα απορρόφησης νερού (ΙΑΝ - Water Absorption Index-WAI) δίνεται από τη σχέση:

$$WAI = \frac{m_g}{m_s} \qquad \textbf{3-8}$$

όπου m_g είναι η μάζα του ενυδατωμένου τροφίμου (g) και m_s είναι η μάζα του δείγματος (g).

Η ικανότητα διαλυτότητας σε νερό (ΙΔΝ – Water Solubility Index-WSI) δίνεται από τη σχέση:

$$WSI = \frac{m_{ds}}{m_s} \qquad \textbf{3-9}$$

όπου m_{ds} η μάζα των στερεών που διαλύονται στο νερό (g) και m_s είναι η μάζα του δείγματος (g).

Η ικανότητα απορρόφησης ελαίου (ΙΑΕ - Oil Absorption Index-OAI) δίνεται από τη σχέση:

$$OAI = \frac{V_{oil}}{m_s} \qquad \textbf{3-10}$$

όπου V_{oil} ο όγκος του ελαίου που έχει απορροφηθεί (mL) και m_s είναι η μάζα του δείγματος (g).

3.5 Οπτικές ιδιότητες

Οι οπτικές ιδιότητες των τροφίμων είναι αυτές που διέπουν τον τρόπο που τα τρόφιμα ανταποκρίνονται στην απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή των οπτικών μηκών κύματος και συχνοτήτων. Αυτή η περιοχή περιλαμβάνει το ορατό φως και χρώμα, καθώς και τη διάδοση, την ανάκλαση και τη διάθλαση του ορατού φωτός (Figura & Teixeira, 2007).

Οι επιλεκτική απορρόφηση διαφορετικών ποσοστών μήκους κύματος στην περιοχή του ορατού φάσματος καθορίζει το χρώμα των τροφίμων. Το χρώμα είναι μια σημαντική φυσική ιδιότητα η οποία καθορίζει την αποδοχή του τροφίμου από τους καταναλωτές. Για την περιγραφή του χρώματος έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία συστημάτων. Τα συστήματα ταξινόμησης του χρώματος (Color order systems) είναι τρισδιάστατες διευθετήσεις του χρώματος σύμφωνα με την εμφάνιση. Υπάρχουν πέντε κλίμακες ταξινόμησης του χρώματος για τα τρόφιμα: το σύστημα Munsell, το CIE, το CIE $L^*a^*b^*$ (CIELAB), το Hunter Lab και το Lovibond.

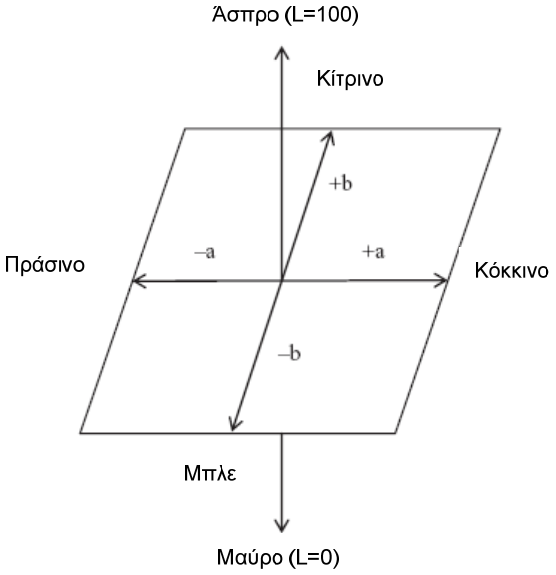
Μερικές φορές κατά την ανάλυση των τροφίμων, αντί για χημική ανάλυση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέτρηση του χρώματος, αν υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ της παρουσίας ενός χρωματισμένου συστατικού και μιας χημικής ουσίας του τροφίμου, εφ' όσον η μέτρηση του χρώματος είναι πιο απλή και ταχύτερη από ότι η χημική ανάλυση. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αν είναι επιθυμητή η παρακολούθηση των μεταβολών του χρώματος ενός προϊόντος κατά την αποθήκευση, ωρίμανση, επεξεργασία κλπ.

Για τη μέτρηση του χρώματος των τροφίμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν φασματοφωτόμετρα και χρωματόμετρα. Στα φασματοφωτόμετρα, απαιτείται η παρουσία τριών προβολέων ο καθένας με φίλτρο κόκκινο, πράσινο ή μπλε στο μπροστινό του μέρος. Με παρατήρηση προσδιορίζονται τα ποσοστά του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε κα έτσι το φασματικό χρώμα μπορεί να ορισθεί ως ποσοστό του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε (Francis, 1983). Έχουν αναπτυχθεί ειδικά σύνολα μαθηματικών εξισώσεων X, Y, και Z, ώστε να αντικαταστήσουν το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε χρώμα αντίστοιχα. Το συνταίριασμα των συναρτήσεων του χρώματος για τα X, Y, και Z είναι όλα θετικοί αριθμοί και αναπαρίστανται ως $\overline{X}$, $\overline{Y}$ και $\overline{Z}$. Τα ποσοστά των X, Y και Z που απαιτούνται ονομάζονται τριχρωματικές τιμές του χρώματος.

Λόγω του χρονοβόρου υπολογισμού των δεδομένων X, Y, και Z από το φάσμα, αναπτύχθηκαν τα τριχρωματικά χρωματόμετρα. Το κάθε χρώμα έχει ένα συγκεκριμένο αποτύπωμα ανάκλασης στο φάσμα. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε ένα τριχρωματικό χρωματόμετρο είναι κανονικά συγκρίσιμες. Απαραίτητη είναι η χρήση βαθμονόμησης με πρότυπα παρομοίων χρωμάτων με το υλικό που πρόκειται να μετρηθεί, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

Η κλίμακα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του χρώματος στα τρόφιμα είναι η Hunter Lab. Αυτό το σύστημα στηρίζεται τις μετρήσεις των L, a και b. Η τιμή του L αναπαριστά τη φωτεινότητα και μεταβάλλεται από το 0 (μαύρο) μέχρι το 100 (άσπρο). Η τιμή του a μεταβάλλεται από – a (πράσινο) μέχρι + a (κόκκινο), ενώ οι τιμές του b από –b (μπλε) έως + b (κίτρινο). Η κλίμακα Hunter προκύπτει από τις τιμές X, Y και Z.

Στο ανθρώπινο μάτι υπάρχει ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταγωγής του σήματος μεταξύ του οπτικού υποδοχέα του αμφιβληστροειδούς χιτώνα και του οπτικού νεύρου που μεταδίδει τα χρωματικά σήματα στον εγκέφαλο. Σε αυτό το στάδιο μεταγωγής, οι αποκρίσεις του κόκκινου συγκρίνονται με το πράσινο και δημιουργούν τη χρωματική διάσταση κόκκινο-πράσινο. Η πράσινη απόκριση (ή η κόκκινη και η πράσινη μαζί) συγκρίνονται με παρόμοιο τρόπο με το μπλε για τη δημιουργία της χρωματικής διάστασης κίτρινο-μπλε. Αυτές οι δύο διαστάσεις είναι συσχετισμένες με τα σύμβολα a και b, αντίστοιχα. Η τιμή του a είναι μια συνάρτηση του X και του Y, και η τιμή του b του Z και του Y. Η απαραίτητη τρίτη διάσταση, L για τη φωτεινότητα, είναι μια μη γραμμική συνάρτηση. Οι διαστάσεις της κλίμακας Hunter Lab φαίνονται στο Σχήμα 3.5-1.



Σχήμα 3.5-1 Οι διαστάσεις της κλίμακας Hunter Lab.

3.6 Ενεργότητα ύδατος και ιδιότητες προσρόφησης τροφίμων

Η ενεργότητα ύδατος και οι ιδιότητες προσρόφησης των τροφίμων είναι σημαντικές φυσικές ιδιότητες των διαφόρων προϊόντων και διεργασιών τροφίμων. Είναι σημαντική τόσο στις επεξεργασίες απομάκρυνσης νερού, όσο και για τον καθορισμό της σταθερότητας των τροφίμων. Η ενεργότητα ύδατος είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα, και ορίζεται ως ο λόγος των τάσεων ατμών του νερού στο σύστημα προς την τάση ατμών του καθαρού νερού στην ίδια θερμοκρασία, ή η σχετική υγρασία ισορροπίας (ERH) του αέρα που περικλείει το σύστημα στην ίδια θερμοκρασία. Έτσι η ενεργότητα ύδατος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$a_w = \frac{(P_w^v)_{sy}}{P_w^v} = ERH \qquad \textbf{3-11}$$

όπου α_w είναι η ενεργότητα ύδατος σε θερμοκρασία T (°C), $(P_w^v)_{sy}$ και P_w^v είναι οι τάσεις ατμών του νερού στο σύστημα και του καθαρού νερού, αντίστοιχα, σε θερμοκρασία T (°C) και *ERH* η σχετική υγρασία ισορροπίας του αέρα σε θερμοκρασία (Rahman & Sablani, 2009).

Για την μέτρηση της ενεργότητας ύδατος των τροφίμων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Αυτές βασίζονται στην ισοπιεστική μεταφορά, στην υγροσκοπικότητα των αλάτων και στη χρήση υγρομέτρων. Οι μέθοδοι προσδιορισμού της ενεργότητας ύδατος συνοψίζονται στον Πίνακα 3-3 (Rahman et al., 2009).

Πίνακας 3-3 Μέθοδοι προσδιορισμού ισόθερμων ρόφησης.

Μέθοδοι αθροιστικών ιδιοτήτων
1. Μέτρηση τάσης ατμών
2. Μέτρηση σημείου κατάψυξης
3. Μέτρηση σημείου βρασμού
Σταθμικές μέθοδοι
1. Μέθοδοι ασυνεχούς καταγραφής των μεταβολών μάζας
α. Στατικά συστήματα (ισοπιεστική μέθοδος)
β. Συστήματα εκκένωσης
γ. Δυναμικά συστήματα
2. Μέθοδοι συνεχούς καταγραφής των μεταβολών μάζας
α. Στατικού θαλάμου
β. Δυναμικά συστήματα
γ. Σύστημα εκκένωσης
Υγρομετρικά συστήματα
1. Μηχανικά υγρόμετρα
2. Υγρόμετρα υγρού και ξηρού βολβού
3. Υγρόμετρα σημείου δρόσου
4. Υγροσκοπικότητα αλάτων
5. Υγρόμετρα ηλεκτρονικού αισθητηρίου
Άλλες μέθοδοι

Τα στερεά τρόφιμα, όπως και τα προϊόντα εκβολής, είναι πολυσυστατικά και πολυφασικά σώματα, των οποίων οι ιδιότητες και η δομή εξαρτώνται από τη βιολογική τους φύση, τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται και την επεξεργασία που υφίστανται. Λόγω της βιοχημικής δραστικότητας και των μηχανικών, θερμικών και των συμπυκνωτικών τάσεων που υφίστανται κατά την επεξεργασία, αυτά δεν βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον τους και υπόκεινται σε χαλαρώσεις κατά την αποθήκευση. Η θερμοδυναμική κατάσταση του νερού στα προϊόντα αυτά χαρακτηρίζεται από την ενεργότητα αυτού, ενώ η κατάσταση μεταβάλλεται έτσι ώστε να φθάσει την ισορροπία με τον περιβάλλοντα χώρο.

Στα στερεά σώματα, τα επιφανειακά μόρια και άτομα υπόκεινται σε μη ισορροπημένες ελκτικές δυνάμεις, οι οποίες είναι κάθετες προς την επιφάνεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο η επιφάνεια του στερεού τείνει να προσδεθεί με μόρια από το περιβάλλον για να μειώσει την επιφανειακή ενέργεια και να επιτευχθεί η ισορροπία. Οι επιφανειακές δυνάμεις μπορεί να είναι δύο ειδών: φυσικές και χημικές. Στα στερεά τρόφιμα οι φυσικές δυνάμεις είναι σημαντικές και προκύπτουν από τα ακόλουθα φαινόμενα:

- Δυνάμεις διασποράς, οι οποίες προκαλούνται από τις ταχείες συντονισμένες διακυμάνσεις των πυκνοτήτων των ηλεκτρονίων των γειτονικών ατόμων, οι οποίες έχουν την τάση να βρίσκονται στην ίδια φάση. Οι δυνάμεις διασποράς είναι προσθετικές. Οι δυνάμεις διασποράς μεταξύ των ελευθέρων μορίων είναι διαφορετικές από αυτές μεταξύ της επιφάνειας και ενός μορίου της περιοχής της.

- Δυνάμεις απώθησης, οι οποίες προκύπτουν από την δια-διείσδυση των ηλεκτρονιακών νεφών των ατόμων.

- Ηλεκτροστατικές δυνάμεις που προκύπτουν όταν το στερεό έχει ιοντική φύση και το αέριο είναι πολικό. Τα άτομα υδρογόνου ενός διπόλου, που βρίσκονται στην περιφέρεια του μορίου, προσεγγίζουν την επιφάνεια και σχηματίζουν σχετικά ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου.
- Επαγωγικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις, οι οποίες προκύπτουν όταν το στερεό παράγει ηλεκτροστατικό πεδίο και τα προσροφημένα μόρια δεν διαθέτουν σταθερό δίπολο.

Οι επιφανειακές δυνάμεις προκαλούν μετανάστευση των μορίων του περιβάλλοντος αερίου ή ατμού στο στερεό και προσροφώνται στην επιφάνειά του (Atkins, 1998). Η διαδικασία της προσρόφησης συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Η διαδικασία απόσπασης των προσροφημένων μορίων από την επιφάνεια λέγεται εκρόφηση. Έτσι, το στάδιο της ισορροπίας είναι η εξισορρόπηση μεταξύ της διαδικασίας προσρόφησης και εκρόφησης (Lewicki, 2009).

Η προσρόφηση είναι μια αυθόρμητη διαδικασία που συνοδεύεται από τη μείωση της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος. Η προσρόφηση επίσης μειώνει τους βαθμούς ελευθερίας της προσροφούμενης ουσίας και έτσι η εντροπία του συστήματος μειώνεται. Άρα η προσρόφηση είναι μια εξώθερμη διεργασία. Το ποσοστό του αερίου ή ατμού που προσροφάται από το στερεό εξαρτάται από την πίεση, τη θερμοκρασία και τη φύση των ουσιών. Για ένα δεδομένο αέριο και στερεό η προσρόφηση που παρατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία δίδει μια σχέση μεταξύ του ποσοστού που προσροφάται και της μερικής πίεσης της προσροφούμενης ουσίας. Η σχέση αυτή ονομάζεται ισόθερμη προσρόφησης. Στα τρόφιμα είναι σημαντική η προσρόφηση μορίων νερού (Rahman & Labuza, 1999).

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μαθηματικές εξισώσεις για την πλήρη περιγραφή των φαινομένων ροφήσεως. Πολλές από αυτές έχουν περιορισμένη μόνο επιτυχία παρά τη μεγάλη προσπάθεια. Όπως σημειώνεται από τους Bruin και Luyben (1980) και Rizvi και Benado (1984), στη βιβλιογραφία υπάρχουν πλέον των 77 εξισώσεων με διαφόρους βαθμούς θεμελιακής εγκυρότητας. Ακολούθως θα αναφερθούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται πιο συχνά (Lewicki, 2009).

1. Εξίσωση Brunauer-Emmett-Teller (BET): Είναι μια από τις γνωστότερες εξισώσεις, η οποία δίδει καλή προσαρμογή στοιχείων για μια ευρεία περιοχή τροφίμων στην περιοχή $0{,}05<\alpha_w<0{,}45$ (Chirife & Iglesias, 1978). Η εξίσωση είναι:

$$\frac{a_w}{X(1-a_w)} = \frac{1}{X_m C} + \frac{C-1}{X_m C} a_w \qquad \textbf{3-12}$$

όπου X η περιεκτικότητα υγρασίας (kg H_2O/kg ξηρών στερεών), X_m η περιεκτικότητα υγρασίας μονοστιβάδας (kg H_2O/kg ξηρών στερεών) και C η σταθερά η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και σχετίζεται με τη θερμότητα προσροφήσεως του νερού στα σωματίδια.

2. Εξίσωση Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB): Η εξίσωση GAB δίδει καλύτερη προσαρμογή από την BET σε μια ευρύτερη περιοχή περιεκτικοτήτων υγρασίας. Η εξίσωση είναι:

$$X = \frac{X_m C k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)} \qquad \textbf{3-13}$$

Η εξίσωση GAB είναι μία εξίσωση τριών παραμέτρων με σταθερές k, C και X_m. Οι σταθερές C και X_m είναι όμοιες ως προς τη σημασία με την εξίσωση BET. Η σταθερά k είναι μία τρίτη παράμετρος η οποία βελτιώνει την προσαρμογή σε μια ευρύτερη περιοχή περιεκτικοτήτων υγρασίας από την BET.

Οι παράμετροι της εξισώσεως GAB έχουν φυσική σημασία και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία μέσω σχέσεων μορφής Arrhenius. Η παράμετρος k είναι περισσότερο εντροπική, η παράμετρος C περισσότερο ενθαλπική (van den Berg, 1985) και η τιμή της καθορίζει τη σιγμοειδή μορφή της ισοθέρμου. Η παράμετρος X_m (υγρασία μονοστιβάδος), επίσης, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για τις παραμέτρους αυτές έχουμε:

$$k = k_o \exp\left(\frac{H_v - H_n}{RT}\right) \qquad \textbf{3-14}$$

$$C = C_o \exp\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right) \qquad \textbf{3-15}$$

$$X_m = X_{mo} \exp\left(\frac{H}{RT}\right) \qquad \textbf{3-16}$$

όπου H_v η ενθαλπία συμπυκνώσεως του καθαρού νερού, kJ/mole, H_m και H_n μοριακές ενθαλπίες μονοστιβάδος και πολυστιβάδος αντιστοίχως, kJ/mole, R σταθερά των αερίων και T απόλυτη θερμοκρασία.

3. Εξίσωση Halsey (1948; 1952) η οποία χρησιμοποιήθηκε σε λαχανικά, προϊόντα γάλακτος, προϊόντα κρέατος, και σε εύρος ενεργότητας ύδατος $0{,}1<\alpha_w<0{,}8$.

$$a_w = \exp\left(-\frac{A}{RT}\left(\frac{X}{X_m}\right)^B\right) \qquad \textbf{3-17}$$

όπου A και B σταθερές.

4. Εξίσωση Henderson (1952), η οποία χρησιμοποιήθηκε σε φρούτα και πρωτεΐνες και περιοχή α_w 0-1.

$$1 - a_w = \exp\left[-ATX^B\right] \qquad \textbf{3-18}$$

όπου A και B σταθερές.

5. Εξίσωση Chung and Pfost (1967), με χρήση σε προϊόντα σιτηρών και $0,3<\alpha_w<0,7$.

$$\ln a_w = -\frac{A}{RT}\exp[-BX] \qquad \textbf{3-19}$$

6. Εξίσωση Oswin (1946), η οποία χρησιμοποιήθηκε σε πρωτεΐνες, αμυλούχα προϊόντα και προϊόντα κρέατος, και $0,3<\alpha_w<0,8$.

$$X = A\left[\frac{a_w}{1-a_w}\right]^n \qquad \textbf{3-20}$$

7. Εξίσωση Kühn (1964), η οποία ισχύει για $0,1< \alpha_w<0,8$.

$$X = \frac{A}{\ln a_w} + B \qquad \textbf{3-21}$$

8. Εξίσωση Smith (1947), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τρόφιμα και ομογενή υλικά, με $0,6<\alpha_w<0,9$.

$$X = A - B\ln(1-a_w) \qquad \textbf{3-22}$$

Μετά διόρθωση ως προς τη διόγκωση ισχύει για $0,3<\alpha_w<0,9$,

$$\frac{X}{1+X} = a - B\ln(1-a_w) \qquad \textbf{3-23}$$

9. Εξίσωση Iglesias και Chirife (1982), η οποία ισχύει ιδιαιτέρως για σταφίδες και $0,3<\alpha_w<0,8$.

$$X = B_1\left[\frac{a_w}{1-a_w}\right] + B_2 \qquad \textbf{3-24}$$

Προηγουμένως, οι Iglesias και Chirife (1978) ανέπτυξαν μια καθαρώς εμπειρική εξίσωση, η οποία ισχύει για $0,1<\alpha_w<0,8$ και είναι δοκιμασμένη για πολλά φρούτα.

$$X = \frac{\exp[2(Aa_w + B)] - X_{0,5}}{2[\exp(Aa_w + B)]} \qquad \textbf{3-25}$$

με $X_{0,5}$=υγρασία για a_w=0,5.

Για τρόφιμα με υψηλή περιεκτικότητα σακχάρου οι Iglesias, Chirife και Viollaz (1976), ανέπτυξαν την εξίσωση:

$$\ln\left(X + X^2 + X_{0,5}\right) = Aa_w + B \qquad \textbf{3-26}$$

10. Εξίσωση Chen (1971), η οποία χρησιμοποιήθηκε για προϊόντα κρέατος, πρωτεΐνες, αμυλούχα προϊόντα, λαχανικά και σιτηρά και περιοχή a_w 0-1.

$$\ln a_w = k_1 + k_2 \exp(k_3 X) \qquad \textbf{3-27}$$

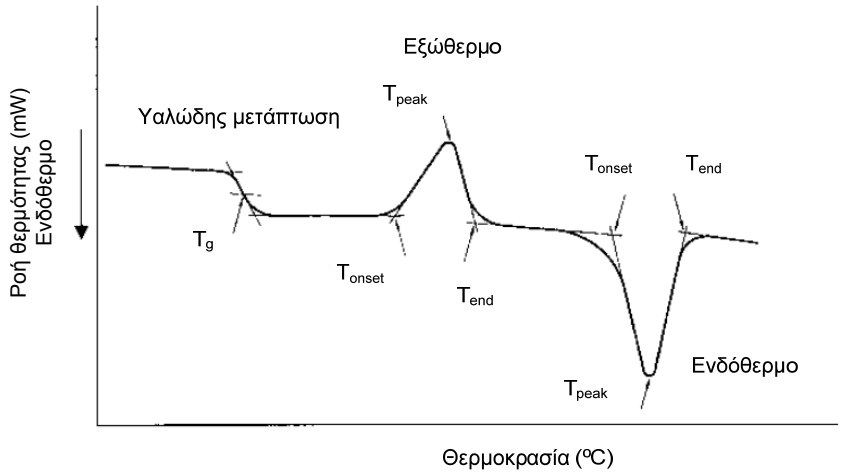
3.7 Μεταπτώσεις φάσεων τροφίμων εκβολής

Οι μεταπτώσεις φάσεως είναι μεταβολές της καταστάσεως των υλικών οι οποίες συμβαίνουν σε καθορισμένες θερμοκρασίες. Τέτοιες περιλαμβάνουν την τήξη (στερεό προς υγρό), την κρυστάλλωση (υγρό προς στερεό), την εξάτμιση (υγρό προς αέριο) και τη συμπύκνωση (αέριο προς υγρό). Πολλά υλικά, συμπεριλαμβανομένων και των τροφίμων, δεν είναι κρυσταλλικά, όμως μπορεί να παρουσιάζουν τις ιδιότητες των στερεών ή των υγρών. Τα μη κρυσταλλικά υλικά είναι άμορφα υλικά, δηλαδή τα μόριά τους είναι διατεταγμένα τυχαία. Τα υλικά αυτά συχνά είναι υπερψυγμένα υγρά ή στερεά. Τα υπερψυγμένα υγρά συχνά καλούνται 'ελαστικά' και τα στερεά 'ύαλοι'. Η μετατροπή μεταξύ των υπερψυγμένων υγρών και στερεών καταστάσεων συμβαίνει σε μια περιοχή θερμοκρασίας και η μετάπτωση ονομάζεται 'υαλώδης μετάπτωση' (glass transition).

3.7.1 Υαλώδης μετάπτωση

Οι μεταπτώσεις φάσεων των τροφίμων εκβολής μπορούν να μελετηθούν με διάφορες τεχνικές. Η θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης (DSC) χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών που αντιστοιχούν στις θερμικά επαγόμενες μεταπτώσεις (υαλώδης, τήξη, ζελατινοποίηση), σε περιοχές θερμοκρασιών και υγρασίας παρόμοιες με αυτά που επικρατούν κατά τη διάρκεια της εκβολής. Η βάση για τη θερμοδυναμική μελέτη των βιοπολυμερών είναι ότι μπορούν να προσδιορισθούν τα σχετικά αρχικά και τελικά στάδια και να μετρηθούν οι ενεργειακές διαφορές μεταξύ αυτών των σταδίων χρησιμοποιώντας το θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης. Η σύγκριση των διαφόρων τελικών σταδίων που προκύπτουν από τις διάφορες συνθήκες εκβολής οι οποίες ξεκινούν από το ίδιο αρχικό στάδιο επιτρέπει την πρόβλεψη της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων της διεργασίας στο σχηματισμό νέων δομών και υφών. Επιπρόσθετα, μπορούν να αξιολογηθούν τα πολύπλοκα συστήματα μεμονωμένων βιοπολυμερών, καθώς και η αλληλεπίδρασή τους σε μακρομοριακά συγκροτήματα (Kaletunç & Breslauer, 2003).

Τα άλευρα των δημητριακών και των οσπρίων είναι μερικώς κρυσταλλικά βιοπολυμερή συστήματα, περιέχοντας κυρίως άμυλο, πρωτεΐνες και λιπίδια. Ως μερικώς κρυσταλλικά πολυμερή, τα άλευρα αυτά επιδεικνύουν τις τυπικές θερμικές μεταπτώσεις των άμορφων πολυμερών και των κρυσταλλικών υλικών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7-1. Η υαλώδης μετάπτωση παρατηρείται για τις μη κρυσταλλικές περιοχές των μερικώς κρυσταλλικών πολυμερών, όπως είναι το άμυλο και οι πρωτεΐνες (Eisenberg, 1984; Zelenzak & Hoseney, 1987). Το θερμοκρασιακό εύρος της υαλώδους μετάπτωσης στο οποίο παρατηρείται το «ξεπάγωμα» των μοριακών κινήσεων, συμπεριλαμβανομένων των περιστροφικών κινήσεων, εξαρτάται από τη φυσικοχημική δομή των μορίων και τις αλληλεπιδράσεις τους.



Σχήμα 3.7-1Τυπική καμπύλη DSC για μερικώς κρυσταλλικά υλικά.

3.7.1.1 Εξάρτηση από το μοριακό βάρος

Η αύξηση του μοριακού βάρους αυξάνει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Sperling, 1992). Για ομόλογες σειρές γραμμικών πολυμερών έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές εξισώσεις που εκφράζουν την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ως συνάρτηση του μοριακού βάρους του πολυμερούς (Εξίσωση Fox and Flory (1950)) ή του βαθμού πολυμερισμού (Ueberreiter & Kanig, 1952):

$$T_g = T_g(\infty) - \frac{K}{M_n} \qquad \textbf{3-28}$$

όπου $T_g(\infty)$ είναι η τιμή της T_g όταν το μοριακό βάρος τείνει στο άπειρο, K είναι σταθερά και M_n είναι ο αριθμός του μέσου μοριακού βάρους.

$$\frac{1}{T_g} = \frac{1}{T_g^0} + \frac{a}{DP} \qquad \textbf{3-29}$$

όπου T_g^0 είναι το όριο του υψηλού μοριακού βάρους για την T_g, α είναι σταθερά και DP είναι ο βαθμός πολυμερισμού.

3.7.1.2 Εξάρτηση από τη χημική δομή

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των συνθετικών πολυμερών με διαφορετικές φυσικές και χημικές δομές φαίνεται να είναι χαρακτηριστική του κάθε άνυδρου υλικού (Sperling, 1992). Αν και έχει διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ του μοριακού βάρους και της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης για τους υδατάνθρακες, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των υδατανθράκων παρόμοιου μοριακού βάρους αλλά διαφορετικής χημικής δομής διαφέρει (Slade & Levine, 1994). Συγκεκριμένα έχουν βρεθεί διαφορές στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μεταξύ της γλυκόζης και της φρουκτόζης (και οι δύο ΜΒ: 180.2 g/gmole) και μεταξύ της μαλτόζης, της σακχαρόζης και της λακτόζης (όλα ΜΒ: 342.2 g/gmole).

Κατά τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης μερικών βιοπολυμερών υψηλού μοριακού βάρους παρατηρούνται δυσκολίες, γιατί η υαλώδης μετάπτωση πραγματοποιείται σε μια ευρεία περιοχή με μικρή μεταβολή στη θερμοχωρητικότητα. Επίσης σε μερικά από αυτά τα βιοπολυμερή μπορεί να συμβεί θερμική διάσπαση πριν την υαλώδη μετάπτωση (Roos & Karel, 1991). Αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να ξεπερασθούν με την μέτρηση της υαλώδους μετάπτωσης των ολιγομερών και την ακόλουθη προεκβολή για υψηλού μοριακού βάρους ή μέσω της μελέτης της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης ως συνάρτηση του περιεχόμενου διαλύτη και την ακόλουθη προεκβολή σε μηδενικό ποσοστό υγρασίας. Στην τελευταία προσέγγιση οι τιμές της υαλώδους μετάπτωσης θα πρέπει να μετρηθούν όσο το δυνατό πιο κοντά στην περιοχή του ξηρού υλικού, επειδή η κλίση της καμπύλης της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης συναρτήσει της υγρασίας μπορεί να είναι πιο απότομη στις περιοχές χαμηλών υγρασιών. Σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης δεν προσδιορίζεται σε αρκετά χαμηλές τιμές υγρασίας τότε η τιμή της υποεκτιμάται.

3.7.1.3 Εξάρτηση από τη θερμική ιστορία

Τόσο η θερμοκρασία όσο και το μέγεθος της υαλώδους μετάπτωσης είναι σημαντικά. Η υαλώδης μετάπτωση σχετίζεται με την αύξηση της ενέργειας του συστήματος, η οποία εκδηλώνεται ως αύξηση της θερμοχωρητικότητας. Μικροσκοπικά η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι είτε η θερμοκρασία του υγρού του οποίου οι κινήσεις με μεγάλα πλάτη σταματούν κατά τη διάρκεια της ψύξης, είτε η θερμοκρασία του στερεού κατά τη θέρμανση του οποίου οι κινήσεις με μεγάλα πλάτη ξεκινούν (Wunderlich, 1990). Για να παρατηρηθεί η υαλώδης μετάπτωση μέσα στον πειραματικό χρόνο θα πρέπει να ταιριάζει με το χρόνο που απαιτείται ώστε τα μόρια να προσαρμοσθούν στις νέες συνθήκες. Εάν ο πειραματικός χρόνος είναι πολύ σύντομος ώστε τα μόρια να προσαρμοσθούν στις μεταβολές της θερμοκρασίας, παρατηρείται η υαλώδης μετάπτωση. Στη θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης μια υπερβολικά γρήγορή σάρωση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και την υποεκτίμησή της κατά τη διάρκεια της ψύξης. Επιπρόσθετα, επειδή δεν υφίσταται ισορροπία, αν οι ύαλοι σχηματίζονται με διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης, καθένας θα έχει διαφορετικό στάδιο ελεύθερης ενέργειας. Όμοιοι ύαλοι με πανομοιότυπη χημική δομή και μοριακό βάρος αλλά διαφορετική θερμική ιστορία μπορεί να εμφανίζουν διαφορετικές τιμές υαλώδους μετάπτωσης (Kaletunç et al., 2003).

3.7.1.4 Επίδραση της κρυσταλλικότητας

Στα συνθετικά πολυμερή η κρυσταλλικότητα έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, οδηγώντας στη μέτρηση μιας φαινόμενης θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης σε μερικώς κρυσταλλικά πολυμερή. Στα ημικρυσταλλικά πολυμερή η μέτρηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης φαίνεται να είναι μεγαλύτερη, γιατί η μοριακή κινητικότητα στις άμορφες περιοχές περιορίζεται από τις γειτονικές κρυσταλλικές περιοχές. Στα υψηλώς κρυσταλλικά πολυμερή η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υπερκαλύπτεται (Sperling, 1992). Μπορεί να

παρατηρηθεί ύπαρξη πολλών θερμοκρασιών υαλώδους μετάπτωσης, από τις οποίες η μια θα οφείλεται στην πλήρως άμορφη φάση και θα συσχετίζεται με το μοριακό βάρος και η άλλη με υψηλότερη φαινόμενη τιμή, η οποία θα εξαρτάται από το βαθμό κρυσταλλικότητας και τη μορφολογία (Boyer, 1977).

Κατά τη διάρκεια της εκβολής δημιουργείται ιξώδες τήγμα. Με την έξοδο του τήγματος από τη μήτρα, αυτό ψύχεται και απότομα μεταβαίνει στην στερεή φάση. Ο χρόνος μετάβασης του υλικού στη στερεή φάση είναι συντομότερος από το χρόνο που απαιτείται για την κρυστάλλωση. Κατά συνέπεια η θερμή εκβολή παράγει προϊόντα τα οποία βρίσκονται στην υαλώδη φάση. Τα άμορφα χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής στην υαλώδη φάση μπορούν να μελετηθούν με περίθλαση των ακτινών Χ, με μικροσκοπία πολωμένου φωτός και θερμιδομετρικές τεχνικές (Kaletunc & Breslauer, 1993). Η τεχνική της περίθλασης των ακτινών Χ χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της απώλειας της κρυσταλλικότητας του αμύλου και των αλεύρων δημητριακών ως αποτέλεσμα της εκβολής. Η κρυσταλλική δομή των αμυλούχων υλικών καταστρέφεται μερικώς ή πλήρως, ανάλογα με την αναλογία αμυλόζη/αμυλοπηκτίνη και τις παραμέτρους της διεργασίας (Kaletunc et al., 1993; McPherson, Bailey & Jane, 2000).

3.7.1.5 Πλαστικοποίηση από την υγρασία

Στα τρόφιμα με βάση τα δημητριακά το νερό δρα ως πλαστικοποιητής. Η πλαστικοποίηση από το νερό προκαλεί απώλεια της τραγανής υφής καθώς και συρρίκνωση των τροφίμων εκβολής από άλευρα δημητριακών, η οποία επηρεάζει την ποιότητα και το χρόνο ζωής του τροφίμου (Kaletunç & Breslauer, 1996). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θερμικής σταθερότητας, με σκοπό την αποτίμηση της ποιότητας και της σταθερότητας των τροφίμων εκβολής, ειδικά σε αυτά που έχουν χαμηλή ή ενδιάμεση περιεκτικότητα υγρασίας. Το υλικό κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης βρίσκεται στην υαλώδη φάση, ενώ πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης στην ελαστική φάση. Η μεγάλη ευαισθησία της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τον πλαστικοποιητή (το νερό προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης), ειδικά στην περιοχή περιεκτικοτήτων υγρασίας 0-10%, υπογραμμίζει τη σπουδαιότητα του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών ροφήσεως του υλικού. Η πλαστικοποιητική δράση της αυξανόμενης υγρασίας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι πανομοιότυπη με την επίδραση της αυξανομένης θερμοκρασίας σε σταθερή περιεκτικότητα υγρασίας. Το γεγονός αυτό καθιστά κρίσιμη την επιλογή των συνθηκών αποθήκευσης, ειδικά για τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν χαμηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ακόμα και σε ξηρές συνθήκες.

Για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης μιγμάτων αναμίξιμων πολυμερών έχουν προταθεί διάφορες εμπειρικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης μιγμάτων πολυμερών και νερού. Η εμπειρική εξίσωση Gordon-Taylor συσχετίζει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης με τη σύσταση μιγμάτων αναμίξιμων πολυμερών (Gordon & Taylor, 1952):

$$T_g = \frac{w_1 \cdot T_{g1} + k \cdot w_2 \cdot T_{g2}}{w_1 + k \cdot w_2} \qquad \textbf{3-30}$$

όπου w και T_g είναι το κλάσμα μάζας και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, αντίστοιχα, και k είναι εμπειρική σταθερά. Η εξίσωση Gordon-Taylor έχει χρησιμοποιηθεί για τη πρόβλεψη της πλαστικοποιητικής δράσης του νερού άμορφων υλικών (Kalichevsky, Jaroszkiewicz & Blanshard, 1993b; Roos et al., 1991).

Η εξίσωση Couchman–Karasz (Couchman & Karasz, 1978) προβλέπει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μιγμάτων συμβατών πολυμερών από τις ιδιότητες των καθαρών συστατικών βάσει της θερμοδυναμικής θεωρίας της υαλώδους μετάπτωσης, κατά την οποία η εντροπία ανάμιξης θεωρείται ότι είναι συνεχής στην υαλώδη μετάπτωση.

$$T_g = \frac{w_1 \cdot \Delta C_{p1} \cdot T_{g1} + w_2 \cdot \Delta C_{p2} \cdot T_{g2}}{w_1 \cdot \Delta C_{p1} + w_2 \cdot \Delta C_{p2}} \qquad \textbf{3-31}$$

όπου w, Tg, και ΔCp είναι το κλάσμα μάζας, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και η μεταβολή της θερμοχωρητικότητας στην υαλώδη μετάπτωση κάθε καθαρού συστατικού, αντίστοιχα. Η εξίσωση Couchman–Karasz επίσης εφαρμόζεται στην πρόβλεψη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης άμορφων υλικών, που έχουν πλαστικοποιηθεί από την υγρασία, με βάση τις ιδιότητες του στερεού και του νερού. Η εξίσωση απαιτεί τη γνώση των θερμοκρασιών υαλώδους μετάπτωσης και των μεταβολών της θερμοχωρητικότητας του στερεού και του νερού.

3.7.2 Τήξη και ζελατινοποίηση

Η τήξη και η ζελατινοποίηση είναι μεταπτώσεις φάσεως οι οποίες σχετίζονται με το μετασχηματισμό των κρυσταλλικών περιοχών του μερικώς κρυσταλλικού αμύλου σε άμορφο υγρό. Οι ενδόθερμες αυτές μεταπτώσεις μπορούν να ανιχνευθούν με τη θερμιδομετρία διαφορικές σάρωσης. Η θερμική σταθερότητα της κρυσταλλικής φάσης του αμύλου μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του νερού του συστήματος. Επιπρόσθετα, ενώ σε χαμηλά (<20%) και υψηλά επίπεδα (>65%) υγρασίας μπορεί να ανιχνευθεί μόνο μια ενδόθερμη κορυφή για άμυλο ελεύθερο λιπιδίων, σε ενδιάμεσα επίπεδα υγρασίας υπάρχει πιθανότητα να παρατηρηθούν περισσότερες από μια ενδόθερμες κορυφές. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί για άμυλο ρυζιού, πατάτας και σίτου (Biliaderis, Page, Maurice & Juliano, 1986; Donovan, Lorenz & Kulp, 1979; Kaletunç et al., 1996).

Οι ενθαλπίες ζελατινοποίησης θα πρέπει να ερμηνευθούν με προσοχή όταν χρησιμοποιούνται ως δείκτες της κρυσταλλικότητας του αμύλου, γιατί αναπαριστούν καθαρές θερμοδυναμικές ποσότητες διαφορετικών γεγονότων: της διόγκωσης του αμύλου και της τήξης των κρυστάλλων (ενδόθερμη) και της ενυδάτωσης και ανακρυστάλλωσης (εξώθερμη). Επιπροσθέτως, οι άμορφες περιοχές συμβάλουν σημαντικά στην τιμή της ΔH. Οι ενθαλπίες ζελατινοποίησης χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της μετατροπής του αμύλου ως αποτέλεσμα της εκβολής. Ο βαθμός

μετατροπής του αμύλου μπορεί να περιγραφεί από τη μείωση της περιοχής της κορυφής ζελατινοποίησης πριν και μετά την εκβολή (Wulansari, Mitchell & Blanshard, 1999).

3.7.3 Σύμπλοκα αμυλόζης - λιπιδίων

Τα λιπίδια υπάρχουν φυσικά στα άλευρα των αμυλούχων σπόρων σε διάφορα ποσοστά και εκτός αυτού, προστίθενται κατά τη διάρκεια της εκβολής, κυρίως ως γαλακτωματοποιητές. Η προσθήκη γαλακτωματοποιητών μεταβάλει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων της διόγκωσης, της κατανομής και του μεγέθους των πόρων και της υφής (Moore, 1994; Ryu & Walker, 1994). Τα λιπίδια σχηματίζουν σύμπλοκα με την αμυλόζη κατά την εκβολή (Galloway, Biliaderis & Stanley, 1989). Οι παράμετροι της διεργασίας επηρεάζουν το σχηματισμό των προϊόντων, των οποίων η δομή και οι φυσικές ιδιότητες εξαρτώνται από την ένταση της κατεργασίας και την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών για την αντίδραση των διαφόρων συστατικών. Κάθε τύπος λιπιδίου παρουσιάζει μια διακριτή επίδραση στις ιδιότητες του υλικού κατά τη διάρκεια της εκβολής, η οποία απαιτεί τροποποίηση των λειτουργικών παραμέτρων της διεργασίας.

Η θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης χρησιμοποιείται για τη μελέτη του σχηματισμού των συμπλόκων λιπιδίων-αμυλόζης καθώς και για τον χαρακτηρισμό των συμπλόκων που σχηματίζονται κατά τη διάλυση και κατά την εκβολή (Guzman, Lee & Chichester, 1992). Η παρουσία των συμπλόκων αμυλόζης-λιπιδίων εμφανίζεται στα θερμογραφήματα ως μια αντιστρεπτή ενδόθερμη κορυφή. Η θερμική σταθερότητα, το σχήμα και η ενέργεια που σχετίζεται με μετάπτωση επηρεάζεται από την παρουσία νερού στα προϊόντα εκβολής.

Ο σχηματισμός του συμπλόκου αμυλόζης-λιπιδίων επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά ποιότητας και τα θρεπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής. Τα σύμπλοκα αμυλόζης-λιπιδίων εμφανίζουν πολύ χαμηλή επιδεκτικότητα στην υδρόλυση από την αμυλάση in vitro. Η υδρόλυση των συμπλόκων σε αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης ενζύμου και χρόνου επώασης έχει ως αποτέλεσμα χαμηλούς ρυθμούς χώνευσης (Kaletunç et al., 2003). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η διάσπαση της κοκκώδους δομής και η κλασμάτωση που οδηγεί στην αύξηση της διαλυτοποίησης του αμύλου κυριαρχούν κατά τη χώνευση του αμύλου, παρά ο σχηματισμός συμπλόκων αμυλόζης-λιπιδίων.

3.8 Ποιότητα - Οργανοληπτικές ιδιότητες

Η ποιότητα των τροφίμων μπορεί να ορισθεί ως το σύνολο εκείνων των χαρακτηριστικών που καθορίζουν το βαθμό αποδοχής από τον καταναλωτή. Ο βαθμός αποδοχής συνήθως γίνεται αντιληπτός με τις αισθήσεις. Παρ' όλα αυτά, εκτός από τις οργανοληπτικές ιδιότητες στην αποδεκτή ποιότητα ενός προϊόντος συνεισφέρει ένας αριθμός συντελεστών. Η μικροβιολογική ακεραιότητα, άλλοι συντελεστές ασφάλειας και το θρεπτικό περιεχόμενο είναι πολύ σημαντικά. Η εικόνα με το σήμα/μάρκα, η τιμή και η ανταγωνιστική τοποθέτηση του προϊόντος επηρεάζουν όλα μαζί την αποδοχή του από τον καταναλωτή (Τζιά, 2009).

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά αποτελούν βασικό κριτήριο και είναι εξίσου σημαντικά κατά την εκτίμηση της ποιότητας των τροφίμων, γιατί καθορίζουν και το βαθμό αρεσκείας και αποδοχής των τροφίμων από τους καταναλωτές. Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα διαφέρουν στα προμαγειρεμένα προϊόντα και ανάλογα με τις πρώτες ύλες και τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται και επίσης τις συνθήκες της διεργασίας που εφαρμόσθηκαν. Η εμφάνιση, το χρώμα, η γεύση-οσμή και η συνεκτικότητα συνήθως εκτιμώνται με τη χρήση βαθμολογικής κλίμακας.

Μόνο ο άνθρωπος μπορεί να κατανοήσει και να μετρήσει πλήρως τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων και συγχρόνως να μετατρέψει τη μέτρηση σε αποκρίσεις που έχουν έννοια. Η οργανοληπτική (μέσω των αισθήσεων) εκτίμηση των τροφίμων έχει ορισθεί από το Sensory Evaluation Division του IFT ως: "ο *επιστημονικός κλάδος που χρησιμοποιείται για να προκαλέσει, να μετρήσει, να αναλύσει και να ερμηνεύσει εκείνες τις αντιδράσεις στα χαρακτηριστικά των τροφίμων και των υλικών όπως αυτά γίνονται αντιληπτά μέσω των αισθήσεων της όρασης, της οσμής, της γεύσης, της αφής και της ακοής*" (Poste, Mackie, Butler & Larmond, 1991). Οι αποκρίσεις, των σύνθετων εντυπώσεων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των αισθήσεων, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ποιότητας των τροφίμων κατά τον έλεγχό της, την ανάπτυξη νέων προϊόντων και σε αρκετές άλλες περιπτώσεις. Η οργανοληπτική εκτίμηση και αξιολόγηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από καταναλωτές ή από επιτροπές εκπαιδευμένων δοκιμαστών εξαρτωμένου από το είδος της πληροφορίας που επιδιώκεται ή απαιτείται (Poste et al., 1991). Έτσι χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, ανάλογα με τα υποβαλλόμενα ερωτήματα, και περιλαμβάνουν την περιγραφική επιτροπή εκπαιδευμένων δοκιμαστών, την περιγραφική επιτροπή εξειδικευμένων (expert) δοκιμαστών και την επιτροπή καταναλωτών (Stone & Sidel, 1995).

Καθώς η σύνθεση, ο εξοπλισμός παραγωγής και οι συνθήκες λειτουργίας επηρεάζουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των διογκωμένων προϊόντων σνακ, η οργανοληπτική αξιολόγηση των προϊόντων αυτών απαιτεί μεγάλη προσοχή ώστε να προκύψει προϊόν που θα καλύπτει τις προτιμήσεις των καταναλωτών. Εφ' όσον αυτές ποικίλουν με την ομάδα των καταναλωτών απαιτείται μοναδικός σχεδιασμός.

Η δημιουργία γεύσης και οσμής κατά τη θερμή εκβολή των δημητριακών οφείλεται στην επιτέλεση θερμικά βοηθούμενων αντιδράσεων, όπως η αντίδραση Maillard και η υποβάθμιση λιπιδίων και βιταμινών. Πρέπει να σημειωθεί ότι περισσότερες από 220 ενώσεις συμβάλλουν στη διαμόρφωση της γεύσης-οσμής των προϊόντων αυτών. Η γεύση-οσμή μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή των παραμέτρων της εκβολής (χρόνος, θερμοκρασία και υγρασία) (Bredie et al., 1998). Εκτός αυτών, η προσθήκη γευστικών-οσμηρών ενώσεων, ιδίως μετά την εκβολή διαμορφώνουν τη γεύση-οσμή του τελικού προϊόντος.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η οργανοληπτική αξιολόγηση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ανάπτυξης και αριστοποίησης ενός διογκωμένου προϊόντος εκβολής, αφού επηρεάζει την αποδοχή και την οικονομική δυνατότητα παραγωγής. Ίσως να αποτελεί τη δαπανηρότερη φάση (σε χρήμα και χρόνο) του όλου κύκλου ανάπτυξης ενός προϊόντος.

Η αναλυτική εκτίμηση κατά τη βελτιστοποίηση των προϊόντων χρησιμοποιεί εφικτές μεθόδους, οι οποίες είναι και διαθέσιμες και ακριβείς. Η επιλογή γίνεται με βάση τη διεργασία, τα συστατικά που χρησιμοποιούνται και τη μέθοδο εφαρμογής γευστικών-οσμηρών ενώσεων. Κάθε μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι ακριβής και αναπαραγώγιμη.

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής μπορούν να εκτιμηθούν με επιτροπή δοκιμαστών. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι δοκιμές προτίμησης, δοκιμές κατάταξης και περιγραφικές δοκιμές. Οι κλίμακες βαθμολογίας για τις δοκιμές προτίμησης μπορεί να περιλαμβάνουν τιμές 1-9 ή 1-5. Οι δοκιμές κατάταξης ανάλογα με την προτίμηση και την αποδοχή, μπορεί να κάνει χρήση καταναλωτών ως δοκιμαστών, όμως αυτοί θα πρέπει να υπερβαίνουν τους 30. Οι περιγραφικές δοκιμές είναι αντικειμενικές και πολλά υποσχόμενες αλλά είναι εντατικές από άποψη εργασίας και χρονοβόρες. Η οργανοληπτική εκτίμηση της υφής των προϊόντων εκβολής περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως εμφάνιση (εμφάνιση, πορώδες, διάμετρος, χρώμα), γεύση-οσμή (αλευρώδες, καμένο και πικρό), και υφή (τραγανότητα, αφρώδες, σκληρότητα, συγκολητικότητα, ενυδάτωση και διάλυση).

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της υφής επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ποικιλία, η περιεκτικότητα αμυλόζης, η περιεκτικότητα πρωτεΐνης, θερμοκρασία εκβολής και ζελατινοποίησης του αμύλου και άλλοι.

Για την αντικειμενικότερη εκτίμηση των διαφόρων χαρακτηριστικών, καθώς επίσης και για να υπάρξει η δυνατότητα μελέτης και ενσωμάτωσης παραμέτρων υφής και της εξάρτησης αυτών από τις παραμέτρους της διεργασίας, απαιτούνται ενόργανες μετρήσεις των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και συσχέτιση αυτών με τις βαθμολογίες από επιτροπές δοκιμαστών. Αυτό μπορεί να έχει επιτυχία στην περίπτωση της υφής. Οι μορφή των εξισώσεων που συνδέουν τη βαθμολογία των δοκιμαστών και την ενόργανη μέτρηση είναι:

$$S = k \cdot I^n \qquad \textbf{3-32}$$

όπου S η οργανοληπτική βαθμολόγηση, I η τιμή της μέτρησης με το όργανο και k, n σταθερές.

3.8.1 Προβλήματα και προκλήσεις

Γενικώς μπορεί να υπάρξουν τρεις κύριες περιοχές σοβαρών προβλημάτων που ο ερευνητής καλείται και προκαλείται να επιλύσει και βελτιώσει σε σχέση με τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και την δια των αισθήσεων εκτίμηση αυτών, έτσι ώστε το ένα να συμπληρώνει το άλλο:

1. πώς η οργανοληπτική εκτίμηση θα καταστεί πιο ευαίσθητη και αναπαραγωγίσιμη και θα λαμβάνει υπόψη τις κατά τόπους διακυμάνσεις στις προτιμήσεις.
2. πώς οι ενόργανες μέθοδοι θα ήταν δυνατό να μιμηθούν τις επιτροπές δοκιμαστών, ενώ ταυτοχρόνως θα παραμένουν ταχείες, ακριβείς και οικονομικές, και

3. πώς θα γίνει καλύτερα κατανοητή η σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών και προϊόντων και της οργανοληπτικής εκτίμησης.

Το ερώτημα που τίθεται επομένως περιλαμβάνει «είναι δυνατό να αναπτύξω και τυποποιήσω μια μέθοδο οργανοληπτικής εκτίμησης των διογκωμένων προϊόντων εκβολής»;

Όσον αφορά στην οργανοληπτική αξιολόγηση των προϊόντων εκβολής, τα χαρακτηριστικά που αξιολογούνται είναι η εμφάνιση, το άρωμα, η γεύση, η σκληρότητα, το κολλώδες και η γενική ποιότητα. Ιδιότητες όπως η σκληρότητα και το κολλώδες μετρούνται γρήγορα και με ακρίβεια χρησιμοποιώντας κατάλληλο όργανο (π.χ. αναλυτής υφής) και στη συνέχεια μπορούν να συσχετισθούν με βαθμολογίες από επιτροπή δοκιμαστών.

Η μελέτη της υφής των διογκωμένων προϊόντων εκβολής κατά την έρευνα και ανάπτυξη ενός προϊόντος πραγματοποιείται τόσο με τη χρήση επιτροπής δοκιμαστών, όσο και με τη χρήση οργάνων. Η απόφαση σχετικά με τη μεταφορά οποιουδήποτε προϊόντος από το εργαστήριο στο εργοστάσιο επεξεργασίας και κατόπιν στα καταστήματα λιανικής πώλησης στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στα αποτελέσματα τέτοιων επιτροπών. Η επιλογή των δοκιμαστών και η κατάρτισή τους, καθώς επίσης και η εκτίμηση των προϊόντων είναι γενικώς μια χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά αν χρησιμοποιηθούν εκπαιδευμένοι δοκιμαστές. Παρ' όλο που οι επιτροπές δοκιμαστών δεν μπορούν ποτέ να αντικατασταθούν, σημαντική μείωση στον όλο κύκλο μελέτης και ανάπτυξης του προϊόντος μπορεί να γίνει με τη χρήση κατάλληλων ενόργανων μετρήσεων. Επιπροσθέτως, τα στοιχεία ποιότητας των προϊόντων που λαμβάνονται με τα όργανα μπορούν να γίνουν κατανοητά από ανθρώπους διαφορετικών περιοχών και κουλτούρας, σε αντίθεση με τους περιγραφικούς όρους της οργανοληπτικής δοκιμής, οι οποίοι χρειάζονται μετάφραση ως προς την έννοια.

Αξίζει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στα χαρακτηριστικά εκείνα τα οποία καθορίζουν την αποδοχή των διογκωμένων προϊόντων εκβολής την ευθρυπτότητα και την τραγανότητα, και διότι είναι τα χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να συνδυασθούν με ενόργανες και οργανοληπτικές μετρήσεις ως συναρτήσεις των υλικών και των συνθηκών της διεργασίας. Η ευθρυπτότητα και η τραγανότητα είναι όροι που αντιπροσωπεύουν αισθητήρια αντίληψη και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την αντίληψη της υφής για πολλά τρόφιμα, συμπεριλαμβανομένων και των διογκωμένων προϊόντων εκβολής. Τα προϊόντα εκβολής χαρακτηρίζονται ως εύθρυπτα και τραγανά και συνήθως έχουν μια εύθρυπτη, σαν αφρός κυψελοειδή δομή, ενώ η δια των αισθήσεων αντίληψη συνδέεται με τις ιδιότητες θραύσης αυτών. Για την ενόργανη μέτρηση της υφής των προϊόντων αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί οι μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνονται με συμπίεση ή διάτρηση (Vincent, 1998). Σχετικά πιο πρόσφατα, η έρευνα έχει εστιασθεί στη συμβολή των παραμέτρων μικροδομής πάνω στις μηχανικές ιδιότητες των διογκωμένων τροφίμων εκβολής (Agbisit et al., 2007; Barrett et al., 1994a; Barrett et al., 1992a; Van Hecke et al., 1998; Warburton et al., 1992).

Εκτός των μηχανικών ιδιοτήτων, μια πρόσθετη διάσταση που παίζει σημαντικό ρόλο στην αντίληψη της ευθρυπτότητας και της τραγανότητας μέσω των αισθήσεων είναι η

ακουστική ή ο ήχος που εκπέμπεται κατά το δάγκωμα και μάσηση των τροφίμων (Anton & Luciano, 2007; Cheng, Alavi, Pearson & Agbisit, 2007). Εφαρμόζεται η επεξεργασία του σήματος που περιλαμβάνεται στην τεχνολογία αναγνώρισης της ομιλάς σε σχέση με το θόρυβο και διαχωρισμό αυτών. Στην περίπτωση των τραγανών προϊόντων εκβολής περιλαμβάνεται μετατροπή των σημάτων εύρους-χρόνου και σύνδεση με τις μηχανικές ιδιότητες και την δια των αισθήσεων αντίληψη του εύθρυπτου-τραγανού και ακόμη σύνδεση με τις παραμέτρους της μικροδομής (Duizer, 2001; Luyten & Vliet, 2006; Marzec, Lewicki & Ranachowski, 2007; Vickers & Bourne, 1976; Vickers, 1988).

3.8.2 Συμπερασματικές επισημάνσεις

Οι θεμελιώδεις τεχνικές που έχουν εφαρμοσθεί για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής (Chávez-Jáuregui, Silva & Arĕas, 2000; Mazumder, Roopa & Bhattacharya, 2007; Ravi, Roopa & Bhattacharya, 2007), αποτελούν έγκυρες προσεγγίσεις για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Όμως, από πρακτική σκοπιά, οι εμπειρικές μέθοδοι φαίνεται ότι συσχετίζονται καλύτερα με τα αποτελέσματα της οργανοληπτικής εκτίμησης και επίσης ερμηνεύονται ευκολότερα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ερευνητής των τροφίμων που ασχολείται με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων δεν μπορεί να παραλείψει την οργανοληπτική εκτίμηση, τη μικροδομή και τις ιδιότητες. Ο συνδυασμός της ανάλυσης των ακουστικών καταγραφών με τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών εμφανίζεται να είναι μια ενδιαφέρουσα τεχνική για την ευθρυπτότητα και την τραγανότητα των προϊόντων εκβολής (Duizer, 2001). Επίσης, η σπουδαιότητα της οργανοληπτικής εκτίμησης με ανθρώπους-δοκιμαστές δεν μπορεί να αμφισβητηθεί και έτσι οι προσπάθειες για την εύρεση της «τέλειας» μεθόδου που θα αντανακλά την ανθρώπινη αντίληψη πρέπει να είναι συνεχείς.

Ιδιότητες, όπως η εκτίμηση της υφής των διογκωμένων προϊόντων εκβολής, είναι ένα πολύπλοκο και διεπιστημονικό αντικείμενο, όπου ο συνδυασμός τεχνικών είναι η καλύτερη πρακτική. Για να παρασκευασθούν προϊόντα τα οποία θα είναι αποδεκτά σε μια πολύ ανταγωνιστική αγορά, η εκβολή των τροφίμων απαιτεί έλεγχο πολλών παραμέτρων που άμεσα ή έμμεσα επηρεάζουν την αποδοχή από τον καταναλωτή. Τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος προκύπτουν εν μέρει από συγκεκριμένες κρίσιμες παραμέτρους που αφορούν τις πρώτες ύλες. Οι κρίσιμες παράμετροι που μερικώς επηρεάζουν την υγρασία, τη διόγκωση, τη διαλυτότητα, την απορρόφηση, το χρώμα, τη γεύση-οσμή και την υφή του τελικού προϊόντος είναι (Huber, 2001):

1. Υγρασία: η πραγματική υγρασία στο προϊόν.
2. Εισαγωγή θερμικής ενέργειας: θερμότητα από θερμικά ρευστά, ατμό ή ηλεκτρική ενέργεια στον εκβολέα.
3. Εισαγωγή μηχανικής ενέργειας: θερμότητα που παράγεται κατά τη διεργασία στον εκβολέα.
4. Χρόνος παραμονής: συνολικός χρόνος που το προϊόν βρίσκεται σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη περιοχή της διαδικασίας εκβολής.

Επιπλέον, η ποιότητα του τελικού προϊόντος επηρεάζεται από τη παροχή της τροφοδοσίας, την ταχύτητα των κοχλιών, τη θερμοκρασία και την πίεση του χιτωνίου. Αυτά μαζί με τις παραπάνω αναφερθείσες παραμέτρους καθορίζουν την ευθρυπτότητα, τη σκληρότητα και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά, τα οποία θα καθορίσουν την επιτυχία του τελικού προϊόντος. Η επιτυχία ή η αποτυχία νέων διογκωμένων τροφίμων εκβολής συσχετίζεται άμεσα με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και η υφή παίζει καθοριστικό ρόλο. Αρκετοί ερευνητές συμφωνούν ότι η ευθρυπτότητα μπορεί να προκύψει από τις δομικές ιδιότητες τροφίμων (Bouvier, Bonneville & Goullieux, 1997; Mohamed, Jowitt & Brennan, 1982). Η ευθρυπτότητα γίνεται αντιληπτή μέσω ενός συνδυασμού αφής, κιναισθητικών, οπτικών και ακουστικών αισθήσεων και αντιπροσωπεύει το βασικό χαρακτηριστικό της υφής των διογκωμένων προϊόντων εκβολής (Heidenreich, Jaros, Rohm & Ziems, 2004).

4 Πειραματική Διαδικασία

4.1 Αντικείμενο και στόχοι

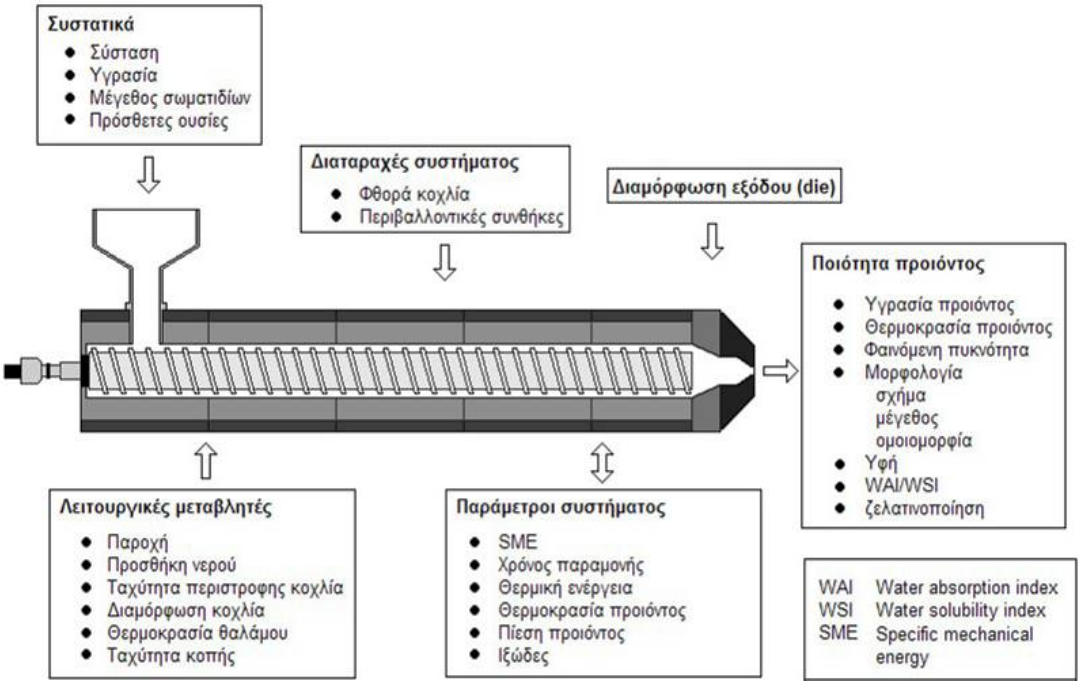
Η παρούσα διατριβή αποσκοπεί στη μελέτη των ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής, τα οποία παράγονται με συνδυασμό αραβοσίτου και φακής (οσπρίων). Τα προϊόντα που θα μελετηθούν περιλαμβάνουν, συνδυασμούς αλεσμάτων αραβοσίτου και διαφόρων ποσοστών φακής και τα οποία είναι διογκωμένα και καταναλώνονται ως σνακ. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και πιθανή αξιοποίηση των παραγομένων στη χώρα γεωργικών προϊόντων. Γενικός στόχος είναι η παραγωγή νέας γνώσης, η οποία θα βελτιώσει τη διεργασία της εκβολής και θα οδηγήσει στην παραγωγή νέων προϊόντων με επιθυμητές δομικές, λειτουργικές και οργανοληπτικές ιδιότητες.

Οι ιδιότητες των προϊόντων εκβολής (δομικές, υφής, λειτουργικές, οργανοληπτικές κλπ.), εκτός από τον τύπο του εκβολέα που χρησιμοποιείται, εξαρτώνται και καθορίζονται από τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύσταση του υλικού που υφίσταται επεξεργασία (Σχήμα 4.1-1). Οι μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο τις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής είναι η θερμοκρασία, η παροχή του υλικού τροφοδοσίας και η αρχική υγρασία του υλικού. Για το λόγο αυτό μελετήθηκε η εκβολή μιγμάτων αλεύρων φακής και αραβοσίτου, κάτω από διάφορες συνθήκες εκβολής (θερμοκρασία, παροχή υλικού τροφοδοσίας). Χρησιμοποιήθηκε εκβολέας διπλού κοχλία, συστροφής, με σταθερή ταχύτητα περιστροφής κοχλιών (rpm), τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οποίου αναλύονται στην παράγραφο 4.3.

Η προσθήκη του αλεύρου φακής σε διάφορες αναλογίες συμβάλλει τόσο στη μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων, όσο και στη βελτίωση του θρεπτικού περιεχομένου. Αυτό θα επιτρέψει τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών εκβολής, καθώς και των χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης πάνω στις ιδιότητες των τροφίμων εκβολής με αυξημένη διατροφική αξία.

Μεταξύ των στόχων είναι:

- Να αναπτυχθούν πρότυπα για την περιγραφή της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας επί των ιδιοτήτων των διογκωμένων προϊόντων εκβολής.
- Να δοθούν απαντήσεις σε βασικά ερωτήματα που αφορούν στο σχηματισμό της δομής με μηχανικές δοκιμές και με μικροσκοπικές τεχνικές.
- Να αναπτυχθούν καινοτόμα προϊόντα με βάση το άλευρο δημητριακών (αραβοσίτου) και οσπρίων (φακής).
- Να επιτραπεί ο a priori σχεδιασμός τροφίμων με μοναδική δομή-υφή και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά.
- Να γίνει συσχετισμός των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (δια των αισθήσεων) και αντικειμενικών μετρήσεων (ενόργανες μετρήσεις) των ιδιοτήτων.
- Να μελετηθούν οι μεταπτώσεις φάσεων τροφίμων εκβολής.



Σχήμα 4.1-1 Παράγοντες που καθορίζουν τις ιδιότητες των τροφίμων εκβολής.

4.2 Προετοιμασία δειγμάτων

Για την παραγωγή των τροφίμων εκβολής χρησιμοποιήθηκε κίτρινο αραβοσιτάλευρο, το οποίο ήταν προσφορά των Μύλων Αφοί Μάρρα Α.Ε. και φακές, οι οποίες ήταν προσφορά της Agrino-ΕΥ.ΓΕ. Πιστιόλας Α.Ε. Οι φακές αλέσθηκαν σε μύλο άλεσης δημητριακών (mill 1200W, CBR di Ceccato, Italy).

Η εκατοστιαία σύνθεση των δειγμάτων περιλάμβανε την περιεκτικότητα υγρασίας, πρωτεΐνης, λίπους, τέφρας και υδατανθράκων. Η περιεκτικότητα υγρασίας προσδιορίσθηκε σε φούρνο υπό κενό 50 mm Hg στους 75°C μέχρι σταθερού βάρους. Για τις λοιπές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι AOAC (1975). Για την πρωτεΐνη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Kjeldahl (No. 14.063) με παράγοντα μετατροπής 6,25, για το λίπος η μέθοδος Soxhlet (No. 14.062) και για την τέφρα η μέθοδος No. 14.006. Οι υδατάνθρακες ελήφθησαν από τη διαφορά των ποσοστών. Η χημική σύσταση των πρώτων υλών παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1 Χημική σύσταση πρώτων υλών (%)

	Αραβοσιτάλευρο	Φακές
Πρωτεΐνες	6	28
Λιπαρά	1	1
Ολικοί Υδατάνθρακες	83	57
Διαιτητικές ίνες	2	30
Σάκχαρα	1	5

Η κατανομή μεγέθους των κόκκων των αλεύρων προσδιορίσθηκε με κοκκομετρική ανάλυση χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από πρότυπα κόσκινα (Fritsch GmbH, Germany) και ψηφιακή συσκευή δόνησης (Octagon 2000, Endecotts Ltd., UK). Η κοκκομετρία των αλεύρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-2.

Το αραβοσιτάλευρο και το άλευρο φακής αναμίχθηκαν στις επιθυμητές αναλογίες: 0%, 10%, 30% και 50% φακή/αραβοσιτάλευρο. Η υγρασία των μιγμάτων ρυθμίσθηκε στα επιθυμητά επίπεδα ψεκάζοντας υπολογισμένο ποσό νερού και αναμιγνύοντας καλά για 15 min περίπου. Τα μίγματα τοποθετήθηκαν στο ψυγείο (4°C), για την εξισορρόπηση της υγρασίας σε σακούλες πολυαιθυλενίου για μια μέρα. Τα επίπεδα υγρασίας τροφοδοσίας ήταν 13%, 16% και 19% σε υγρή βάση. Η υγρασία των δειγμάτων, καθώς και της πρώτης ύλης, προσδιορίσθηκε με ξήρανση υπό κενό (50 mm Hg) στους 75°C, μέχρι σταθερού βάρους. Στις περιπτώσεις όπου η υγρασία των δειγμάτων είχε απόκλιση από την υπολογιζόμενη γίνονταν η αντίστοιχη διόρθωση. Τα δείγματα πριν την εκβολή φερόταν σε θερμοκρασία δωματίου.

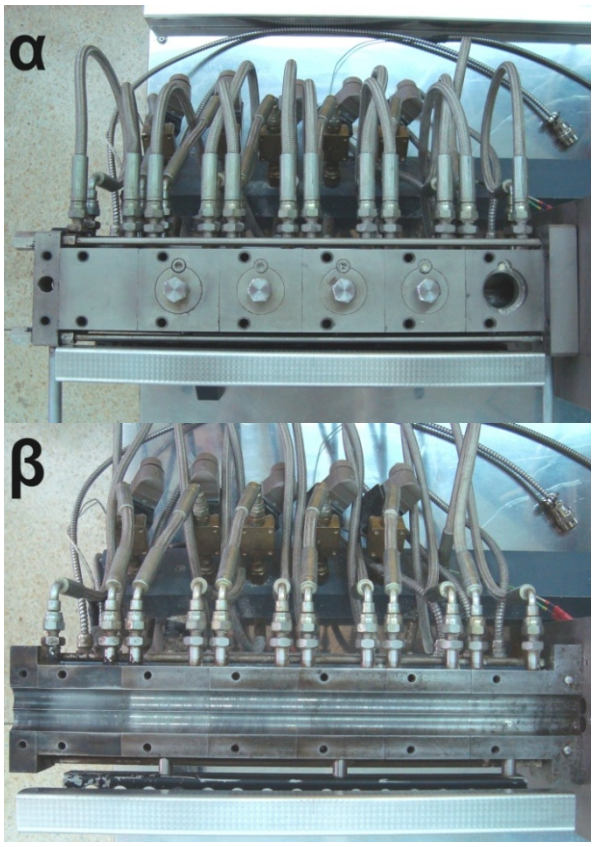
4.3 Εκβολέας

Χρησιμοποιήθηκε εκβολέας διπλού κοχλία της Prism Eurolab, μοντέλο KX-16HC, με διάμετρο κοχλιών 16 mm, μήκος 40 cm και μέγιστη ταχύτητα περιστροφής 500 rpm. Ο εκβολέας διαθέτει κυλινδρική μήτρα διαμέτρου 3 mm και μήκους 17,5 mm και επίσης πέντε ζώνες ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας. Ο ελεύθερος χώρος μεταξύ των κοχλιών και του χιτωνίου του εκβολέα είναι V=8,52·10^{-5} m^3. Στα σχήματα 4.3-1 έως 4.3-5 παρουσιάζεται ο εκβολέας, η μήτρα και οι κοχλίες.

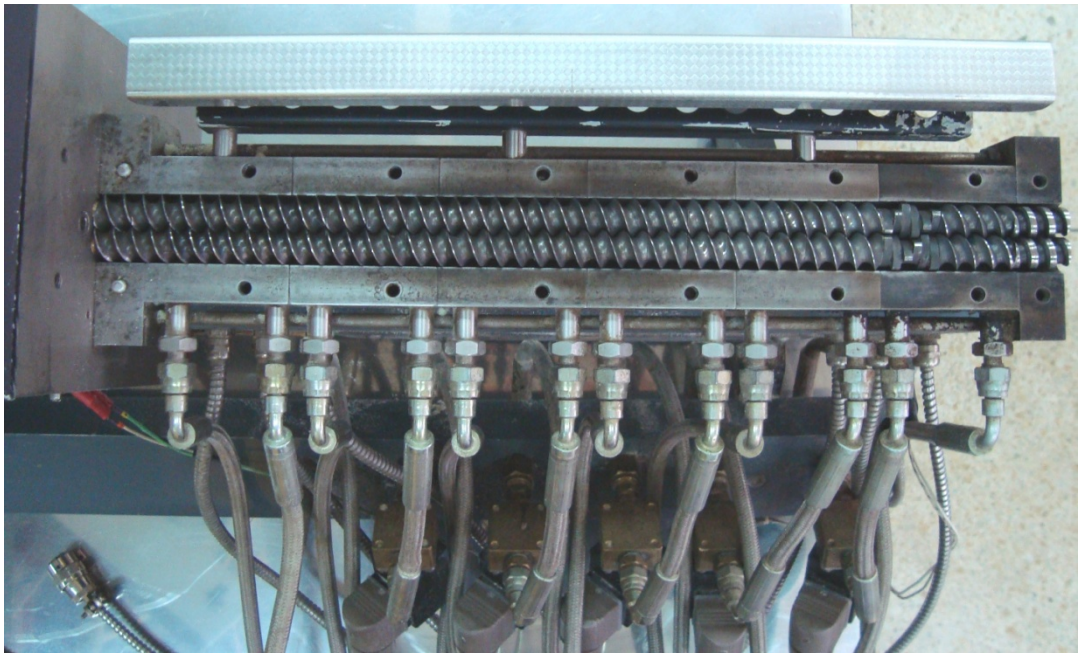
Πίνακας 4-2 Κοκκομετρική ανάλυση πρώτων υλών.

Μέγεθος κόσκινου (μm)	Αραβοσιτάλευρο (% κατακράτηση)	Άλευρο φακής (%κατακράτηση)
630	0,35	1,20
500	0,35	8,78
400	1,40	13,58
315	8,49	15,62
200	61,39	23,70
100	24,82	16,86
90	1,79	1,56
<90	1,42	18,70

Σχήμα 4.3-1 Δεξιά πλάγια όψη εκβολέα. Διακρίνεται το χιτώνιο, ο κινητήρας και η οθόνη τύπου touch screen.

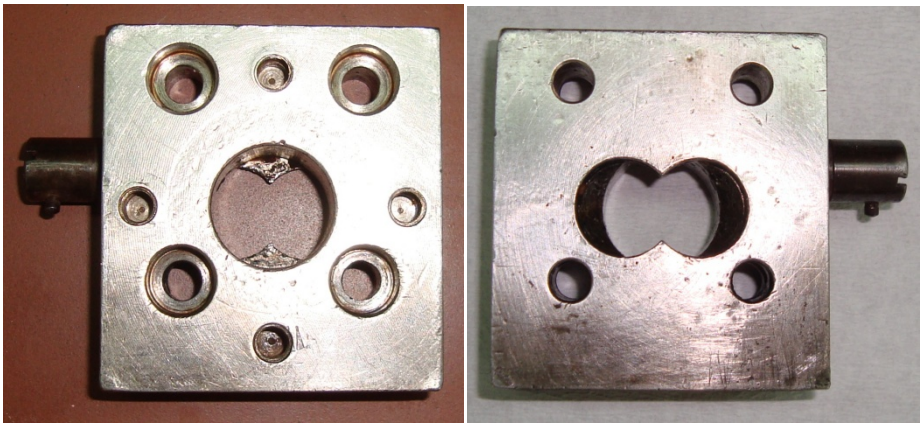


Σχήμα 4.3-2 Κάτοψη χιτωνίου εκβολής διπλού κοχλία. α. Κλειστό, β. Ανοικτό. Διακρίνονται τα θερμαντικά στοιχεία κατά μήκος του χιτωνίου.



Σχήμα 4.3-3 Κάτοψη χιτωνίου εκβολέα διπλού κοχλία. Διακρίνονται οι κοχλίες.

Σχήμα 4.3-4 Μήτρα εξόδου του προϊόντος από τον εκβολέα.



Σχήμα 4.3-5 Πρόσθια και οπίσθια όψη προσασμογέα μήτρας.

Η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών ρυθμίστηκε στα 200 rpm. Η θερμοκρασία ρυθμίστηκε μέσω των θερμαντικών στοιχείων κατά μήκος του εκβολέα. Η θερμοκρασία της μήτρας (προϊόντος) μεταβλήθηκε από 170 έως 230°C. Τα μίγματα τροφοδοτήθηκαν στον εκβολέα με χρήση του ογκομετρικού τροφοδοτικού και η παροχή κυμάνθηκε από 2,52 kg/h έως 6,84 kg/h. Στον Πίνακα 4-3 φαίνονται αναλυτικά οι συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών.

Σε κάθε πειραματική συνθήκη, με την επίτευξη της μόνιμης κατάστασης (περίπου μετά από 20 min) πραγματοποιήθηκε συλλογή των δειγμάτων-τροφίμων. Τα τρόφιμα αφού ξηράθηκαν και ψύχθηκαν στον αέρα, συσκευάσθηκαν σε ειδική πολυστρωματική συσκευασία, προσφορά της εταιρίας Αφοί Βλάχου Α.Ε., μέχρι την περεταίρω ανάλυση.

4.4 Πειραματικός Σχεδιασμός

Για την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα των προϊόντων εκβολής χρησιμοποιήθηκε πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 4(αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο) x 3(υγρασία τροφοδοσίας) x 3(θερμοκρασία εκβολής) x 3(παροχή υλικού τροφοδοσίας) με δύο επαναλήψεις. Οι ανεξάρτητες τιμές ήταν η αναλογία των υλικών (0%, 10%, 30% και 50%), η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας (13%, 16% και 19% σε ξηρή βάση), η θερμοκρασία εκβολής (170°C, 200°C και 230°C) και η παροχή του υλικού τροφοδοσίας (2,52 kg/h, 4,68 kg/h και 6,84 kg/h). Στον Πίνακα 4-3 εμφανίζονται αναλυτικά οι συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, καθώς επίσης και η κωδικοποίηση των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκε. Στον Πίνακα 4-4 παρουσιάζεται ο πλήρης πειραματικός σχεδιασμός, χωρίς τις επαναλήψεις.

Πίνακας 4-3 Συνθήκες εκβολής και κωδικοποίηση δειγμάτων.

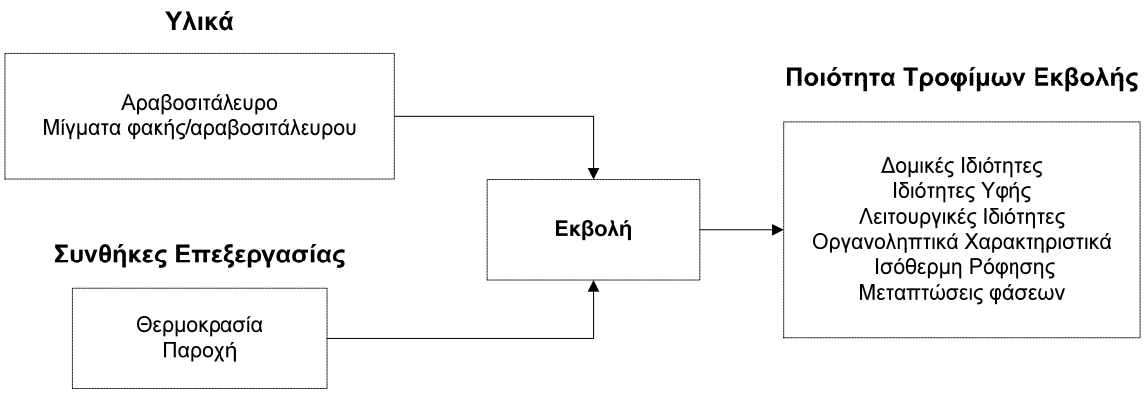
	C (φακή/αραβοσιτάλευρο %)				**X, Υγρασία (% υ.β.)**			**T, Θερμοκρασία (°C)**			**F, Παροχή (kg/h)**		
Τιμές	0	10	30	50	13	16	19	170	200	230	2,52	4,68	6,84
Κωδικός	0	1	3	5	1	2	3	1	2	3	S	M	L

Παράδειγμα κωδικοποίησης: 1^{ο} γράμμα C: προϊόντα από αραβοσιτάλευρο, L: προϊόντα από μίγματα φακής με αραβοσιτάλευρο.

C012S: προϊόν με 0% αναλογία φακής/αραβοσιτάλευρο, με 13% αρχική υγρασία, επεξεργασμένο στους 200°C και σε παροχή 2,52 kg/h.

L321M: προϊόν με 30% αναλογία φακής/αραβοσιτάλευρο, με 16% αρχική υγρασία, επεξεργασμένο στους 170°C και σε παροχή 4,68 kg/h.

Στο Σχήμα 4.4-1 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός των πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων ποιότητας των τροφίμων εκβολής.



Σχήμα 4.4-1 Σχεδιασμός πειραματικών μετρήσεων.

Πίνακας 4-4 Πειραματικός σχεδιασμός

Αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο (%)	Υγρασία Τροφοδοσίας (%wb)	Θερμοκρασία εκβολής (°C)	Παροχή τροφοδοσίας (kg/h)
0	13	170	2,52
0	13	170	4,68
0	13	170	6,84
0	16	170	2,52
0	16	170	4,68
0	16	170	6,84
0	19	170	2,52
0	19	170	4,68
0	19	170	6,84
0	13	200	2,52
0	13	200	4,68
0	13	200	6,84
0	16	200	2,52
0	16	200	4,68
0	16	200	6,84
0	19	200	2,52
0	19	200	4,68
0	19	200	6,84
0	13	230	2,52
0	13	230	4,68
0	13	230	6,84
0	16	230	2,52
0	16	230	4,68
0	16	230	6,84
0	19	230	2,52
0	19	230	4,68
0	19	230	6,84
10	13	170	2,52
10	13	170	4,68
10	13	170	6,84
10	16	170	2,52
10	16	170	4,68
10	16	170	6,84
10	19	170	2,52
10	19	170	4,68
10	19	170	6,84
10	13	200	2,52
10	13	200	4,68
10	13	200	6,84
10	16	200	2,52
10	16	200	4,68
10	16	200	6,84
10	19	200	2,52

10	19	200	4,68
10	19	200	6,84
10	13	230	2,52
10	13	230	4,68
10	13	230	6,84
10	16	230	2,52
10	16	230	4,68
10	16	230	6,84
10	19	230	2,52
10	19	230	4,68
10	19	230	6,84
30	13	170	2,52
30	13	170	4,68
30	13	170	6,84
30	16	170	2,52
30	16	170	4,68
30	16	170	6,84
30	19	170	2,52
30	19	170	4,68
30	19	170	6,84
30	13	200	2,52
30	13	200	4,68
30	13	200	6,84
30	16	200	2,52
30	16	200	4,68
30	16	200	6,84
30	19	200	2,52
30	19	200	4,68
30	19	200	6,84
30	13	230	2,52
30	13	230	4,68
30	13	230	6,84
30	16	230	2,52
30	16	230	4,68
30	16	230	6,84
30	19	230	2,52
30	19	230	4,68
30	19	230	6,84
50	13	170	2,52
50	13	170	4,68
50	13	170	6,84
50	16	170	2,52
50	16	170	4,68
50	16	170	6,84
50	19	170	2,52
50	19	170	4,68
50	19	170	6,84
50	13	200	2,52
50	13	200	4,68
50	13	200	6,84
50	16	200	2,52
50	16	200	4,68
50	16	200	6,84
50	19	200	2,52
50	19	200	4,68
50	19	200	6,84
50	13	230	2,52
50	13	230	4,68
50	13	230	6,84
50	16	230	2,52
50	16	230	4,68
50	16	230	6,84
50	19	230	2,52
50	19	230	4,68
50	19	230	6,84

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν ήταν εφικτή η παραγωγή όλων των παραπάνω δειγμάτων λόγω υπέρ-ροπής (over-torque) κατά τη διάρκεια της εκβολής.

4.5 Μέσος χρόνος παραμονής

Η κατανομή του χρόνου παραμονής είναι πολύ σημαντική για το χαρακτηρισμό της διεργασίας εκβολής. Οι συνθήκες ανάμιξης, το είδος της ροής και ο χρόνος παραμονής κατά τη θερμή εκβολή παρουσιάζουν σημαντική επίδραση πάνω στην έκταση της θερμικής και διατμητικής κατεργασίας που προσφέρεται στο υλικό που υφίσταται εκβολή και την έκταση των μετατροπών και αντιδράσεων των βιοπολυμερών εντός του εκβολέα.

Όλες οι μέθοδοι μέτρησης του χρόνου παραμονής στους εκβολείς διπλού κοχλία βασίζονται στην εισαγωγή κάποιου ιχνηλάτη στο ρεύμα ροής, όπως π.χ. μιας χρωστικής. Θεωρώντας τον εκβολέα ως ένα αντιδραστήρα συνεχούς ροής, ο μέσος χρόνος παραμονής, ο οποίος είναι κρίσιμος κατά το σχεδιασμό της διεργασίας, μπορεί να ληφθεί από (Maroulis & Saravacos, 2003):

$$\tau = \frac{(1-e_f)\cdot \rho_t \cdot V}{F} \qquad \textbf{4-1}$$

όπου e_f το κενό κλάσμα μέσα στον εκβολέα, ρ_t η πραγματική πυκνότητα του υλικού (kg/m^3), V ο ελεύθερος όγκος στο χιτώνιο του εκβολέα (V=8,52·10^{-5}m^3) και F η παροχή του υλικού τροφοδοσίας (kg/s). Το κενό κλάσμα του εκβολέα είναι το τμήμα του όγκου του μεταξύ του χιτωνίου και των κοχλιών, που παραμένει κενό κατά τη διάρκεια της εκβολής.

Το τμήμα του όγκου του εκβολέα που παραμένει κενό κατά τη διάρκεια της εκβολής εξαρτάται από τις παραμέτρους της διεργασίας και κατ' επέκταση αυτές θα επηρεάζουν το μέσο χρόνο παραμονής. Με πειραματικό τρόπο προσδιορίσθηκε η σχέση του μέσου χρόνου παραμονής με τις παραμέτρους της διεργασίας. Αναλυτικότερα, για τον προσδιορισμό του μέσου χρόνου παραμονής πραγματοποιήθηκε εκβολή αραβοσιτάλευρου, αλλάζοντας τις παραμέτρους τις διεργασίας. Στις παραμέτρους περιλαμβάνονται η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών (150-250 rpm), η παροχή του υλικού τροφοδοσίας (0,00032-0,002 kg/s), η θερμοκρασία εκβολής (150-230°C) και η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας (13-19% υ.β.). Στον Πίνακα 4-5 παρουσιάζεται αναλυτικά ο πειραματικός σχεδιασμός.

Για τον προσδιορισμό του μέσου χρόνου παραμονής, στη μόνιμη κατάσταση προστέθηκε στην τροφοδοσία του εκβολέα μικρή ποσότητα χρωστικής ουσίας. Στη συνέχεια μετρήθηκε σε πόσο χρόνο εξήλθε από τον εκβολέα το χρωματισμένο προϊόν. Ως μέσος χρόνος παραμονής θεωρήθηκε ο χρόνος που εξήλθε το εντονότερα χρωματισμένο προϊόν.

Για την πρόβλεψη του μέσου χρόνου παραμονής αναπτύχθηκε το μαθηματικό πρότυπο που παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-6. Η εξάρτηση του μέσου χρόνου παραμονής από τις παραμέτρους της διεργασίας εκφράζεται από τη μεταβολή του κενού κλάσματος του εκβολέα με τις παραμέτρους. Βασική παραδοχή ήταν ότι η πυκνότητα του στερεού υλικού κατά τη διάρκεια της εκβολής είναι σταθερή, δηλαδή δεν μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Πίνακας 4-5 Πειραματικός σχεδιασμός για τον προσδιορισμό του μέσου χρόνου παραμονής.

Υγρασία τροφοδοσίας *X* (%υ.β)	Θερμοκρασία εκβολής *T* (°C)	Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών *N* (rpm)	Παροχή τροφοδοσίας *F* (kg/s)
19	150	200	0,0004
19	150	150	0,0004
16	150	200	0,0004
16	150	250	0,0004
16	150	150	0,0004
13	150	200	0,0004
19	200	200	0,0004
19	200	150	0,0004
13	150	150	0,0004
13	230	250	0,0004
19	150	250	0,0005
16	200	150	0,0005
13	150	200	0,0005
19	230	150	0,0005
16	230	150	0,0005
13	200	200	0,0005
13	200	250	0,0005
13	150	250	0,0005
13	150	200	0,0005
13	200	150	0,0005
19	150	150	0,0006
16	150	150	0,0006
19	230	200	0,0006
19	230	250	0,0006
16	230	250	0,0006
16	230	200	0,0006
13	230	250	0,0006
13	230	200	0,0006
13	230	150	0,0006
19	150	200	0,0007
19	150	200	0,0007
16	150	200	0,0007
16	200	200	0,0007
16	200	150	0,0007
16	200	250	0,0007
13	200	250	0,0007
19	200	250	0,0007
16	230	150	0,0007
13	200	200	0,0007
13	150	200	0,0007
13	200	150	0,0007
13	230	250	0,0007
16	150	200	0,0008
16	150	250	0,0008
16	200	200	0,0008
16	230	250	0,0008
16	230	200	0,0008
19	200	150	0,0008
13	200	250	0,0008
13	150	250	0,0008
13	200	250	0,0008
13	230	200	0,0008
13	230	150	0,0008
13	230	150	0,0008
19	150	200	0,0010
19	150	200	0,0010
19	150	200	0,0010

19	150	150	0,0010
19	150	150	0,0010
19	150	250	0,0010
19	150	250	0,0010
19	150	200	0,0010
16	150	200	0,0010
16	150	150	0,0010
16	200	150	0,0010
13	200	250	0,0010
19	200	200	0,0010
19	200	200	0,0010
19	200	200	0,0010
19	230	250	0,0010
19	230	150	0,0010
19	200	150	0,0010
13	200	200	0,0010
13	200	250	0,0010
13	200	150	0,0010
13	230	250	0,0010
13	230	200	0,0010
13	230	150	0,0010
19	150	200	0,0013
19	150	250	0,0013
16	150	250	0,0013
16	200	200	0,0013
16	200	150	0,0013
16	200	250	0,0013
16	200	250	0,0013
19	200	200	0,0013
19	200	250	0,0013
16	230	200	0,0013
19	230	200	0,0013
19	230	150	0,0013
16	230	250	0,0013
16	230	150	0,0013
19	200	150	0,0013
13	200	250	0,0013
13	230	200	0,0013
13	230	200	0,0013
19	150	250	0,0015
19	150	200	0,0015
16	200	200	0,0015
19	200	200	0,0015
19	230	250	0,0015
16	230	200	0,0015
13	230	250	0,0013
13	230	250	0,0015
16	200	250	0,0016
19	230	200	0,0016
16	230	250	0,0016
19	200	200	0,0018
19	230	200	0,0018
19	200	250	0,0019
16	230	250	0,0019
19	230	250	0,0020

Οι συνθήκες αναφοράς που ελήφθησαν είναι οι ακόλουθες: N_0=200 rpm, F_0=0,001 kg/s, T_0=200°C και X_0=10% υ.β., Η εκτίμηση των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με μη γραμμική παλινδρόμηση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

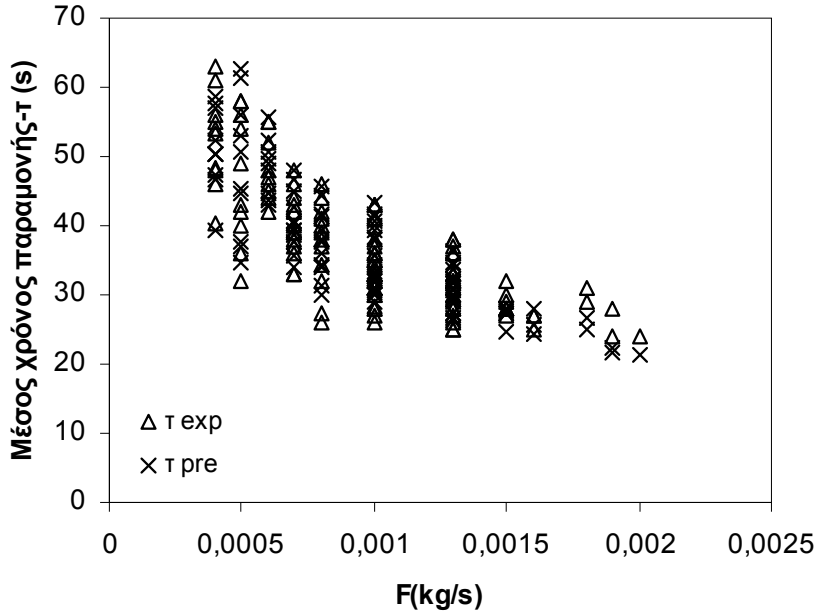
Πίνακας 4-6 Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης μέσου χρόνου παραμονής.

Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης μέσου χρόνου παραμονής	
1. Ιδιότητες	
τ μέσος χρόνος παραμονής	(s)
$\tau = \frac{(1-e_f)\cdot\rho_t\cdot V}{F}$	
όπου	
e_f κενό κλάσμα εκβολέα κατά τη διάρκεια λειτουργίας	(-)
F παροχή τροφοδοσίας	(kg/s)
ρ_t η πραγματική πυκνότητα του υλικού	(kg/m^3)
V κενός χώρος εκβολέα μεταξύ χιτωνίου και κοχλιών	(m^3)
2. Παράγοντες Διεργασίας	
T θερμοκρασία εκβολής	(^{o}C)
N ταχύτητα περιστροφής κοχλιών	(rpm)
F παροχή τροφοδοσίας	(kg/s)
X υγρασία τροφοδοσίας	(% υ.β.)
3. Παράμετροι Διεργασίας	
e_f κενό κλάσμα εκβολέα	(-)
F παροχή του υλικού τροφοδοσίας	(kg/s)
ρ πυκνότητα υλικού	(kg/m^3)
Εξισώσεις παραμέτρων	
$\rho_t = \frac{1}{\frac{1-X}{\rho_s}+\frac{X}{\rho_w}}$	(kg/m^3)
$\rho_w = \rho_{w0} + \rho_{w1}\cdot T + \rho_{w2}\cdot T^2$	(kg/m^3)
$\rho_s = \sigma\tau\alpha\theta\varepsilon\rho\acute{o}$	(kg/m^3)
$e_f = e_{f0}\cdot\left(\frac{N}{N_0}\right)^{n_N}\cdot\left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_F}\cdot\left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_T}\cdot\left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_X}$	(-)
όπου	
ρ_s, ρ_w οι πυκνότητες του στερεού υλικού και του νερού, αντίστοιχα	(kg/m^3)
ρ_{w0}, ρ_{w1}, ρ_{w2} σταθερές	(-)
X υγρασία τροφοδοσίας	(% υ.β.)
T θερμοκρασία εκβολής	(°C)
F παροχή τροφοδοσίας	(kg/s)
N ταχύτητα περιστροφής κοχλιών	(rpm)
4. Εκτιμώμενες Παράμετροι	
e_{f0} κενό κλάσμα εκβολέα στις συνθήκες αναφοράς	(-)
n_N εκθέτης ταχύτητας περιστροφής κοχλιών	(-)
n_F εκθέτης παροχής τροφοδοσίας	(-)
n_T εκθέτης θερμοκρασίας	(-)
n_X εκθέτης υγρασίας	(-)

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης έδειξαν ότι όλες οι παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά το μέσο χρόνο παραμονής. Οι τιμές των εκτιμούμενων παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-7. Οι προβλεπόμενες και πειραματικές τιμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5-1. Παρατηρείται ότι η παροχή του υλικού τροφοδοσίας μειώνει τον μέσο χρόνο παραμονής (Εξίσωση 4-1). Οι πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές του μέσου χρόνου παραμονής για κάθε πειραματική συνθήκη παρουσιάζονται στο Παράρτημα στον Πίνακα 13-1.

Πίνακας 4-7 Αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης προτύπου μέσου χρόνου παραμονής (R^2=0,937)

	Τιμή παραμέτρου	*p*-value
e_{f0}	0,707 ± 0,006	<0,0001
n_N	0,141 ±0,013	<0,0001
n_F	-0,192 ± 0,008	<0,0001
n_T	-0,142 ± 0,015	<0,0001
n_X	-0,069±0,016	<0,0001



Σχήμα 4.5-1 Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές του μέσου χρόνου παραμονής συναρτήσει της παροχής του υλικού τροφοδοσίας.

Οι παράμετροι της διεργασίας επηρεάζουν σημαντικά τον κενό χώρο του εκβολέα. Η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών προκαλεί αύξηση αυτού, ενώ η παροχή του υλικού τροφοδοσίας, η θερμοκρασία εκβολής και η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας το μειώνουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο μέσος χρόνος παραμονής να υφίσταται τις αντίστοιχες μεταβολές.

Ο ρυθμός και η έκταση των φυσικών και χημικών αντιδράσεων διέπονται από τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και του χρόνου. Ο χρόνος παραμονής σε ένα εκβολέα τροφίμων αποτελεί μια σπουδαία ενδιάμεση μεταβλητή της διεργασίας, η οποία ελέγχει την έκταση των αντιδράσεων, οι οποίες καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του τήγματος που υφίσταται εκβολή και κατά συνέπεια του προϊόντος (Choudhury et al., 1998b). Τα δεδομένα της κατανομής του χρόνου παραμονής είναι χρήσιμα για τον καθορισμό της έκτασης της ανάμιξης, της αναλογικής αύξησης (scale-up) και τη βελτίωση του σχεδιασμού του εξοπλισμού. Εκτός των αντιδράσεων, οι μεταβολές που συμβαίνουν στα βιοπολυμερή κατά την εκβολή μεταβάλλουν την ρεολογική συμπεριφορά του τήγματος, το ιξώδες του οποίου επηρεάζει το μέσο χρόνο παραμονής. Επίσης η παραδοχή ότι η πυκνότητα του υλικού παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εκβολής δεν πλήρως έγκυρη. Κατά το σχεδιασμό πολύ σημαντική είναι η γρήγορη και σχετικά αξιόπιστη πρόβλεψη του μέσου χρόνου παραμονής. Σημειώνεται ότι το πρότυπο που αναπτύχθηκε βοηθά στην γρήγορη εκτίμηση του χρόνου παραμονής. Όμως, με δεδομένο ότι αυτός αποτελεί ενδιάμεση μεταβλητή της διεργασίας (Choudhury et al., 1998b), στα πρότυπα που θα αναπτυχθούν για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των τροφίμων εκβολής, τα οποία συνδέονται και με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτών, θα συμπεριληφθεί η παροχή και όχι μέσος χρόνος παραμονής.

4.6 Συσχέτιση ιδιοτήτων τροφίμων εκβολής

Για τη συσχέτιση μεταξύ των εξεταζόμενων ιδιοτήτων των τροφίμων εκβολής (Σχήμα 4.4 1), που χαρακτηρίζουν την ποιότητα των προϊόντων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική πολυμεταβλητής ανάλυσης, ανάλυση κυρίων συνιστωσών – ΑΚΣ (Principal Component Analysis). Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη για την διερεύνηση των συσχετίσεων μεταξύ των αντικειμενικών και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων.

Ο όρος πολυμεταβλητή (ή πολυπαραμετρική) ανάλυση αναφέρεται στην ταυτόχρονη στατιστική ανάλυση όλων των παραμέτρων (ανεξάρτητες μεταβλητές – προσδιορισμένες ιδιότητες) ενός πειράματος. Στην περίπτωση όπου ένας μεγάλος αριθμός ιδιοτήτων έχει προσδιορισθεί σε ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων, τότε η χρήση στατιστικών μεθόδων της μόνο-παραμετρικής ανάλυσης (univariate analysis) είναι πολύ χρονοβόρα διαδικασία, ενώ τα αποτελέσματά της μπορεί να ερμηνευθούν κατά τρόπο ανεπαρκή οδηγώντας σε λάθος συμπεράσματα. Στην περίπτωση αυτή συνιστάται η εφαρμογή της τεχνικής Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών. Η ΑΚΣ παρέχει δύο σημαντικές δυνατότητες: α. τη μείωση του αριθμού των απαιτούμενων μεταβλητών για την επαρκή ερμηνεία των αποτελεσμάτων του πειράματος και β. τη χαρτογράφηση του τρόπου αλληλεπίδρασης των μεταβλητών και των δειγμάτων.

Κατά τη συσχέτιση πολλών μεταβλητών (ανεξάρτητων και εξαρτημένων) μπορεί οι διάφορες μεταβλητές να έχουν μετρηθεί σε διαφορετικές κλίμακες και έτσι κατά τη στατιστική ανάλυση οι διακυμάνσεις με τις μεγαλύτερες τιμές να επικαλύπτουν (κυριαρχούν) αυτές με το μικρότερο εύρος τιμών. Η ΑΚΣ περιλαμβάνει το μετασχηματισμό της κλίμακας των μεταβλητών μιας σειράς πολυμεταβλητών δεδομένων κατά τρόπο ώστε οι διακυμάνσεις να γίνονται συγκρίσιμες με ίση βάση. Με τον τρόπο

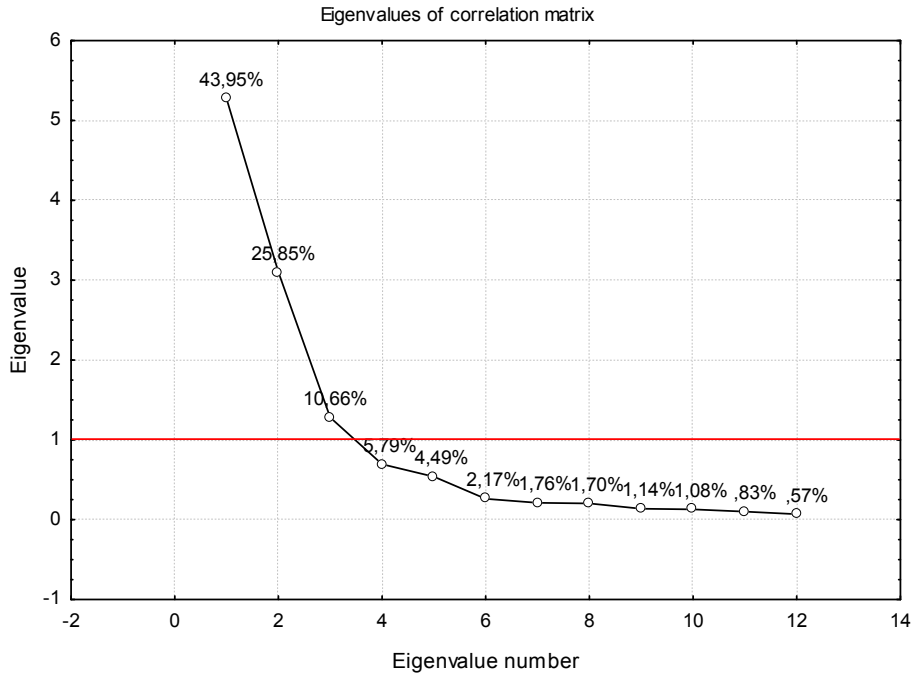
αυτό εξαλείφεται η περίπτωση η αντιπροσώπευση των μεταβλητών μόνο με βάση το μέγεθος. Ένα δεύτερο σημείο μη ορθής ανάλυσης τέτοιων δεδομένων είναι ότι αυτά δεν ξεκινούν από το ίδιο σημείο (κέντρο). Η ΑΚΣ συμπεριλαμβάνει τη δημιουργία ενός νέου σημείου εκκίνησης (mean centering, μέσο κέντρο) για τα δεδομένα που ορίζονται από το μέσο όρο των πολυμεταβλητών. Αυτό προσφέρει ένα νέο σημείο αναφοράς για τις μετασχηματισμένες μεταβλητές, με βάση τις οποίες μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση.

Με τις παραπάνω προεργασίες, η ΑΚΣ επιτρέπει την επεξεργασία όλων των μεταβλητών με βάση το ίδιο επίπεδο (μέγεθος-κλίμακα) και το ίδιο σημείο εκκίνησης. Μετά την προεργασία αυτή, η ανάλυση προχωρά με εύρεση ενός αριθμού κυρίων συνιστωσών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις αρχικές μεταβλητές υπό το πρίσμα των ελαχίστων τετραγώνων. Δηλαδή ανευρίσκεται και χρησιμοποιείται ένα νέο σύστημα συντεταγμένων το οποίο προβλέπει ένα πίνακα παρατηρήσεων ως μια προσέγγιση της νέας μεταβλητής (διάνυσμα $\hat{X}$). Αυτό διεξάγεται σταδιακά, δηλαδή πρώτα εξάγεται η πρώτη κύρια συνιστώσα (*PC1*), η οποία για παράδειγμα περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης της νέας μεταβλητής $\hat{X}$ και κατόπιν ακολουθεί η δεύτερη κοκ. Για την καλύτερη κατανόηση, αναφέρουμε κατά απλοποιημένο τρόπο τι συμβαίνει κατά το συσχετισμό δύο από τις πολλές μεταβλητές που έχουν μετρηθεί σε ένα πείραμα. Οι δύο μεταβλητές μπορούν να παρασταθούν σε σύστημα συντεταγμένων και ανάλογα με τις τιμές που έχει λάβει η κάθε μία κατά τη μέτρηση. Η Κύρια Συνιστώσα 1 (*PC1*) αποτελεί τον τρίτο άξονα σε ένα τέτοιο γράφημα, ο οποίος διέρχεται από τη μέση τιμή των πολυμεταβλητών δεδομένων $\hat{X}$. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούμε το σημείο έναρξης του νέου συστήματος αξόνων, που στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται ως η *PC1*. Η κατεύθυνση της *PC1* εκλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριλαμβάνει τη μέγιστη διακύμανση των δεδομένων. Κάθε παρατήρηση στο σύνολο των αρχικών δεδομένων $x_i = (x_1, x_2)$ μπορεί στη συνέχεια να προβληθεί στον άξονα *PC1*. Η προβολή αυτή κατά μήκος του *PC1* αποτελεί τη βαθμολογία ti. Με άλλα λόγια ti είναι η νέα τιμή για μια παρατήρηση στο νέο σύστημα αξόνων. Έτσι για ένα σύνολο δεδομένων $\hat{X}$ με N παρατηρήσεις, τα άνυσμα της βαθμολογίας $t=(t_i,...,t_N)$ με μοναδικότητα ορίζει το σύνολο των μετασχηματισμένων δεδομένων.

Ειδικότερα, η μείωση του αρχικού αριθμού των μεταβλητών στον καινούργιο αριθμό των απαιτούμενων μεταβλητών (κύριες συνιστώσες) πραγματοποιείται μέσω της κατασκευής των γραμμικών συνδυασμών των αρχικών μεταβλητών και είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Κατά συνέπεια δημιουργείται ένας πίνακας συνδιακύμανσης ή συσχέτισης μεταξύ του αριθμού n των μεταβλητών, από τον οποίο προσδιορίζονται οι χαρακτηριστικές ρίζες (ιδιοτιμές – eigevalues) και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά διανύσματα (scree plot). Οι ιδιοτιμές διατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά και αποτελούν τις συνδιακυμάνσεις των κυρίων συνιστωσών. Οι κύριες συνιστώσες παρέχονται από τις εξισώσεις:

$$
\begin{aligned}
PC1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \ldots + a_{1n}X_n \\
PC2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \ldots + a_{2n}X_n \\
&\ldots \\
PCn &= a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \ldots + a_{nn}X_n
\end{aligned}
\qquad \textbf{4-2}
$$

όπου *PC1-PCn* οι κύριες συνιστώσες, a_{11}-a_{nn} τα χαρακτηριστικά διανύσματα τα οποία αποτελούν τους συντελεστές των γραμμικών εξισώσεων της σχέσης, και σχετίζονται με την κλίση του υπερεπίπεδου που δημιουργείται στο χώρο από τις κύριες συνιστώσες, και X_1-X_n οι προσδιορισθείσες μεταβλητές. Πρακτικά μόνο ένας πολύ μικρός αριθμός κύριων συνιστωσών επιλέγεται για περαιτέρω μελέτη (*PC1-PC3)*. Η επιλογή του μέγιστου αριθμού των προς μελέτη κυρίων συνιστωσών γίνεται με βάση το διάγραμμα ιδιοτιμών - scree plot. Γενικά επιλέγονται μόνο οι κύριες συνιστώσες που χαρακτηρίζονται από τιμή ιδιοδιανύσματος μεγαλύτερη ή ίση του 1 (Σχήμα 4.6-1).



Σχήμα 4.6-1 Διάγραμμα ιδιοτιμών (eigenvalue) - αριθμού ιδιοδιανύσματος (eigenvalue number) για την επιλογή των απαιτούμενων κυρίων συνιστωσών.

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ΑΚΣ πρέπει επίσης να κατασκευασθεί ο πίνακας συσχέτισης των κυρίων συνιστωσών με τις προσδιορισμένες μεταβλητές. Με βάση τον πίνακα συσχέτισης καθορίζεται ο τρόπος συσχέτισης των μεταβλητών με τους άξονες των διαγραμμάτων ΑΚΣ. Έτσι, για μια ιδιότητα η οποία συσχετίζεται σημαντικά (>0,7 ή <-0,7) με τον άξονα *PC1*, η τιμή της θα μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα και ανάλογα με το είδος της συσχέτισης (θετική ή αρνητική). Στην περίπτωση όπου η σύσταση των μεταβλητών είναι σύνθετη, δηλαδή περιλαμβάνει ιδιότητες που έχουν προσδιορισθεί σε διαφορετική κλίμακα, πχ. οργανοληπτικά δεδομένα και αντικειμενικές μετρήσεις, τότε πριν την επεξεργασία τους τα δεδομένα κανονικοποιούνται (Σούκουλης, 2009).

Πίνακας 4-8 Συντεταγμένες κυρίων συνιστωσών, με βάση τις συσχετίσεις, που προκύπτουν από την ΑΚΣ.

	PC1	*PC2*	*PC3*	*PC4*	*PC5*	*PC6*	*PC7*	*PC8*	*PC9*	*PC10*	*PC11*	*PC12*
X1	**-0,759**	-0,545	-0,085	-0,067	0,151	-0,187	0,122	0,060	0,026	-0,063	0,055	0,176
X2	**-0,840**	-0,340	-0,123	-0,047	0,071	0,088	-0,054	-0,368	0,077	0,032	-0,065	0,010
X3	**-0,874**	-0,273	0,037	-0,100	0,291	0,014	0,067	0,024	-0,081	-0,154	0,074	-0,155
X4	-0,196	-0,223	**-0,765**	0,554	0,068	0,094	-0,018	0,069	-0,010	0,027	0,018	-0,008
X5	**-0,739**	0,507	-0,224	-0,045	-0,438	0,016	0,297	-0,044	-0,002	-0,010	0,023	-0,025
X6	**0,856**	-0,091	-0,028	-0,077	0,365	0,132	0,297	-0,008	0,038	0,091	-0,067	-0,002
X7	**-0,833**	-0,362	0,227	-0,086	-0,035	0,156	-0,012	0,080	-0,167	0,233	0,047	0,018
X8	0,371	**-0,815**	0,070	-0,080	-0,225	0,323	0,002	0,048	-0,002	-0,163	-0,020	0,047
X9	**-0,718**	0,564	-0,034	-0,174	0,101	0,184	-0,069	0,152	0,246	0,025	0,048	0,006
X10	0,333	0,135	**-0,741**	-0,551	0,025	-0,005	-0,086	0,009	-0,096	0,005	-0,004	0,011
X11	**0,729**	-0,607	-0,059	-0,059	-0,097	-0,050	0,012	-0,085	0,106	0,076	0,235	-0,045
X12	-0,249	**-0,894**	-0,095	-0,111	-0,157	-0,160	0,007	0,134	0,116	0,071	-0,147	-0,090

5 Δομικές Ιδιότητες Προϊόντων Εκβολής

5.1 Αντικείμενο και στόχοι

Η δομή των προϊόντων εκβολής είναι βασική ποιοτική παράμετρος για τον καθορισμό και την αντίληψη της υφής τους. Η δομή των προϊόντων εκβολής προσεγγίζεται από μια σειρά ιδιοτήτων οι οποίες περιλαμβάνουν τη φαινόμενη πυκνότητα, την πραγματική πυκνότητα, το πορώδες και τον συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων.

Η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_a) των διογκωμένων προϊόντων υπολογίζεται από το λόγο της μάζας τους προς το συνολικό όγκος τους, συμπεριλαμβανομένων και των πόρων του αέρα. Η πραγματική πυκνότητα (ρ_t) αναφέρεται στην πυκνότητα του υλικού χωρίς τους πόρους και υπολογίζεται από την μάζα του υλικού προς τον πραγματικό όγκο. Το πορώδες (ε) των διογκωμένων προϊόντων χαρακτηρίζει την αφρώδη τους δομή και υπολογίζεται μέσω της φαινόμενης και της πραγματικής πυκνότητας. Ο συντελεστής διόγκωσης (*Exp R*) αναφέρεται στο ποσοστό της διόγκωσης του τήγματος, που υφίσταται εκβολή, κατά την έξοδό του από την μήτρα μορφοποίησης. Συνήθως αναφέρεται στην ακτινική διόγκωση του προϊόντος και υπολογίζεται από τον λόγο των διαμέτρων του προϊόντος και της μήτρας.

Οι ιδιότητες αυτές μελετήθηκαν για προϊόντα που παρείχθησαν από αραβοσιτάλευρο και από μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου. Επίσης εξετάσθηκε η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στις δομικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων της υγρασίας του υλικού τροφοδοσίας, της θερμοκρασίας εκβολής και της παροχής του υλικού τροφοδοσίας.

Κύριος στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στις δομικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής (φαινόμενη πυκνότητα, πραγματική πυκνότητα, πορώδες, συντελεστής διόγκωσης) και η κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη δημιουργία της διογκωμένης-αφρώδους δομής τους. Επίσης πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη απλών μαθηματικών προτύπων, που επιτρέπει την πρόβλεψη των ιδιοτήτων δομής από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, και κατ' επέκταση το σχεδιασμό διογκωμένων τροφίμων εκβολής με επιθυμητές δομικές ιδιότητες.

5.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια στροφή των καταναλωτών σε τρόφιμα με θετική συνεισφορά στην υγεία. Η Μεσογειακή διατροφή έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ ευεργετική για την υγεία του ανθρώπου (Panagiotakos, Pitsavos & Stefanadis, 2006; Romaguera, Bamia, Pons, Tur & Trichopoulou, 2009; Trichopoulou et al., 2009), είναι κατά βάση Ελληνική και περιλαμβάνει την κατανάλωση κυρίως φυτικών τροφίμων. Για τον λόγο αυτό παρατηρείται μια μείωση στην κατανάλωση ζωικών πρωτεϊνών. Επίσης, γίνεται προσπάθεια για αντικατάσταση αυτών και για την αύξηση της κατανάλωσης πρωτεϊνών φυτικής προέλευσης. Τα όσπρια είναι από τις καλύτερες και πλουσιότερες πηγές φυτικών πρωτεϊνών (Duranti, 2006; Ohr, 2010). Επιπρόσθετα το θρεπτικό τους περιεχόμενο, σε ότι αφορά τις πρωτεΐνες, αυξάνεται με συνδυασμό αυτών με

δημητριακά. Επίσης οι καταναλωτές τα τελευταία χρόνια στρέφονται και αναζητούν τρόφιμα τα οποία έχουν υποστεί τη μικρότερη δυνατή επεξεργασία (Sloan, 2010a; Sloan, 2010b). Η εκβολή είναι μια διεργασία τροφίμων, η οποία στηρίζεται στην τεχνολογία HTST (High Temperature-Short Time), και μπορεί να παραγάγει μια ποικιλία προϊόντων με υψηλούς βαθμούς απόδοσης, τα οποία είναι έτοιμα προς κατανάλωση, καθώς επίσης και ευκολόχρηστα.

Η εκβολή είναι μια διεργασία που μπορεί να δώσει μια σειρά διαφορετικών τροφίμων αλλάζοντας μόνο τις συνθήκες εκβολής. Η δομή των προϊόντων αυτών καθορίζεται και επηρεάζεται από τις συνθήκες εκβολής που εφαρμόζονται και επίσης από τη συγκέντρωση των συστατικών που τροφοδοτούνται στον εκβολέα. Για την παραγωγή διογκωμένων τροφίμων εκβολής χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις οι εκβολείς διπλού κοχλία. Η διόγκωση των προϊόντων αυτών εκφράζεται μέσω του πορώδους και του συντελεστή διόγκωσης. Στο παρελθόν έχει μελετηθεί η ανάπτυξη της αφρώδους δομής προϊόντων από άμυλο αραβοσίτου, σίτου, ρυζιού και πατάτας (Artz et al., 1990; Cheyne, Barnes, Gedney & Wilson, 2005; Hagenimana, Ding & Fang, 2006; Ryu & Ng, 2001; Thymi, Krokida, Pappa & Maroulis, 2005). Στις μελέτες αυτές χρησιμοποιείται κυρίως εκβολέας διπλού κοχλία. Επίσης έχει μελετηθεί και προτυποποιηθεί η ανάπτυξη των πόρων και η διόγκωση των προϊόντων (Alvarez-Martinez et al., 1988; Kumagai, Kumagai & Yano, 1993). Τα περισσότερα πρότυπα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την περιγραφή των δομικών ιδιοτήτων των διογκωμένων τροφίμων εκβολής είναι πολύπλοκες μαθηματικές εκφράσεις, με σταθερές οι οποίες δεν έχουν κάποια φυσική σημασία (προκύπτουν απλά από την προσαρμογή) και είναι δύσκολη η χρήση τους για μια γρήγορη εκτίμηση της τάξης μεγέθους των δομικών ιδιοτήτων.

Η χρήση οσπρίων στην παραγωγή διογκωμένων τροφίμων εκβολής αυξημένης διατροφικής αξίας (σνακ δευτέρας γενεάς) είναι ένα σχετικά νέο ερευνητικό πεδίο. Στο παρελθόν οι έρευνες αφορούσαν και περιορίζονταν στη μελέτη της σόγιας ή πρωτεϊνικών της συμπυκνωμάτων και την ανάπτυξη νέων προϊόντων με τη χρήση της (σε συνδυασμό με δημητριακά), είτε έτοιμα για κατανάλωση, είτε προζελατινοποιημένα άλευρα ή ημι-προϊόντα που να μιμούνται την υφή του κρέατος (Frazier, Crawshaw, Daniels & Russell Eggitt, 1983; Hager, 1984; Iwe, 1998; Lee & Brennand, 2005; Lin, Huff & Hsieh, 2002; Obatolu, Omueti & Adebowale, 2006; Pırez, Drago, Carrara, De Greef, Torres & Gonzalez, 2008). Η μελέτη και ανάπτυξη διογκωμένων προϊόντων εκβολής εμπλουτισμένα με άλλες πηγές οσπρίων είναι περιορισμένη. Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί προϊόντα από φασόλια και μπιζέλια (Alonso, Orúe, Zabalza, Grant & Marzo, 2000; Anton et al., 2009; Gujska & Khan, 1991a; Hernandez-Diaz, Quintero-Ramos, Barnard & Balandran-Quintana, 2007; Wang, Bhirud & Tyler, 1999). Στις προαναφερθείσες εργασίες συνήθως χρησιμοποιούνταν μέρος του οσπρίου, είτε το άμυλο, είτε το πρωτεϊνικό του κλάσμα. Από τα παραπάνω προκύπτει σαφώς ότι υπάρχει ανάγκη μελέτης της αφρώδους δομής τροφίμων εκβολής και άλλων οσπρίων και η επίδραση της προσθήκης αυτών σε τέτοιου είδους προϊόντα.

Σκοπός αυτού του μέρους της διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας (θερμοκρασία εκβολής και παροχή τροφοδοσίας) και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών (αναλογία υλικών τροφοδοσίας και περιεχόμενη υγρασία) στις δομικές ιδιότητες (φαινόμενη πυκνότητα, πραγματική πυκνότητα, πορώδες και συντελεστής διόγκωσης) διογκωμένων προϊόντων εκβολής με προσθήκη αλεύρου οσπρίου ολικής άλεσης και αραβοσιτάλευρου. Για το σκοπό αυτό θα αναπτυχθούν απλά μαθηματικά πρότυπα, τα οποία θα περιέχουν φυσικές παραμέτρους, και θα επιτρέπουν την εύκολη και αξιόπιστη πρόβλεψη των ιδιοτήτων δομής που εξετάζονται.

5.3 Μαθηματικό Πρότυπο

Η πραγματική πυκνότητα των τροφίμων ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας δίνεται από τη σχέση (Krokida & Maroulis, 1997):

$$\rho_t = \frac{1+X}{\frac{1}{\rho_s}+\frac{X}{\rho_w}} \qquad \textbf{5-1}$$

όπου ρ_s κα ρ_w η πυκνότητα του καθαρού στερεού και του νερού, αντίστοιχα, και X η περιεχόμενη υγρασία.

Η φαινόμενη πυκνότητα των τροφίμων ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας δίνεται από τη σχέση (Krokida et al., 1997):

$$\rho_a = \frac{(1+X)\cdot\rho_{a0}}{1+\beta\cdot X} \qquad \textbf{5-2}$$

όπου ρ_{a0} η φαινόμενη πυκνότητα του ξηρού στερεού (δηλαδή για X=0), β ο συντελεστής συρρίκνωσης και X η περιεχόμενη υγρασία.

Τα διογκωμένα προϊόντα εκβολής θεωρούνται τρόφιμα με πολύ χαμηλό ποσοστό υγρασίας. Οπότε από τις σχέσεις 6-1 και 6-2, προκύπτει ότι η πραγματική πυκνότητα είναι ίση με την πυκνότητα του στερεού και η φαινόμενη πυκνότητα εξαρτάται μόνο από τις διαστάσεις του υλικού.

Θεωρώντας τα προϊόντα εκβολής ότι έχουν κυλινδρικό σχήμα η φαινόμενή τους πυκνότητα δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_a = \frac{4\cdot m}{\pi\cdot d^2\cdot L} \qquad \textbf{5-3}$$

όπου m η μάζα του τροφίμου (g), L το μήκος του (cm) και d η διάμετρος (cm^2).

Το πορώδες των κυψελοειδών τροφίμων ορίζεται από τη σχέση (Krokida et al., 1997):

$$\varepsilon = 1-\frac{\rho_a}{\rho_t} \qquad \textbf{5-4}$$

όπου ρ_a η φαινόμενη και ρ_t η πραγματική πυκνότητα του τροφίμου.

Βασική ιδιότητα δομής των προϊόντων εκβολής που χαρακτηρίζει τη δημιουργία διογκωμένης ανοικτής δομής είναι ο συντελεστής διόγκωσης. Ο συντελεστής διόγκωσης ορίζεται ως ο λόγος της διαμέτρου του προϊόντος προς τη διάμετρο της μήτρας του εκβολέα.

$$Exp = \frac{d}{d_{die}} \qquad \textbf{5-5}$$

όπου d και d_{die} η διάμετρος του τροφίμου εκβολής και της μήτρας, αντίστοιχα.

Οι παράμετροι της διεργασίας και η σύσταση του υλικού που υφίσταται εκβολή επηρεάζουν σημαντικά τη δημιουργία της δομής του τελικού προϊόντος. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη ενός μαθηματικού προτύπου για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων δομής των προϊόντων εκβολής. Το προτεινόμενο πρότυπο συνοψίζεται στον Πίνακα 5-1.

Το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των δομικών ιδιοτήτων (φαινόμενη πυκνότητα και συντελεστής διόγκωσης) είναι ένα εκθετικό πρότυπο. Η προτεινόμενη εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$M = M_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_{T,M}} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_{F,M}} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_{X,M}} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_0}\right)^{n_{C,M}} \qquad \textbf{5-6}$$

όπου M η ιδιότητα, M_0 η ιδιότητα στις συνθήκες αναφοράς, T η θερμοκρασία εκβολής (°C), F η παροχή τροφοδοσίας (kg/h), X η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας (υ.β.) και C η αναλογία οσπρίου προς αραβοσιτάλευρο (%). Τα σύμβολα με τους μηδενικούς δείκτες είναι οι αντίστοιχες τιμές στις συνθήκες αναφοράς. Οι συνθήκες αναφοράς είναι θερμοκρασία 200°C, παροχή τροφοδοσίας 4,68 kg/h, υγρασία τροφοδοσίας 16% υ.β. και αναλογία υλικών 30%.

Το πρότυπο για κάθε δομική ιδιότητα περιέχει πέντε παραμέτρους: την ιδιότητα στις συνθήκες αναφοράς (M_0), τον εκθέτη της θερμοκρασίας ($n_{T,M}$), τον εκθέτη της παροχής ($n_{F,M}$), τον εκθέτη της υγρασίας ($n_{X,M}$) και τον εκθέτη της αναλογίας οσπρίου προς αραβοσιτάλευρο ($n_{C,M}$).

Η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στις δομικές ιδιότητες (θερμοκρασία και παροχή τροφοδοσίας) εκφράζεται μέσω των εκθετών $n_{T,M}$ και $n_{F,M}$, ενώ η επίδραση των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών (υγρασία και αναλογία οσπρίου προς αραβοσιτάλευρο) μέσω των εκθετών $n_{X,M}$ και $n_{C,M}$. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις δομικές ιδιότητες εκτιμώνται με ανάλυση παλινδρόμησης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

Πίνακας 5-1 Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης δομικών ιδιοτήτων τροφίμων εκβολής.

Μαθηματικό πρότυπο δομικών ιδιοτήτων	
1. Ιδιότητες	
ρ_α φαινόμενη πυκνότητα	(g/cm^3)
ρ_t πραγματική πυκνότητα	(g/cm^3)
ε πορώδες	(-)
Exp συντελεστής διόγκωσης	(-)
2. Χαρακτηριστικά υλικών	
C αναλογία αλεύρων φακής προς αραβοσιτάλευρο	(%)
X υγρασία τροφοδοσίας	(% υ.β.)
3. Παράμετροι διεργασίας	
T θερμοκρασία εκβολής	(°C)
F παροχή τροφοδοσίας	(kg/h)
4. Εξισώσεις ιδιοτήτων	
$\rho_\alpha = \rho_{\alpha,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_{T,\rho}} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_{F,\rho}} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_{X,\rho}} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_0}\right)^{n_{C,\rho}}$	(g/cm^3)
$Exp = Exp_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_{T,Exp}} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_{F,Exp}} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_{X,Exp}} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_0}\right)^{n_{C,Exp}}$	(-)
$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t}$	(-)
$\rho_t = \frac{m_t}{V_t}$	(g/cm^3)
5. Παράμετροι	
$\rho_{\alpha,0}$ φαινόμενη πυκνότητα στις συνθήκες αναφοράς	(g/cm^3)
Exp_0 συντελεστής διόγκωσης στις συνθήκες αναφοράς	
$n_{T,\rho}$ και $n_{T,Exp}$ εκθέτες θερμοκρασίας	(-)
$n_{F,\rho}$ και $n_{F\,Exp}$ εκθέτες παροχής τροφοδοσίας	(-)
$n_{X,\rho}$ και $n_{X\,Exp}$ εκθέτες υγρασίας	(-)
$n_{C,\rho}$ και $n_{C,Exp}$ εκθέτες αναλογίας υλικών	(-)

5.4 Πειραματική Διαδικασία

5.4.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων

Η προετοιμασία και παραγωγή των τροφίμων εκβολής πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

5.4.2 Προσδιορισμός δομικών ιδιοτήτων

5.4.2.1 Φαινόμενη πυκνότητα

Η φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής προσδιορίστηκε από τη μάζα και τις διαστάσεις του προϊόντος, θεωρώντας ότι έχει κυλινδρικό σχήμα (κυλινδρικό άνοιγμα

μήτρας). Η διάμετρος και το μήκος του προϊόντος μετρήθηκε με παχύμετρο. Η φαινόμενη πυκνότητα υπολογίζεται από τη σχέση 5-3.

Για κάθε δείγμα η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας αντιστοιχεί στο μέσο όρο δέκα μετρήσεων για κάθε πειραματική επανάληψη.

5.4.2.2 Πραγματική πυκνότητα

Η πραγματική πυκνότητα προσδιορίσθηκε με χρήση στερεοπυκνόμετρου ηλίου Quantachrome (model MVP-1, Quantachrome, Florida, USA) (Σχήμα 5.4-1). Η αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Μια προζυγισμένη ποσότητα δείγματος λειοτριβείται και προσδιορίζεται ο πραγματικός όγκος, με χρήση της κυψελίδας micro. Ο όγκος και η πυκνότητα υπολογίζονται από τις σχέσεις 3-3 και 3-4.

Οι όγκοι V_C και V_R προσδιορίσθηκαν από τη βαθμονόμηση του οργάνου, με χρήση μεταλλικών σφαιρών γνωστής διαμέτρου, για την κυψελίδα micro. Οι τιμές δίνονται στον Πίνακα 5-2.

Για κάθε δείγμα η τιμή της πραγματικής πυκνότητας αντιστοιχεί στο μέσο όρο τουλάχιστον τριών μετρήσεων για κάθε επανάληψη.

5.4.2.3 Πορώδες

Το πορώδες των τροφίμων εκβολής προσδιορίσθηκε μέσω της πραγματικής και της φαινόμενης πυκνότητας, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, από τη σχέση 3-6.

Για κάθε δείγμα η τιμή του πορώδους αντιστοιχεί στο μέσο όρο τουλάχιστον τριών μετρήσεων για κάθε επανάληψη.

Πίνακας 5-2 Τιμές όγκων V_C και V_R για κυψελίδα micro.

	V_C (cm^3)	V_R (cm^3)
Micro	12,531	7,315

Σχήμα 5.4-1 Στερεοπυκνόμετρο Quantachrome.

5.4.2.4 Συντελεστής διόγκωσης

Ο συντελεστής διόγκωσης των τροφίμων εκβολής, που αφορά την ακτινική διόγκωση του προϊόντος, προσδιορίσθηκε από το λόγο της διαμέτρου του προϊόντος και της διαμέτρου της μήτρας του εκβολέα. Ο προσδιορισμός της διαμέτρου πραγματοποιήθηκε με παχύμετρο. Ο συντελεστής διόγκωσης υπολογίζεται από τη σχέση 5-5.

Για κάθε δείγμα η τιμή του συντελεστή διόγκωσης αντιστοιχεί στο μέσο όρο δέκα μετρήσεων για κάθε επανάληψη.

5.4.2.5 Στερεοσκοπία

Για την παρατήρηση της δομής των προϊόντων εκβολής χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο Olympus SZ61 (Stereoscope SZ61, Olympus, Center Valley, PA, USA), το οποίο έχει προσαρμοσμένη έγχρωμη ψηφιακή κάμερα (model SC30, Olympus, Center Valley, PA, USA), ανάλυσης 3,3MPixel. Το στερεοσκόπιο και η κάμερα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4-2.

Σχήμα 5.4-2 Στερεοσκόπιο Olympus SZ61.

5.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

5.5.1 Φαινόμενη πυκνότητα

Η ανάλυση της παλινδρόμησης έδειξε ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν τη φαινόμενη πυκνότητα σημαντικά ($p < 0.001$) είναι τα ρ_{a0}, $n_{T,\rho}$, $n_{F,\rho}$, $n_{x,\rho}$, $n_{c,\rho}$. Οι τιμές των εκτιμώμενων παραμέτρων συνοψίζονται στον Πίνακα 5-3. Οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των προϊόντων εκβολής συνοψίζονται στον Πίνακα 13-2 του Παραρτήματος. Στο Σχήμα 5.5-1 παρουσιάζονται οι μεταβολές της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των υλικών. Η φαινόμενη πυκνότητα αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής.

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ιξώδους του μίγματος, γεγονός που ευνοεί την ανάπτυξη των φυσαλίδων κατά τη διάρκεια της εκβολής (Mercier et al., 1989). Επιπρόσθετα η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του βαθμού υπερθέρμανσης του νερού στο χιτώνιο του εκβολέα. Κατά συνέπεια ένα προϊόν που θα έχει αναπτύξει υψηλό πορώδες, θα έχει χαμηλή τιμή για τη φαινόμενη πυκνότητα (Lazou et al., 2010b),

όπως παρατηρείται στα προϊόντα που έχουν παραχθεί στις υψηλότερες θερμοκρασίες (Σχήμα 5.5-1).

Οι μεταβολές της παροχής του υλικού τροφοδοσίας στον εκβολέα επηρεάζουν το βαθμό πλήρωσης του χιτωνίου. Η παροχή επηρεάζει τις παραμέτρους του συστήματος, όπως ο μέσος χρόνος παραμονής του υλικού και η ειδική μηχανική ενέργεια (Lazou et al., 2007; Liang, Huff & Hsieh, 2002). Τα μεγέθη αυτά εν συνεχεία επιδρούν στη ρεολογία του τήγματος μέσα στο χιτώνιο του εκβολέα. Έτσι η αύξηση της παροχής τροφοδοσίας αυξάνει το τελικό ιξώδες του προϊόντος, γεγονός που συμβάλει στη δημιουργία πυκνότερων δομών. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για προϊόντα εκβολής από αραβόσιτο, ρύζι και φασόλια (Chang, Martinez-Bustos & Lara, 1998; Chang, Martinez-Bustos, Park & Kokini, 1999; Ding, Ainsworth, Tucker & Marson, 2005; Ilo, Tomschik, Berghofer & Mundigler, 1996).

Πίνακας 5-3 Αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων του εκθετικού προτύπου με ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis).

	ρ_a (g/cm^3)	*Exp. Ratio* (-)
M_0	0,146 ± 0,001	2,251 ± 0,014
p-value	<0,0001	<0,0001
$n_{T,M}$	-0,537 ± 0,026	-1,086 ± 0,045
p-value	<0,0001	<0,0001
$n_{F,M}$	0,075 ± 0,053	0,414 ± 0,025
p-value	<0,0001	<0,0001
$n_{X,M}$	0,741 ± 0,063	-0,282 ± 0,046
p-value	<0,0001	<0,0001
$n_{C,M}$	-0,615 ± 0,019	0,251 ± 0,021
p-value	<0,0001	<0,0001
R^2	0,888	0,923

Τα χαρακτηριστικά των υλικών, η υγρασία τροφοδοσίας και η αναλογία των υλικών, επηρέασαν σημαντικά τη φαινόμενη πυκνότητα των εξεταζόμενων προϊόντων εκβολής. Η μεταβολή αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα των επιδράσεων αυτών των παραμέτρων της διεργασίας στα χαρακτηριστικά ελαστικότητας των υλικών που έχουν ως βάση το άμυλο (Ding et al., 2005). Η αύξηση της υγρασίας του υλικού τροφοδοσίας μπορεί να αλλάξει τη μακρομοριακή δομή του εξωθούμενου τήγματος μειώνοντας την ελαστικότητά του, ευνοώντας το σχηματισμό προϊόντων με πιο συμπαγείς δομές. Η προσθήκη του αλεύρου φακής στα μίγματα οδήγησε σε αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας. Το άλευρο φακής είναι πλούσιο σε πρωτεΐνες. Έτσι, η αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας μπορεί να συσχετισθεί να το αυξημένο πρωτεϊνικό περιεχόμενο των προϊόντων εκβολής. Παρόμοιες παρατηρήσεις για διάφορα προϊόντα εκβολής έχουν αναφερθεί από τους (Anton et al., 2009; Bhattacharya, 1997; Onwulata, Smith, Konstance & Holsinger, 2001; Sun & Muthukumarappan, 2002).

5.5.2 Πραγματική πυκνότητα

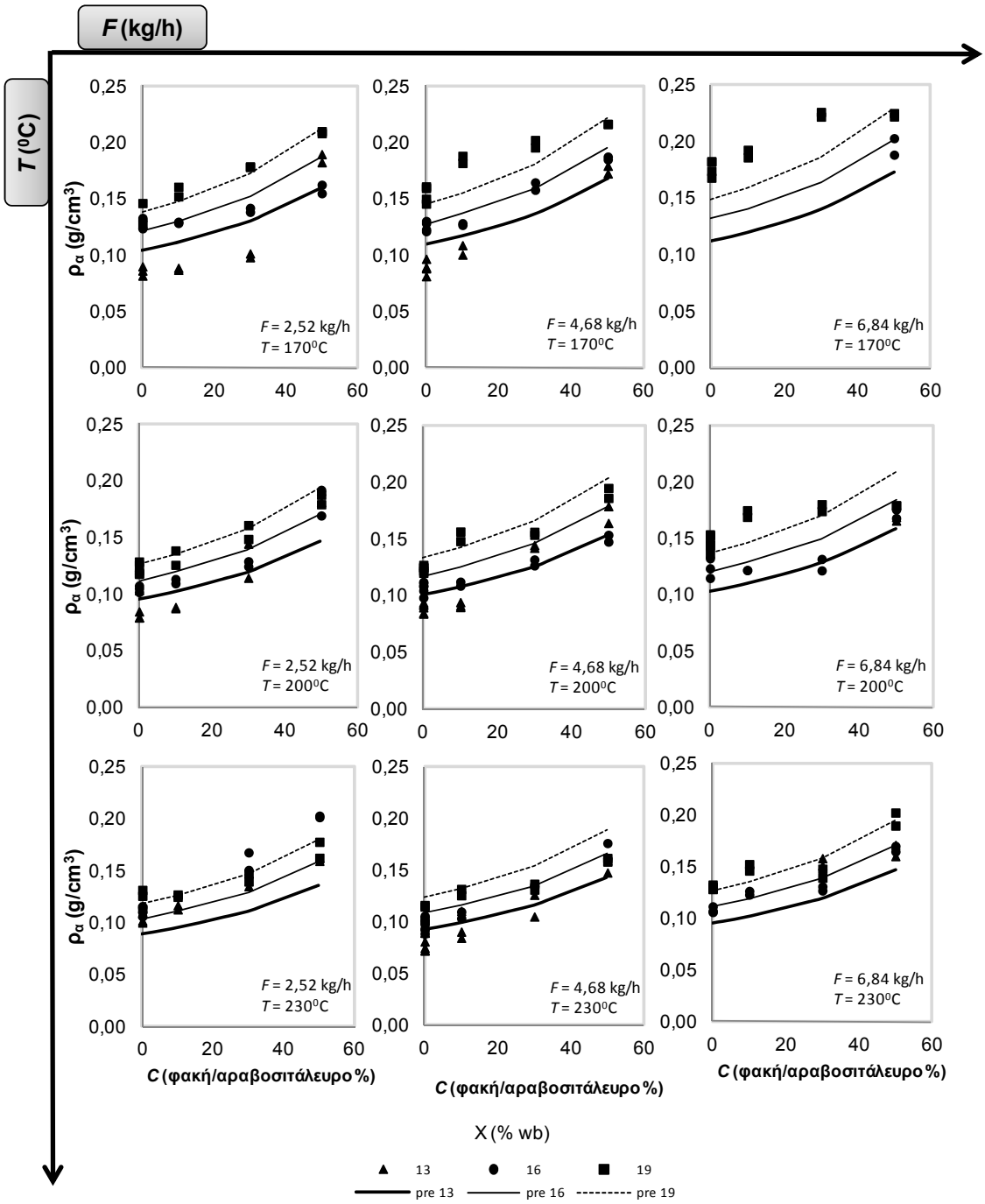
Τα προϊόντα εκβολής είναι τρόφιμα με χαμηλά ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας. Κατά συνέπεια η πραγματική τους πυκνότητα θα εξαρτάται μόνο από τα συστατικά που τα αποτελούν και θα είναι σταθερή και ίση με τη πυκνότητα του στερεού υλικού. Αυτό παρατηρήθηκε κατά τον προσδιορισμό της πραγματικής πυκνότητας των τροφίμων εκβολής με το στερεοπυκνόμετρο. Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται οι τιμές τις πραγματικής πυκνότητας για κάθε επεξεργασμένο υλικό.

5.5.3 Συντελεστής διόγκωσης

Εφαρμόζοντας την ανάλυση παλινδρόμησης αποδείχθηκε ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν το συντελεστή διόγκωσης σημαντικά ($p < 0{,}001$) είναι τα Exp_0, $n_{T,Exp}$, $n_{F,Exp}$, $n_{x,Exp}$, $n_{c,Exp}$. Οι τιμές των εκτιμώμενων παραμέτρων συνοψίζονται στον Πίνακα 5-3. Οι τιμές το συντελεστή διόγκωσης των τροφίμων εκβολής συνοψίζονται στον Πίνακα 13-2 του Παραρτήματος. Στο Σχήμα 5.5-2 παρουσιάζονται οι μεταβολές του συντελεστή διόγκωσης συναρτήσει των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των υλικών. Ο συντελεστής διόγκωσης αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο.

Πίνακας 5-4 Πραγματική πυκνότητα προϊόντων εκβολής.

***C* (φακή/αραβοσιτάλευρο)**	**ρ_t (g/cm^3)**
0	1,451±0,060
10	1,513±0,044
30	1,536±0,048
50	1,523±0,051



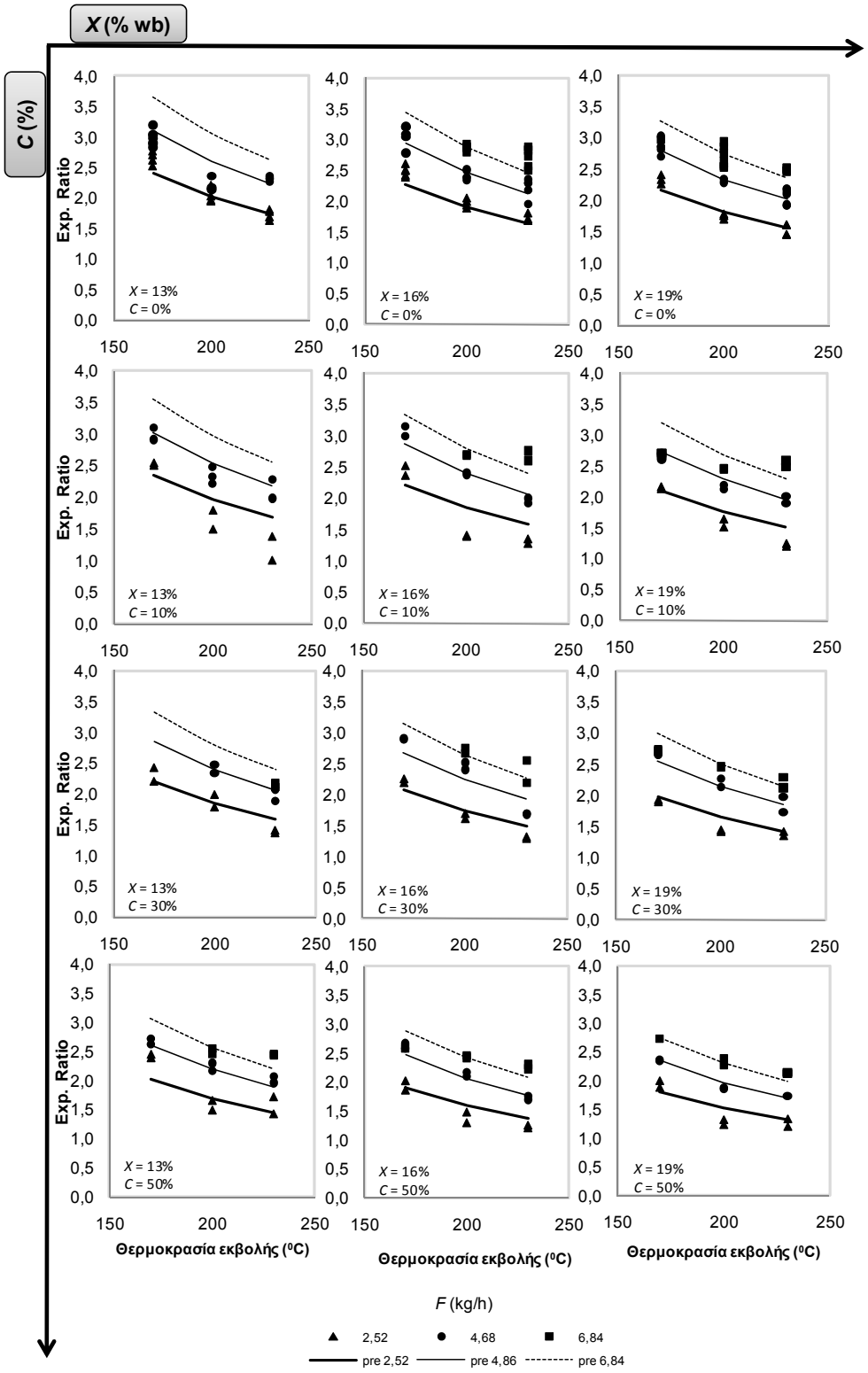
Σχήμα 5.5-1 Φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής, αυξάνεται ο βαθμός υπερθέρμανσης του νερού του εξωθούμενου τήγματος στον εκβολέα και αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία περισσότερων πόρων κατά την εξάτμιση του νερού με την έξοδο του υλικού από το χιτώνιο. Δηλαδή το προϊόν, όπως αποδείχθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, θα έχει χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα και υψηλότερο πορώδες. Η ενίσχυση της δημιουργίας πορώδους δομής με τη θερμοκρασία δεν εξασφαλίζει την αύξηση του συντελεστή διόγκωσης. Παρ' όλο που θα ήταν αναμενόμενο η διόγκωση των προϊόντων εκβολής να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται μείωσή της. Στα περισσότερα προϊόντα μειώθηκε η διόγκωση με τη θερμοκρασία. Από το Σχήμα 5.5-2 παρατηρείται ότι από τους 170°C έως τους 200°C η μείωση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που παρατηρείται στις θερμοκρασίες από 200°C έως 230°C. Σε προϊόντα εκβολής από άμυλο αραβοσίτου, επεξεργασμένα σε παρόμοιες ταχύτητες περιστροφής των κοχλιών, η αύξηση της θερμοκρασίας από 160°C έως τους 200°C μειώνει σημαντικά το συντελεστή διόγκωσης, ενώ σε άλλα εύρη θερμοκρασιών (από 100°C έως 140°C) αυξάνεται (Ali, Hanna & Chinnaswamy, 1996). Επίσης για προϊόντα εκβολής από λευκά φασόλια η διόγκωση μειώθηκε από 2,1 σε 1,9 για μεταβολή θερμοκρασίας από τους 132°C έως τους 150°C (Gujska & Khan, 1990). Ο συντελεστής διόγκωσης τροφίμων εκβολής διαφόρων αμυλούχων προϊόντων έχει βρεθεί ότι παρουσιάζει μέγιστη τιμή συναρτήσει της θερμοκρασίας, σε ένα εύρος μεταξύ των 140°C και 160°C, το οποίο εξαρτάται από το ποσοστό της αμυλόζης που περιέχεται στο προς εκβολή άλευρο (Chinnaswamy, 1993).

Ο συντελεστής διόγκωσης των τροφίμων εκβολής αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Τα αυξημένα επίπεδα παροχής μπορεί να προκαλέσουν αύξηση του ιξώδους του τήγματος, του οποίου η μεταβολή επηρεάζει το συντελεστή διόγκωσης του παραγόμενου τροφίμου εκβολής. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί στο παρελθόν για διάφορα αμυλούχα προϊόντα (Chang et al., 1999; Ding et al., 2005; González, Torres, De Greef & Guadalupe, 2006).

Συνεπώς, η ανισοτροπία της διόγκωσης θα πρέπει να εξαρτάται κυρίως από τις θερμικές συνθήκες και θα μπορούσε να προκύψει από την ισορροπία μεταξύ των πιέσεων τήγματος και ατμών στη μήτρα. Η ύπαρξή της επιτρέπει την εφαρμογή ενός απλού προτύπου για την ανάπτυξη των φυσαλίδων. Αυτό χρειάζεται πειραματική επιβεβαίωση, για παράδειγμα με ανάλυση εικόνας βίντεο των τμημάτων του εξωθήματος κατά την αξονική κατεύθυνση, για την οποία προς το παρόν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία. Λόγω της ανισοτροπίας, προϊόντα εκβολής με ίδια ογκομετρική διόγκωση μπορεί να παρουσιάζουν διαφορές στους εγκάρσιους και επιμήκεις δείκτες, οδηγώντας σε μια διαφορετική κατανομή φυσαλίδων και έτσι πιθανώς σε μια διαφορετική υφή (Della Valle, Vergnes, Colonna & Patria, 1997).

Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας και η αναλογία των υλικών μειώνουν το συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής, όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.5-2. Οι μεταβολές μπορούν να αποδοθούν στην επίδραση των συστατικών του μίγματος πάνω στη ρεολογία και την ελαστικότητα του τήγματος που επεξεργάζεται μέσα στον εκβολέα.



Σχήμα 5.5-2 Συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών.

5.5.4 Πορώδες

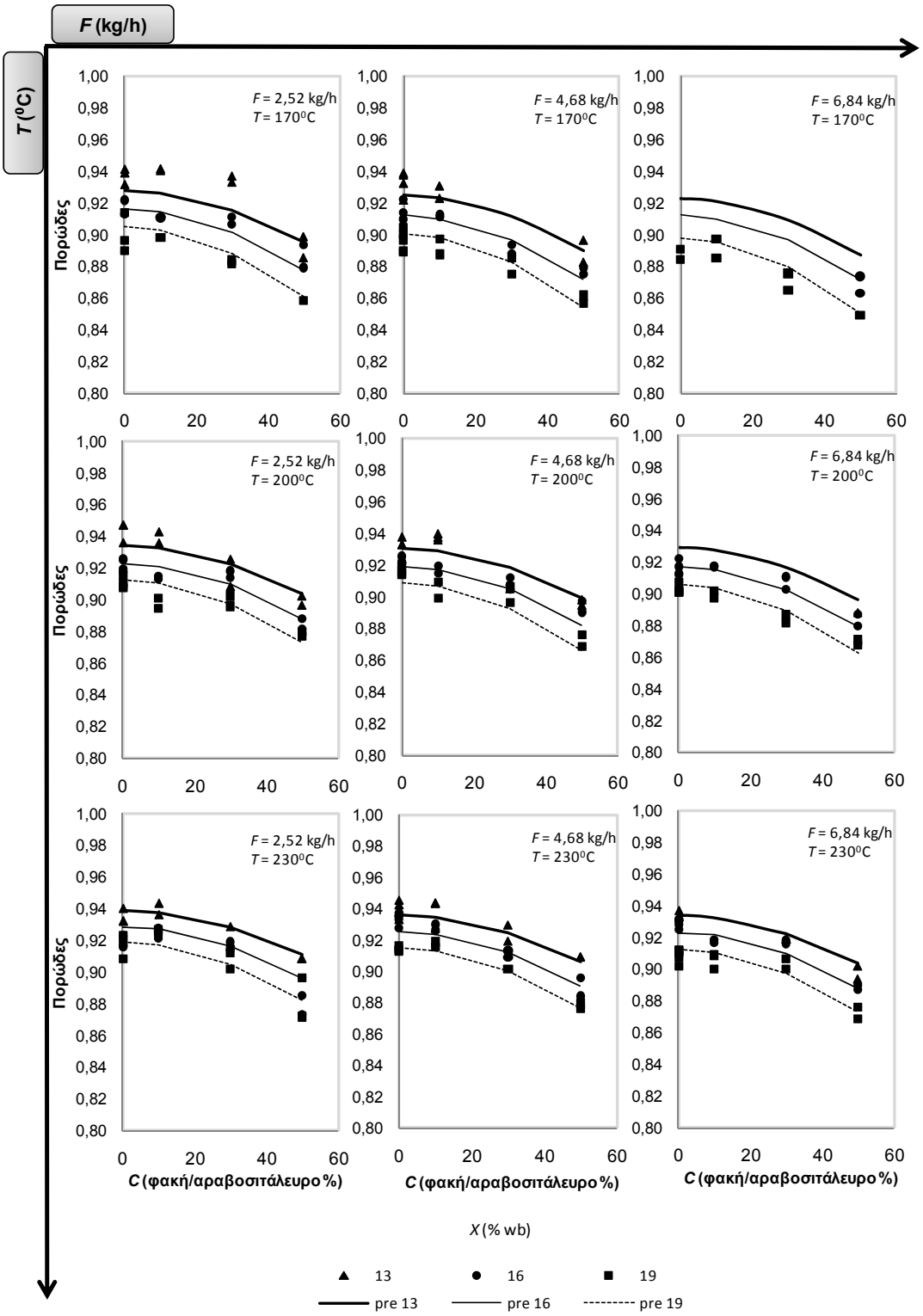
Το πορώδες των τροφίμων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αραβοσιτάλευρου και φακής προσδιορίσθηκε πειραματικά από τη φαινόμενη και τη πραγματική πυκνότητα των προϊόντων. Η πρόβλεψη του πορώδους, από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του μαθηματικού προτύπου της φαινόμενης πυκνότητας, λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 3-6, όπου για κάθε μίγμα λαμβάνεται η αντίστοιχη τιμή της πραγματικής πυκνότητας από τον Πίνακα 5-4. Οι τιμές του πορώδους των προϊόντων εκβολής συνοψίζονται στον Πίνακα 13-2 του Παραρτήματος. Οι μεταβολές του πορώδους με της συνθήκες εκβολής και τη σύσταση της πρώτης ύλης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5-3.

Όπως είναι αναμενόμενο το πορώδες μεταβάλλεται με αντίθετο τρόπο από ότι η φαινόμενη πυκνότητα. Δηλαδή το πορώδες μειώθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο και αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής. Τα προϊόντα εκβολής που μελετήθηκαν εμφανίζουν υψηλό πορώδες, γεγονός που υποδεικνύει ότι συνθήκες εκβολής που επιλέχθηκαν ευνοούν την ανάπτυξη πορώδους δομής.

5.5.5 Στερεοσκοπία

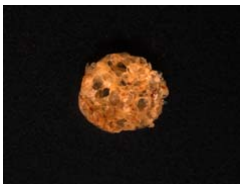
Στον Πίνακα 5-5 φωτογραφίες μερικών προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και άλευρο οσπρίων. Παρατηρείται η ομοιομορφία της δομής των δειγμάτων καθώς και η μεταβολή της διόγκωσης των προϊόντων.

Παρατηρώντας τη μακροδομή των διαφόρων προϊόντων εκβολής επιβεβαιώνονται και με οπτικό τρόπο οι μεταβολές σαν αποτέλεσμα των συνθηκών εκβολής και της σύστασης της πρώτης ύλης. Παρατηρείται μείωση της διόγκωσης με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία του υλικού τροφοδοσίας και τη συγκέντρωση του οσπρίου και αύξηση με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Επιπρόσθετα φαίνεται ότι ανεξαρτήτως του μεγέθους της διαμέτρου του προϊόντος το πορώδες του είναι υψηλό, όπως βρέθηκε και ενόργανα μέσω του πυκνομέτρου για όλα τα προϊόντα εκβολής που εξετάσθηκαν.



Σχήμα 5.5-3 Πορώδες των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών.

Πίνακας 5-5 Εικόνες τροφίμων εκβολής, όπου παρατηρείται η μακροδομή.

Φωτογραφία δειγμάτων	Φωτογραφίες διατομής με στερεοσκόπιο (10x)
Επίδραση *C* (φακή/αραβοσιτάλευρο %)	
L111M	
L511M	
Επίδραση *T*	
L111S	
L113S	
L511S	
L513S	
Επίδραση *X*	

L312M

L322M

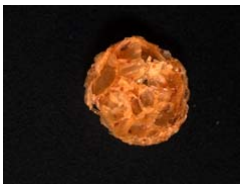
L332M

Επίδραση *F*

L133S

L133L

L531S



L531L

5.6 Συμπεράσματα

Μελετήθηκαν οι δομικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής με προσθήκη αλεύρου φακής, όπως αυτές επηρεάζονται από τις συνθήκες επεξεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Για τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών επεξεργασίας και της σύστασης της τροφοδοσίας στις δομικές ιδιότητες αναπτύχθηκαν εκθετικά πρότυπα, των οποίων οι εκθέτες εκφράζουν τις αντίστοιχες επιδράσεις. Η φαινόμενη πυκνότητα μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και αυξήθηκε με την παροχή τροφοδοσίας, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας κυμάνθηκαν από 0,08 g/cm^3 έως 0,18 g/cm^3, για τα προϊόντα εκβολής με αραβοσιτάλευρο, και από 0,08 g/cm^3 έως 0,22 g/cm^3, για τα προϊόντα εκβολής με φακή. Το πορώδες επηρεάσθηκε με αντίστροφο τρόπο από ότι η φαινόμενη πυκνότητα από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές του πορώδους για όλα τα προϊόντα εκβολής ήταν μεγαλύτερες του 0,85. Ο συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο. Οι τιμές του συντελεστή διόγκωσης κυμάνθηκαν από 1,53 έως 3,07, για τα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο, και από 1,18 έως 3,07, για τα προϊόντα με άλευρο φακής. Οι παράγοντες που ευνοούν την ανάπτυξη της κυψελοειδούς-διογκωμένης δομής των προϊόντων εκβολής, μειώνουν τη φαινόμενή τους πυκνότητα. Στις συνθήκες εκβολής που εξετάσθηκαν όλα τα προϊόντα που παρήχθησαν είχαν διογκωμένη-κυψελοειδή δομή. Η πραγματική πυκνότητα των τροφίμων εκβολής επηρεάζεται μόνο από τη σύσταση του τροφίμου.

6 Ιδιότητες υφής προϊόντων εκβολής

6.1 Αντικείμενο και στόχοι

Η υφή των διογκωμένων τροφίμων εκβολής αποτελεί μια από τις βασικότερες ποιοτικές παραμέτρους, οι οποίες καθορίζουν την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Η αντίληψη της υφής από τους καταναλωτές είναι καθοριστικής σημασίας σε χαμηλής υγρασίας προϊόντα δημητριακών και συσχετίζεται άμεσα με τη δομή του προϊόντος. Η υφή των κυψελοειδών προϊόντων είναι πολύπλοκη, και χαρακτηρίζεται από μια σειρά ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών ιδιοτήτων. Η εκτίμησή της πραγματοποιείται είτε ενόργανα, είτε με οργανοληπτικές δοκιμές.

Παρ' όλο που με τον οργανοληπτικό έλεγχο παρέχεται μια ολοκληρωμένη περιγραφή της υφής του προϊόντος, προέκυψε και υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης ενόργανων τεχνικών για την εκτίμηση της υφής των τροφίμων. Οι ενόργανες τεχνικές εμφανίζουν μερικά πλεονεκτήματα, ειδικά σε βιομηχανικό επίπεδο, γιατί είναι γρήγορες και εύχρηστες μέθοδοι, έχουν μεγάλη ζήτηση, είναι οικονομικότερες και περιλαμβάνουν κυρίως μηχανικές μετρήσεις.

Οι δοκιμές που εφαρμόζονται συχνότερα για τον προσδιορισμό και χαρακτηρισμό της υφής των τροφίμων εκβολής, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες: κάμψη (flexure), διάτμηση (shear) και δοκιμές συμπίεσης (compression). Η τελευταία κατηγορία είναι η συνηθέστερη, λόγω των ομοιοτήτων με τη διαδικασία μάσησης. Σε αυτές τις δοκιμές, το προς εξέταση δείγμα συμπιέζεται είτε μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, είτε ένα έμβολο συμπιέζει το δείγμα που κρατείται σε έναν κύλινδρο. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης καταγράφεται η εφαρμοζόμενη δύναμη και η μετατόπιση, δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης των εύθρυπτων τροφίμων. Από τις καμπύλες αυτές λαμβάνονται χαρακτηριστικά όπως η τάση θραύσης, η παραμόρφωση κατά τη θραύση, το μέτρο ελαστικότητας και διάφοροι άλλοι παράγοντες που χαρακτηρίζουν την τραγανότητα του τροφίμου.

Οι καμπύλες συμπίεσης μελετήθηκαν για τρόφιμα εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου και ακόμη, εξετάσθηκε η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων της υγρασίας του υλικού τροφοδοσίας, της θερμοκρασίας εκβολής και της παροχής του υλικού τροφοδοσίας.

Μεταξύ των σκοπών της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη και ο χαρακτηρισμός της μηχανικής συμπεριφοράς διογκωμένων προϊόντων εκβολής όπως αυτά επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Περαιτέρω πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη απλών μαθηματικών προτύπων, που επιτρέπει την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, και κατ' επέκταση το σχεδιασμό διογκωμένων τροφίμων εκβολής με επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Επιπρόσθετα εξετάζεται η συσχέτιση των δομικών και

μηχανικών ιδιοτήτων για την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την μηχανική συμπεριφορά των διογκωμένων προϊόντων εκβολής.

6.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η εκβολή συνδυάζει και μπορεί να αντικαταστήσει πολλές συμβατικές διεργασίες τροφίμων, αφού είναι η μοναδική θερμική διεργασία στην οποία το υλικό υφίσταται ισχυρή μηχανική καταπόνηση. Τα ενυδατωμένα αμυλούχα ή πρωτεϊνούχα τρόφιμα «δουλεύονται» σε ένα ιξώδες ζυμάρι και θερμαίνονται (ψήνονται) πριν αναγκαστούν να διέλθουν μέσα από τη μήτρα μορφοποίησης. Μέσω της εκβολής έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι τροφίμων snack, κυρίως από αραβοσιτάλευρο, άλευρο ρυζιού, σιτάλευρο, ή άλευρο πατάτας, σε πολλά σχήματα και με ποικίλες υφές. Η ποιότητα των προϊόντων εκβολής μπορεί να ποικίλει αρκετά ανάλογα με τις διάφορες παραμέτρους τις διεργασίας όπως ο τύπος του εκβολέα, η διαμόρφωση των κοχλιών, η υγρασία τροφοδοσίας, η θερμοκρασία εκβολής, η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών και η παροχή του υλικού τροφοδοσίας (Frame, 1994)

Τα άμεσα διογκωμένα snack που παράγονται μέσω της εκβολής ταξινομούνται στα snack δεύτερης γενιάς. Αυτά έχουν συνήθως χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα και εμπορεύονται ως προϊόντα υψηλά σε διαιτητικές ίνες, χαμηλά σε θερμίδες, υψηλής πρωτεϊνικής και διατροφικής αξίας (Liu, Hsieh, Heymann & Huff, 2000). Η αποδοχή των snack είναι ιδιαιτέρως κρίσιμη λόγω των ιδιαίτερων ποιοτικών χαρακτηριστικών τα οποία προσελκύουν τους καταναλωτές. Τα διάφορα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής είναι η εμφάνιση, η υφή, η γεύση, το χρώμα και το άρωμα. Η υφή είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό (Mazumder, Roopa, & Bhattacharya, 2007). Τα προϊόντα αυτά εκδηλώνουν τον κλασσικό μηχανισμό εύθραυστης κατάρρευσης κατά τη μάσηση, ως συνέπεια της κυψελοειδούς δομής τους και της απουσίας δομικής ευκαμψίας. Τα προϊόντα αυτά συνήθως περιγράφονται ως τραγανά λόγω του σύνθετου μηχανισμού θραύσης ο οποίος περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες παραμορφώσεις και θραύσεις της πορώδους δομής. Αυτές οι μηχανικές και οργανοληπτικές ιδιότητες εξαρτώνται από τις εσωτερικές δομικές υπομονάδες, ειδικότερα από τους ανεξάρτητους πόρους και τα διασυνδεδεμένα εύθραυστα τοιχώματα των πόρων (Barrett et al., 1994a).

Τα τρόφιμα εκβολής αντιπροσωπεύουν μια μεγάλη κατηγορία τροφίμων snack και η διόγκωση μέσω της εκβολής αποτελεί μια αποτελεσματική διεργασία για την παραγωγή πορωδών και τραγανών τροφίμων. Οι ιδιότητές τους, όπως η διόγκωση, η πυκνότητα, η δομή των πόρων και η μηχανική αντοχή, μεταβάλλονται ανάλογα με τη συνταγή και τις συνθήκες εκβολής. Αρκετοί ερευνητές έχουν παρατηρήσει την αύξηση της πυκνότητας και τη μείωση του συντελεστή διόγκωσης με την υγρασία τροφοδοσίας (Ali et al., 1996; Barrett, 2003; Chanvrier, Colonna, Della Valle & Lourdin, 2005; Faubion et al., 1982) ή με την μείωση της θερμοκρασίας εκβολής (Chang et al., 1998; Ding et al., 2005; Lazou et al., 2007). Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η τάση θραύσης των διογκωμένων προϊόντων εκβολής συσχετίζεται με την πυκνότητά τους μέσω εκθετικής σχέσης (Corradini et al., 2008a; Hayter et al., 1989; Hayter & Smith, 1988; Lazou, Krokida, Karathanos & Marinos-Kouris, 2010d).

Για το χαρακτηρισμό της δομής και της υφής, αλλά και των ιδιοτήτων κατάρρευσης των τροφίμων εκβολής, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Για παράδειγμα, ο προσδιορισμός της δομής των πόρων έχει γίνει με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης εικόνας (Mezreb, Goullieux, Ralainirina & Queneudec, 2003; Tan, Zhang & Gao, 1997; Zheng, Sun & Zheng, 2006). Επίσης, για τον χαρακτηρισμό του αναλυτικού σχήματος των καμπυλών συμπίεσης έχει χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός Fourier και η ανάλυση fractal (Barrett et al., 1992b; Peleg et al., 1993; Valles Pamies, Roudaut, Dacremont, Le Meste & Mitchell, 2000). Οι καμπύλες συμπίεσης γενικά ακολουθούν το πρότυπο τριών μερών (the three-part model) - το οποίο περιλαμβάνει ένα γραμμικό ελαστικό μέρος, ένα πλατό και την περιοχή πύκνωσης (αύξηση πυκνότητας –densification) -, που έχει αναπτυχθεί από τους Gibson and Ashby (1999) για τα πορώδη στερεά. Οι καμπύλες συμπίεσης επίσης εμφανίζουν ένα «οδοντωτό» τμήμα του οποίου ο βαθμός «οδόντωσης» εξαρτάται από την υγρασία. Αυτό το τραχύ τμήμα υποδεικνύει την έκταση της ευκαμψίας ή την ευθραυστότητα της δομής (Barrett et al., 1994a). Τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για την αποτίμηση του «οδοντωτού» τμήματος της καμπύλης συμπίεσης των διογκωμένων snack. Αυτές περιλαμβάνουν την μέτρηση των τοπικών ελαχίστων ή μεγίστων στο «οδοντωτό» τμήμα (Corradini et al., 2006; Dogan et al., 2007), ενώ ορίζεται ο «αριθμός των θραύσεων» θεωρώντας για κάθε «θραύση» μια διαφορά στη δύναμη (πχ. 1N) (Mazumder et al., 2007). Οι μέθοδοι αυτές περιγράφουν τις διαδοχικές θραύσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των τραγανών τροφίμων, τα οποία θραύονται συνεχώς κατά τη μάσηση. Επιπρόσθετα, οι τελευταίες απαιτούν λιγότερο υπολογιστικό χρόνο, σε σχέση με τις πρώτες.

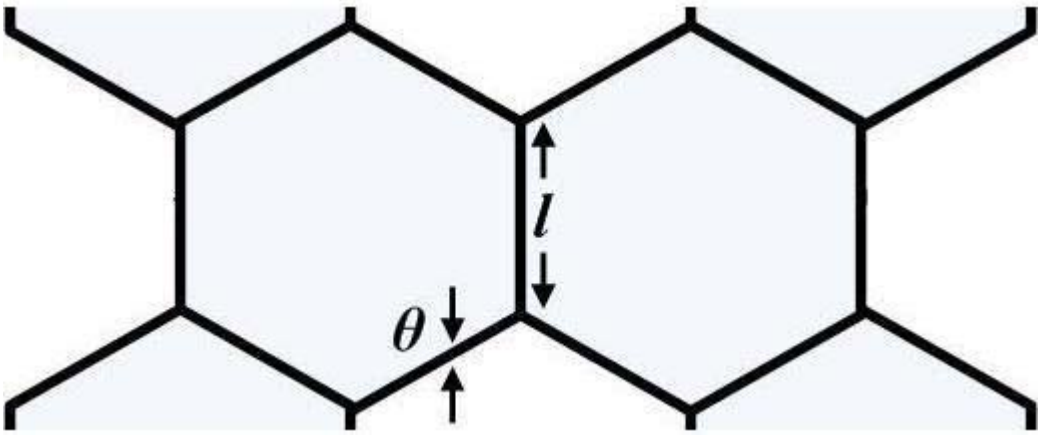
Οι συνθήκες εκβολής και η σύσταση του υλικού τροφοδοσίας επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά υφής των τροφίμων εκβολής. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες αναφορές για τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών εκβολής στην υφή των προϊόντων εκβολής με βάση το άμυλο (Ding et al., 2006; Ding et al., 2005; Fernandez-Gutierrez, Martin-Martinez, Martinez-Bustos & Cruz-Orea, 2004; Onwulata et al., 2001). Σε αυτές το βασικό συστατικό που εξετάζεται είναι το άμυλο από αραβόσιτο, σιτάρι, ρύζι και πατάτα και το οποίο αποτελεί το βασικό συστατικό για την ανάπτυξη της αφρώδους δομής των προϊόντων. Επίσης έχει μελετηθεί η εκβολή συστημάτων πρωτεϊνών-αμύλου (Anton et al., 2009; Bhattacharya, Hanna & Kaufman, 1986; Bhattacharya, 1997; Matthey & Hanna, 1997; Singh, Sekhon & Singh, 2007; Sun et al., 2002). Οι πρωτεϊνικές πηγές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η σόγια, τα φασόλια, τα μπιζέλια, η καζεΐνη, οι πρωτεΐνες ορού γάλακτος και σε μικρότερο βαθμό οι φυτικές πρωτεΐνες από άλλα είδη οσπρίων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά των οσπρίων και μιγμάτων οσπρίων κατά την εκβολή, καθώς επίσης και οι ιδιότητές τους, και ειδικότερα προϊόντων εκβολής από ολικής αλέσεως άλευρα οσπρίων.

Σκοπός αυτού του μέρους της διατριβής είναι η μελέτη των ιδιοτήτων υφής (ενόργανες και οργανοληπτικές) των προϊόντων εκβολής από μίγματα αραβοσιτάλευρου και φακής όπως αυτές επηρεάζονται από τις συνθήκες της διεργασίας (θερμοκρασία εκβολής και παροχή τροφοδοσίας) και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (υγρασία υλικού τροφοδοσίας και αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο). Για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων υφής που λαμβάνονται ενόργανα ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και της

σύστασης της τροφοδοσίας αναπτύχθηκαν απλά μαθηματικά πρότυπα. Επιπρόσθετα, συσχετίσθηκαν τα ενόργανα και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της υφής και της δομής (Κεφάλαιο 5), ενώ οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τροφίμων που παράγονται σε διάφορες συνθήκες εξετάσθηκαν με την ανάλυση κυρίων συνιστωσών και αυτό για την περεταίρω διερεύνηση και κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν την υφή των προϊόντων εκβολής.

6.3 Μαθηματικό Πρότυπο

Όπως έχει αναφερθεί, σημαντικό χαρακτηριστικό της υφής των διογκωμένων τροφίμων εκβολής είναι η ευθρυπτότητα. Τα προϊόντα αυτά πρέπει να είναι τραγανά και έτσι είναι πορώδη και εύθραυστα. Η δομή τους σχηματίζεται όταν εξέλθουν από τον εκβολέα και όχι εντός αυτού, μετά σχεδόν τη στιγμιαία εξάτμιση του νερού. Τα προϊόντα λαμβάνουν κυψελωτή και ανοιχτή δομή (Σχήμα 6.3-1)(Gibson & Ashby, 1997; Gibson et al., 1999). Η υφή των προϊόντων αυτών προκύπτει από μια αυξητική και προοδευτική κλασμάτωση (θραύση) των συστατικών των τοιχωμάτων των κυψελίδων σε απόκριση στον αποσχηματισμό. Η ευθρυπτότητα λοιπόν είναι ένας πολύπλοκος μηχανισμός, ο οποίος δεν είναι πλήρως κατανοητός. Επιβοηθητική τεχνική αποτελεί η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και η οπτική μικροσκοπία τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες μελέτες πάνω στα διογκωμένα προϊόντα εκβολής αγνοούν την κυψελωτή δομή ή παρουσιάζουν διατομές και γίνεται συζήτηση επί της μικροδομής (Anton, 2007; Roudaut, Dacremont, Valles Pamies, Colas & Le Meste, 2002; Saeleaw & Schleining, 2011).



Σχήμα 6.3-1 Διδιάστατο πρότυπο μορφής κυψέλης για τη προσομοίωση της δομής των διογκωμένων προϊόντων (l=μήκος κυψέλης, θ=πάχος τοιχώματος).

Εκείνο που είναι πολύ σημαντικό και έχει μεγάλη σημασία για τα διογκωμένα προϊόντα εκβολής είναι η διόγκωση μαζί με το κυψέλωμα και η κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή του τελευταίου. Για το λόγο αυτό το πορώδες μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. κατά τη θερμή εκβολή προϊόντων με υψηλή περιεκτικότητα πρωτεΐνης, να μετράται σε σχετικά υψηλές τιμές, αλλά αυτό να μην περιγράφει την υφή του προϊόντος, γιατί θα οφείλεται στις πολύ μεγάλες και λίγες σε αριθμό κυψέλες με σκληρά τοιχώματα.

Η μηχανική ιδιότητα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπίεσης στους διογκωμένους αφρούς μπορεί να προσεγγισθεί θεωρώντας τρισδιάστατες κυψέλες (Σχήμα 6.3-1) των οποίων η σχετική πυκνότητα μπορεί να εκφρασθεί με όρους το πάχος και το μήκος των τοιχωμάτων (Gibson et al., 1997). Για την εύθρυπτη θραύση, όπως συμβαίνει στα διογκωμένα προϊόντα εκβολής, ισχύουν οι εξισώσεις των Gibson and Ashby (1997), σύμφωνα με τις οποίες οι σχετικές μηχανικές ιδιότητες των στερεών αφρών συσχετίζονται με τη σχετική τους πυκνότητα με σχέσεις εκθετικού τύπου όπως:

$$\frac{E_f}{E_{fw}} \propto \left[\frac{\rho}{\rho_w}\right]^{3/2}$$ για ανοιχτές κυψελίδες

$$\frac{E_f}{E_{fw}} \propto \left[\frac{\rho}{\rho_w}\right]^{2}$$ για κλειστές κυψελίδες

Όπου E_f = το μέτρο ελαστικότητας κα E_{fw} = το αντίστοιχο μέτρο στα τοιχώματα, ρ= η πυκνότητα του αφρού και ρ_w = η πυκνότητα των τοιχωμάτων του αφρού (κυψελίδας) (Gibson et al., 1997; Robin, Engmann, Pineau, Chanvrier, Bovet & Della Valle, 2010). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ρ αντιστοιχεί στη φαινόμενη πυκνότητα του προϊόντος, ενώ η ρ_w στην πραγματική πυκνότητα, ιδιότητες που μπορούν να προσδιορισθούν πειραματικά, όπως έγινε και εδώ.

Σχήμα 6.3-2 Χαρακτηριστική καμπύλη συμπίεσης τροφίμων εκβολής.

Η καμπύλη η οποία λαμβάνεται κατά τη συμπίεση δημιουργεί ένα πλατό με πολλαπλές θραύσεις, οδοντωτής μορφής (ζικ-ζακ) (Σχήμα 6.3-2) (Mazumder et al., 2007; Nuebel & Peleg, 1993; Roudaut et al., 2002) και δεν ακολουθεί τις τυπικές καμπύλες των ξηραμένων τροφίμων, η δομή των οποίων σχηματίζεται κατά διαφορετικό τρόπο, δηλαδή δεν περιλαμβάνεται διόγκωση αλλά συρρίκνωση. Έτσι καθίσταται δύσκολη η μέτρηση της μέγιστης δύναμης θραύσης στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, καθ' όσον υπάρχει

ένας αριθμός επιμέρους θραύσεων και μεγίστων (Barrett et al., 1994b). Αυτές οι «οδοντωτές» ή «ταλαντούμενες» συναρτήσεις τάσης-παραμόρφωσης είναι τυπικές των πορωδών και εύθρυπτων υλικών κατά τη δοκιμή της συμπίεσης, γιατί πραγματοποιούνται σε διαφορετικά μικρά στάδια (Barrett, Kaletunc, Rosenburg & Breslauer, 1995; Guessasma, Chaunier, Della Valle & Lourdin, 2011). Ο βαθμός «οδόντωσης» των καμπυλών συμπίεσης ποσοτικοποιείται με τη χρήση του αριθμού των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης (N). Ο αριθμός αυτός υπολογίσθηκε ως ο αριθμός των θετικών κορυφών (τοπικά μέγιστα) μέσα στο οδοντωτό τμήμα της καμπύλης συμπίεσης.

Οι μετρήσεις κατά τη συμπίεση των εύθρυπτων διογκωμένων τροφίμων δεν δίνουν μόνο οδοντωτές καμπύλες, αλλά αυτές δεν είναι αναπαραγώγιμες ακόμη και όταν λαμβάνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Η μη αναπαραγωγιμότητα δεν αποτελεί απλώς ένα εργαστηριακό τεχνούργημα (artifact), αλλά ένα εγγενές χαρακτηριστικό, μια εκδήλωση της τυχαίας φύσης του μηχανισμού κατάρρευσης. Ένα μικρό σπάσιμο ή ένα ιδιαιτέρως ασθενές ή λεπτό τοίχωμα μπορεί να αναπτύξει μια κύρια δομική βλάβη, η οποία μεταφράζεται σε μια μεγάλη πτώση της δύναμης, ενώ δεν θα έπρεπε. Συνεπώς, και εφ' όσον η κυψελωτή δομή είναι ετερογενής, ο πραγματικός τρόπος κατάρρευσης και το ακριβές σχήμα των καμπυλών δύναμης-παραμόρφωσης δεν μπορούν να προβλεφθούν (Aguilera, Lillford, Corradini & Peleg, 2008).

Για την υπερνίκηση των παραπάνω δυσκολιών και για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων υφής που λαμβάνονται ενόργανα (μέτρο ελαστικότητας και αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση) χρησιμοποιήθηκε ένα εκθετικό μαθηματικό πρότυπο (Πίνακας 6-1), το οποίο αντιμετωπίζει την παρούσα περίπτωση. Η προτεινόμενη εξίσωση είναι (Lazou et al., 2010b):

$$M = M_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_{T,M}} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_{F,M}} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_{X,M}} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_0}\right)^{n_{C,M}} \qquad \textbf{6-1}$$

όπου M η ιδιότητα, M_0 η ιδιότητα στις συνθήκες αναφοράς, T η θερμοκρασία εκβολής (°C), F η παροχή τροφοδοσίας (kg/h), X η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας (wb) και C η αναλογία οσπρίου προς αραβοσιτάλευρο (%). Τα σύμβολα με τους μηδενικούς δείκτες είναι οι αντίστοιχες τιμές στις συνθήκες αναφοράς. Οι συνθήκες αναφοράς είναι θερμοκρασία 200°C, παροχή τροφοδοσίας 4,68 kg/h, υγρασία τροφοδοσίας 16% wb και αναλογία υλικών 30%.

Το πρότυπο για κάθε ιδιότητα υφής περιέχει πέντε παραμέτρους: την ιδιότητα στις συνθήκες αναφοράς (M_0), τον εκθέτη της θερμοκρασίας ($n_{T,M}$), τον εκθέτη της παροχής ($n_{F,M}$), τον εκθέτη της υγρασίας ($n_{X,M}$) και τον εκθέτη της αναλογίας οσπρίου προς αραβοσιτάλευρο ($n_{C,M}$).

Η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στις ιδιότητες υφής (θερμοκρασία και παροχή τροφοδοσίας) εκφράζεται μέσω των εκθετών $n_{T,M}$ και $n_{F,M}$, ενώ η επίδραση των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών (υγρασία και αναλογία οσπρίου προς αραβοσιτάλευρο) μέσω των εκθετών $n_{X,M}$ και $n_{C,M}$. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις ιδιότητες υφής εκτιμώνται με ανάλυση παλινδρόμησης. Για το σκοπό αυτό

χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

Πίνακας 6-1 Μαθηματικό πρότυπο πρόβλεψης των ιδιοτήτων υφής των τροφίμων εκβολής.

Μαθηματικό πρότυπο ιδιοτήτων υφής	
1. Ιδιότητες υφής	
E μέτρο ελαστικότητας	(MPa)
N αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση	(-)
2. Χαρακτηριστικά υλικών	
C αναλογία αλεύρων φακής προς αραβοσιτάλευρο	(%)
X υγρασία τροφοδοσίας	(% υ.β.)
3. Παράμετροι διεργασίας	
T θερμοκρασία εκβολής	(°C)
F παροχή τροφοδοσίας	(kg/h)
4. Εξισώσεις ιδιοτήτων	
$E = E_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_{T,E}} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_{F,E}} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_{X,E}} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_0}\right)^{n_{C,E}}$	(MPa)
$N = N_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_{T,N}} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{n_{F,N}} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{n_{X,N}} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_0}\right)^{n_{C,N}}$	(-)
5. Παράμετροι	
E_0 μέτρο ελαστικότητας στις συνθήκες αναφοράς	(MPa)
N_0 αριθμός θραύσεων στις συνθήκες αναφοράς	(-)
$n_{T,E}$ και $n_{T,N}$ εκθέτες θερμοκρασίας	(-)
$n_{F,E}$ και $n_{F,N}$ εκθέτες παροχής τροφοδοσίας	(-)
$n_{X,E}$ και $n_{X,N}$ εκθέτες υγρασίας	(-)
$n_{C,E}$ και $n_{C,N}$ εκθέτες αναλογίας υλικών	(-)

6.4 Πειραματική διαδικασία

6.4.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων

Η προετοιμασία και παραγωγή των τροφίμων εκβολής πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

6.4.2 Προσδιορισμός ιδιοτήτων υφής

6.4.2.1 Δοκιμή συμπίεσης

Οι δοκιμές συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) χρησιμοποιώντας το μηχάνημα της εταιρίας Zwick Universal Testing Machine (Zwick, Model 1120, Ulm, Germany) (Σχήμα 6.4-1). Τα δείγματα συμπιέσθηκαν μεταξύ δύο παράλληλων πλακών διαμέτρου 10 cm η καθεμιά, με ταχύτητα δοκιμής 5 mm/min και κεφαλή των 100 N. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης καταγράφθηκαν η δύναμη και η παραμόρφωση και με τη βοήθειά τους κατασκευάσθηκαν οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την υφή των τροφίμων.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως ο μέσος όρος τουλάχιστον 15 μετρήσεων για κάθε επανάληψη. Τα δείγματα πριν από τη συμπίεση κόβονται με λεπίδα σε κυλινδρικό σχήμα μήκους περίπου 2 cm, και επίσης καταγράφεται η μέση διάμετρός τους.

Σχήμα 6.4-1 Εικόνα του Zwick Universal Testing Machine.

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης συμπίεσης ως:

$$E = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B} \qquad \textbf{6-2}$$

όπου σ_B (MPa)η τάση θραύσης και ε_B (-) η αντίστοιχη παραμόρφωση.

Η θραύση των εύθρυπτων υλικών κατά τη διάρκεια της δοκιμής συμπίεσης πραγματοποιείται σε διάφορα μικρά στάδια, έχοντας ως αποτέλεσμα μια οδοντωτή καμπύλη δύναμης-παραμόρφωσης. Ο βαθμός «οδόντωσης» των καμπυλών συμπίεσης ποσοτικοποιείται με η χρήση του αριθμού των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης (N). Ο αριθμός αυτός υπολογίσθηκε ως ο αριθμός των θετικών κορυφών (τοπικά μέγιστα) μέσα στο οδοντωτό τμήμα της καμπύλης συμπίεσης.

6.4.2.2 Μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης

Για την παρατήρηση της κυψελοειδούς δομής των προϊόντων εκβολής τα δείγματα κόπηκαν με λεπίδα, σε κάθετη διατομή, πάχους 1-2 mm. Τα κομμένα δείγματα στερεώθηκαν σε κυλινδρικούς δειγματοφορείς με χρήση αγώγιμης κόλλας και

επικαλύφθηκαν με άνθρακα σε αντλία κενού. Η κυψελοειδής δομή εξετάσθηκε με μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (JEOL, Model JSM-5310, JEOL Ltd., Japan), χρησιμοποιώντας δυναμικό επιτάχυνσης 15 kV.

6.4.2.3 Οργανοληπτική εκτίμηση υφής

Για την περιγραφική ανάλυση της υφής και της διαμέτρου των τροφίμων εκβολής χρησιμοποιήθηκε δεκαμελής ομάδα εκπαιδευμένων δοκιμαστών. Όλοι οι δοκιμαστές είχαν εμπειρία στην εκτίμηση τροφίμων εκβολής. Οι δοκιμές διεξήχθηκαν στον διαπιστευμένο χώρο οργανοληπτικών δομικών του εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Οι δοκιμαστές αξιολογούσαν την υφή των τροφίμων εκβολής σε ξεχωριστούς φωτισμένους θαλάμους. Για την εξασφάλιση σταθερών συνθηκών μεταξύ των οργανοληπτικών ελέγχων, η θερμοκρασία του χώρου παρέμενε σταθερή (25±1°C) και τα αναλώσιμα (πλαστικά πιάτα, ποτήρια, εμφιαλωμένο νερό για την έκλυση του στόματος κ.α.) που χρησιμοποιούνταν είχαν σταθερά χαρακτηριστικά.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων περιλάμβανε τεμαχισμό των κυλινδρικών τροφίμων εκβολής σε κομμάτια περίπου 4 cm και τοποθέτηση τριών τεμαχίων σε λευκά πλαστικά πιάτα. Τα δείγματα εμφανίζονταν στους δοκιμαστές με τυχαία σειρά. Σε κάθε πιάτο αναγραφόταν ο κωδικός του αντίστοιχου δείγματος, ο οποίος ήταν τυχαίος τριψήφιος αριθμός. Μεταξύ των διαδοχικών δοκιμών οι δοκιμαστές ξέπλεναν το στόμα τους με εμφιαλωμένο νερό, προκειμένου να ουδετεροποιήσουν τους υποδοχείς της γλώσσας.

Οι περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της υφής και της διαμέτρου των τροφίμων εκβολής, καθώς και οι ορισμοί και οι άξονες βαθμολογίας, αναλύονται στον Πίνακα 7-2 (Dijksterhuis, Luyten, de Wijk & Mojet, 2007; Liu et al., 2000). Η εκτίμηση και βαθμολόγηση των περιγραφικών όρων της υφής έγινε με χρήση 9-βάθμιας κλίμακας όπου: 1 = ανεπαίσθητο/μη αντιληπτό χαρακτηριστικό, 5 = αρκετά αντιληπτό και 9 = εξαιρετικά αντιληπτό/πολύ έντονο. Τα πειράματα σχεδιάσθηκαν έτσι ώστε να λαμβάνονται 3 επαναλήψεις για κάθε τρόφιμο εκβολής. Σε κάθε δοκιμή σερβιρόταν 5 δείγματα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δεκαεννέα δοκιμές, διάρκειας 45 min.

Πίνακας 6-2 Χαρακτηριστικά υφής τροφίμων εκβολής.

Χαρακτηριστικό	Ορισμός	Άξονας
Διάμετρος	Μέγεθος της κάθετης διατομής του δείγματος	Χαμηλό έως υψηλό
Τραγανότητα	Βαθμός του θορύβου που ελευθερώνεται κατά τη μάσηση με τους γομφίους	Χαμηλό έως υψηλό
Αφρώδες	Θραύση του προϊόντος: η δύναμη που ασκείται από τα δόντια στο δείγμα είναι πιο ελαφριά, και πιο «αεράτη» από ότι όταν σπάει με θόρυβο ένα προϊόν	Χαμηλό έως υψηλό
Σκληρότητα	Η δύναμη που ασκείται κατά το δάγκωμα του δείγματος	Χαμηλό έως υψηλό
Συγκολητικότητα	Βαθμός με τον οποίο τα σωματίδια του δείγματος συγκολλούνται μεταξύ τους	Χαμηλό έως υψηλό

6.4.2.4 Στατιστική επεξεργασία

Για τον έλεγχο της σημαντικότητας της επίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών (συνθήκες εκβολής και χαρακτηριστικά των πρώτων υλών) στους μέσους όρους των χαρακτηριστικών της οργανοληπτικής υφής χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Στις περιπτώσεις που παρατηρήθηκαν σημαντικές επιδράσεις των μεταβλητών εφαρμόσθηκε το κριτήριο Duncan, για τον έλεγχο των διαφορών των μέσων όρων των παραμέτρων. Για τη συσχέτιση και διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αντικειμενικών και των οργανοληπτικών ιδιοτήτων δομής και υφής εφαρμόσθηκε η τεχνική πολυμεταβλητής ανάλυσης, ανάλυση κυρίων συνιστώσων (ΑΚΣ).

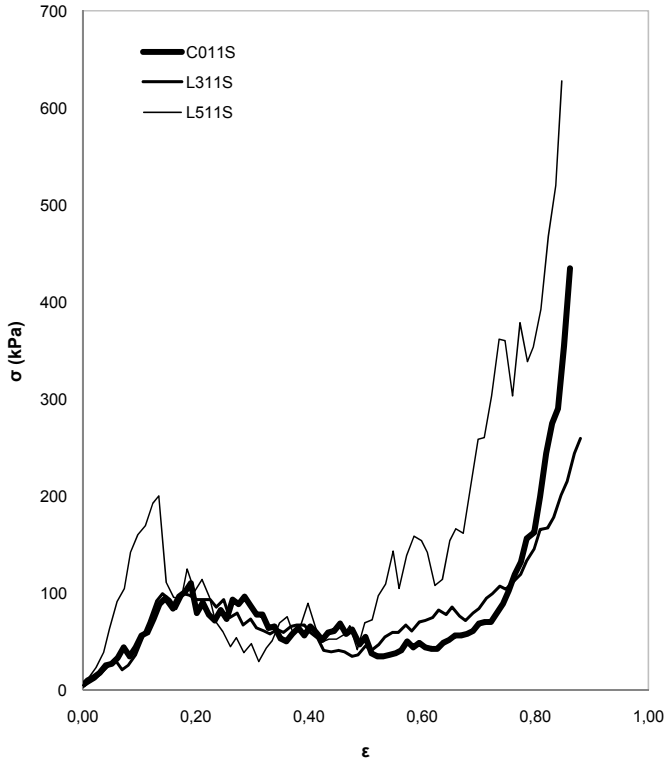
Η ANOVA και η ΑΚΣ πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

6.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

6.5.1 Δοκιμή συμπίεσης

Μια τυπική καμπύλη συμπίεσης των προϊόντων εκβολής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5-1. Η καμπύλη συμπίεσης φανερώνει την ύπαρξη τριών περιοχών. Στην πρώτη περιοχή παρατηρείται μια απότομη αύξηση της τάσης με την παραμόρφωση, η οποία μπορεί να αποδοθεί στη σκληρότητα του προϊόντος. Στη δεύτερη περιοχή εμφανίζονται οι διαδοχικές πολλαπλές θραύσεις, όπως αποδεικνύεται από την παρουσία του οδοντωτού τμήματος της καμπύλης, το οποίο έχει μια αυξητική τάση. Η τρίτη περιοχή χαρακτηρίζεται από μια απότομη αύξηση της τάσης με την αύξηση της έκτασης της συμπίεσης. Η σκληρότητα (Stiffness) είναι η αντίσταση ενός αντικειμένου κατά τη παραμόρφωση και αναπαρίσταται από το μέτρο ελαστικότητας (Corradini & Peleg, 2008b). Το μέτρο ορίζεται ως η τάση ανά μονάδα παραμόρφωσης και μπορεί να υπολογισθεί από την κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης συμπίεσης.

Η ανάλυση παλινδόμησης έδειξε ότι οι συνθήκες εκβολής επηρεάζουν σημαντικά ($p <$ 0,001) το μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής (Πίνακας 6-3). Η αναλογία των υλικών είχε μικρότερη επίδραση στη σκληρότητα, ενώ η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας δεν είχε σημαντική επίδραση. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής συνοψίζονται στον Πίνακα 13-3 του Παραρτήματος. Στο Σχήμα 6.5-2 παρουσιάζονται οι μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας ως συνάρτηση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των υλικών. Το μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή τροφοδοσίας.



Σχήμα 6.5-1 Τυπική καμπύλη συμπίεσης προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αραβοσιτάλευρου και φακής.

Πίνακας 6-3 Αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων του εκθετικού προτύπου με ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis).

	E **(MPa)**	***N*** **(-)**
M_0	1,151 ± 0,013	10,007±0,191
p-value	<0,0001	<0,0001
$n_{T,M}$	-0,122 ± 0,035	-3,029±0,054
p-value	<0,0001	0,064
$n_{F,M}$	-0,061 ± 0,073	0,716±0,100
p-value	<0,0001	<0,0001
$n_{X,M}$	1,177 ± 0,083	-0,406±0,135
p-value	0,201	<0,0001
$n_{C,M}$	-0,498 ± 0,025	0,100±0,045
p-value	0,029	<0,0001
R^2	0,817	0,880

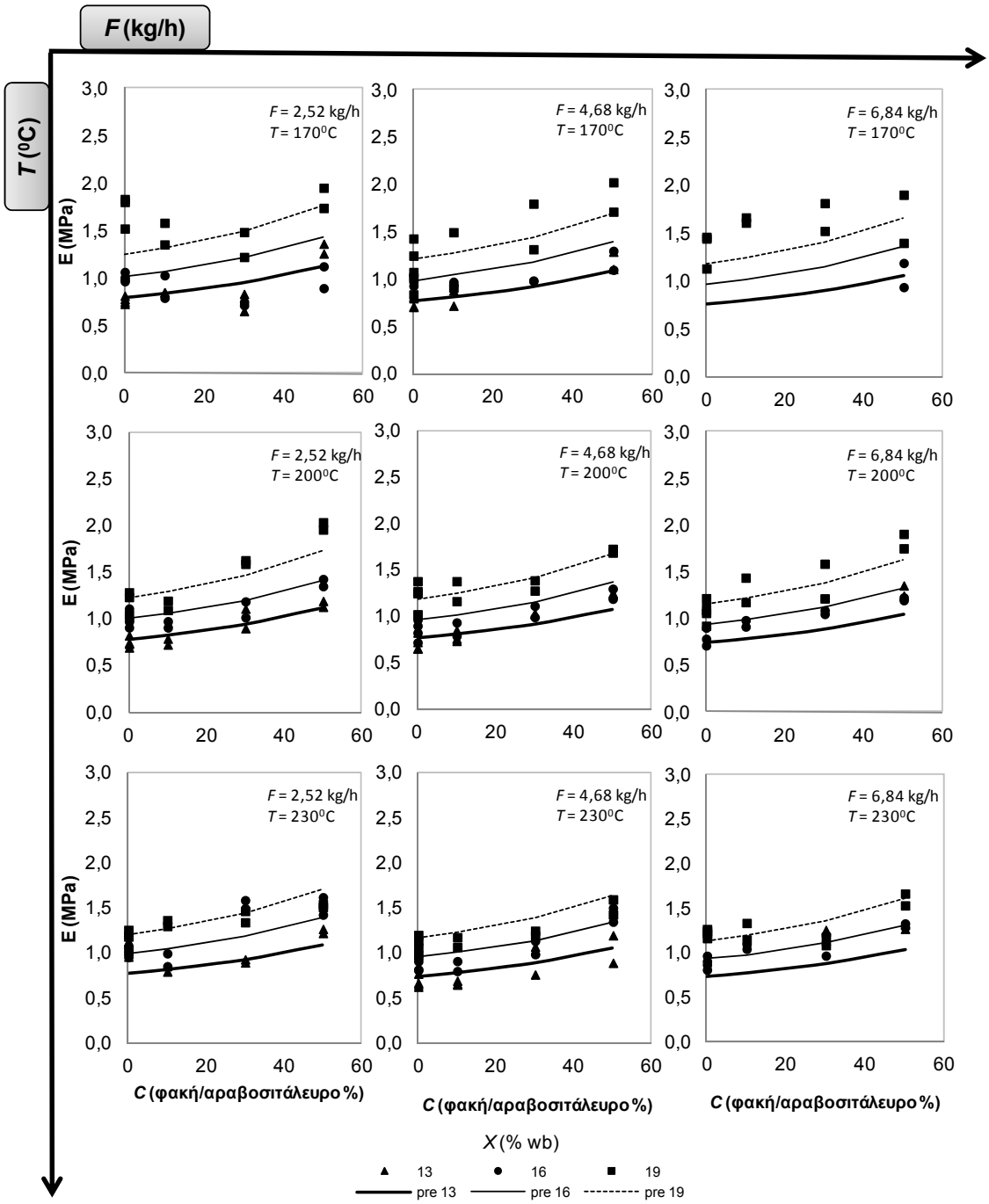
Η υγρασία τροφοδοσίας προκάλεσε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής που προέκυψαν τόσο από αραβοσιτάλευρο, όσο και από τα μίγματα με όσπριο. Γενικά είναι γνωστό ότι η μείωση της αρχικής υγρασίας κατά την εκβολή τείνει να αυξήσει την ειδική μηχανική ενέργεια και κατά συνέπεια ευνοεί τη μοριακή υποβάθμιση του αμύλου μέσω της δεξτρινοποίησης (Gomez & Aguilera, 1983; Lazou & Krokida, 2010a; Van Hecke et al., 1998). Το προκύπτον τήγμα στη συνέχεια αποδίδει πιο εύθραυστες δομές, με αποτέλεσμα τη χαμηλή αντίσταση των τοιχωμάτων των πόρων και

περισσότερες δομικές θραύσεις. Σε αντίθεση, το άλευρο της φακής (πηγή πρωτεΐνης) έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πιο σκληρών δομών και αυξημένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας (Lazou et al., 2010d). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί και για άλλα πρωτεϊνούχα προϊόντα εκβολής (Anton et al., 2009; Cheng et al., 2007; Matthey et al., 1997; Onwulata et al., 2001).

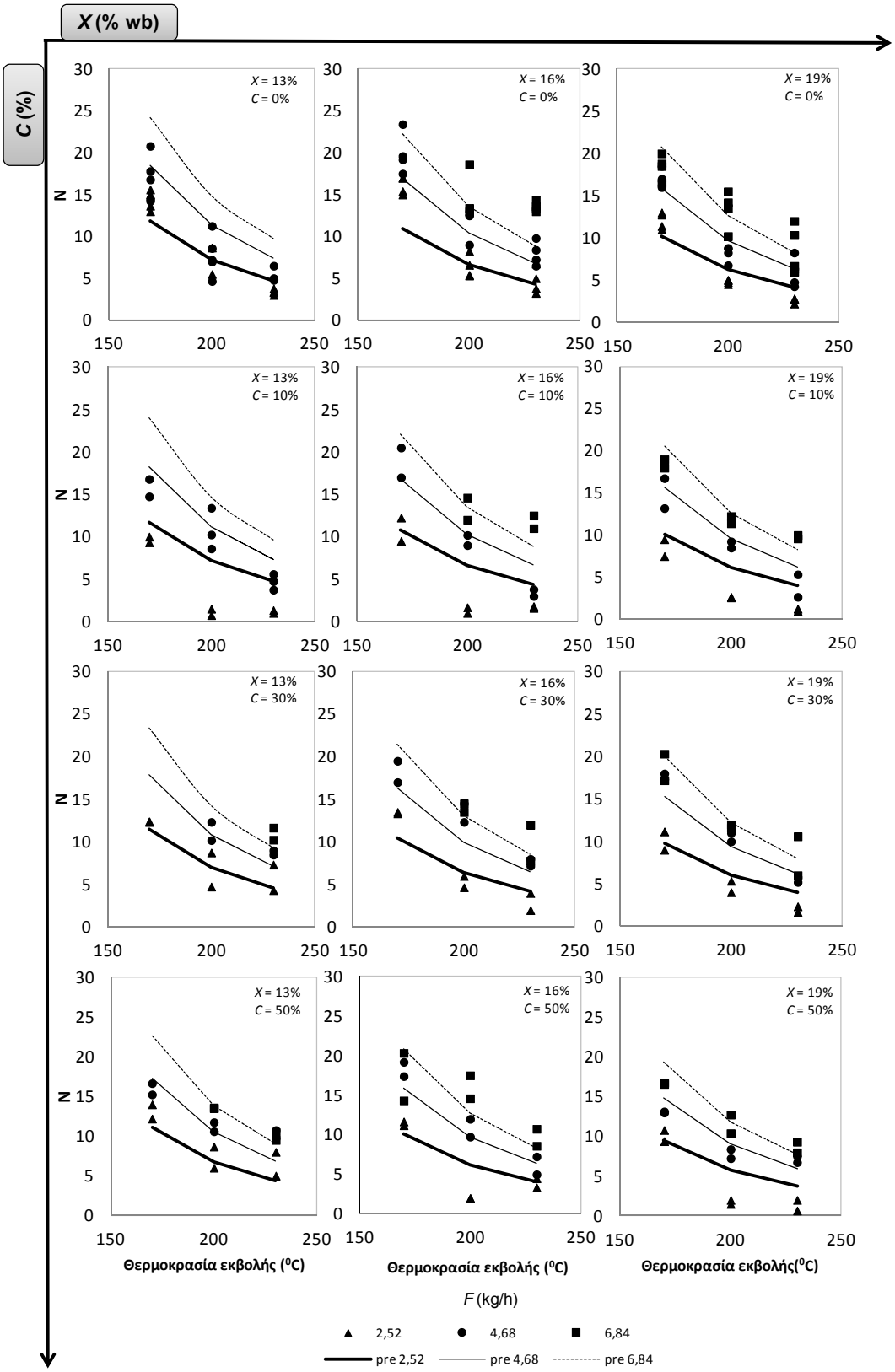
Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής μείωσε το μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής. Στα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασιών εκβολής τα παραγόμενα τρόφιμα εμφανίζουν υψηλό πορώδες (Lazou et al., 2010b; Lazou et al., 2007). Ένα προϊόν εκβολής με πλήρως ανεπτυγμένη πορώδη δομή έχει μαλακή υφή και τα τοιχώματα των πόρων είναι λεπτότερα από ότι ένα πυκνότερο προϊόν με μικρότερο πορώδες και βαθμό διόγκωσης. Η μείωση της σκληρότητας των προϊόντων εκβολής με τη θερμοκρασία έχει παρατηρηθεί για προϊόντα από αραβόσιτο, σιτάρι και ρύζι (Bhattacharya, 1997; Ding et al., 2005; Ryu et al., 2001). Επίσης η παροχή του υλικού τροφοδοσίας μείωσε ελαφρώς τη σκληρότητα των δειγμάτων. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στις μεταβολές που προκαλούνται από την παροχή στις διατμητικές δυνάμεις και στις παραμέτρους του συστήματος (ειδική μηχανική ενέργεια, χρόνος παραμονής κλπ.) στο χιτώνιο του εκβολέα κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Ο βαθμός οδόντωσης της καμπύλης συμπίεσης για κάθε τρόφιμο εκβολής εκτιμήθηκε μέσω του αριθμού των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Η ανάλυση παλινδρόμησης υπέδειξε ότι η παροχή τροφοδοσίας, η υγρασία τροφοδοσίας και η αναλογία των υλικών επηρέασαν σημαντικά ($p < 0{,}001$) τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση (Πίνακας 6-3). Η θερμοκρασία εκβολής δεν είχε σημαντική επίδραση στον αριθμό των θραύσεων (p=0,064). Οι τιμές του αριθμού των θραύσεων κατά τη συμπίεση των προϊόντων εκβολής συνοψίζονται στον Πίνακα 13-3 του Παραρτήματος. Οι μεταβολές του αριθμού των θραύσεων ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5-3.

Η θερμοκρασία εκβολής μείωσε τον αριθμό των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης των τροφίμων εκβολής. Η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί τη δημιουργία μιας πιο πορώδους δομής και μαλακής υφής. Έτσι, η μείωση του αριθμού των θραύσεων κατά τη συμπίεση υποδεικνύει ότι τα προϊόντα έχουν λεπτότερα τοιχώματα πόρων και κατά συνέπεια χαρακτηρίζει το αφράτο των προϊόντων, όπως αυτό ορίζεται στον Πίνακα 6-2. Από την άλλη μεριά, η παροχή τροφοδοσίας αύξησε τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση. Η αύξηση της παροχής ευθύνεται για την παραγωγή πυκνότερων προϊόντων με παχιά τοιχώματα πόρων. Η τραγανότητα αυτών των προϊόντων αναμένεται να είναι αυξημένη. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγήσει τη μεταβολή αυτή του αριθμού των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης.



Σχήμα 6.5-2 Μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών.

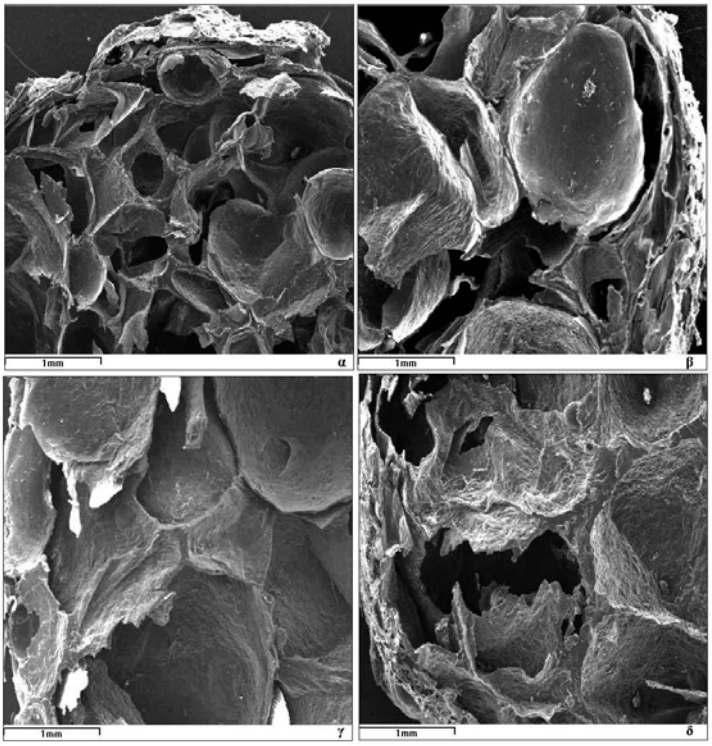


Σχήμα 6.5-3 Αριθμός των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών.

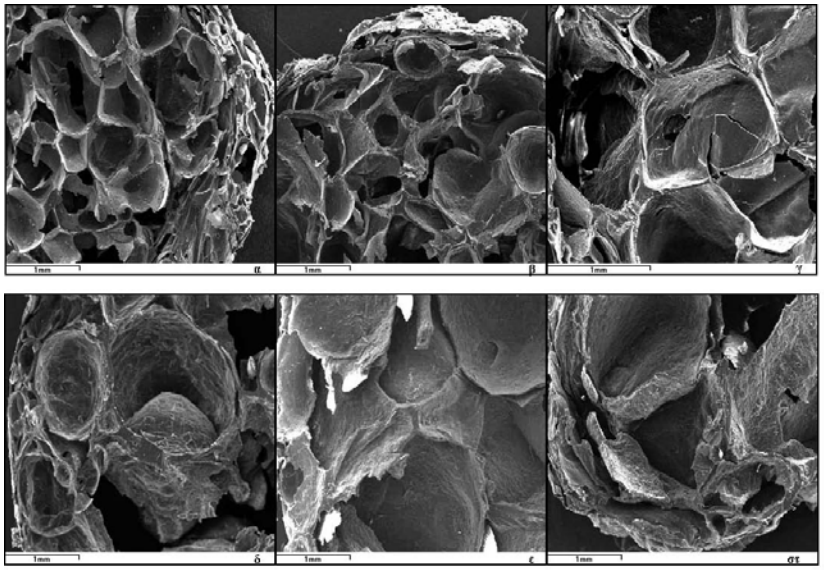
Τα χαρακτηριστικά των υλικών παρουσίασαν σημαντική επίδραση στον αριθμό των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Η υγρασία τροφοδοσίας και η αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο μείωσε των αριθμό των θραύσεων. Η αύξηση των ανεξάρτητων αυτών μεταβλητών έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί στο σχηματισμό σκληρότερων δομών με αυξημένη φαινόμενη πυκνότητα. Κατά συνέπεια, ο αριθμός των θραύσεων κατά τη συμπίεση μεταβάλλεται λόγω αυτής της μεταβολής (Lazou et al., 2010b).

6.6 Μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης

Οι αλλαγές της δομής των τροφίμων εκβολής από μίγματα αλεύρου φακής και αραβοσιτάλευρου παρατηρήθηκαν οπτικά από τις φωτογραφίες που ελήφθησαν με μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης. Η μεγέθυνση που πραγματοποιήθηκε η λήψη των φωτογραφιών ήταν x35. Στο Σχήμα 6.6-1 παρουσιάζεται η δομή των εξεταζόμενων τροφίμων σε διάφορες αναλογίες υλικών. Από το σχήμα παρατηρείται ότι η προσθήκη του αλεύρου φακής οδηγεί στη δημιουργία πόρων με παχύτερα τοιχώματα. Επιπρόσθετα ο αριθμός των πόρων μειώνεται με την αύξηση της αναλογίας του οσπρίου. Τα προϊόντα με τα υψηλότερα ποσοστά οσπρίου έχουν λιγότερους και μεγαλύτερους πόρους αέρα. Με αυτόν τον τρόπο αποδεικνύεται ότι η προσθήκη του αλεύρου οσπρίου δημιουργεί σκληρότερες δομές. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί για προϊόντα με προσθήκη μπιζελιού (Rzedzicki & Fornal, 1999).



Σχήμα 6.6-1 Επίδραση αναλογίας φακής/αραβοσιτάλευρο στη κυψελοειδή δομή των τροφίμων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί σε 200°C, 4,68 kg/h και 16% υγρασία τροφοδοσίας για: α. C = 0%, β. C = 10%, γ. C = 30% και δ. C = 50%.

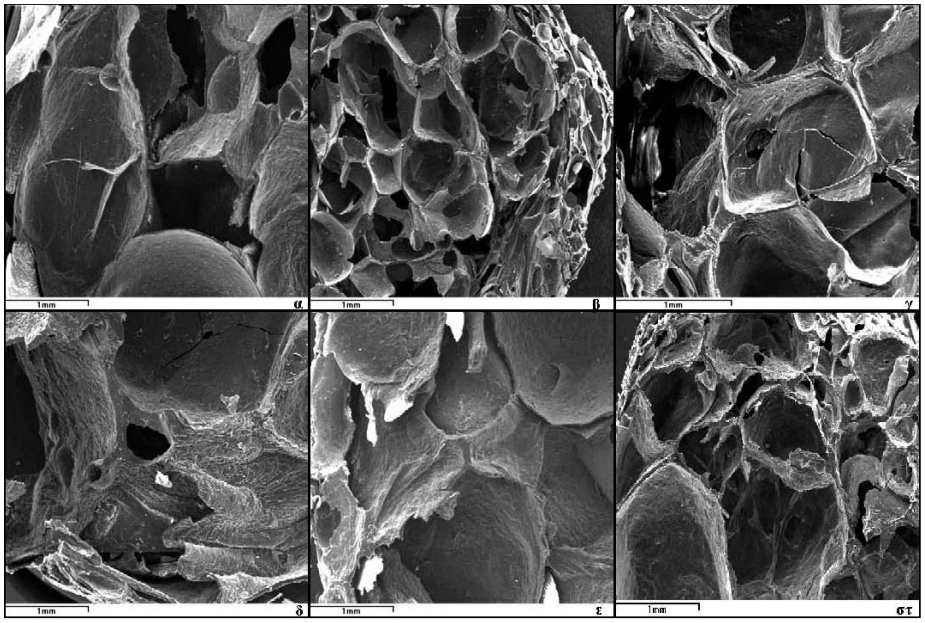


Σχήμα 6.6-2 Επίδραση υγρασίας τροφοδοσίας στην κυψελοειδή δομή των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί: από α-γ. *C* = 0%, στους 200°C, 4,68 kg/h σε υγρασίες από 13 έως 19%, και από δ-στ. *C* = 30%, στους 200°C, 4,68 kg/h σε υγρασίες από 13 έως 19%.

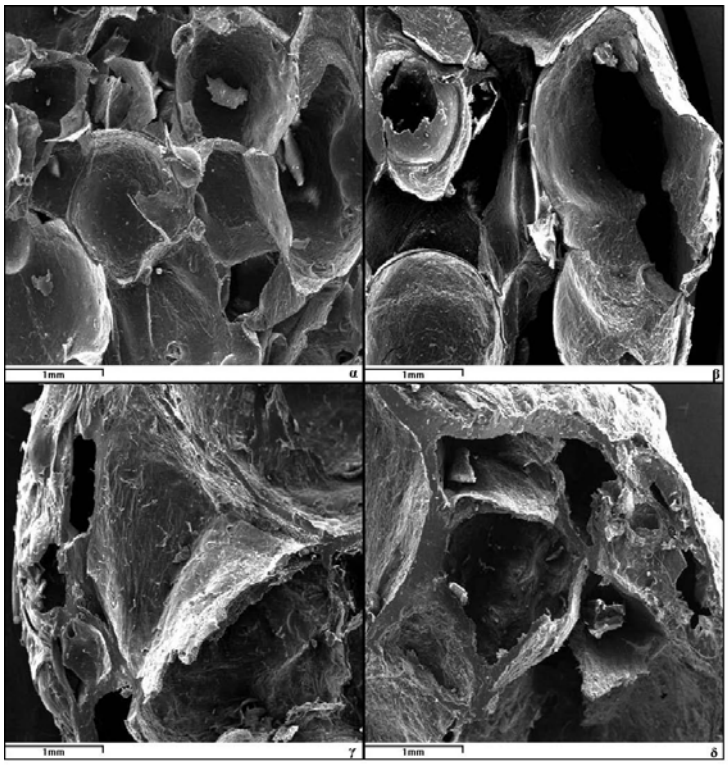
Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας επηρέασε το σχηματισμό του κυψελώματος των τροφίμων εκβολής όπως και η προσθήκη του οσπρίου. Δηλαδή η αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία παχύτερων τοιχωμάτων στους πόρους του προϊόντος. Η αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων και η αύξηση του μεγέθους των πόρων των τροφίμων εκβολής με την υγρασία τροφοδοσίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6-2.

Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής είχε σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό περισσότερων πόρων αέρα και τη δημιουργία λεπτότερων τοιχωμάτων στους πόρους (Σχήμα 6.6-3). Η αύξηση δηλαδή της θερμοκρασίας αυξάνει το πορώδες των παραγόμενων τροφίμων και προάγει την ανάπτυξη της κυψελοειδούς δομής, με συνέπεια η υφή τους γίνεται πιο μαλακή. Αυτή η μεταβολή επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 6.6-3.

Η αύξηση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της εκβολής των προϊόντων από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αραβοσιτάλευρου και φακής παρουσίασε αντίθετη επίδραση στην κυψελοειδή τους δομή σε σχέση με τη θερμοκρασία. Δηλαδή στα υψηλότερα επίπεδα παροχής τροφοδοσίας τα τοιχώματα των πόρων των προϊόντων εκβολής ήταν παχύτερα, το μέγεθος των πόρων μεγαλύτερο και ο αριθμός τους μικρότερος (Σχήμα 6.6-4). Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας με την αύξηση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας.



Σχήμα 6.6-3 Επίδραση θερμοκρασίας εκβολής στην κυψελοειδή δομή των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί σε παροχή τροφοδοσίας 4,68 kg/h για α-γ. *C* = 0% και *X* = 13% και *T*: 170-230°C και δ-στ. *C* = 30% και *X* = 16% και *T*: 170-230°C.

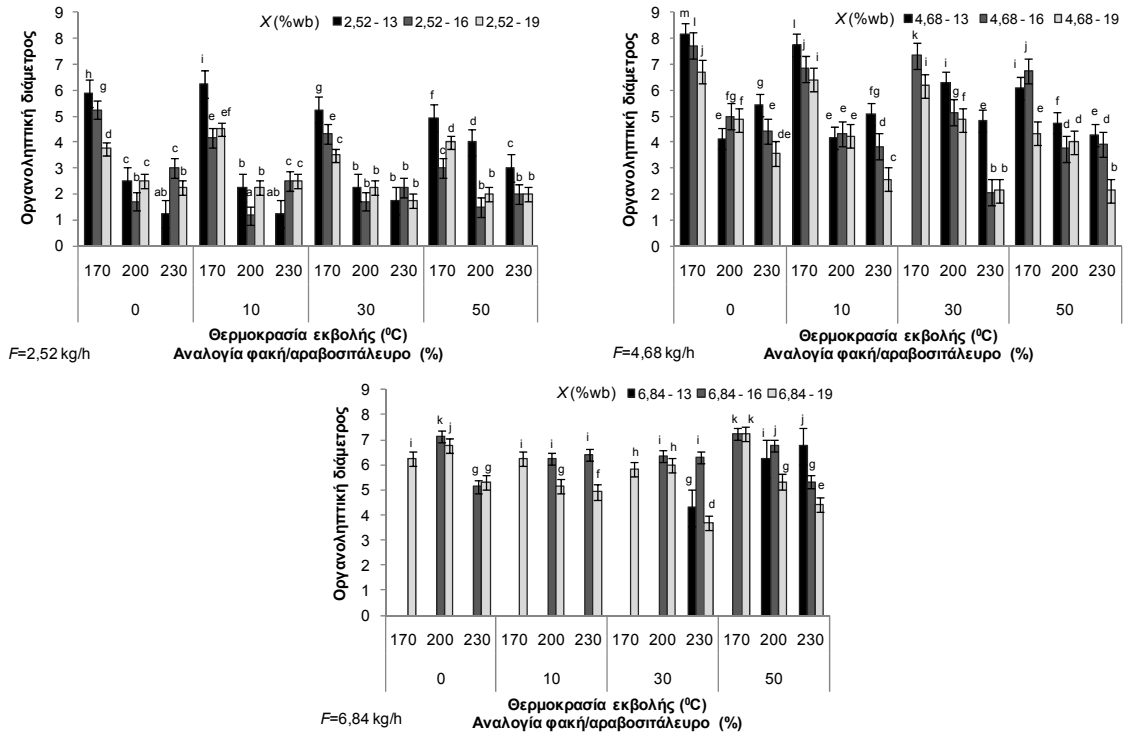


Σχήμα 6.6-4 Επίδραση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας στην κυψελοειδή δομή των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα έχουν επεξεργασθεί σε *T*: 170°C, *X*: 13% για α-β. C=10% και F: 2,52-4,68 kg/h και γ-δ. *C*=50% και *F*=2,52-4,68 kg/h.

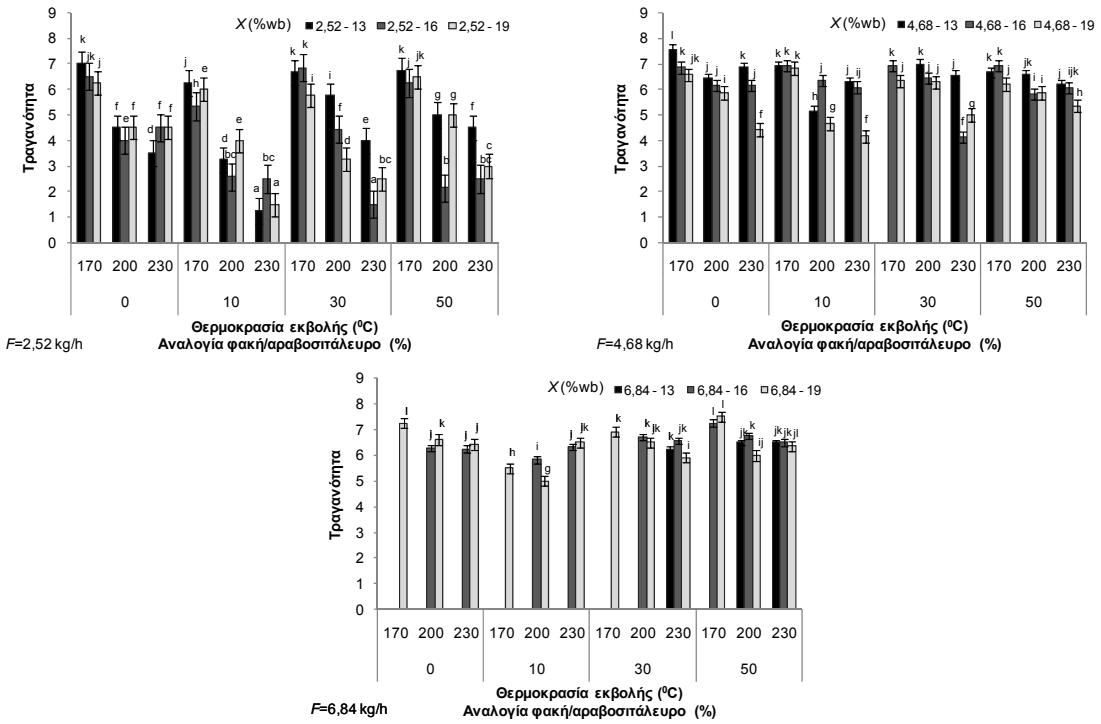
6.7 Οργανοληπτική αξιολόγηση της υφής και διαμέτρου των προϊόντων εκβολής

Η υφή και η διάμετρος των προϊόντων εκβολής εκτιμήθηκε οργανοληπτικά. Τα χαρακτηριστικά που εξετάσθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 6-2. Για τη μελέτη της επίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών στα χαρακτηριστικά της υφής χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης.

Οι συνθήκες εκβολής και η υγρασία τροφοδοσίας επηρέασαν σημαντικά ($p < 0{,}001$) την οργανοληπτική διάμετρο των εξεταζόμενων τροφίμων. Η οργανοληπτική διάμετρος των προϊόντων εκβολής μειώθηκε με τη θερμοκρασία και την υγρασία τροφοδοσίας και αυξήθηκε με τη παροχή τροφοδοσίας (Σχήμα 6.7-1). Η οργανοληπτική διάμετρος των προϊόντων μπορεί να συσχετισθεί με τη διόγκωση των προϊόντων. Οι αλλαγές των ανεξάρτητων αυτών μεταβλητών επηρεάζουν το μέσο χρόνο παραμονής και την ειδική μηχανική ενέργεια. Κατά συνέπεια, ο βαθμός θέρμανσης (ψησίματος) θα μεταβάλλεται και το γεγονός αυτό επηρεάζει το σχηματισμό των πόρων κατά τη διάρκεια της εκβολής και το βαθμό διόγκωσης των προϊόντων με βάση το άμυλο (Wang, Ganjyal, Jones, Weller & Hanna, 2005).



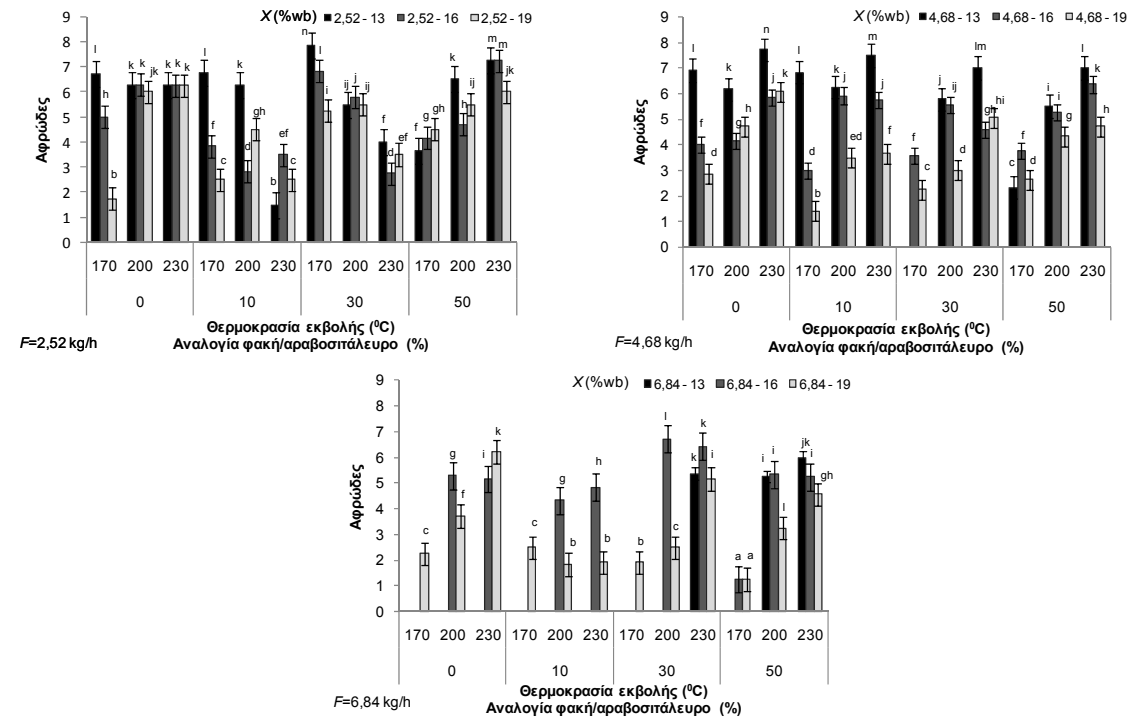
Σχήμα 6.7-1 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην οργανοληπτική διάμετρο των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αντιπροσωπεύουν την τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0{,}05$).



Σχήμα 6.7-2 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην τραγανότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

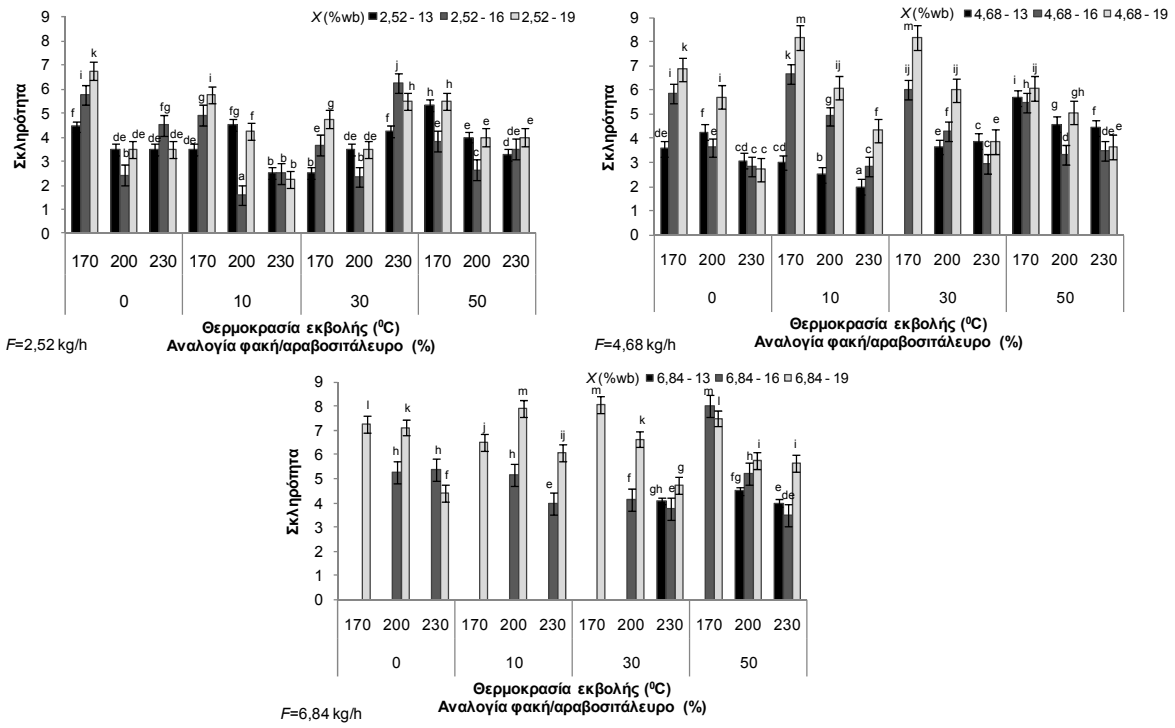
Η τραγανότητα των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (p < 0,001). Στο Σχήμα 6.7-2 παρουσιάζονται οι μεταβολές αυτές. Η θερμοκρασία εκβολής και η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας μείωσαν την τραγανότητα των τροφίμων, ενώ η παροχή του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε την αύξησή της. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι αποτέλεσμα των αντιστοίχων επιδράσεων που παρουσιάζουν οι ανεξάρτητες μεταβλητές στη διόγκωση των προϊόντων εκβολής. Η αναλογία των υλικών επηρέασε την τραγανότητα των τροφίμων. Από το Σχήμα 6.7-2 παρατηρείται ότι η αναλογία των υλικών δεν έχει μια ξεκάθαρη επίδραση στη τραγανότητα των τροφίμων εκβολής.

Το αφρώδες των δειγμάτων επηρεάσθηκε σημαντικά (p < 0,001) από τη θερμοκρασία εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η υγρασία μείωσε το αφρώδες των παραγόμενων τροφίμων, ενώ η θερμοκρασία εκβολής προκάλεσε αύξηση αυτού (Σχήμα 6.7-3) . Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί την αύξηση του βαθμού υπερθέρμανσης του περιεχόμενου νερού, πριν το εξωθούμενο τήγμα αναγκαστεί να διέλθει από τη μήτρα μορφοποίησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξάνει την ακτίνα των φυσαλίδων, η οποία ταυτοχρόνως προκαλεί αύξηση στην ακτίνα του πλέγματος και μείωση του πάχους των τοιχωμάτων των πόρων (Wang et al., 2005). Τα λεπτότερα τοιχώματα των πόρων πιθανότατα είναι υπεύθυνα για τη βελτίωση της αντίληψης του αφρώδους των εξεταζόμενων τροφίμων. Γενικά τα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο έλαβαν τις υψηλότερες βαθμολογίες.



Σχήμα 6.7-3 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στο αφρώδες των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

Στο Σχήμα 6.7-4 φαίνονται οι μεταβολές της σκληρότητας των προϊόντων εκβολής ως συνάρτηση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. Η σκληρότητα των δειγμάτων επηρεάσθηκε από την υγρασία και την παροχή τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία εκβολής (p < 0,001). Η σκληρότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου αυξήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας. Η μεταβολή αυτή έχει παρατηρηθεί για προϊόντα από αραβόσιτο και από σόγια (Chen, Serafin, Pandya & Daun, 1991; Li, Zhang, Tony Jin & Hsieh, 2005). Επίσης, η παροχή του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε την αύξηση της σκληρότητας των τροφίμων. Ο χαμηλότερος βαθμός ψησίματος στα αυξημένα επίπεδα παροχής μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία σκληρότερων δομών και κατά συνέπεια να οδηγεί στην παραγωγή σκληρότερων προϊόντων (Lazou et al., 2010a). Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πιο μαλακών δομών. Η θερμοκρασία εκβολής συμβάλει στην παραγωγή διογκωμένων, πιο αφράτων και συνεπώς πιο μαλακών προϊόντων.



Σχήμα 6.7-4 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη σκληρότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$)

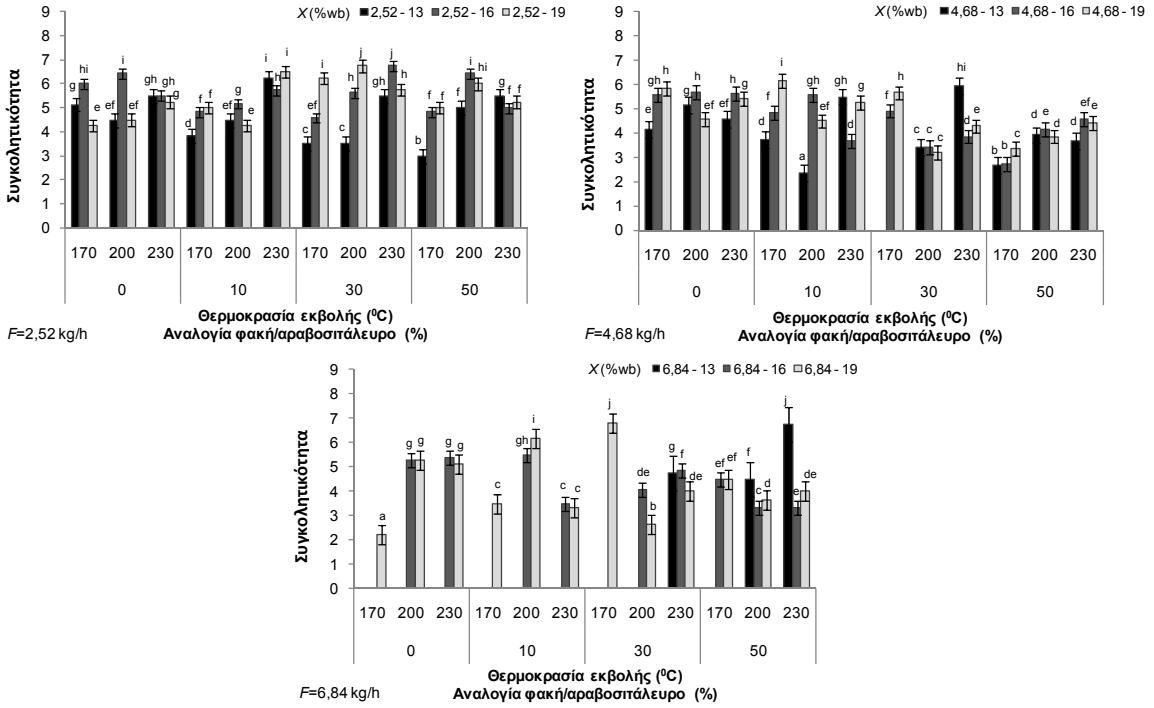
Η ανάλυση διακύμανσης έδειξε ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή που επηρέασε σημαντικά ($p < 0.001$) τη συγκολητικότητα των εξεταζόμενων τροφίμων εκβολής ήταν η παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Στο Σχήμα 6.8-1 παρουσιάζονται οι μεταβολές της συγκολητικότητας των προϊόντων. Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας επηρεάζει την κατανομή του χρόνου παραμονής στο χιτώνιο του εκβολέα. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τις φυσικοχημικές μεταβολές που υφίστανται τα μακρομόρια του τροφίμου, και έτσι μεταβάλλεται η έκταση των αντιδράσεων ψησίματος. Για τον λόγο αυτό η συγκολητικότητα των τροφίμων εκβολής μπορεί να μεταβάλλεται με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας.

6.8 Συσχέτιση ενόργανων και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής

Οι ενόργανα και οργανοληπτικά ληφθείσες ιδιότητες των προϊόντων εκβολής (δομικές και ιδιότητες υφής) με προσθήκη αλεύρου φακής υποβλήθηκαν σε ανάλυση κυρίων συνιστωσών (ΑΚΣ), ώστε να διερευνηθούν οι μεταξύ τους σχέσεις. Σύμφωνα με το διάγραμμα των ιδιοτιμών, οι πρώτες τρεις κύριες συνιστώσες (*PC*) παραμένουν για την χαρτογράφηση του τρόπου αλληλεπίδρασης των ιδιοτήτων και των δειγμάτων και περιγράφουν το 85,26% της ολικής μεταβλητότητας.

Επειδή η τιμή της ιδιοτιμής της *PC3* είναι οριακά κάτω από 1, επιλέγονται για την ερμηνεία της ομαδοποίησης των ιδιοτήτων οι 2 πρώτες κύριες συνιστώσες, *PC1* και *PC2*. Το Σχήμα 6.8-2 παρουσιάζει το διάγραμμα της ΑΚΣ των 2 πρώτων κυρίων συνιστωσών,

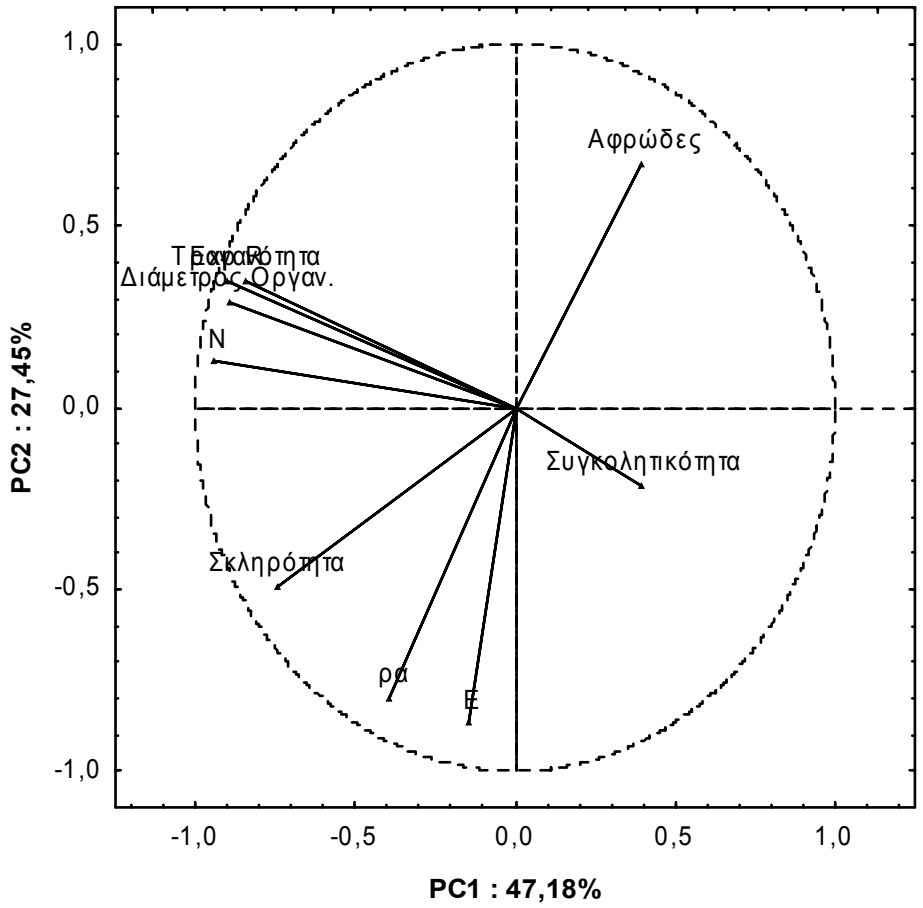
της *PC1* και *PC2*. Οι συνιστώσες αυτές περιγράφουν το 74,6% της ολικής διακύμανσης, με το 47,2% να εξηγείται από την πρώτη.



Σχήμα 6.8-1 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη συγκολητικότητα των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής διόγκωσης, ο αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση, η οργανοληπτική διάμετρος, η τραγανότητα και η σκληρότητα συσχετίζονται αρνητικά με την *PC1*. Η φαινόμενη πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας συσχετίζονται αρνητικά με την *PC2* (<-0,7), το αφρώδες συσχετίζεται θετικά (>0,7) με την *PC2*.

Στο Σχήμα 6.8-2 φαίνεται ο συντελεστής διόγκωσης συσχετίσθηκε θετικά με την οργανοληπτική διάμετρο και την τραγανότητα. Δηλαδή όσο περισσότερο διογκωμένο είναι το προϊόν εκβολής τόσο αυξάνεται η τραγανότητά του. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των θραύσεων κατά τη συμπίεση συσχετίσθηκε θετικά με την τραγανότητα των προϊόντων εκβολής. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι όσο τραγανότερο είναι το τρόφιμο εκβολής τόσο αυξάνεται ο αριθμός των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Βρέθηκε ακόμη ότι οι οργανοληπτικές ιδιότητες και οι αντίστοιχες ενόργανες μετρήσεις συσχετιζόταν μεταξύ τους με μια απλή εκθετική σχέση (Πίνακας 6-4). Με τη χρήση των εξισώσεων συσχέτισης καθίσταται εφικτή η πρόβλεψη της τραγανότητας και της οργανοληπτικής διαμέτρου με τη βοήθεια των ενόργανων μετρήσεων, δηλαδή μέσω του συντελεστή διόγκωσης και του αριθμού των θραύσεων κατά τη συμπίεση. Παρόμοιες συσχετίσεις κατά εκθετικό τρόπο έχουν βρεθεί και στο παρελθόν για προϊόντα εκβολής από αραβοσιτάλευρο (Dogan et al., 2007).



Σχήμα 6.8-2 Διάγραμμα ΑΚΣ των 2 πρώτων κυρίων συνιστωσών των δομικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων υφής των τροφίμων εκβολής (ενόργανες και οργανοληπτικές).

Πίνακας 6-4 Συσχέτιση ιδιοτήτων ($y = a \cdot x^b$)

Ιδιότητες	***a***	***b***	R^2
Διάμετρος Οργαν. = f(Exp. Ratio)	1,072	1,761	0,797
Τραγανότητα = f(N)	2,215	0,419	0,697
Τραγανότητα = f(Exp. Ratio)	2,112	1,227	0,689
$E = f(\rho_{app})$	6,030	0,851	0,688

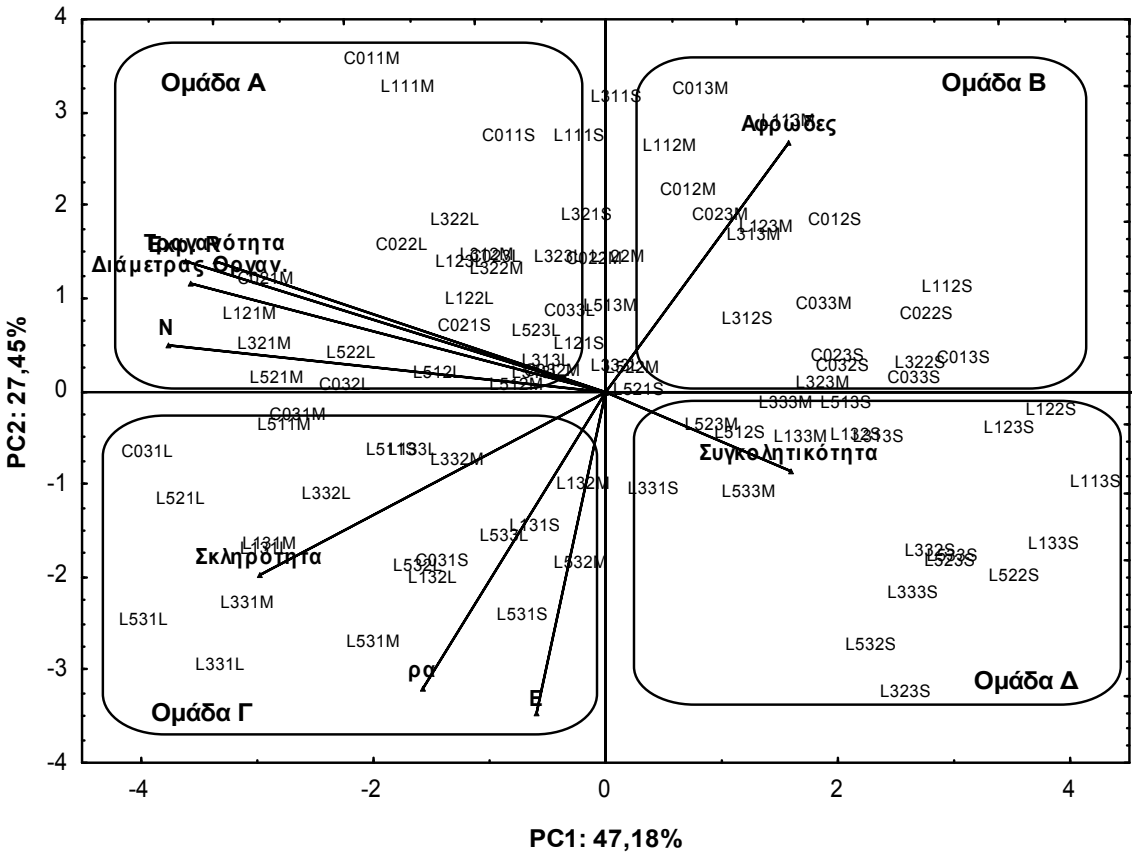
Επίσης από το Σχήμα 6.8-2 φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας συσχετίσθηκε θετικά με τη φαινόμενη πυκνότητα των εξεταζόμενων τροφίμων εκβολής. Αυτό σημαίνει ότι το προϊόν με την πυκνότερη δομή θα έχει πιο σκληρή υφή. Παρόμοια συσχέτιση δομής και υφής έχει παρατηρηθεί για άλλα πορώδη στερεά (Aguilera & Stanley, 1999; Gibson et al., 1999). Για το αφρώδες των προϊόντων εκβολής με προσθήκη αλεύρου φακής βρέθηκε μια αρνητική συσχέτιση με τη φαινόμενη πυκνότητα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το λιγότερο πυκνό προϊόν, και συνεπώς περισσότερο διογκωμένο, θα έχει περισσότερους και μικρότερους, ομοιόμορφα κατανεμημένους πόρους αέρα, όπως αποδείχθηκε από τη μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης. Οι σχέσεις που βρέθηκαν μεταξύ των ενόργανων

και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών επιτρέπουν το σχεδιασμό διογκωμένων σνακ προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου, μέσω της ρύθμισης των συνθηκών εκβολής και της σύστασης, χρησιμοποιώντας τα απλά μαθηματικά πρότυπα που αναπτύχθηκαν.

Στο Σχήμα 6.9-1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ΑΚΣ, το οποίο περιλαμβάνει την ομαδοποίηση των διαφόρων δειγμάτων με βάση τις ιδιότητες δομής και υφής. Τα προϊόντα εκβολής της ομάδας Α εμφανίζουν υψηλό βαθμό διόγκωσης και αυξημένη τραγανότητα. Τα περισσότερα από αυτά έχουν παραχθεί με παροχή τροφοδοσίας μεγαλύτερη των 2,52 kg/h. Για παράδειγμα προϊόντα που έχουν παραχθεί με παροχή τροφοδοσίας 4,68 kg/h, θερμοκρασία εκβολής 170°C και υγρασία τροφοδοσίας 16%, για όλες τις αναλογίες οσπρίου, εμφάνισαν υψηλή διόγκωση και τραγανότητα. Τα τρόφιμα εκβολής της ομάδα Β εμφανίζουν υψηλές τιμές του αφρώδους, δηλαδή τα τοιχώματα των πόρων που περιέχουν είναι λεπτά και έχουν σχετικά μικρούς και ομοιόμορφα κατανεμημένους πόρους. Παρατηρείται ότι τα περισσότερα προϊόντα αυτής της ομάδας έχουν παραχθεί με παροχές τροφοδοσίας 2,52 kg/h και 4,68 kg/h, σε θερμοκρασίες μικρότερες των 230°C και ποσοστό οσπρίου που δεν ξεπερνά το 30%. Τα περισσότερα από τα προϊόντα εκβολής της ομάδας Γ τα οποία έχουν παραχθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (T<230°C) και υψηλές υγρασίες (X>13%) και παροχές τροφοδοσίας γίνονται πιο σκληρά και παρουσιάζουν αυξημένες τιμές φαινόμενης πυκνότητας και μέτρου ελαστικότητας. Επίσης τα προϊόντα αυτά έχουν παχύτερα τοιχώματα πόρων, αφού εμφανίζουν χαμηλές τιμές αφρώδους (αρνητική συσχέτιση). Τέλος, η ομάδα Δ περιλαμβάνει τα τρόφιμα εκβολής που εμφάνισαν υψηλές τιμές συγκολητικότητας, χαμηλό βαθμό διόγκωσης και μειωμένη τραγανότητα. Κοινό χαρακτηριστικό των προϊόντων αυτών είναι ότι έχουν επεξεργαστεί με παροχή τροφοδοσίας 2,52 kg/h.

6.9 Συμπεράσματα

Μελετήθηκαν οι ιδιότητες υφής (ενόργανες και οργανοληπτικές) προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και άλευρο φακής όπως αυτές επηρεάζονται από τις παραμέτρους της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Για την εξέταση της επίδρασης των συνθηκών εκβολής και της σύστασης στις ιδιότητες υφής αναπτύχθηκαν εκθετικά πρότυπα. Το μέτρο ελαστικότητας και ο αριθμός των θραύσεων κατά τη συμπίεση μειώθηκαν με τη θερμοκρασία εκβολής. Επιπρόσθετα η θερμοκρασία εκβολής μείωσε την οργανοληπτική διάμετρο και τη σκληρότητα των προϊόντων και βελτίωσε το αφρώδες τους. Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας και η υγρασία αύξησε τον αριθμό των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και μείωσε το μέτρο ελαστικότητας. Η οργανοληπτική διάμετρος βελτιώθηκε με την παροχή τροφοδοσίας. Η αύξηση της παροχής και της υγρασίας τροφοδοσίας είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκληρότερων προϊόντων. Η προσθήκη του αλεύρου φακής επηρέαζε αρνητικά τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση και αύξησε τη σκληρότητα των προϊόντων.



Σχήμα 6.9-1 ΑΚΣ των ενόργανων και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής όπως επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η κωδικοποίηση των δειγμάτων είναι αυτή που περιγράφεται στον Πίνακα 4-3.

Η συσχέτιση των ενόργανων και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών υπέδειξε ότι η οργανοληπτική διάμετρος συσχετίζεται με το συντελεστή διόγκωσης και η τραγανότητα με τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση και το συντελεστή διόγκωσης. Επιπρόσθετα η φαινόμενη πυκνότητα συσχετίσθηκε θετικά με το μέτρο ελαστικότητας. Είναι εφικτή πρόβλεψη των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής με προσθήκη αλεύρου φακής, τα οποία είναι κρίσιμα για την αποδοχή των προϊόντων από τους καταναλωτές, μέσω των ενόργανων μετρήσεων χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις συσχέτισης. Γενικά τα προϊόντα που παρήχθησαν σε χαμηλές παροχές και υγρασίες και ενδιάμεσα επίπεδα θερμοκρασιών είναι τραγανά, αφράτα και έχουν μαλακή υφή. Αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η παραγωγή αποδεκτών διογκωμένων προϊόντων εκβολής (από άποψη δομής και υφής) χρησιμοποιώντας άλευρο φακής ολικής άλεσης ρυθμίζοντας κατάλληλα τις συνθήκες επεξεργασίας και τη σύσταση του υλικού τροφοδοσίας.

7 Λειτουργικές ιδιότητες τροφίμων εκβολής

7.1 Αντικείμενο και στόχοι

Οι λειτουργικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής είναι πολύ σημαντικές γιατί καθορίζουν τη συμπεριφορά του τροφίμου – συστατικού, όταν αυτό χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα τροφίμων και επηρεάζουν την ποιότητα και την αποδοχή του τελικού τροφίμου. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζονται από τη λειτουργικότητα των συστατικών που περιέχονται στο τρόφιμο εκβολής, δηλαδή των πρωτεϊνών, των υδατανθράκων κλπ. Οι σπουδαιότερες από αυτές είναι εκείνες που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση μεταξύ τροφίμου, νερού και ελαίων και περιλαμβάνουν την ικανότητα απορρόφησης νερού, τη ικανότητα διαλυτότητας σε νερό και την ικανότητα απορρόφησης ελαίου.

Κατά τη διάρκεια της εκβολής τα συστατικά που επεξεργάζονται υφίστανται διάφορες φυσικοχημικές μεταβολές, όπως η μετουσίωση και αναδιαμόρφωση των πρωτεϊνών, η ζελατινοποίηση και μερική δεξτρινοποίηση του αμύλου, και η δημιουργία διαφόρων συμπλόκων, όπως για παράδειγμα η δημιουργία των συμπλόκων αμυλόζης – λιπιδίων. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής (θερμοκρασία και διατμητικές τάσεις) και τη συγκέντρωση των συστατικών που περιλαμβάνονται στο προς εκβολή μίγμα. Κατά συνέπεια η λειτουργικότητα του παραγόμενου τροφίμου θα επηρεάζεται από όλους τους παράγοντες που συμμετέχουν στην μεταβολή της δομής και της λειτουργικότητας των συστατικών του προς εκβολή μίγματος.

Για τους παραπάνω λόγους μελετήθηκαν οι λειτουργικές ιδιότητες (ικανότητα απορρόφησης νερού, ικανότητα διαλυτότητας σε νερό και ικανότητα απορρόφησης ελαίου) προϊόντων εκβολής από μίγματα αλεύρου φακής και αραβοσιτάλευρου όπως αυτές επηρεάζονται από παραμέτρους της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Επίσης πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των δειγμάτων με βάση τη λειτουργικότητά τους, ώστε να επιτευχθεί η επιλογή δειγμάτων με κατάλληλη λειτουργικότητα, ανάλογα με την εμπορική τους χρήση.

7.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα όσπρια είναι μια πολύ σημαντική πηγή πρωτεϊνών και σε πολλές περιοχές του κόσμου, αποτελούν τη μοναδική πηγή πρωτεΐνης στο διαιτολόγιο διαφόρων πληθυσμών. Πολύ συχνά τα όσπρια αποτελούν το απαραίτητο συμπλήρωμα για άλλες πηγές πρωτεϊνών (Duranti et al., 1997). Με βάση τους παραπάνω λόγους, είναι σαφές ότι η σπουδαιότητα των οσπρίων ως τροφής αναμένεται να αυξηθεί τα προσεχή έτη, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του αυξανόμενου πληθυσμού για πρωτεΐνες, καθώς και την ανάγκη μείωσης των επιπτώσεων της κατανάλωσης ζωικών πρωτεϊνών, ειδικά στις αναπτυγμένες χώρες. Όπως ήδη έχει σημειωθεί, οι αποθηκευτικές πρωτεΐνες των οσπρίων είναι σχετικά πτωχές σε θειούχα αμινοξέα (μεθειονίνη, κυστεΐνη και θρυπτοφάνη), ενώ τα επίπεδα των λοιπών απαραίτητων αμινοξέων (λυσίνη) είναι πολύ υψηλότερα από αυτά των δημητριακών. Έτσι, από την άποψη των ποσοστών λυσίνης και θειούχων αμινοξέων τα όσπρια και τα δημητριακά χαρακτηρίζονται «διατροφικά συμπληρωματικά». Η εκβολή, ως μια ευέλικτη και αποτελεσματική μέθοδος

επεξεργασίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη διάφορων snack, με βάση διάφορες αμυλούχες πηγές και να δώσει προϊόντα με διάφορα σχήματα και ποικιλία υφής. Η εκβολή αλεύρων οσπρίων είναι σχετικά μια καινούργια ερευνητική περιοχή, με εξαίρεση τη σόγια (Lazou et al., 2007; Rocha-Guzman, Gallegos-Infante, Gonzalez-Laredo, Castillo-Antonio, Delgado-Licon & Ibarra-Perez, 2006).

Η καταλληλότητα των τροφίμων εκβολής για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τις λειτουργικές των ιδιότητες όπως η ικανότητα απορρόφησης νερού, η ικανότητα διαλυτότητας σε νερό και η ικανότητα απορρόφησης ελαίου, ο συντελεστής διόγκωσης, η φαινόμενη πυκνότητα και το ιξώδες του ζυμαριού (Ali et al., 1996; Hernandez-Diaz et al., 2007). Στο παρελθόν έχει μελετηθεί η επίδραση των συνθηκών εκβολής στις λειτουργικές ιδιότητες διαφόρων προϊόντων δημητριακών (αραβοσιτάλευρου, ρυζιού και σίτου) (Artz et al., 1990; Choudhury & Gautam, 1998a; Ding et al., 2006; Ding et al., 2005; Gomez et al., 1983; Kadan, Bryant & Pepperman, 2003; Sacchetti, Pinnavaia, Guidolin & Rosa, 2004). Γενικά οι λειτουργικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής σχετίζονται με τις μοριακές μετατροπές οι οποίες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της εκβολής. Επίσης έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες όπου εξετάζεται η επίδραση της προσθήκης πρωτεϊνών στις λειτουργικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής με βάση τα δημητριακά (Fernandez-Gutierrez et al., 2004; Gujska et al., 1991a; Lin et al., 2002; Matthey et al., 1997; Onwulata et al., 2001). Οι συνηθέστερες πηγές πρωτεϊνών είναι η σόγια, η καζεΐνη και οι πρωτεΐνες ορού γάλακτος, και σε μικρότερο βαθμό φυτικές πρωτεΐνες από όσπρια, όπως φασόλια και μπιζέλια (εκτός της σόγιας) (Anton et al., 2009; Balandran-Quintana, Barbosa-Canovas, Zazueta-Morales, Anzaldua-Morales & Quintero-Ramos, 1998; Singh et al., 2007; Skierkowski, Gujska & Khan, 1990). Από τα παραπάνω προκύπτει σαφώς ότι υπάρχει ανάγκη διερεύνησης της λειτουργικότητας των τροφίμων εκβολής με βάση διάφορες πηγές οσπρίων.

Σκοπός του μέρους αυτού της διατριβής είναι να μελετηθούν οι μεταβολές των λειτουργικών ιδιοτήτων (ικανότητα απορρόφησης νερού, διαλυτότητα σε νερό και ικανότητα απορρόφηση ελαίου) μίγματος αραβοσιτάλευρου και φακής ως συνάρτηση των παραμέτρων της διεργασίας (παροχή υλικού τροφοδοσίας και θερμοκρασία) και των χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης (υγρασία υλικού τροφοδοσίας και αναλογία φακής προς αραβοσιτάλευρο). Επιπρόσθετα, θα γίνει συσχετισμός των λειτουργικών ιδιοτήτων έτσι ώστε να καθορισθούν τα δείγματα με την επιθυμητή λειτουργικότητα.

7.3 Πειραματική διαδικασία

7.3.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων

Η προετοιμασία και παραγωγή των τροφίμων εκβολής πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

7.3.2 Προσδιορισμός λειτουργικών ιδιοτήτων

7.3.2.1 Ικανότητα απορρόφησης νερού και διαλυτότητα σε νερό

Η ικανότητα απορρόφησης νερού (WAI – Water Absorption Index - IAN) προσδιορίσθηκε με βάση την μέθοδο των Anderson, Conway, and Peplinski (1970). Σε προζυγισμένο σωλήνα φυγοκέντρησης των 15 mL προστίθενται 5 mL απιονισμένο νερό και 0,2 g λειοτριβιμένου δείγματος. Ο σωλήνας αναδεύεται σε αναδευτήρα Vortex για 2 min και στη συνέχεια φυγοκεντρείται επί 20 min στα 700×g. Το υπερκείμενο υγρό αποχύνεται σε προζυγισμένο φιαλίδιο. Το ενυδατωμένο ίζημα που παραμένει ζυγίζεται και η IAN υπολογίζεται ως:

$$IAN = \frac{m_g}{m_s} \qquad \textbf{7-1}$$

όπου η m_g μάζα του ενυδατωμένου δείγματος (g) και m_s η μάζα του δείγματος (g).

Η ικανότητα διαλυτότητας σε νερό (Water Solubility Index – WSI – ΙΔΝ) προσδιορίσθηκε από το ποσοστό των διαλυμένων στερεών που απομένουν στο προζυγισμένο φιαλίδιο μετά την εξάτμιση του υπερκείμενου υγρού της φυγοκέντρησης. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{ΙΔΝ} = \frac{m_{ds}}{m_s} \cdot 100 \qquad \textbf{7-2}$$

όπου m_{ds} η μάζα των ξηρών στερεών του υπερκείμενου υγρού (g) και m_s η μάζα του δείγματος (g).

Τα αποτελέσματα είναι οι μέσοι όροι τουλάχιστον τεσσάρων μετρήσεων για κάθε επανάληψη.

7.3.2.2 Ικανότητα απορρόφησης ελαίου

Η ικανότητα απορρόφησης ελαίου προσδιορίσθηκε με βάση την μέθοδο των Liadakis, Floridis, Tzia, and Oreopoulou (1993). Σε βαθμολογημένο σωλήνα φυγοκέντρησης των 15 mL προστίθενται 3 mL εξευγενισμένου αραβοσιτελαίου και 0,5 g λειοτριβιμένου δείγματος. Ο σωλήνας αναδεύεται σε αναδευτήρα Vortex για 1 min και αφήνεται σε ηρεμία επί 30 min. Στη συνέχεια φυγοκεντρείται επί 20 min στα 700×g. Στο τέλος της φυγοκέντρησης καταγράφεται ο όγκος του ελεύθερου ελαίου. Η IAE υπολογίζεται ως:

$$IAE = \frac{V_{oil}}{m_s} \qquad \textbf{7-3}$$

όπου ο V_{oil} όγκος του ελαίου που απορροφήθηκε (mL) και m_s το βάρος του δείγματος (g).

Τα αποτελέσματα είναι οι μέσοι όροι τουλάχιστον τεσσάρων μετρήσεων για κάθε επανάληψη.

7.3.3 Στατιστική ανάλυση

Για τον έλεγχο της σημαντικότητας της επίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών (συνθήκες εκβολής και χαρακτηριστικά των πρώτων υλών) στους μέσους όρους των τιμών των λειτουργικών ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Στις περιπτώσεις που παρατηρήθηκαν σημαντικές επιδράσεις των μεταβλητών εφαρμόσθηκε το κριτήριο Duncan, για τον έλεγχο των διαφορών των μέσων όρων των παραμέτρων. Επίσης εφαρμόσθηκε η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (ΑΚΣ) για την διερεύνηση των ομοιοτήτων μεταξύ των τροφίμων εκβολής με βάση τη λειτουργικότητά τους. Όλες οι αναλύσεις διεξήχθησαν στο πρόγραμμα Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

7.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

7.4.1 Ικανότητα απορρόφησης νερού (ΙΑΝ)

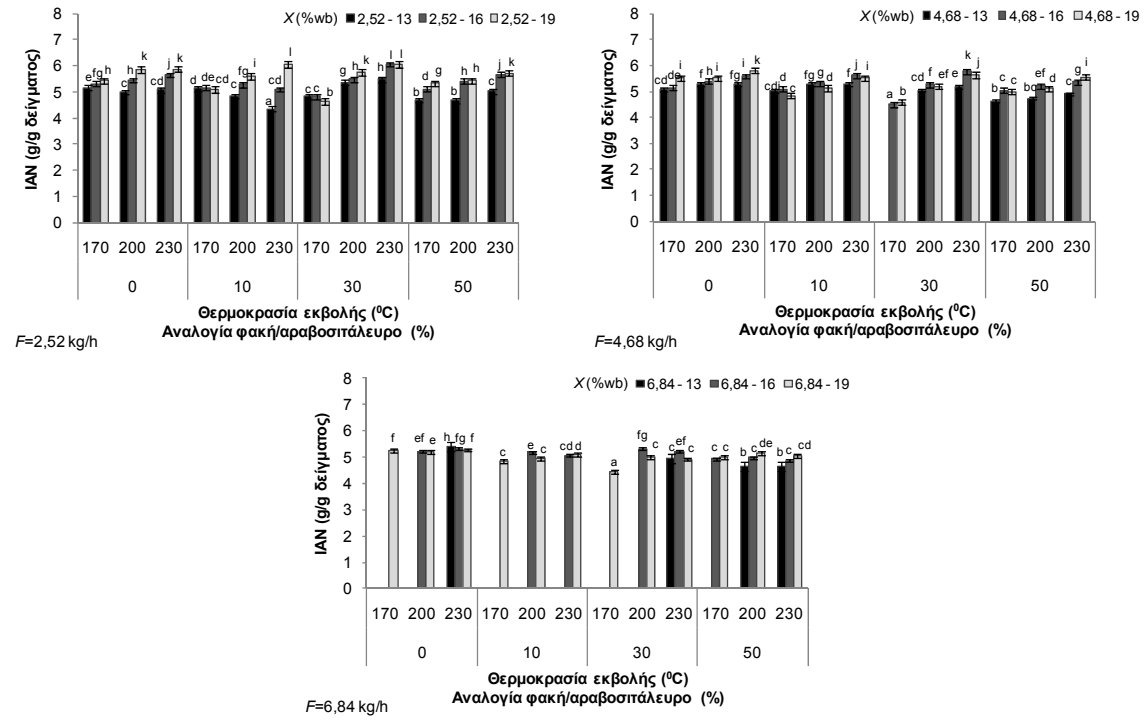
Η ανάλυση διακύμανσης έδειξε ότι η ικανότητα απορρόφησης νερού επηρεάζεται σημαντικά ($p < 0,001$) από την αναλογία των υλικών (φακή/αραβοσιτάλευρο), την υγρασία του υλικού τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Στον Πίνακα 13-7 του Παραρτήματος συνοψίζονται όλες οι τιμές της ΙΑΝ των τροφίμων εκβολής.

Η ΙΑΝ αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και την υγρασία του υλικού τροφοδοσίας για τα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο και στα μίγματα με τη φακή (Σχήμα 7.4-1). Γενικά οι τιμές της ΙΑΝ για τα τρόφιμα από αραβοσιτάλευρο κυμάνθηκε από 5,00 έως 5,88 g/g δείγματος, ενώ για τα τρόφιμα με προσθήκη φακής από 4,35 έως 6,06 g/g δείγματος. Η ΙΑΝ δεν παρουσίασε αυξητική τάση στις υψηλότερες τιμές παροχής τροφοδοσίας, για τα προϊόντα με άλευρο φακής με το υψηλότερο ποσοστό αρχικής υγρασίας (19%). Παρατηρήθηκε ότι σε μερικά από αυτά τα δείγματα μειώνονταν. Δηλαδή σε μερικά από τα δείγματα αυτά παρατηρείται ένα μέγιστο της ΙΑΝ για υγρασία τροφοδοσίας 16%. Στο παρελθόν έχει παρατηρηθεί παρόμοια μεταβολή για προϊόντα εκβολής με προσθήκη φασολιών (Gujska et al., 1991a). Αυτή η μεταβολή μπορεί να αποδοθεί στην αλληλεπίδραση μεταξύ των συνθηκών επεξεργασίας, λόγω των διαφορετικών μοριακών μετατροπών των πλεγμάτων του αμύλου και των πρωτεϊνών στα μίγματα του οσπρίου, έχοντας ως αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές της ΙΑΝ.

Η ΙΑΝ αποτελεί μέτρο του ποσοστού του νερού που μπορεί να απορροφηθεί από το άμυλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ζελατινοποίησης, αφού το φυσικό άμυλο δεν απορροφά νερό σε θερμοκρασία δωματίου (Anderson et al., 1970; Colonna et al., 1989; Ding et al., 2006). Η θερμοκρασία εκβολής και η υγρασία τροφοδοσίας είναι γνωστό ότι επηρεάζουν τη ζελατινοποίηση κατά τη διάρκεια της εκβολής και κατά συνέπεια θα επηρεάζουν την ΙΑΝ. Σε υψηλής υγρασίας προϊόν από σόγια (απομίμηση κρέατος) έχει βρεθεί ότι η ΙΑΝ αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής και της υγρασίας (Lin et al., 2002). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί για προϊόντα από άμυλο αραβοσίτου, φασολιών και ρεβιθιών (Gomez et al., 1983; Gujska et al., 1990; Singh et al., 2007).

Η IAN επηρεάσθηκε από την παροχή του υλικού τροφοδοσίας (Σχήμα 7.4-1). Η IAN μειώθηκε σημαντικά (p < 0,001) με την αύξηση της παροχής τόσο στα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο, όσο και στα προϊόντα από μίγματα φακής. Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας είναι γνωστό ότι επηρεάζει το βαθμό πλήρωσης του χιτωνίου του εκβολέα και κατά συνέπεια θα επηρεάζει τον μέσο χρόνο παραμονής του υλικού, καθώς και την ειδική μηχανική ενέργεια. Η αύξηση της παροχής προκαλεί μείωση στο μέσο χρόνο παραμονής και την ειδική μηχανική ενέργεια (Lazou et al., 2007; Liang et al., 2002). Η αποδόμηση των πολυμερών κατά τη διάρκεια της εκβολής γενικά θεωρείται ότι οφείλεται κυρίως στην μηχανική καταπόνηση, παρά στην θερμική υποβάθμιση, παρ' όλο που η θερμική υποβάθμιση γενικά παρατηρείται σε παρατεταμένες θερμικές διεργασίες (Kaletunc et al., 1993). Κατά συνέπεια η μειωμένη ειδική μηχανική ενέργεια μπορεί να προκαλεί μείωση των τιμών της IAN των προϊόντων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τις μεταβολές των προϊόντων εκβολής αραβοσιτάλευρου, επεξεργασμένα με εκβολέα διπλού κοχλία (Chang et al., 1998).

Η προσθήκη του οσπρίου οδήγησε γενικά σε μείωση των τιμών της IAN. Η μεταβολή αυτή είναι ξεκάθαρη για όλα τα προϊόντα που έχουν παραχθεί με υγρασία τροφοδοσίας 13%. Στις τιμές της IAN παρατηρήθηκε μια ελάχιστη τιμή για τα προϊόντα με ποσοστό φακή/αραβοσιτάλευρο 30%, και τα οποία παρήχθησαν σε χαμηλή θερμοκρασία (170°C) και σχετικά υψηλότερες τιμές υγρασίας τροφοδοσίας (16 και 19%).



Σχήμα 7.4-1 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην IAN των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

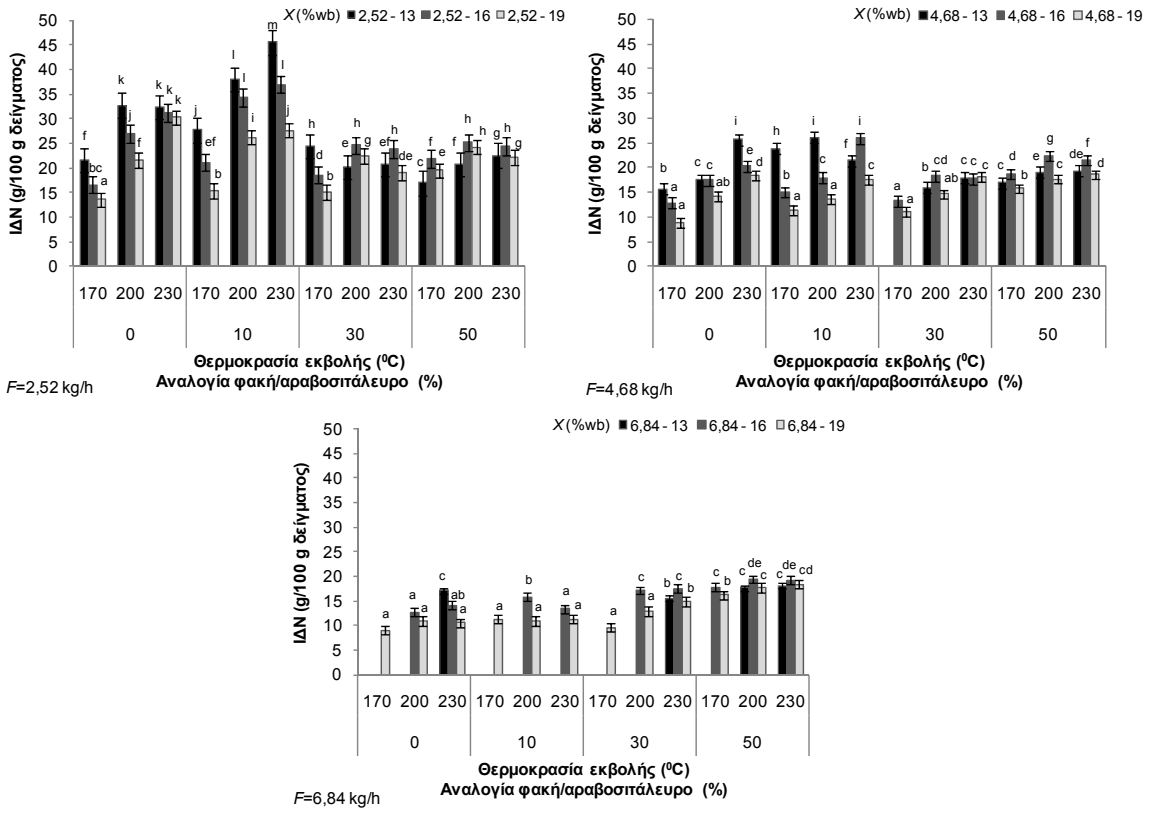
Η αύξηση του ποσοστού του οσπρίου αυξάνει το πρωτεϊνικό περιεχόμενο των τροφίμων εκβολής. Η ΙΑΝ εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των υδρόφιλων ομάδων, στις οποίες προσδένονται τα μόρια του νερού και στην ικανότητα σχηματισμού πηκτών των μακρομορίων (Gomez et al., 1983). Παρ' όλο που οι πρωτεΐνες έχουν υδρόφιλες ομάδες, η μετουσίωσή τους κατά τη διάρκεια της εκβολής οδηγεί στην απώλεια της ικανότητας ενυδάτωσης των πρωτεϊνών. Η μειωμένη ικανότητα ενυδάτωσης ευνοείται από το σχηματισμό ενδο- και δια-μοριακών δεσμών μεταξύ των πρωτεϊνών με τα μόρια της αμυλόζης και της αμυλοπηκτίνης (Fernandez-Gutierrez et al., 2004). Με τον τρόπο αυτό η προσθήκη πρωτεϊνών στο μίγμα που υφίσταται εκβολή μπορεί να μειώσει τη μοριακή υποβάθμιση (Matthey et al., 1997).

7.4.2 Ικανότητα διαλυτότητας σε νερό (ΙΔΝ)

Η ΙΔΝ των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκε σημαντικά ($p < 0,001$) από την αναλογία των υλικών (φακή/αραβοσιτάλευρο), την υγρασία του υλικού τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία και την παροχή τροφοδοσίας. Στον Πίνακα 13-7 του Παραρτήματος συνοψίζονται όλες οι τιμές της ΙΔΝ των τροφίμων εκβολής.

Η ΙΔΝ μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας και αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής (Σχήμα 7.4-2). Γενικά οι τιμές της ΙΔΝ για τα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο κυμάνθηκε από 8,88 έως 32,79 g/100 g δείγματος, ενώ για τα προϊόντα από μίγματα φακής από 9,60 έως 41,71 g/100 g δείγματος. Οι τιμές της ΙΔΝ αυξήθηκαν με τη θερμοκρασία σχεδόν για όλα τα δείγματα, εκτός από τα δείγματα με αναλογία υλικών 10%, υγρασία τροφοδοσίας 19% και παροχή 6,84 kg/h τα οποία δεν ήταν σημαντικά διαφορετικά. Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της ΙΔΝ, σχεδόν σε όλα τα προϊόντα εκβολής.

Η ΙΔΝ συνδέεται με την ποσότητα των διαλυτών μορίων του τροφίμου, η οποία συνδέεται με τη δεξτρινοποίηση. Κατά συνέπεια η ΙΔΝ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της υποβάθμισης των μορίων και προσδιορίζει το βαθμό μετατροπής του αμύλου κατά τη διάρκεια της εκβολής (Colonna et al., 1989). Πρόσφατα η ΙΔΝ έχει χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για την εκτίμηση του βαθμού ψησίματος (degree of cooking) για τρόφιμα εκβολής από φασόλια (Drago, Velasco-González, Torres, González & Valencia, 2007). Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την ένταση της θερμικής κατεργασίας στον εκβολέα, η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για την αύξηση της ΙΔΝ των δειγμάτων. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι παρόμοιες με τις μεταβολές που έχουν παρατηρηθεί στην ΙΔΝ προϊόντων εκβολής με βάση το άμυλο, επεξεργασμένα με εκβολέα μονού ή και διπλού κοχλία (Chauhan & Bains, 1988; Colonna et al., 1989; Ding et al., 2006; Gujska et al., 1990; Kadan et al., 2003). Επιπρόσθετα έχει βρεθεί ότι η δεξτρινοποίηση του αμύλου είναι ο κύριος μηχανισμός μετατροπής του κατά τη διάρκεια της εκβολής του σε χαμηλή υγρασία. Κατά συνέπεια η μείωση της ΙΔΝ με την υγρασία τροφοδοσίας είναι αναμενόμενη και βρίσκεται σε συμφωνία με προηγούμενες αναφορές (Ding et al., 2005; Gujska et al., 1991a; Hernandez-Diaz et al., 2007).



Σχήμα 7.4-2 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην ΙΔΝ των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

Η μεταβολή της παροχής του υλικού τροφοδοσίας είχε σημαντική επίδραση στην ΙΔΝ. Η ΙΔΝ μειώθηκε με την αύξηση της παροχής τροφοδοσίας. Η αύξηση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας προκαλεί μείωση στο μέσο χρόνο παραμονής και στην ειδική μηχανική ενέργεια (Lazou et al., 2007; Liang et al., 2002). Αυτές οι παράμετροι του συστήματος έχουν μεγάλη επίδραση στη μοριακή αποδόμηση του αμύλου. Το τήγμα που υφίσταται εκβολή σε υψηλές παροχές υπόκειται σε μικρότερες διατμητικές δυνάμεις, οι οποίες προκαλούν μικρότερη μοριακή υποβάθμιση και έτσι μικρότερο βαθμό ψησίματος. Η παρατηρούμενη τάση συμφωνεί με τις αντίστοιχες μεταβολές προϊόντων με βάση το αραβοσιτάλευρο, το σιτάλευρο και το ρύζι (Chang et al., 1998; Ding et al., 2006; Ding et al., 2005).

Η προσθήκη του οσπρίου επηρέασε σημαντικά τις τιμές της ΙΔΝ (p < 0,001). Παρ' όλο που η παροχή επηρέασε σημαντικά την ΙΔΝ, δεν παρατηρήθηκε μια ξεκάθαρη τάση μεταβολής. Για θερμοκρασία εκβολής 170ºC και όλες τις τιμές της υγρασίας τροφοδοσίας, η ΙΔΝ των δειγμάτων με αναλογία υλικών 10% παρουσίασε ένα μέγιστο, μειώθηκε με αναλογία υλικών 30% και αυξήθηκε εκ νέου για αναλογία υλικών 50%. Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας 13%, στις υψηλές θερμοκρασίες (200, 230ºC) και παροχή 2,52 kg/h. Μέγιστη τιμή της ΙΔΝ βρέθηκε επίσης για υγρασία 16%, σε θερμοκρασίες 200 και 230ºC και αντίστοιχες παροχές 2,52 και 4,68 kg/h και για τα δείγματα με 19% υγρασία, επεξεργασμένα στους 200ºC και σε παροχή

2,52 kg/h. Οι τιμές της ΙΔΝ για τα δείγματα με 16% υγρασία, επεξεργασμένα στους 200°C και παροχή 4,68kg/h δεν ήταν σημαντικά διαφορετικές για αναλογίες υλικών από 0-30%, ενώ για την αναλογία υλικών 50% παρατηρήθηκε αύξηση στην ΙΔΝ. Η ΙΔΝ αυξήθηκε με αύξηση της αναλογίας υλικών στις υψηλότερες τιμές παροχής τροφοδοσίας. Τέλος, για 19% υγρασία τροφοδοσίας, 200°C και στις υψηλότερες παροχές (4,68 και 6,84 kg/h) η ΙΔΝ αυξήθηκε με την αύξηση της αναλογίας υλικών. Παρόμοια μεταβολή βρέθηκε για τα αντίστοιχα δείγματα στους 230°C, ενώ σε παροχή 2,52 kg/h η ΙΔΝ μειώθηκε.

Η αύξηση της αναλογίας υλικών (ποσοστό οσπρίου) αύξησε το πρωτεϊνικό περιεχόμενο των προϊόντων. Κατά τη διάρκεια της εκβολής η ικανότητα διαλυτότητας των πρωτεϊνών χάνεται λόγω της μετουσίωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα δομικές μεταβολές που επιτρέπουν στις υδρόφιλες ομάδες, όπως –OH, $–NH_2$, –COOH και –SH, να σχηματίζουν συνδέσεις (γέφυρες) με το άμυλο (Fernandez-Gutierrez et al., 2004). Εξάλλου, όλες οι μακρομοριακές τροποποιήσεις κατά τη διάρκεια της εκβολής επηρεάζονται από τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο χιτώνιο του εκβολέα. Ο ρυθμός διάτμησης εξαρτάται από την ειδική μηχανική ενέργεια, μια παράμετρο του συστήματος, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες εκβολής (παροχή τροφοδοσίας, θερμοκρασία εκβολής και ταχύτητα περιστροφής κοχλιών) και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (υγρασία υλικού, σύσταση και ιξώδες) (Colonna et al., 1989). Έτσι, η προσθήκη των πρωτεϊνών στα τρόφιμα εκβολής αναμένεται να μειώνει την ΙΔΝ, γεγονός που επιβεβαιώθηκε για ορισμένα δείγματα. Όμως η προσθήκη φακής σε ποσοστό 50% προκάλεσε αύξηση των τιμών της ΙΔΝ των τροφίμων. Παρόμοιες μεταβολές έχουν βρεθεί για προϊόντα εκβολής από φασόλια με υψηλό ποσοστό αμύλου, καθώς και τα μικρά λευκά φασόλια (navy beans) (Aguilera, Crisafulli, Lusas, Uebersax & Zabik, 1984; Gujska & Khan, 1991b).

7.4.3 Ικανότητα απορρόφησης ελαίου (ΙΑΕ)

Η ΙΑΕ των προϊόντων επηρεάσθηκε σημαντικά ($p < 0,001$) από την αναλογία των υλικών (φακή/αραβοσιτάλευρο), την υγρασία τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή τροφοδοσίας. Στον Πίνακα 13-7 του Παραρτήματος συνοψίζονται όλες οι τιμές της ΙΑΕ των τροφίμων εκβολής.

Η ΙΑΕ στα περισσότερα τρόφιμα αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας (Σχήμα 7.4-3). Οι τιμές της ΙΑΕ κυμάνθηκαν από 1,48 έως 5,45 mL/g και 0,91 έως 4,49 mL/g για τα τρόφιμα από αραβοσιτάλευρο και μίγματα φακής, αντίστοιχα. Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής αυξάνει το βαθμό ψησίματος των τροφίμων εκβολής (Drago et al., 2007), έχοντας σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μικρότερων μορίων λόγω της δεξτρινοποίησης του αμύλου. Η παρουσία των μορίων αυτών μπορεί να είναι υπεύθυνη για την αύξηση της ΙΑΕ. Γενικά η ΙΑΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της υδροφοβικής φύσης των τροφίμων εκβολής. Τα ληφθέντα αποτελέσματα για τις μεταβολές βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά για την ΙΑΕ τροφίμων εκβολής από ρύζι και φασόλια (Gujska et al., 1990; Kadan et al., 2003). Η αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας μειώνει το βαθμό ψησίματος και η ΙΑΕ θα πρέπει να είναι μικρότερη, γιατί θα υπάρχουν χαμηλά ποσοστά μορίων, τα οποία ευνοούν την αύξηση των τιμών της ΙΑΕ. Τα δείγματα με 50% αναλογία υλικών, σε παροχή

τροφοδοσίας 2,52 kg/h και 4,68 kg/h, δεν ακολούθησαν την πτωτική πορεία με την υγρασία τροφοδοσίας στις τιμές της ΙΑΕ, αλλά αυξήθηκαν οι τιμές σε όλες τις θερμοκρασίες εκβολής.

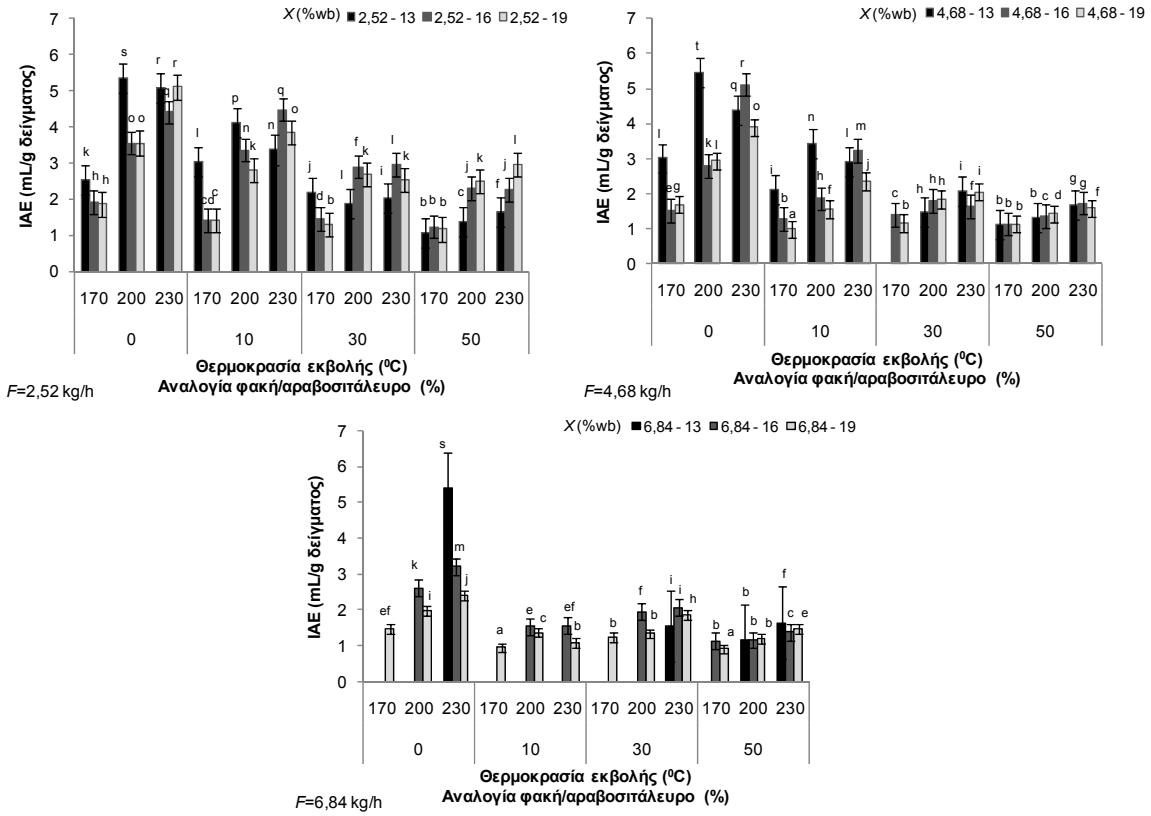
Η αύξηση της παροχής κατά τη διάρκεια της εκβολής μείωσε τις τιμές της ΙΑΕ των παραγόμενων τροφίμων. Η μεταβολή αυτή μειώνει ο βαθμό της δεξτρινοποίησης του αμύλου, μέσω της μείωσης του μέσου χρόνου παραμονής και της ειδικής μηχανικής ενέργειας. Κατά αυτόν τον τρόπο σε χαμηλές τιμές της παροχής αναμένονται υψηλές τιμές ΙΑΕ, γεγονός που παρατηρείται στην παρούσα εργασία.

Η αύξηση της αναλογίας φακή/αραβοσιτάλευρο μείωσε τις τιμές της ΙΑΕ των τροφίμων. Τα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές ΙΑΕ. Η προσθήκη πρωτεϊνών στα προϊόντα μείωσε την ΙΑΕ. Η μεταβολή αυτή έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν για προϊόντα εκβολής από φασόλια (Gujska et al., 1991b). Ο Kinsella (1976) επεξήγησε το μηχανισμό απορρόφησης λιπαρών ως ένα φυσικό εγκλεισμό ελαίου, ενώ κάποιοι άλλοι μελετητές (Bencini, 1986; Narayana & Narasinga Rao, 1982; Sathe, Deshpande & Salunkhe, 1982) συσχέτισαν την ικανότητα απορρόφησης ελαίου με τις μη πολικές πλευρικές αλυσίδες των πρωτεϊνών. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας υποστηρίζουν τον μηχανισμό του εγκλεισμού του ελαίου, αφού η ΙΑΕ ήταν χαμηλότερη στα δείγματα που περιείχαν περισσότερη πρωτεΐνη. Οι διαφορές στα χαρακτηριστικά συγκράτησης ελαίου μπορεί να οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις πρωτεϊνών, στα διαφορετικά ποσοστά μη πολικών αμινοξέων, στα διαφορετικά χαρακτηριστικά διαμόρφωσης και στη σύνδεση μεταξύ αμύλου-πρωτεϊνών-λιπιδίων (Gujska et al., 1991b).

7.4.4 Ομαδοποίηση δειγμάτων και διαλογή

Οι λειτουργικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της καταλληλότητας ενός αμυλούχου προϊόντος εκβολής ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον σχηματισμό αιωρημάτων ή διαλυμάτων (Colonna et al., 1989). Για τη διερεύνηση του τρόπου ομαδοποίησης των λειτουργικών ιδιοτήτων, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή προϊόντων με κατάλληλη λειτουργικότητα, το σύνολο των δεδομένων υποβλήθηκε σε ανάλυση κυρίων συνιστωσών.

Οι συντεταγμένες των παραγόντων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1. Η ΙΑΝ συσχετίζεται θετικά με την κύρια συνιστώσα *PC2*, ενώ η ΙΔΝ και η ΙΑΕ συσχετίζεται αρνητικά με την κύρια συνιστώσα *PC1*. Στο Σχήμα 7.4-4 φαίνεται η συσχέτιση των διαφόρων δειγμάτων, όπου το C και το L αναφέρονται στα προϊόντα με αραβοσιτάλευρο και μίγματα φακής, αντίστοιχα. Η κωδικοποίηση των δειγμάτων που ακολουθείται είναι αυτή που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.



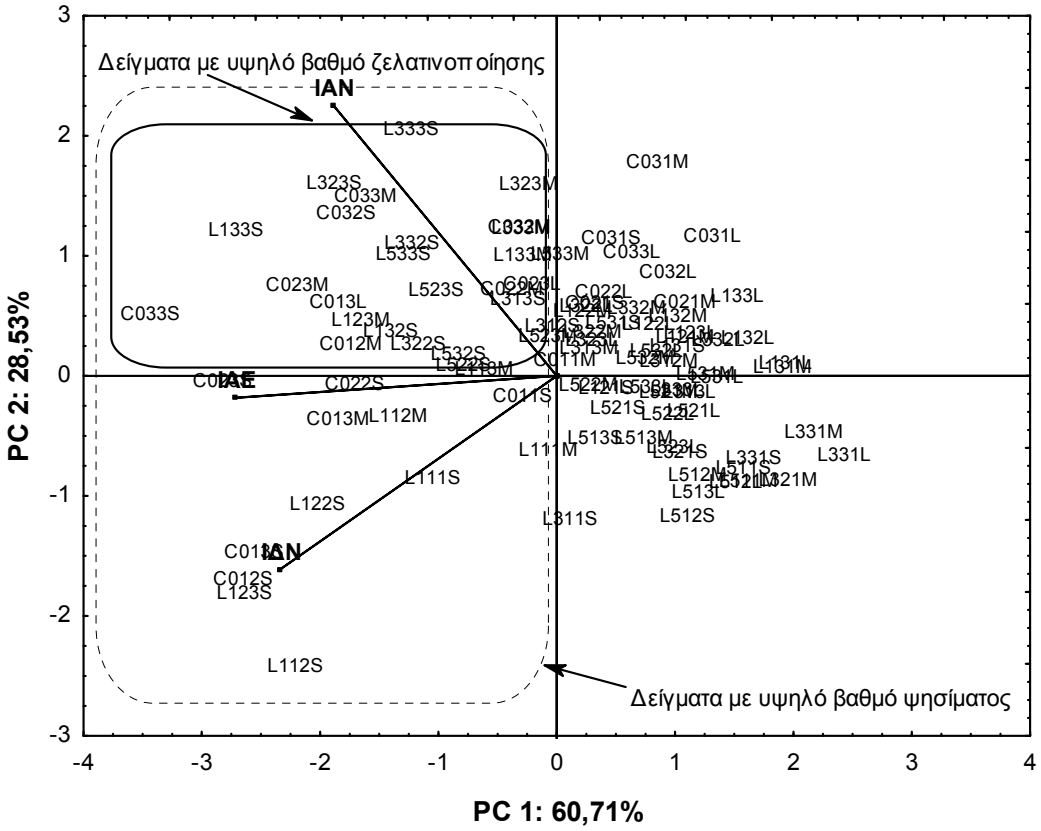
Σχήμα 7.4-3 Επίδραση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στην ΙΑΕ των προϊόντων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου. Οι γραμμές των σφαλμάτων αναπαριστούν των τυπική απόκλιση. Οι ράβδοι με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν τις σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

Η ΙΑΝ αυξάνεται κατά μήκος του άξονα y, ενώ η ΙΔΝ και η ΙΑΕ των δειγμάτων αυξάνονται κατά μήκος των αρνητικών τιμών του άξονα x (Σχήμα 7.4-4). Αυτή η ταξινόμηση επιτρέπει τη διάκριση δειγμάτων με επιθυμητές λειτουργικές ιδιότητες, τα οποία μπορούν να παραχθούν υπό συγκεκριμένο συνδυασμό συνθηκών εκβολής και χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. Έτσι λοιπόν, αν για παράδειγμα απαιτούνται προϊόντα με υψηλό βαθμό ψησίματος, τα οποία θα μετατραπούν σε σκόνες για κρεμώδεις σούπες (Drago et al., 2007), κατάλληλα κρίνονται όσα δείγματα βρίσκονται στα αριστερά του άξονα y, στο Σχήμα 7.4-4, τα οποία επιπροσθέτως εμφανίζουν αυξημένες τιμές ΙΑΕ. Τα δείγματα αυτά παρατηρείται ότι έχουν παραχθεί σε παροχές υλικού τροφοδοσίας 2,52 kg/h και 4,68 kg/h, και δεν περιέχουν ποσοστό φακής πάνω από 30%.

Πίνακας 7-1 Συντεταγμένες παραγόντων των κυρίων συνιστωσών, με βάση τις συσχετίσεις.

	PC 1	*PC 2*	*PC 3*
ΙΑΝ	-0,629	**0,751**	0,199
ΙΔΝ	**-0,778**	-0,536	0,327
ΙΑΕ	**-0,906**	-0,061	-0,419

Από την ομαδοποίηση των τροφίμων εκβολής προκύπτει ακόμα ότι σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή συνδετική ικανότητα, δηλαδή υψηλός βαθμός ζελατινοποίησης (Colonna et al., 1989) θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα τα δείγματα που βρίσκονται μέσα στο κύκλο. Τα δείγματα με αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο 50% γενικά εμφάνισαν χαμηλές τιμές ΙΔΝ και ΙΑΕ, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7.4-4, εκτός από τα δείγματα με 16% και 19% υγρασία τροφοδοσίας που έχουν υποστεί εκβολή σε υψηλές θερμοκρασίες (200°C και 230°C αντίστοιχα) και χαμηλή παροχή (2,52 kg/h). Τα περισσότερα δείγματα με υψηλή υγρασία τροφοδοσίας, επεξεργασμένα σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές παροχές τροφοδοσίας εμφανίζουν μειωμένη λειτουργικότητα.



Σχήμα 7.4-4 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών των λειτουργικών ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής όπως αυτές επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών.

7.5 Συμπεράσματα

Οι λειτουργικές ιδιότητες τροφίμων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου που έχουν παρήχθησαν σε εκβολέα διπλού κοχλία εξαρτώνται από τις παραμέτρους της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Γενικά οι τιμές της ΙΑΝ των τροφίμων εκβολής κυμάνθηκαν από 4,35 έως 6,06 g/g δείγματος. οι τιμές της ΙΔΝ από 8,88 έως 41,71 g/100 g δείγματος και οι τιμές της ΙΑΕ κυμάνθηκαν από 0,91 έως 5,45 mL/g.

Η θερμοκρασία εκβολής προκάλεσε αύξηση των τιμών όλων των εξεταζόμενων λειτουργικών ιδιοτήτων (ΙΑΝ, ΙΔΝ και ΙΑΕ), ενώ η παροχή του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε τη μείωσή τους. Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε αύξηση της ΙΑΝ, ενώ είχε την αντίστροφη επίδραση στην ΙΔΝ και στην ΙΑΕ. Η αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο μείωσε την ΙΑΝ και την ΙΑΕ, αλλά δεν παρατηρήθηκε κάποια ξεκάθαρη μεταβολή της ΙΔΝ με την παράμετρο αυτή. Συγκριτικά, τα τρόφιμα εκβολής από αραβοσιτάλευρο είχαν υψηλότερες τιμές λειτουργικών ιδιοτήτων από αυτές των τροφίμων από μίγματα φακής.

Η συσχέτιση των δειγμάτων με τη χρήση της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών υπέδειξε ότι μπορεί να επιτευχθεί η επιλογή δειγμάτων με επιθυμητή λειτουργικότητα. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται, για την παραγωγή ενός προϊόντος τροφίμου, συστατικό με υψηλή συνδετική ικανότητα, δηλαδή υψηλός βαθμός ζελατινοποίησης, και υψηλός βαθμός ψησίματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παραχθέντα τρόφιμα εκβολής. Οι συνθήκες που εξασφαλίζουν την επιθυμητή λειτουργικότητα είναι η παροχή τροφοδοσίας να κυμαίνεται από 2,52 kg/h έως 4,68 kg/h και το μίγμα να μην περιέχει περισσότερο από 30% άλευρο φακής. Τα προϊόντα με ποσοστό οσπρίου 50% και αυτά με υψηλή αρχική υγρασία (>16%), που παράγονται σε υψηλές παροχές τροφοδοσίας εμφανίζουν μειωμένη λειτουργικότητα.

8 Οργανοληπτική αξιολόγηση και αποδοχή των προϊόντων εκβολής

8.1 Αντικείμενο και στόχοι

Οι οργανοληπτικές ιδιότητες των τροφίμων είναι καθοριστικές για την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Τα διάφορα διογκωμένα προϊόντα εκβολής έχουν μοναδικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά ιδιαιτέρως αρεστά από τους καταναλωτές. Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά καθορίζονται από τη δομή και την υφή των προϊόντων, καθώς και από τα διάφορα αρωματικά συστατικά με τα οποία εμπλουτίζονται. Η υφή και η δομή των τροφίμων εκβολής επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες επεξεργασίας και τη σύσταση του μίγματος που υφίσταται επεξεργασία. Κατά συνέπεια οι οργανοληπτικές ιδιότητες των τροφίμων εκβολής επηρεάζονται και καθορίζονται από τις συνθήκες εκβολής, όπως η θερμοκρασία, η παροχή του υλικού τροφοδοσίας κλπ. και από τη χημική σύνθεση του υλικού.

Έτσι, μελετήθηκαν οι οργανοληπτικές ιδιότητες των προϊόντων που παρασκευάσθηκαν με αραβοσιτάλευρο και τρία μίγματα αλεύρων φακής και αραβοσίτου. Επίσης, εξετάσθηκε η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στις ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων της υγρασίας του υλικού τροφοδοσίας, της θερμοκρασίας εκβολής και της παροχής του υλικού τροφοδοσίας.

Κύριος στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στις οργανοληπτικές ιδιότητες (εμφάνιση, υφή, γεύση) και την αποδοχή των τροφίμων εκβολής και η κατανόηση των μηχανισμών που καθορίζουν την δημιουργία και την ανάπτυξη των διαφόρων οργανοληπτικών χαρακτηριστικών. Επίσης πραγματοποιήθηκε συσχέτιση των οργανοληπτικών ιδιοτήτων για την κατανόηση της μεταξύ τους σχέσης και την ομαδοποίηση των δειγμάτων με βάση τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά.

8.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Κατά την τελευταία δεκαετία μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στη Μεσογειακή δίαιτα και έχει βρεθεί ότι αυτή συνδέεται με τη μείωση της εμφάνισης των καρδιαγγειακών παθήσεων και του καρκίνου, μέσω διαφόρων μηχανισμών (Avellone et al., 2003; Huang & Sumpio, 2008; Panagiotakos, 2005; Pérez-López, Chedraui, Haya & Cuadros, 2009). Η Μεσογειακή διατροφή περιλαμβάνει: υψηλή συγκέντρωση μονοακόρεστων/κορεσμένων λιπαρών, περιορισμένη κατανάλωση αλκοολούχων ποτών, γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων, χαμηλή κατανάλωση κρέατος και προϊόντων κρέατος και υψηλή κατανάλωση δημητριακών, φρούτων, λαχανικών και οσπρίων. Τα όσπρια είναι καλές πηγές υδατανθράκων και είναι πλούσια σε πρωτεΐνες και διαιτητικές ίνες, ενώ περιέχουν σημαντικά ποσοστά αντιοξειδωτικών (πολυφαινολών) και μη-αντιοξειδωτικών (πολυστερολών) βιοενεργών συστατικών. Τα όσπρια κανονικά καταναλώνονται μετά την επεξεργασία, η οποία αυξάνει τη βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών μέσω της αδρανοποίησης των αναστολέων της θρυψίνης και της αιμογλουτίνης. Όμως, το άμυλο, το μεγάλο βιοπολυμερές των οσπρίων, μέσω της επεξεργασίας μετατρέπεται μερικώς σε

ανθεκτικό άμυλο (Faraj, Vasanthan & Hoover, 2004; Tharanathan & Mahadevamma, 2003).

Τα όσπρια πολύ συχνά καθίστανται αναγκαία συμπληρώματα άλλων πρωτεϊνικών πηγών (Duranti et al., 1997). Έτσι, η διατροφική αξία των οσπρίων αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον (Makri, Papalamprou & Doxastakis, 2005). Διατροφικά, οι πρωτεΐνες των οσπρίων είναι φτωχές σε θειούχα αμινοξέα (μεθειονίνη, κυστεΐνη και θρυπτοφάνη), ενώ περιέχουν μεγαλύτερα ποσοστά άλλων απαραιτήτων αμινοξέων (λυσίνη) από τα δημητριακά (Duranti, 2006). Έτσι, από την άποψη της λυσίνης και των θειούχων αμινοξέων τα δημητριακά και τα όσπρια αλληλοσυμπληρώνονται.

Η εκβολή αλεύρων οσπρίων είναι σχετικά μια καινούρια ερευνητική περιοχή, με εξαίρεση τη σόγια (Lazou et al., 2007; Rocha-Guzman et al., 2006). Τα προϊόντα άμεσης διόγκωσης που παράγονται μέσω της εκβολής χαρακτηρίζονται ως σνακ δεύτερης γενιάς. Συνήθως έχουν χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα και διαφημίζονται ως προϊόντα με αυξημένο θρεπτικό περιεχόμενο, πλούσια σε διαιτητικές ίνες και πρωτεΐνες (Liu et al., 2000). Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής καθορίζουν σχεδόν αποκλειστικά την αποδοχή τους εκ μέρους των καταναλωτών. Σε αυτά περιλαμβάνονται η τραγανή υφή και η καλά διογκωμένη δομή, η ομοιογενής δομή, η καλή γεύση, η ελκυστική εμφάνιση, το χρώμα και η οσμή. Η οργανοληπτική αξιολόγηση είναι πολύ σημαντική στην ανάπτυξη νέων προϊόντων, στη βελτίωση των προϊόντων και στην αριστοποίηση. Οι συνθήκες εκβολής και οι ιδιότητες των πρώτων υλών επηρεάζουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής και τέτοιες μεταβολές έχουν παρατηρηθεί για διάφορα προϊόντα δημητριακών (από αραβόσιτο και σιτάρι) (Andersson et al., 1990; Chen et al., 1991; Onwulata & Heymann, 1994). Επιπροσθέτως, η προσθήκη φυτικών πρωτεϊνών επηρεάζει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής (Li et al., 2005; Lin et al., 2002; Yeu, Lee & Lee, 2008). Για την παραγωγή σνακ πλουσίων σε πρωτεΐνες χρησιμοποιείται συνήθως σόγια. Όμως, η προσθήκη της σε υψηλές συγκεντρώσεις προσδίδει στα παραγόμενα τρόφιμα γεύση-οσμή «φασολιού» (beany). Έχει βρεθεί ότι η γεύση-οσμή «φασολιού» στα τρόφιμα σχετίζεται με διάφορες χημικές ενώσεις (Bott & Chambers, 2006; Vara-Ubol, Chambers & Chambers, 2004). Οι μελέτες που αφορούν την επίδραση άλλων φυτικών πρωτεϊνών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τροφίμων εκβολής είναι περιορισμένες και αναφέρονται σε μερικά είδη φασολιών και αλεύρου φιστικιών (Chauhan, Sharma & Bains, 2003; Choi, Phillips & Resurreccion, 2007; Skierkowski et al., 1990). Έτσι, αναγκαία είναι η διερεύνηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών τροφίμων εκβολής με βάση άλλα είδη οσπρίων. Οι σχέσεις μεταξύ των συνθηκών εκβολής και των φυσικοχημικών (δομικών, μηχανικών και λειτουργικών) και οργανοληπτικών ιδιοτήτων αποτελεί τη βάση για την αποτελεσματική ανάπτυξη νέων προϊόντων.

Σκοπός του παρόντος μέρους της διατριβής ήταν η μελέτη των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (εμφάνιση, γεύση, υφή και αποδοχή) των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και άλευρο φακής όπως αυτά επηρεάζονται από τις παραμέτρους της διεργασίας (θερμοκρασία εκβολής και παροχή τροφοδοσίας) και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (υγρασία τροφοδοσίας και αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο). Επιπρόσθετα

τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά συσχετίσθηκαν μεταξύ τους, ώστε να μελετηθούν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τροφίμων εκβολής, που έχουν παραχθεί σε διαφορετικές συνθήκες, μέσω της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών.

8.3 Πειραματική διαδικασία

8.3.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων

Η προετοιμασία και παραγωγή των τροφίμων εκβολής πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

8.3.2 Οργανοληπτικός έλεγχος τροφίμων εκβολής

Για την περιγραφική ανάλυση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων εκβολής χρησιμοποιήθηκε δεκαμελής ομάδα εκπαιδευμένων δοκιμαστών. Όλοι οι δοκιμαστές είχαν εμπειρία στην εκτίμηση των τροφίμων εκβολής. Οι δοκιμές διεξήχθηκαν στον διαπιστευμένο χώρο οργανοληπτικών δοκιμών του εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Οι δοκιμαστές αξιολόγησαν τα προϊόντα εκβολής σε ξεχωριστούς φωτισμένους θαλάμους. Για να εξασφαλισθούν σταθερές συνθήκες μεταξύ των οργανοληπτικών ελέγχων, η θερμοκρασία του χώρου παρέμενε σταθερή (25±1°C) και τα αναλώσιμα (πλαστικά πιάτα, ποτήρια, εμφιαλωμένο νερό για την έκλυση του στόματος κ.α.) που χρησιμοποιούνταν είχαν σταθερά χαρακτηριστικά.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων περιλάμβανε τον τεμαχισμό των κυλινδρικών τροφίμων εκβολής σε κομμάτια περίπου 4 cm και την τοποθέτηση τριών τεμαχίων σε λευκά πλαστικά πιάτα. Τα δείγματα εμφανιζόταν στους δοκιμαστές με τυχαία σειρά. Σε κάθε πιάτο αναγραφόταν ο κωδικός του αντίστοιχου δείγματος, ο οποίος ήταν τυχαίος τριψήφιος αριθμός. Μεταξύ των διαδοχικών δοκιμών οι δοκιμαστές ξέπλεναν το στόμα τους με εμφιαλωμένο νερό, προκειμένου να ουδετεροποιήσουν τους υποδοχείς της γλώσσας.

Οι περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των διαφόρων οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων εκβολής, καθώς και οι ορισμοί και οι άξονες βαθμολογίας, αναλύονται στον Πίνακα 8-1 (Dijksterhuis et al., 2007; Liu et al., 2000). Η εκτίμηση και βαθμολόγηση των περιγραφικών όρων της υφής έγινε με χρήση 9-βάθμιας κλίμακας όπου: 1 = ανεπαίσθητο/μη αντιληπτό χαρακτηριστικό, 5 = αρκετά αντιληπτό και 9 = εξαιρετικά αντιληπτό/πολύ έντονο. Τα πειράματα σχεδιάσθηκαν έτσι ώστε να λαμβάνονται 3 επαναλήψεις για κάθε τρόφιμο εκβολής. Σε κάθε δοκιμή σερβιρόταν 5 δείγματα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δεκαεννέα δοκιμές, διάρκειας 45 min.

Πίνακας 8-1 Χαρακτηριστικά, ορισμοί και άξονες που χρησιμοποιήθηκαν στην περιγραφική ανάλυση των τροφίμων εκβολής.

	Χαρακτηριστικό	Ορισμός	Άξονας
Εμφάνιση	Εμφάνιση	Ομογενής δομή	Χαμηλό έως υψηλό
	Πορώδες	Ποσοστό των πόρων αέρα στην κάθετη διατομή του δείγματος	Λίγοι μέχρι πολλοί
	Διάμετρος	Μέγεθος της κάθετης διατομής του δείγματος	Χαμηλό έως υψηλό
	Χρώμα	Από σκούρο καφέ έως ανοικτό κίτρινο	Σκούρο έως ανοικτό
Γεύση-Οσμή	Αλευρώδες	Άψητο αλεύρι	Χαμηλό έως υψηλό
	Καμένο και πικρό	Καμένο δείγμα	Χαμηλό έως υψηλό
Υφή	Τραγανότητα	Βαθμός του θορύβου που ελευθερώνεται κατά τη μάσηση με τους γομφίους	Χαμηλό έως υψηλό
	Αφρώδες	Θραύση του προϊόντος: η δύναμη που ασκείται από τα δόντια στο δείγμα είναι πιο ελαφριά, και πιο «αεράτη» από ότι όταν σπάει με θόρυβο ένα προϊόν	Χαμηλό έως υψηλό
	Σκληρότητα	Η δύναμη που ασκείται κατά το δάγκωμα του δείγματος	Χαμηλό έως υψηλό
	Συγκολητικότητα	Βαθμός με τον οποίο τα σωματίδια του δείγματος συγκολλούνται μεταξύ τους	Χαμηλό έως υψηλό
	Ενυδάτωση και διάλυση	Ποσοστό που διαλύεται	Χαμηλό έως υψηλό

Για την αποτίμηση της ολικής αποδοχής των προϊόντων εκβολής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αρεσκείας με 25 μη εκπαιδευμένους δοκιμαστές, που επιλέχθηκαν από το προσωπικό και τους φοιτητές της Σχολής Χημικών Μηχανικών. Τα κριτήρια επιλογής των δοκιμαστών ήταν ότι κατανάλωναν τουλάχιστον μια φορά την εβδομάδα προϊόντα εκβολής, είχαν ηλικία μεταξύ 18-65 ετών, δεν είχαν διατροφικές αλλεργίες και ήταν διαθέσιμοι και πρόθυμοι να λάβουν μέρος στις δοκιμές. Τα πειράματα σχεδιάσθηκαν έτσι ώστε για κάθε τρόφιμο να ληφθούν τρεις επαναλήψεις. Οι δοκιμές διεξήχθησαν στο διαπιστευμένο χώρο οργανοληπτικών δομικών του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Οι συνθήκες και η κωδικοποίηση των δειγμάτων έγινε κατά όμοιο τρόπο με την περιγραφική ανάλυση των τροφίμων. Τα τρόφιμα εκτιμήθηκαν για την ολική τους αποδοχή χρησιμοποιώντας της 9-βάθμια κλίμακα με εύρος από 1 (ανεπιθύμητο προϊόν) μέχρι 9 (πολύ επιθυμητό προϊόν.

Τα προϊόντα θεωρήθηκαν αποδεκτά αν η μέση βαθμολογία τους ήταν πάνω από 6 (λίγο αρεστό) (Choi et al., 2007).

8.3.3 Στατιστική ανάλυση

Η επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών (συνθήκες εκβολής και αναλογία υλικών) στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής μελετήθηκε με ανάλυση διακύμανσης. Οι σημαντικές διαφορές ορίσθηκαν στο $p < 0,05$. Επίσης, εφαρμόσθηκε η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (ΑΚΣ) για την διερεύνηση των ομοιοτήτων και διαφοροποιήσεων μεταξύ των τροφίμων εκβολής με βάση τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά. Η επεξεργασία των δεδομένων διεξήχθη με το πρόγραμμα Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

8.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

8.4.1 Χαρακτηριστικά εμφάνισης

Η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στα χαρακτηριστικά της εμφάνισης των προϊόντων εκβολής, όπως αυτά εκτιμήθηκαν από τους δοκιμαστές παρουσιάζονται στα Σχήματα 8.4-1 έως 8.4-9. Η ομογενής δομή των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε σημαντικά ($p<0,001$) από την αναλογία των υλικών (φακή/αραβοσιτάλευρο), την υγρασία τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή της τροφοδοσίας. Το οργανοληπτικό πορώδες επηρεάσθηκε από τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή της τροφοδοσίας ($p < 0,001$). Οι συνθήκες εκβολής (θερμοκρασία και παροχή) και η υγρασία τροφοδοσίας επηρέασαν σημαντικά τη διάμετρο των προϊόντων εκβολής, ενώ το χρώμα τους επηρεάσθηκε από την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο ($p < 0,001$). Οι τιμές των χαρακτηριστικών εμφάνισης των τροφίμων εκβολής συνοψίζονται στο Παράρτημα στον Πίνακα 13-4.

Το οργανοληπτικό πορώδες (αριθμός των ανοικτών πόρων) των προϊόντων εκβολής μειώθηκε με τη θερμοκρασία και αυξήθηκε με την παροχή τροφοδοσίας. Παρόμοια μεταβολή με τη θερμοκρασία παρατηρήθηκε και για την οργανοληπτική διάμετρο των προϊόντων, ενώ παρατηρήθηκε μείωση με την υγρασία τροφοδοσίας. Παρατηρείται ότι το ποσοστό των πόρων και η οργανοληπτική διάμετρος των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκαν σημαντικά από τις συνθήκες εκβολής. Η διάμετρος και ο αριθμός των πόρων μπορεί να συσχετισθεί με τη διόγκωση των προϊόντων (Chen et al., 1991). Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας είναι γνωστό ότι επηρεάζει το βαθμό πλήρωσης στο χιτώνιο του εκβολέα και κατά συνέπεια επηρεάζει το μέσο χρόνο παραμονής και την ειδική μηχανική ενέργεια (Lazou et al., 2007; Liang et al., 2002). Οι παράμετροι αυτές του συστήματος επηρεάζουν πολύ την μοριακή αποδόμηση του αμύλου. Γενικά ο βαθμός ψησίματος των προϊόντων μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία σχηματισμού των πόρων του προϊόντος κατά τη διάρκεια της εκβολής και κατά συνέπεια θα επηρεάζει και το βαθμό διόγκωσης των προϊόντων (Wang et al., 2005).

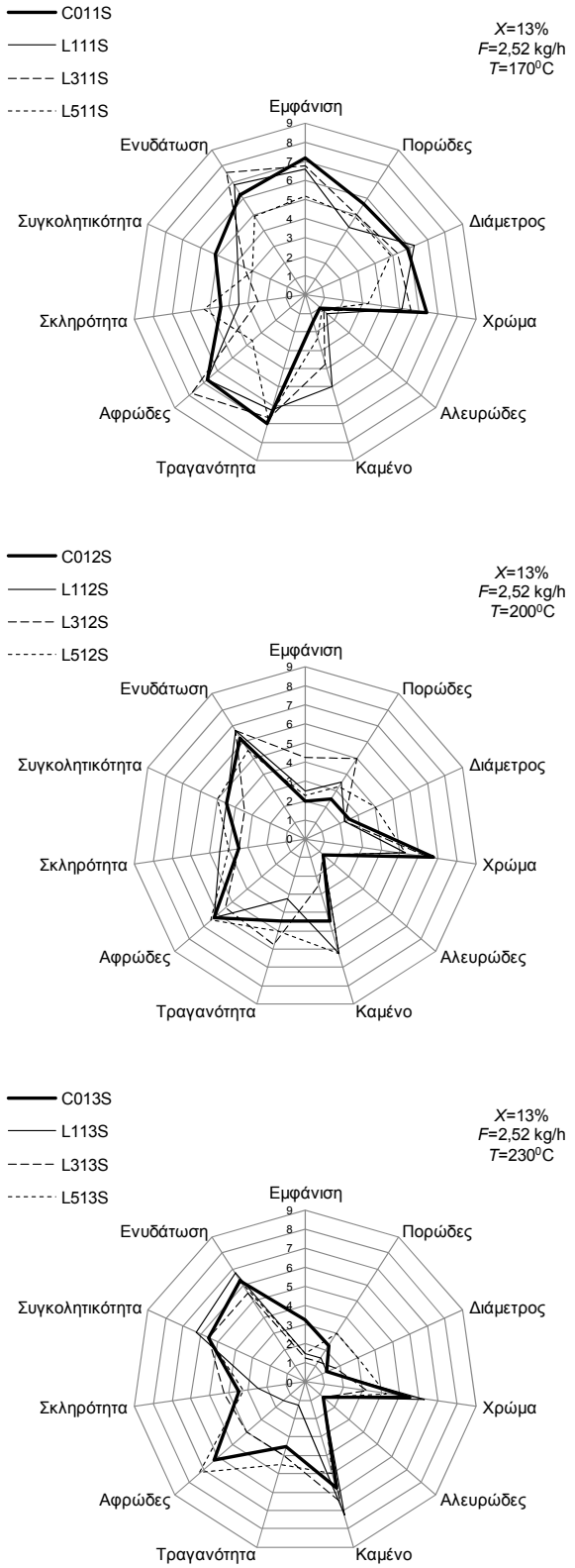
Το οργανοληπτικό χρώμα των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε κυρίως από την αναλογία των υλικών. Η μείωση του χρώματος των προϊόντων που προέρχεται από την προσθήκη πρωτεϊνών έχει αναφερθεί και για προϊόντα εκβολής από πρωτεϊνικό συμπύκνωμα σόγιας

(Camire & King, 1991). Το χρώμα είναι πολύ σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό στα προϊόντα εκβολής. Κατά τη διάρκεια της εκβολής προκαλούνται μεταβολές στο χρώμα των προϊόντων λόγω: (1) της αποδόμησης των χρωστικών ουσιών, (2) της διόγκωσης του τροφίμου η οποία προκαλεί το ξεθώριασμα του χρώματος (Berset, 1989), και (3) του χρώματος που παράγεται από χημικές αντιδράσεις όπως η καραμελοποίηση των υδατανθράκων, η αντίδραση Maillard και η αντίδραση της οξειδωτικής αποδόμησης των λιπιδίων και των πρωτεϊνών (Dworschak, 1980). Έτσι η αύξηση του πρωτεϊνικού περιεχομένου του μίγματος που υφίσταται επεξεργασία μπορεί να αυξήσει την έκταση της αντίδρασης Maillard, και κατά συνέπεια να μειώσει το χρώμα των προϊόντων, δηλαδή να προκύψουν πιο σκουρόχρωμα προϊόντα.

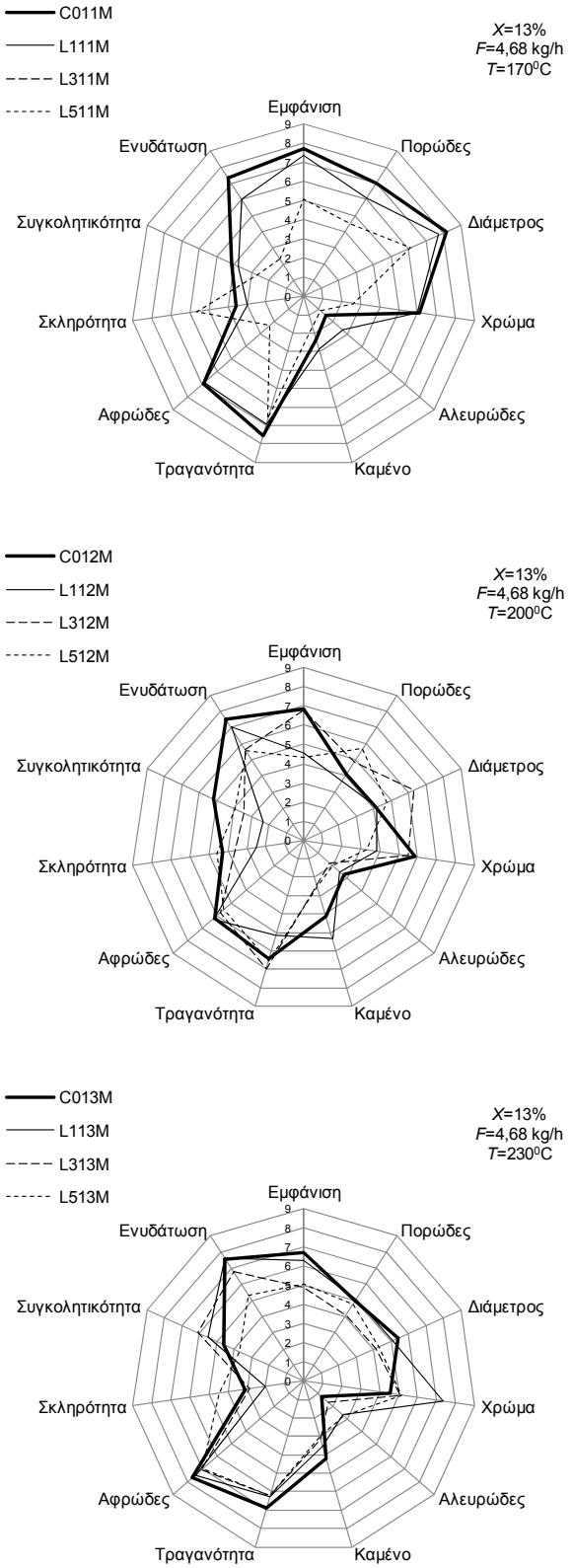
Η εμφάνιση των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκε από τις συνθήκες εκβολής, καθώς επίσης και από τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η καλή εμφάνιση των τροφίμων μειώθηκε με την αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο, την υγρασία τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία και αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Η αντίληψη της ομογενούς δομής των προϊόντων επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το χρώμα του. Από την παραπάνω παρατήρηση αναμένεται ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές που θα επηρεάζουν το πορώδες, τη διάμετρο και το χρώμα, θα επιδρούν και στην αντίληψη της καλής εμφάνισης των προϊόντων. Η εξάρτηση αυτή επιβεβαιώνεται από τις μεταβολές της ομογενούς δομής. Τα προϊόντα που έλαβαν την υψηλότερη βαθμολογία για την εμφάνιση ήταν αυτά που περιείχαν μόνο αραβοσιτάλευρο και χαμηλή υγρασία τροφοδοσίας (13%) και είχαν επεξεργασθεί στους 170°C και στα 4,68 kg/h.

8.4.2 Γεύση-οσμή (Flavor)

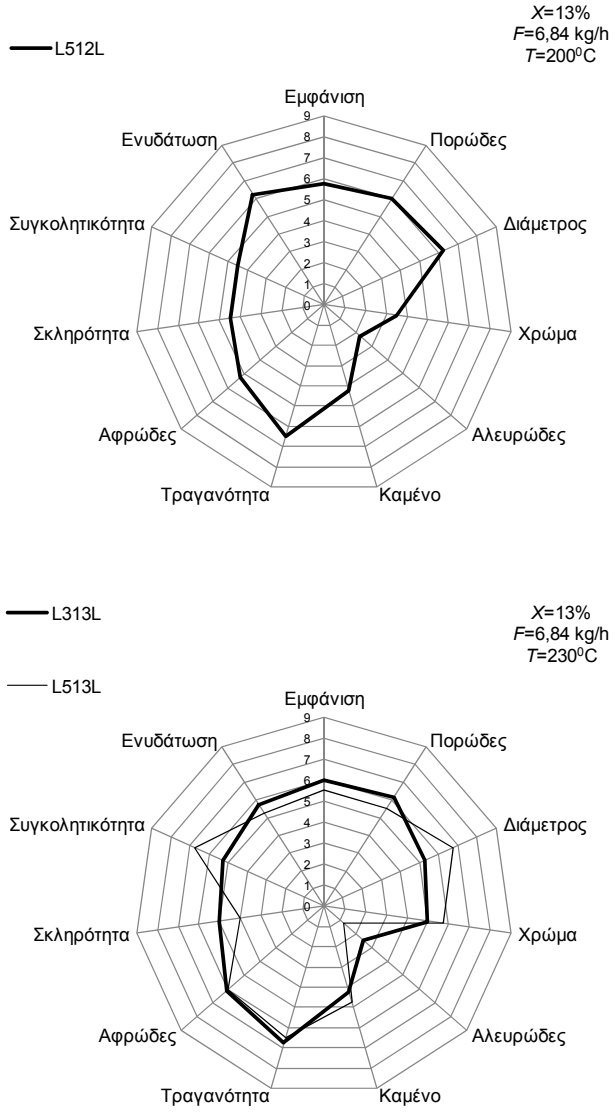
Τα χαρακτηριστικά γεύσης-οσμής των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και άλευρο φακής παρουσιάζονται στα Σχήματα 8.4-1 έως 8.4-9. Η αλευρώδης γεύση επηρεάσθηκε από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, ενώ η καμένη γεύση επηρεάσθηκε από την υγρασία τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την παροχή τροφοδοσίας ($p < 0,001$). Οι τιμές των χαρακτηριστικών της γεύσης-οσμής των προϊόντων εκβολής συνοψίζονται στο Παράρτημα στον Πίνακα 13-5.



Σχήμα 8.4-1 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=13% και *F*=2,52 kg/h.



Σχήμα 8.4-2 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=13% και *F*=4,68 kg/h.



Σχήμα 8.4-3 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=13% και *F*=6,84 kg/h.

Η αλευρώδης γεύση των τροφίμων εκβολής αυξήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας, ενώ η καμένη γεύση μειώθηκε. Δηλαδή όσο αυξάνεται η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας τα προϊόντα ψήθηκαν λιγότερο και παρουσίαζαν μια πιο ισχυρή γεύση άψητου αλεύρου. Πρόσφατα έχει βρεθεί ότι η αύξηση της υγρασίας του υλικού τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της εκβολής μειώνει το βαθμό ψησίματος (που έχει εκτιμηθεί ως μεταβολή στην ικανότητα διαλυτότητας σε νερό λόγω της μετουσίωσης των πρωτεϊνών) των τροφίμων (Drago et al., 2007; Lazou et al., 2010a). Κατά συνέπεια ο μικρότερος βαθμός μοριακής υποβάθμισης στις υψηλότερες τιμές υγρασίας μπορεί να ευθύνεται για την αυξημένη γεύση άψητου αλεύρου στα προϊόντα. Παρόμοιες μεταβολές έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν για προϊόντα εκβολής από αραβόσιτο (Chen et al., 1991).

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε μείωση της αλευρώδους γεύσης των προϊόντων και αύξηση στη γεύση-οσμή του καμένου. Από το γεγονός αυτό συνάγεται ότι τα αυξημένα επίπεδα θερμοκρασίας ευνοούν τις χημικές αντιδράσεις, οδηγώντας στη δημιουργία της ψημένης γεύσης-οσμής των τροφίμων εκβολής. Η αύξηση της παροχής τροφοδοσίας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αλευρώδους γεύση-οσμής και τη μείωση της καμένης. Τα αυξημένα επίπεδα παροχής μειώνουν το μέσο χρόνο παραμονής του υλικού στο χιτώνιο του εκβολέα. Το προς εκβολή ζυμάρι στις υψηλότερες παροχές υφίσταται μικρότερες διατμητικές δυνάμεις, οι οποίες θα προκαλέσουν μικρότερη υποβάθμιση και, κατά συνέπεια, μικρότερο βαθμό ψησίματος, ο οποίος μπορεί να είναι υπεύθυνος για αυτές τις μεταβολές της γεύσης-οσμής των τροφίμων εκβολής.

8.4.3 Υφή

Η ανάλυση διακύμανσης έδειξε ότι η τραγανότητα των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκε από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών, ενώ το αφρώδες των τροφίμων επηρεάσθηκε από όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές, εκτός της παροχής τροφοδοσίας ($p < 0{,}001$). Η σκληρότητα και η ενυδάτωση των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκαν από την υγρασία τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία και την παροχή ($p < 0{,}001$). Η συγκολητικότητα των δειγμάτων επηρεάσθηκε μόνο από την παροχή τροφοδοσίας ($p < 0{,}05$). Οι τιμές των χαρακτηριστικών υφής των τροφίμων εκβολής συνοψίζονται στο Παράρτημα στον Πίνακα 13-6.

Η τραγανότητα των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε από την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Γενικά, οι βαθμολογίες της τραγανότητας για τα περισσότερα δείγματα ήταν πάνω από 5. Τα δείγματα που έλαβαν την υψηλότερη βαθμολογία για την τραγανότητα ήταν αυτά χωρίς άλευρο φακής (C=0%) και αυτά που είχαν αναλογία υλικών 50%. Η σύσταση του μίγματος που τροφοδοτείται στον εκβολέα φαίνεται ότι δεν παρουσιάζει μια ξεκάθαρη μεταβολή στην τραγανότητα των τροφίμων. Παρόμοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν για την τραγανότητα προϊόντων εκβολής με προσθήκη φασολιών (Skierkowski et al., 1990).

Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε μείωση της τραγανότητας των δειγμάτων. Η μεταβολή αυτή είναι συνήθης σε αρκετά τρόφιμα σνακ, γιατί η έκταση της διόγκωσης που λαμβάνει χώρα στο υλικό σχετίζεται με την τραγανότητα, και κατά συνέπεια θα σχετίζεται με τη διαφορά πίεσης μεταξύ της μήτρας και της ατμόσφαιρας. Τα υλικά που θα έχουν μικρότερη υγρασία θα είναι πιο ιξώδη από αυτά που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά, και έτσι η διαφορά πίεσης θα είναι πιο χαμηλή στα υψηλότερης υγρασίας τρόφιμα οδηγώντας σε μικρότερο βαθμό διόγκωσης του προϊόντος (Chen et al., 1991).

Οι συνθήκες εκβολής επηρέασαν την τραγανότητα των προϊόντων εκβολής. Η τραγανότητα των δειγμάτων μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη δομή των παραγόμενων τροφίμων, τα οποία στις χαμηλότερες θερμοκρασίες εκβολής αναπτύσσουν παχύτερα τοιχώματα πόρων, με αποτέλεσμα κατά τη μάσηση ο ήχος που θα παράγεται να είναι πιο έντονος, αυξάνοντας κατ’ αυτόν τον τρόπο την τραγανότητά τους. Η παροχή τροφοδοσίας προκάλεσε αύξηση

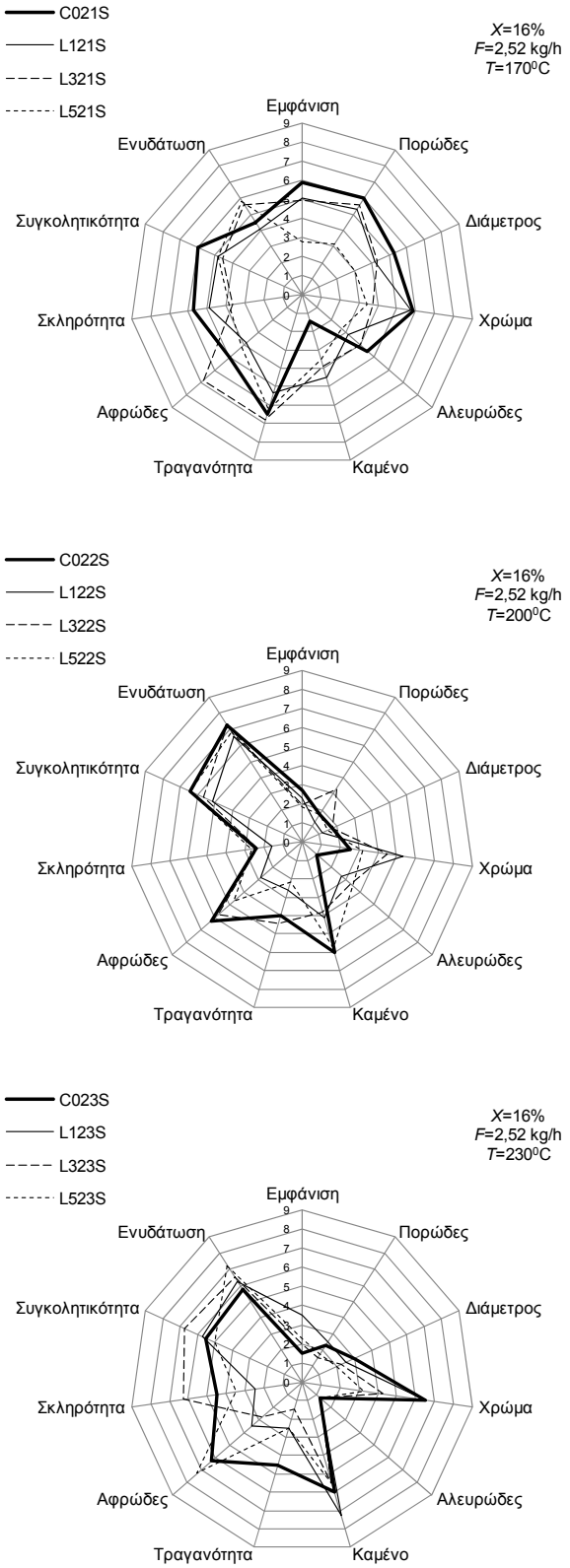
της τραγανότητας. Η μεταβολή αυτή είναι αναμενόμενη γιατί η παροχή βελτιώνει τη διόγκωση του εξωθούμενου ζυμαριού, και κατά συνέπεια το προϊόν θα είναι πιο τραγανό.

Το αφρώδες των προϊόντων εκβολής επηρεάσθηκε σημαντικά από την αναλογία των υλικών του μίγματος της τροφοδοσίας. Τα προϊόντα από αραβόσιτο είχαν υψηλότερο αφρώδες και ακολουθούν τα προϊόντα που περιέχουν 30% άλευρο φακής. Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας μείωσε το αφρώδες των τροφίμων εκβολής. Η μεταβολή αυτή μπορεί να αποδοθεί στην μείωση της διόγκωσης του υλικού και την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητάς του, όταν επεξεργάζεται σε υψηλότερα ποσοστά υγρασίας. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πυκνότερο προϊόν θα έχει παχύτερα τοιχώματα πόρων. Αυτό μπορεί να μειώνει το αφρώδες του.

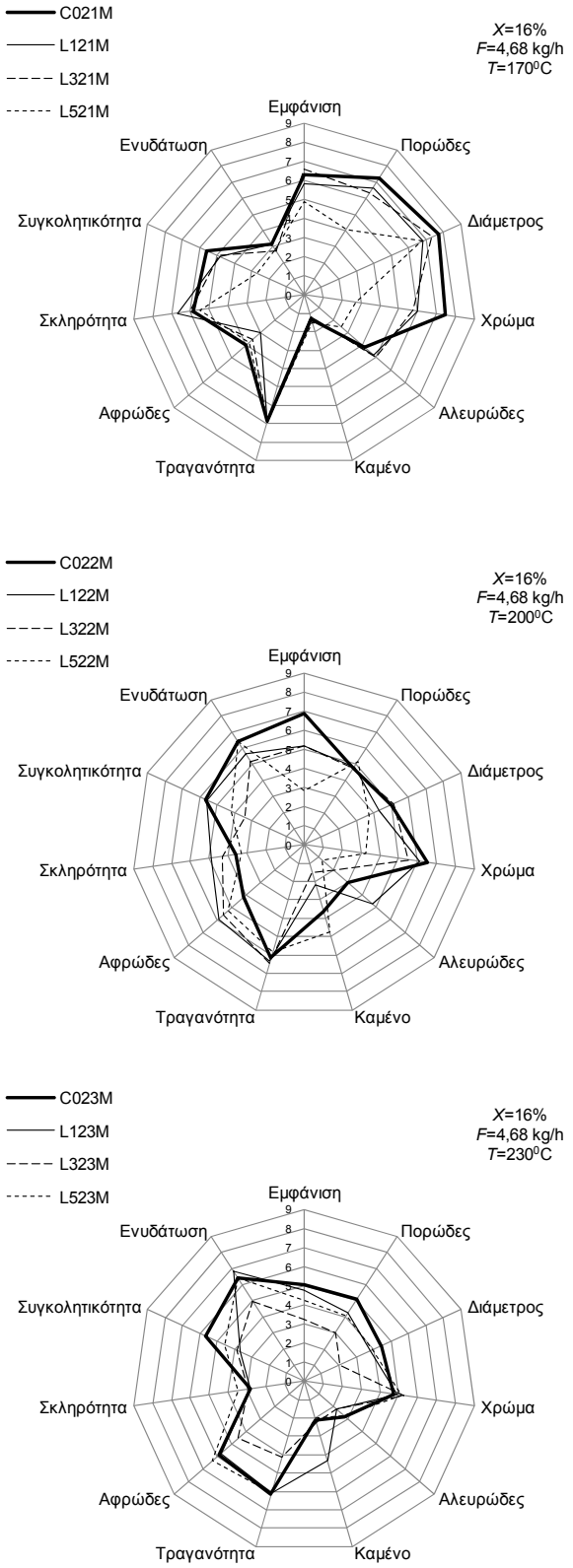
Η θερμοκρασία εκβολής προκάλεσε αύξηση του αφρώδους των τροφίμων εκβολής. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το βαθμό υπερθέρμανσης του νερού του τήγματος μέσα στον εκβολέα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει την ακτίνα των πόρων, η οποία στη συνέχεια προκαλεί αύξηση στην ακτίνα του πλέγματος και μείωση του πάχους των τοιχωμάτων των πόρων (Wang et al., 2005). Τα λεπτότερα τοιχώματα είναι υπεύθυνα για τη βελτίωση της αντίληψης του αφρώδους των προϊόντων εκβολής.

Η σκληρότητα των δειγμάτων αυξήθηκε με την υγρασία τροφοδοσίας. Η επίδραση αυτή έχει παρατηρηθεί για προϊόντα εκβολής από αραβόσιτο και σόγια (Chen et al., 1991; Li et al., 2005). Η αύξηση της υγρασίας, όπως έχει αποδειχθεί, αυξάνει τη φαινόμενη πυκνότητα των τροφίμων εκβολής. Το πιο πυκνό προϊόν θα εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση κατά τη θραύση. Η θερμοκρασία εκβολής είχε αντίστροφη επίδραση στην σκληρότητα των προϊόντων από ότι η υγρασία τροφοδοσίας, δηλαδή προκάλεσε μείωση της σκληρότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του πορώδους, δηλαδή βελτιώνει τη δημιουργία κυψελοειδούς δομής. Το γεγονός αυτό καθιστά το προϊόν πιο αφράτο με συνέπεια να είναι πιο μαλακό (Lazou, Krokida & Tzia, 2010c).

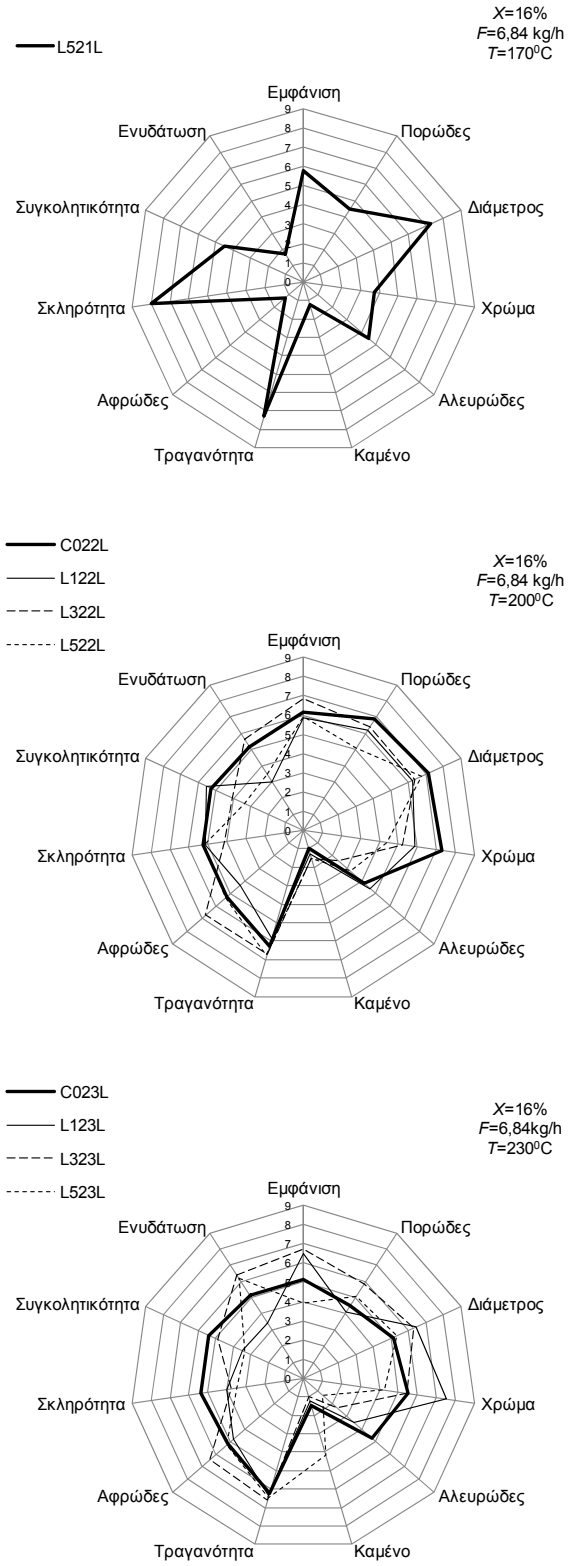
Η σκληρότητα των δειγμάτων αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Στις υψηλότερες τιμές παροχής μειώνεται ο βαθμός ψησίματος του προϊόντος, λόγω της μικρότερης υποβάθμισης που υφίστανται τα μακρομόρια του τήγματος στο χιτώνιο του εκβολέα. Η αύξηση της πυκνότητας των προϊόντων είναι υπεύθυνη για την αύξηση της σκληρότητάς τους (Lazou et al., 2010c).



Σχήμα 8.4-4 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=16% και *F*=2,52 kg/h.



Σχήμα 8.4-5 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=16% και *F*=4,68 kg/h.



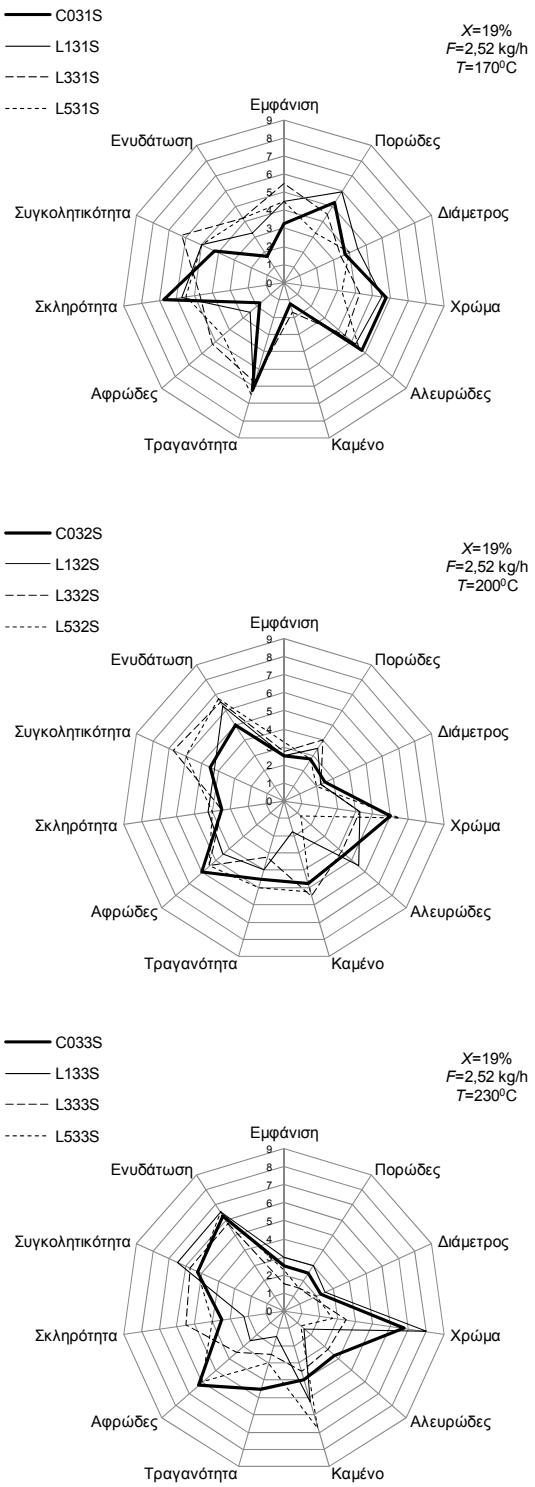
Σχήμα 8.4-6 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=16% και *F*=6,84 kg/h.

Η ενυδάτωση των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε από την υγρασία τροφοδοσίας και τις συνθήκες εκβολής ($p < 0,001$). Γενικά η ενυδάτωση όλων των προϊόντων μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας. Ο βαθμός διάλυσης των δειγμάτων στο στόμα μπορεί να συσχετισθεί με τη λειτουργικότητα των συστατικών τους. Έχει αποδειχθεί ότι τα υψηλά επίπεδα υγρασίας τροφοδοσίας μειώνουν τις τιμές της ικανότητας διαλυτότητας σε νερό των τροφίμων εκβολής από αραβόσιτο, φασόλια και μίγματα φακής/αραβοσιτάλευρου (Hernandez-Diaz et al., 2007; Lazou et al., 2010a). Επίσης, είναι γνωστό ότι η παροχή τροφοδοσίας επιδρά στον βαθμό ψησίματος, ενώ υψηλές τιμές της τελευταίας προκαλούν μείωση του βαθμού ψησίματος. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι καθοριστικές για τη μείωση της ενυδάτωσης των τροφίμων εκβολής με την παροχή τροφοδοσίας. Σε αντίθεση με την παροχή, η θερμοκρασία εκβολής βελτίωσε την αντίληψη της ενυδάτωσης των προϊόντων εκβολής, αφού είναι υπεύθυνη για την αύξηση του βαθμού ψησίματος των τροφίμων.

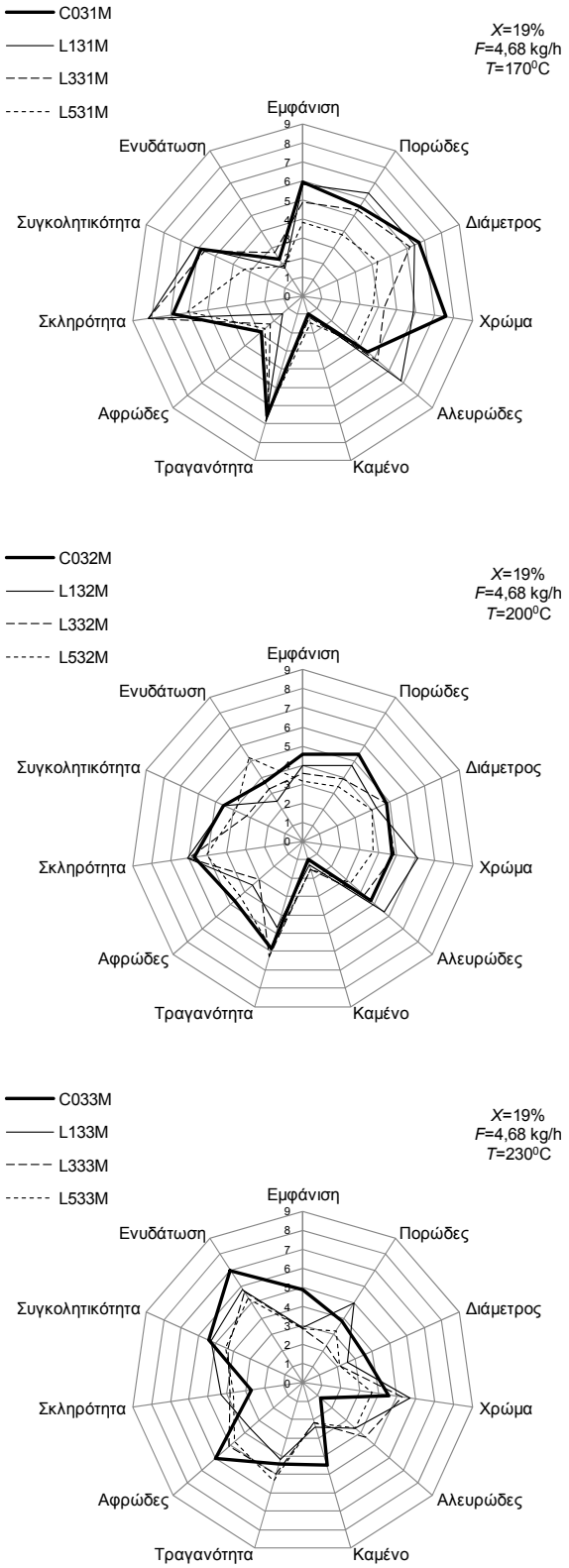
Η συγκολητικότητα των μελετηθέντων τροφίμων εκβολής βρέθηκε να μεταβάλλεται αρκετά στα διάφορα δείγματα. Η ανεξάρτητη μεταβλητή που κυρίως επηρέασε τη συγκολητικότητα των δειγμάτων ήταν η παροχή του υλικού τροφοδοσίας. Γενικά η παροχή επιδρά στις φυσικοχημικές αλλαγές που υφίστανται τα μακρομόρια του τροφίμου, μεταβάλλοντας την έκταση των αντιδράσεων ψησίματος. Οι μεταβολές αυτές είναι πολύπλοκες και ευθύνονται για την μεταβολή της συγολητικότητας των προϊόντων εκβολής που μελετήθηκαν.

8.4.4 Ολική αποδοχή των προϊόντων εκβολής

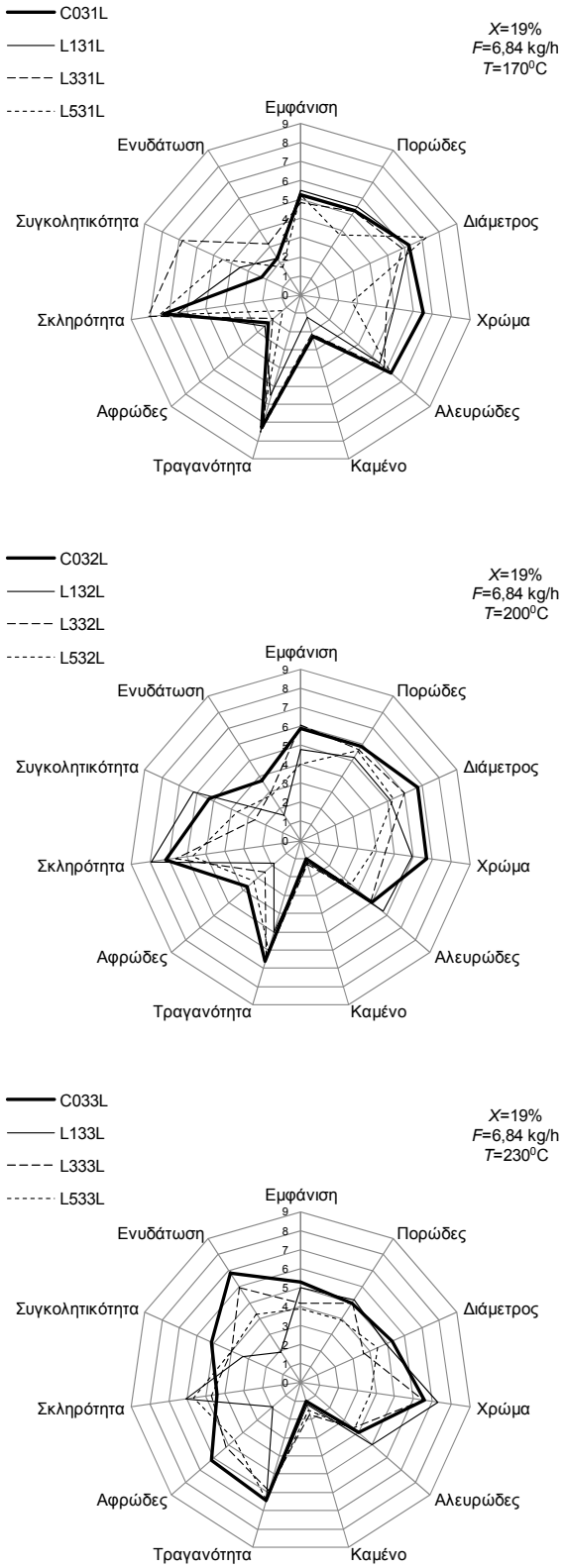
Οι μέσες τιμές της ολικής αποδοχής των προϊόντων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αλεύρου φακής και αραβοσιτάλευρου παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.4-10. Λίγα από τα δείγματα μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτά, έχοντας συνολική βαθμολογία μεγαλύτερη από 6. Η προσθήκη του αλεύρου φακής σε ποσοστό 50% μειώνει την ολική αποδοχή των τροφίμων εκβολής. Αυτή η δυσμενής επίδραση της προσθήκης του αλεύρου οσπρίων έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν γα προϊόντα εκβολής από φιστίκια και σόγια (Choi et al., 2007; Yeu et al., 2008). Στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες εκβολής σχεδόν τα περισσότερα προϊόντα είχαν βαθμολογίες κάτω από 5. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ανάπτυξη της καμένης γεύσης-οσμής και στην αύξηση της ικανότητας ενυδάτωσης των δειγμάτων. Από το Σχήμα 8.4-10 παρατηρείται ότι σε παροχή τροφοδοσίας 2,52 kg/h, τα δείγματα που είχαν υψηλή αποδοχή ήταν αυτά με αρχική υγρασία 13%, επεξεργασμένα στους 170°C, με ποσοστό φακή/αραβοσιτάλευρο μικρότερο του 50%. Σε παροχή τροφοδοσίας 4,68 kg/h τα πιο αποδεκτά δείγματα ήταν αυτά με αρχική υγρασία 13%, με ποσοστό φακή/.αραβοσιτάλευρο μικρότερο του 50% επεξεργασμένα στους 170 και 230°C. Σε παροχή τροφοδοσίας 6,84 kg/h τα πιο αποδεκτά δείγματα ήταν αυτά που περιείχαν 30% φακή/αραβοσιτάλευρο, με 13% και 16% αρχική υγρασία, επεξεργασμένα στους 230°C. Τα περισσότερα από αυτά τα δείγματα έχουν σχετικά ομοιογενή δομή (βαθμός>5), είναι τραγανά (βαθμός>7), αφράτα (βαθμός>6,5), σχετικά μαλακά (σκληρότητα<6) και παρουσιάζουν καλή ενυδάτωση. Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι είναι εφικτή η παραγωγή προϊόντων εκβολής με προσθήκη υψηλού ποσοστού αλεύρου φακής ολικής άλεσης επιλέγοντας τις κατάλληλες παραμέτρους της διεργασίας.



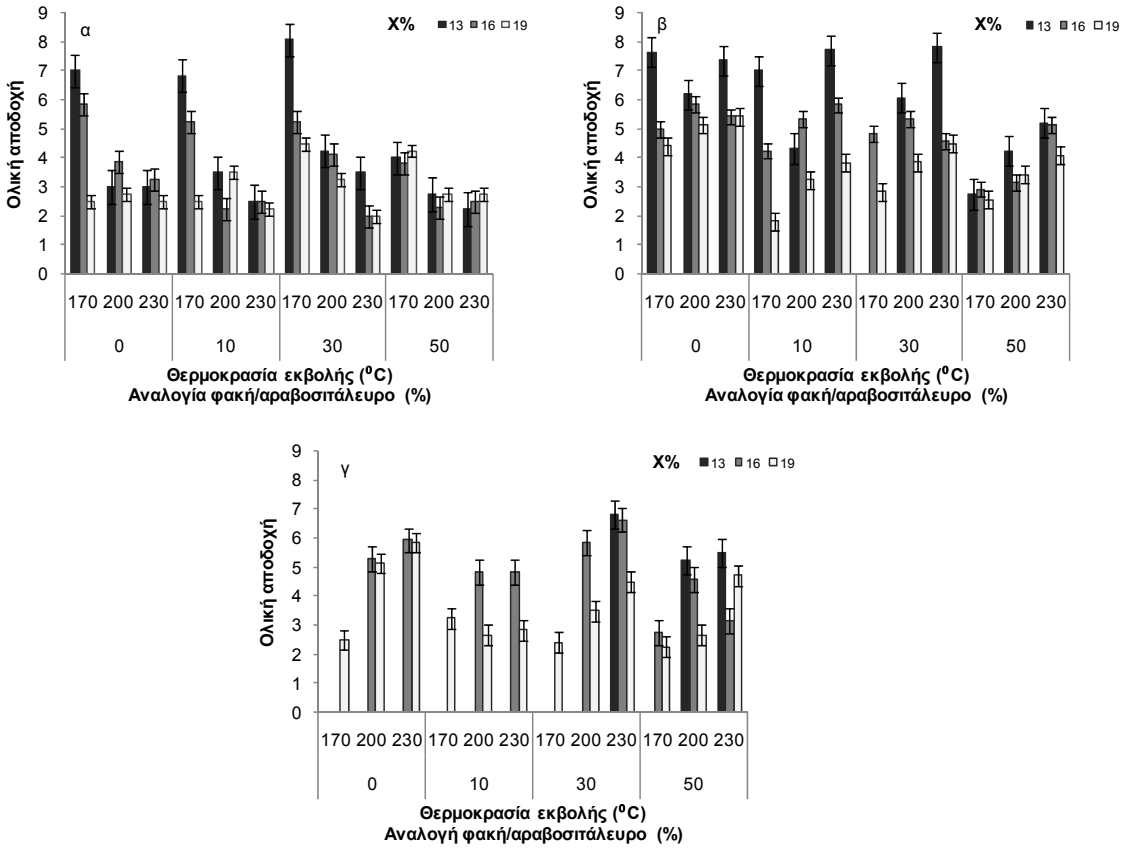
Σχήμα 8.4-7 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=19% και *F*=2,52 kg/h.



Σχήμα 8.4-8 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=19% και *F*=4,68 kg/h.



Σχήμα 8.4-9 Επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής και της αναλογίας υλικών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής για υγρασία τροφοδοσίας *X*=19% και *F*=6,84 kg/h

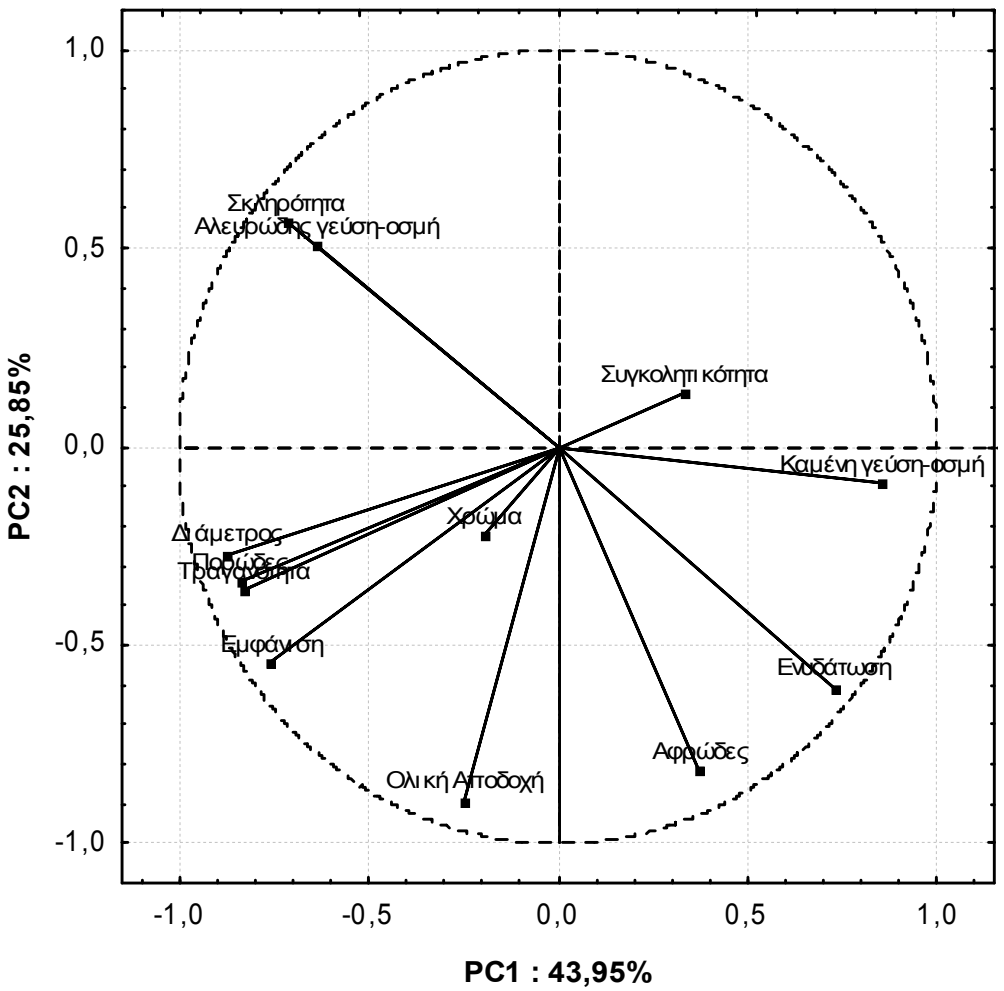


Σχήμα 8.4-10 Ολική αποδοχή των τροφίμων εκβολής ως συνάρτηση των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. α) F= 2,52kg/h, β) F=4,68 kg/h, γ) F=6,84 kg/h.

8.4.5 Συσχέτιση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών

Τα δεδομένα της οργανοληπτικής αξιολόγησης, τα οποία ελήφθησαν από την περιγραφική ανάλυση των προϊόντων εκβολής, και η συνολική βαθμολογία των δειγμάτων υποβλήθηκαν σε ανάλυση κυρίων συνιστωσών (ΑΚΣ), ώστε να διερευνηθούν οι μεταξύ τους συσχετίσεις. Σύμφωνα με το διάγραμμα των ιδιοτιμών, οι πρώτες τρεις κύριες συνιστώσες παραμένουν και περιγράφουν το 80,5% της ολικής μεταβλητότητας.

Το Σχήμα 8.4-11 παρουσιάζει το διάγραμμα της ΑΚΣ των 2 πρώτων κυρίων συνιστωσών, της *PC1* και *PC2*. Οι συνιστώσες αυτές περιγράφουν το 69,8% της ολικής διακύμανσης, με το 44% να εξηγείται από την πρώτη.



Σχήμα 8.4-11 Διάγραμμα ΑΚΣ των 2 πρώτων κυρίων συνιστωσών των οργανοληπτικών ιδιοτήτων και της ολικής αποδοχής των τροφίμων εκβολής.

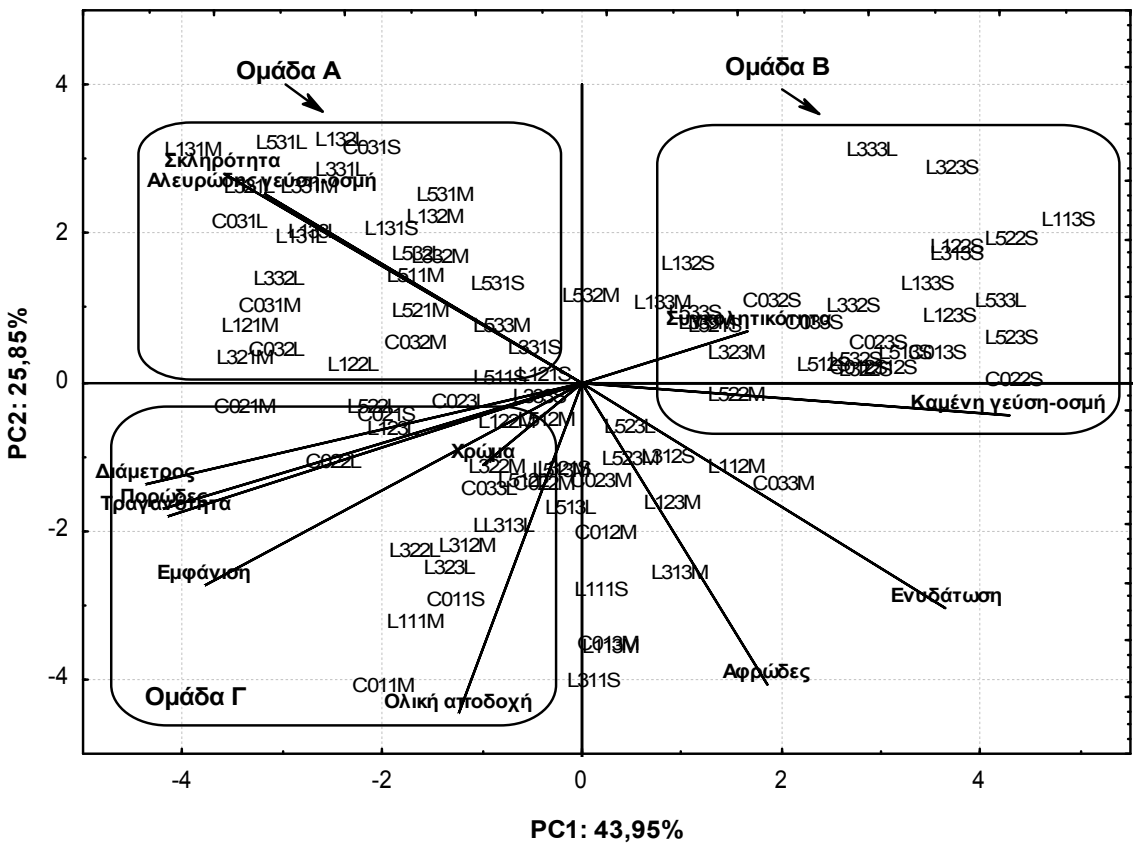
Από το Σχήμα 8.4-11 φαίνεται, ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών της εμφάνισης. Δηλαδή η ομοιογενής δομή συσχετίσθηκε με το οργανοληπτικό πορώδες και τη διάμετρο. Επίσης υποδεικνύεται ότι η τραγανότητα των προϊόντων εκβολής συσχετίζεται με την εμφάνιση, το πορώδες και τη διάμετρο. Επιπροσθέτως, όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά συσχετίσθηκαν με την ολική αποδοχή των προϊόντων. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι όσο υψηλότερο είναι το πορώδες, η τραγανότητα και η διάμετρος των παραγόμενων τροφίμων εκβολής, τόσο πιο αποδεκτά γίνονται από τους καταναλωτές. Όλα τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης και το χρώμα συσχετίσθηκαν αρνητικά με τη συγκολητικότητα των προϊόντων. Η αρνητική συσχέτιση που βρέθηκε μεταξύ της τραγανότητας και της συγκολητκότητας έχει βρεθεί και παλαιότερα για αφρώδη προϊόντα από πατάτα (Faller & Heymann, 1996).

Υπήρξε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ σκληρότητας των προϊόντων εκβολής και της αλευρώδους γεύσης-οσμής των δειγμάτων. Όσο πιο σκληρά γίνονται τα προϊόντα μετά την εκβολή, τόσο αυξάνεται η αλευρώδης γεύση. Τα πιο σκληρά δείγματα έχουν συνήθως μικρότερο βαθμό ψησίματος. Έτσι η αλευρώδης γεύση-οσμή αυτών των δειγμάτων θα αυξάνεται, σαν αποτέλεσμα της μείωσης του βαθμού ψησίματος. Η

σκληρότητα και το αλευρώδες των τροφίμων συσχετίσθηκαν αρνητικά με το αφρώδες, την ενυδάτωση και την καμένη γεύση-οσμή. Όσο το προϊόν γίνεται πιο μαλακό, το πάχος των τοιχωμάτων των πόρων του μειώνεται. Επίσης, πιο μαλακά είναι τα προϊόντα που έχουν υψηλότερο βαθμό ψησίματος, γεγονός που βελτιώνει την ενυδάτωση και τη διάλυσή τους. Επίσης η αύξηση στην ενυδάτωση μπορεί να αυξήσει την αντίληψη της καμένης-πικρής γεύσης-οσμής, γιατί κατά τη διάρκεια της μάσησης το δείγμα παραμένει για περισσότερο χρόνο στο στόμα. Τέλος, το οργανοληπτικό χρώμα των προϊόντων εκβολής συσχετίσθηκε με τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι όσο περισσότερο διογκωμένη είναι η δομή των τροφίμων τόσο πιο ανοιχτόχρωμα θα είναι αυτά. Η παρατήρηση αυτή έχει αναφερθεί στο παρελθόν για προϊόντα εκβολής από βρώμη (Liu et al., 2000).

Η ομαδοποίηση των δειγμάτων με βάση την ΑΚΣ παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.4-12. Επίσης, στο Σχήμα 8.4-12 συμπεριλαμβάνονται τα διανύσματα των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών που εξετάσθηκαν. Από την ομαδοποίηση των προϊόντων εκβολής προκύπτει ότι όλα τα δείγματα, που περιείχαν 19% υγρασία τροφοδοσίας και επεξεργάσθηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες (T<230°C), για όλες τις τιμές αναλογίας υλικών και παροχών, γίνονται σκληρά και έχουν αλευρώδη γεύση-οσμή (Δείγματα ομάδας Α στο Σχήμα 8.4-12). Επίσης, τα τρόφιμα αυτά είναι λιγότερο αφράτα και ενυδατώνονται πιο δύσκολα.

Μια άλλη ομάδα δειγμάτων που προκύπτει είναι τα δείγματα που έχουν επεξεργασθεί σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές τιμές παροχής τροφοδοσίας (Δείγματα ομάδας Β στο Σχήμα 8.4-12). Τα δείγματα αυτά έχουν αυξημένη τη γεύση-οσμή του καμένου-πικρού, υποδεικνύοντας ότι χαμηλές τιμές παροχών χειροτερεύουν τα χαρακτηριστικά διόγκωσης και της εμφάνισης και πολλά από τα δείγματα αυτά καίγονται κατά την επεξεργασία, γεγονός που καθιστά τα τρόφιμα μη αποδεκτά. Τα προϊόντα που περιέχουν αναλογίες υλικών από 0 έως 30%, χαμηλή υγρασία τροφοδοσίας και έχουν επεξεργασθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες έχουν ομαδοποιηθεί στην περιοχή της υψηλής ολικής αποδοχής (Δείγματα ομάδας Γ στο Σχήμα 8.4-12). Επιπρόσθετα αυτά τα δείγματα εμφανίζουν υψηλές τιμές για τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης. Δηλαδή έχουν ομοιογενή και καλά διογκωμένη δομή, καθώς επίσης είναι αρκετά τραγανά. Έτσι ο συνδυασμός των παραπάνω συνθηκών εκβολής και συστάσεων τροφοδοσίας παράγει αποδεκτά τρόφιμα εκβολής. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής. Κατά συνέπεια, μπορούν να παραχθούν προϊόντα με επιθυμητά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ελέγχοντας τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύσταση της τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της εκβολής.



Σχήμα 8.4-12 ΑΚΣ των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και της ολικής αποδοχής των προϊόντων εκβολής όπως επηρεάζονται από τις συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η κωδικοποίηση των δειγμάτων είναι αυτή που περιγράφεται στον Πίνακα 4-3.

8.5 Συμπεράσματα

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων εκβολής από αραβοσιτάλευρο και μίγματα αραβοσιτάλευρου και αλεύρου φακής, που παράγονται με εκβολέα διπλού κοχλία εξαρτώνται από τις παραμέτρους της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Η θερμοκρασία εκβολής μείωσε τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης (ομοιογενής δομή, πορώδες και διάμετρος), την αλευρώδη γεύση-οσμή, την τραγανότητα και τη σκληρότητά τους, ενώ η παροχή του υλικού τροφοδοσίας βελτίωσε τα χαρακτηριστικά εμφάνισης, αλλά αύξησε τη σκληρότητα των προϊόντων. Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας αύξησε την οργανοληπτική σκληρότητα των δειγμάτων και χειροτέρεψε τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης και την ενυδάτωσή τους. Η προσθήκη του αλεύρου φακής είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκουρόχρωμων προϊόντων, τα οποία δεν ήταν ιδιαιτέρως ελκυστικά στους δοκιμαστές.

Η ολική αποδοχή των προϊόντων εκβολής γενικά μειώθηκε με την προσθήκη του αλεύρου φακής σε ποσοστό 50%. Τα πιο αποδεκτά τρόφιμα εκβολής ήταν αυτά που περιείχαν 13% αρχική υγρασία, ποσοστό φακής μικρότερο από 50% και επεξεργάσθηκαν σε θερμοκρασία 170°C. Επιπροσθέτως τα τρόφιμα αυτά εμφανίζουν ομοιόμορφη και διογκωμένη δομή, είναι τραγανά, αφράτα, σχετικά μαλακά και έχουν καλή ενυδάτωση κατά τη μάσηση.

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής καθορίζονται από το συνδυασμό των συνθηκών εκβολής και της σύστασης των πρώτων υλών. Η συσχέτιση των δειγμάτων με βάση τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά έδειξε ότι η τραγανότητα συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης και την ολική αποδοχή των προϊόντων. Επιπροσθέτως, η σκληρότητά τους συσχετίζεται θετικά με την αλευρώδη γεύση-οσμή και αρνητικά με το αφρώδες, την ενυδάτωση και την καμένη γεύση-οσμή.

Τα προϊόντα που περιέχουν αναλογίες υλικών από 0 έως 30%, χαμηλή υγρασία τροφοδοσίας (X<19%) και έχουν επεξεργασθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (T<230°C) ομαδοποιήθηκαν στην περιοχή της υψηλής ολικής αποδοχής. Επιπρόσθετα αυτά τα δείγματα εμφανίζουν υψηλές τιμές για τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης. Δηλαδή έχουν ομοιογενή και καλά διογκωμένη δομή, καθώς επίσης είναι αρκετά τραγανά. Κατά συνέπεια είναι εφικτή η παραγωγή προϊόντων εκβολής με επιθυμητά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ελέγχοντας τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύσταση της τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της εκβολής.

9 Μεταπτώσεις φάσεων τροφίμων εκβολής

9.1 Αντικείμενο και στόχοι

Οι βασικές φυσικές διεργασίες (ανάμιξη, θέρμανση, μάλαξη, σχηματοποίηση και μορφοποίηση), οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά την εκβολή των τροφίμων και οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν κατά τη διεργασία, έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία και παραγωγή προϊόντων χαμηλής υγρασίας, τα οποία σπάνια βρίσκονται σε κάποιο στάδιο ισορροπίας φάσεων και είναι μερικώς ή πλήρως άμορφα. Έτσι για τη συντήρηση των τροφίμων εκβολής, η υαλώδης μετάπτωση είναι μεγάλης σπουδαιότητας, γιατί επηρεάζει τη δομή και κατ' επέκταση την υφή των προϊόντων, καθώς επίσης και το ρυθμό των αντιδράσεων που ελέγχονται από τη διάχυση των αντιδρώντων. Επίσης, κατά τη διάρκεια της εκβολής λόγω των φυσικοχημικών μεταβολών που συμβαίνουν κατά το ψήσιμο, λαμβάνει χώρα σχηματισμός διαφόρων συμπλόκων μεταξύ των πολυμερών του τροφίμου.

Η υαλώδης μετάπτωση επηρεάζεται από τη χημική σύσταση του τροφίμου, το μοριακό βάρος των συστατικών, την ευκαμψία των μακρομορίων και το περιεχόμενο νερό. Το νερό έχει τη μεγαλύτερη επίδραση από όλους τους παραπάνω παράγοντες, αφού ασκεί πλαστικοποιητική δράση. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) μειώνεται όσο αυξάνεται η υγρασία του προϊόντος, και μπορεί να λάβει τιμές πολύ χαμηλότερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος . Η συνηθέστερη τεχνική με την οποία προσδιορίζεται η υαλώδης μετάπτωση, αλλά και οι υπόλοιπες μεταπτώσεις φάσεων ενός τροφίμου, είναι η θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης (DSC).

Επειδή ακριβώς τα προϊόντα εκβολής που παρασκευάσθηκαν βρίσκονται σε κατάσταση μη ισορροπίας, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα και τη σταθερότητά τους κατά την αποθήκευση, μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης των πρώτων υλών στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων από μίγματα αλεύρου φακής και αραβοσιτάλευρου. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της ενεργότητας νερού στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων, καθώς και ο σχηματισμός συμπλόκων κατά τη διάρκεια της εκβολής και προσδιορίσθηκε η θερμοκρασία τήξης αυτών.

9.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) είναι μια σημαντική φυσική ιδιότητα των τροφίμων, η οποία εξηγεί τη φυσικοχημική συμπεριφορά τους. Γενικά, για τον προσδιορισμό της υαλώδους μετάπτωσης των βιοπολυμερών ενός τροφίμου χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, που στηρίζονται στο προσδιορισμό των μεταβολών σε κάποια ιδιότητα, που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της υαλώδους μετάπτωσης. Αυτές περιλαμβάνουν τις τεχνικές της θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης (DSC), τις τεχνικές μοριακής κινητικότητας (πχ. τεχνικές διηλεκτρικών και πυρηνικών μαγνητικών χαλαρώσεων), τις μηχανικές μεθόδους και τις δυναμικές μηχανικές μεθόδους (πχ. δυναμική μηχανική θερμική ανάλυση, DMTA). Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης είναι η DMTA, η

DSC και η NMR (Kalichevsky, Jaroszkiewicz, Ablett, Blanshard & Lillford, 1992; Le Meste, Champion, Roudaut, Blond & Simatos, 2002; Saravacos & Maroulis, 2001).

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των μεμονωμένων βιοπολυμερών ενός τροφίμου όπως της αμυλοπηκτίνης, της αμυλόζης, των μάλτο-ολιγοσακχαριτών, της γλουτένης, της γλουτενίνης έχουν μελετηθεί στο παρελθόν, καθώς επίσης και η επίδραση του νερού και άλλων μικρού μοριακού βάρους πλαστικοποιητών, όπως τα σάκχαρα, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Claude & Ubbink, 2006; Cocero & Kokini, 1991; De Graaf, Madeka, Cocero & Kokini, 1993; Kalichevsky et al., 1992). Παρ' όλα αυτά, η χρήση αυτών των δεδομένων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς πιο πολύπλοκών συστημάτων, όπως τα άλευρα, μπορεί να είναι παραπλανητική, γιατί δεν μπορεί να παραληφθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών (Sandoval, Nupez, Móller, Valle & Lourdin, 2009). Επιπρόσθετα οι θερμικές μεταπτώσεις των μεμονωμένων βιοπολυμερών μπορούν να επηρεασθούν από τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την απομόνωσή τους (Kaletunç et al., 2003). Έχουν μελετηθεί πιο πολύπλοκα προϊόντα (Chanvrier, Della Valle & Lourdin, 2006) και έχει βρεθεί διαφορετική συμπεριφορά στο πολύπλοκο σύστημα σε σχέση με αυτή των μεμονωμένων συστατικών. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης πολύπλοκων προϊόντων έχει βρεθεί ότι είναι μεταξύ αυτών των κυρίων συστατικών ή πάνω από αυτά. Γενικά, μπορεί να παρατηρηθεί μια κύρια χαλάρωση στο μίγμα των βιοπολυμερών. Αυτή η πλατιά κύρια χαλάρωση μπορεί να είναι αποτέλεσμα των αλληλεπικαλυπτόμενων πολλαπλών ανεξαρτήτων υαλωδών μεταπτώσεων που συμβαίνουν μέσα σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος (Kaletunç et al., 2003). Για τους παραπάνω λόγους καθίσταται αναγκαία η περεταίρω μελέτη της υαλώδους μετάπτωσης πολύπλοκων τροφίμων.

Τα διογκωμένα σνακ που προκύπτουν με εκβολή έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα και αφράτη και τραγανή υφή. Οι συνθήκες εκβολής και η σύσταση του υλικού τροφοδοσίας επηρεάζουν τη δομή και την υφή τους. Τα δομικά τους χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά της υφής δημιουργούνται κατά το χρόνο που συμβαίνουν τα φαινόμενα διόγκωσης, τα οποία τελειώνουν όταν το τρόφιμο περνά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Κατά συνέπεια το παραγόμενο τρόφιμο βρίσκεται στην υαλώδη φάση (Della Valle et al., 1997). Για τον λόγο αυτό η υαλώδης μετάπτωση στην επεξεργασία τροφίμων με εκβολή είναι πολύ σημαντική και απαιτείται η διερεύνηση της συμπεριφοράς των προς εκβολή πολύπλοκων μιγμάτων. Η γνώση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της διεργασίας και των τελικών ιδιοτήτων των τροφίμων.

Σκοπός του παρόντος μέρους της διατριβής ήταν να προσδιορισθεί η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης του υλικού τροφοδοσίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και στη θερμοκρασία τήξης των συμπλόκων προϊόντων εκβολής μιγμάτων αλεύρου φακής και αραβοσιτάλευρου. Επιπρόσθετα μελετήθηκαν τα φαινόμενα προσρόφησης νερού των τροφίμων εκβολής και η πλαστικοποιητική επίδραση του νερού στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

9.3 Πειραματική διαδικασία

9.3.1 Παραγωγή διογκωμένων τροφίμων

Η προετοιμασία και παραγωγή των τροφίμων εκβολής πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

9.3.2 Προσδιορισμός ισόθερμου ροφήσεως νερού

Τα χαρακτηριστικά προσρόφησης νερού των τροφίμων εκβολής προσδιορίσθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C) με τη σταθμική μέθοδο (Maroulis, Tsami, Marinos-Kouris & Saravacos, 1988). Τα προϊόντα εκβολής αλέσθηκαν σε περιστροφικό μύλο ώστε να αποκτήσουν μέγεθος <630μm. Στη συνέχεια αφυδατώθηκαν σε ξηραντήρα με πεντοξείδιο του φωσφόρου για τρεις εβδομάδες. Τα αφυδατωμένα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρες που περιείχαν κορεσμένα διαλύματα αλάτων (LiCl, $MgCl_2$, $Mg(NO_3)_2$, NaCl, και KNO_3). Η σχετική υγρασία (α_w) των προαναφερθέντων κορεσμένων διαλυμάτων αλάτων ήταν 0,11, 0,33, 0,53, 0,75 και 0,94, αντίστοιχα (Greenspan, 1977). Τα δείγματα αφέθηκαν για προσρόφηση υγρασίας μέχρι σταθερού βάρους (περίπου 3 εβδομάδες). Η υγρασία ισορροπίας προσδιορίσθηκε εις διπλούν σε φούρνο κενού στους 75°C. Ο πειραματισμός περιελάμβανε τέσσερις επαναλήψεις.

9.3.3 Θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης

Οι θερμιδομετρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα αλεσμένα δείγματα χρησιμοποιώντας θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης (DSC 6, Perkin Elmer Inc, Waltham, Massachusetts 02451, USA) και το λογισμικό Pyris για Windows (Σχήμα 9.3-1). Για τη δημιουργία αδρανούς ατμόσφαιρας χρησιμοποιήθηκε αέριο άζωτο με ρυθμό ροής 30 mL/min. Μετά την εξισορρόπηση των δειγμάτων σε σταθερές τιμές α_w, περίπου 15 mg κάθε δείγματος σφραγίσθηκαν ερμητικά σε καψύλλια αλουμινίου (50 μL, Perkin–Elmer), με την βοήθεια της κατάλληλης πρέσας (Σχήμα 9.3-1), και τοποθετήθηκαν στο DSC. Τα δείγματα ψύχθηκαν από τη θερμοκρασία δωματίου έως τους -40°C, θερμάνθηκαν από τους -40°C σε θερμοκρασία αρκετά πάνω από αυτή της T_g (η ακριβής θερμοκρασία εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος), στη συνέχεια ψύχθηκαν πάλι στους -40°C, κρατήθηκαν σε αυτήν τη θερμοκρασία για 10 min και τελικά θερμάνθηκαν από τους -40°C σε θερμοκρασία πάνω από την T_g. Η ψύξη και η θέρμανση των δειγμάτων έγινε με ρυθμό 5°C/min. Από το θερμογράφημα προσδιορίστηκε η έναρξη (onset), το μέσο (midpoint) και το καταληκτικό σημείο (endpoint) της βηματικής μεταβολής της ειδικής θερμότητας από την τελική θέρμανση του δείγματος, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Pyris. Για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών τήξης των συμπλόκων των προϊόντων εκβολής σε τιμή α_w 0,33, τα δείγματα σαρώθηκαν από τους 20°C έως τους 150°C, με ρυθμό 5°C/min. Όλα τα αποτελέσματα είναι ο μέσος όρος τριών επαναλήψεων.

Σχήμα 9.3-1 Συσκευή θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης και πρέσα συμπίεσης δείγματος.

9.3.4 Ειδική μηχανική ενέργεια

Η ειδική μηχανική ενέργεια (Specific Mechanical Energy-SME) κατά τη διάρκεια της εκβολής υπολογίσθηκε από την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών (λειτουργική και μέγιστη, rpm), τη ροπή του κινητήρα, T_r (Nm), και το ρυθμό ροής μάζας (F, kg/h), χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$SME = \frac{N}{N_{rated}} \cdot \frac{T}{100} \cdot \frac{K_w}{F} \qquad \textbf{9-1}$$

όπου N η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών (rpm), N_{rated} η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής κοχλιών (rpm), T_r η ροπή του κινητήρα κατά τη διάρκεια της εκβολής, K_w η ισχύς του κινητήρα και F ο ρυθμός ροής μάζας (kg/h).

9.3.5 Πειραματικός Σχεδιασμός

Ο πειραματικός σχεδιασμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν πειραματικός σχεδιασμός κεντρικού σημείου με τρία επίπεδα, που είχε ως αποτέλεσμα 9 ανεξάρτητα πειράματα, με δύο επαναλήψεις. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η αναλογία των υλικών (10%, 30% και 50% φακή/αραβοσιτάλευρο), η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας (13, 16, and 19% σε υγρή βάση), η θερμοκρασία εκβολής (170, 200 και 230°C) και η παροχή του υλικού τροφοδοσίας (2,52, 4,86, και 6,84 kg/h). Στον Πίνακα 9-1 παρουσιάζεται ο πειραματικός σχεδιασμός.

Πίνακας 9-1 Πειραματικός σχεδιασμός (κεντρικού σημείου)

Ανεξάρτητες μεταβλητές	Επίπεδα		
	-1	0	1
X, υγρασία τροφοδοσίας (%wb)	13	16	19
C, φακή/αραβοσιτάλευρο (%)	10	30	50
T, Θερμοκρασία εκβολής (°C)	170	200	230
F, Παροχή τροφοδοσίας (kg/h)	2,52	4,68	6,84

9.3.6 Προσαρμογή δεδομένων και στατιστική ανάλυση

Για την περιγραφή των φαινομένων προσρόφησης υγρασίας των τροφίμων εκβολής χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο Guggenheim – Anderson - de Boer (GAB):

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w)(1 - k \cdot a_w + C \cdot k \cdot a_w)} \qquad \textbf{9-2}$$

όπου X η προβλεπόμενη περιεχόμενη υγρασία, a_w η ενεργότητα ύδατος, X_m η περιεκτικότητα υγρασίας μονομοριακής στιβάδας και C, K σταθερές.

Για τη εξέταση της εξάρτησης της T_g από την περιεχόμενη υγρασία του τροφίμου χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Gordon-Taylor.

$$T_g = \frac{w_1 \cdot T_{g1} + k \cdot w_2 \cdot T_{g2}}{w_1 + k \cdot w_2} \qquad \textbf{9-3}$$

όπου T_{g1} και T_{g2} είναι οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης του ξηρού τροφίμου και του νερού (T_{g2} = 134K), w_1 και w_2 είναι τα αντίστοιχα κλάσματα μάζας του ξηρού τροφίμου και του νερού. Ο παράγοντας k είναι μια εμπειρική σταθερά ανάλογη της πλαστικοποιητικής δράσης του νερού.

Όλες οι προσαρμογές πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc. Tulsa, OK, USA).

9.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

9.4.1 Ειδική μηχανική ενέργεια

Οι τιμές της ειδικής μηχανικής ενέργειας (SME) παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-2. Η SME μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και την υγρασία τροφοδοσίας. Η μείωση που προκαλεί η παροχή του υλικού τροφοδοσίας ήταν αναμενόμενη, όπως φαίνεται από την Εξίσωση 9-1.

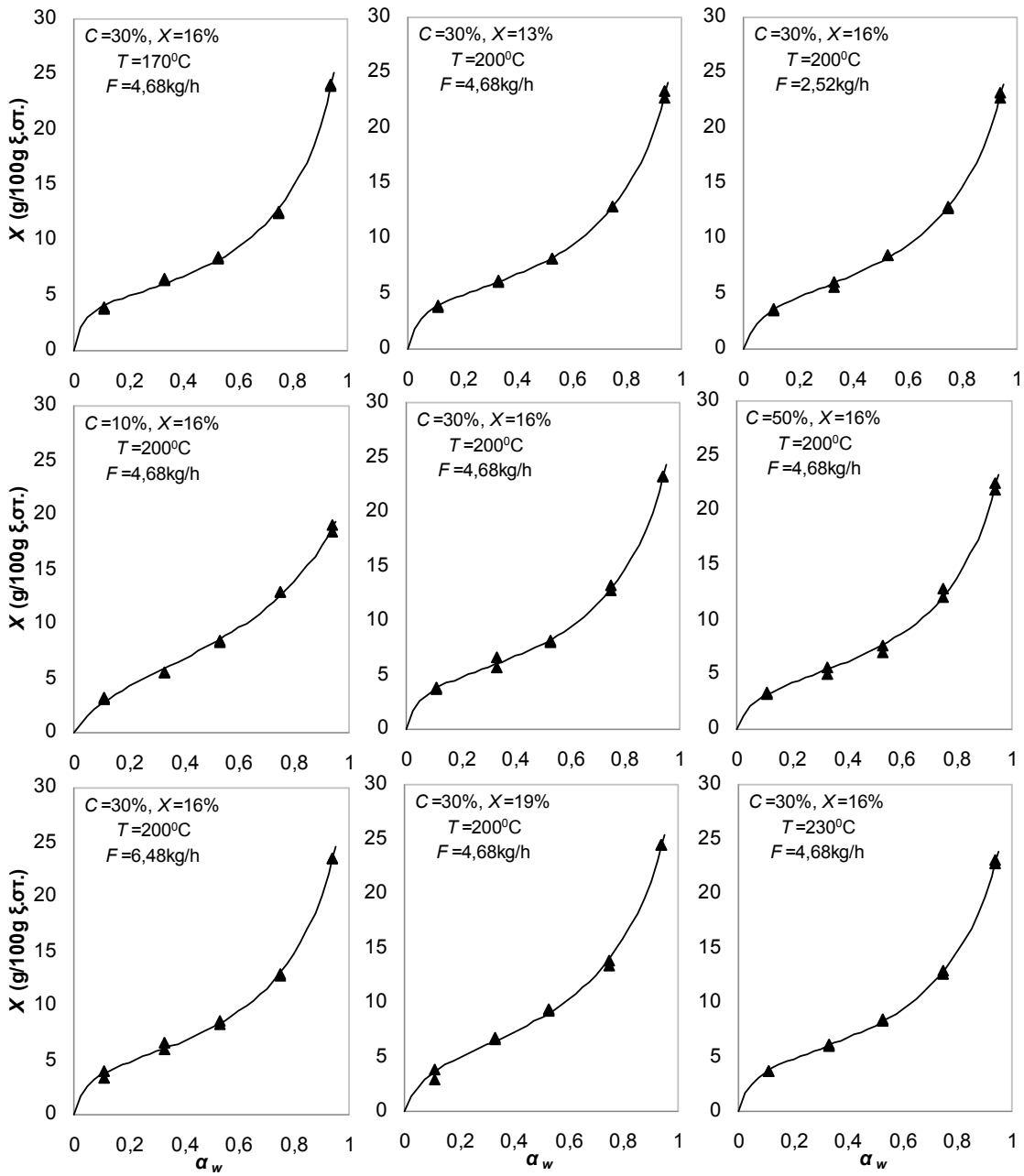
Η SME είναι το ποσοστό του εισερχόμενου έργου από τον κινητήρα στην πρώτη ύλη που υφίσταται εκβολή, χαρακτηρίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την διεργασία (Godavarti & Karwe, 1997). Η SME είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, το συντελεστή διόγκωσης, την πυκνότητα, τη σκληρότητα κλπ. Οι τιμές της αποτελούν ένδειξη της έκτασης της μοριακής υποβάθμισης που υφίσταται το υλικό κατά την επεξεργασία. Παρατηρήθηκε μείωση της SME με την αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας. Η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του υλικού αρχικά προκαλεί μείωση του ιξώδους του ζυμαριού μέσα στον εκβολέα (Chang et al., 1999), μειώνοντας έτσι το μέσο χρόνο παραμονής του υλικού στο χιτώνιο του εκβολέα (Lazou et al., 2007) και το βαθμό μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του εκβολέα σε θερμική, και τελικά μειώνοντας την SME. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά από προηγούμενες μελέτες (Anuonye, Badifu, Inyang, Akpapunam & Mazza, 2007; Chen, Wei, Zhang & Ojokoh, 2010). Η θερμοκρασία εκβολής προκάλεσε επίσης μείωση της

SME. Η θερμοκρασία εκβολής είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τη ρεολογική συμπεριφορά του τήγματος που υφίσταται εκβολή. Οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν μείωση του ιξώδους (Chang et al., 1999). Το μειωμένο ιξώδες απαιτεί μικρότερη κατανάλωση μηχανικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της εκβολής.

Πίνακας 9-2 Ειδική μηχανική ενέργεια κατά τη διάρκεια της εκβολής.

Συνθήκες εκβολής και σύσταση τροφοδοσίας				**SME (kJ/kg)**
C (%)	*X* (% wb)	*T* (°C)	*F* (kg/h)	
10	16	200	4,68	427±3
30	13	200	4,68	498±6
30	19	200	4,68	378±3
30	16	170	4,68	582±3
30	16	200	4,68	465±3
30	16	230	4,68	373±3
30	16	200	2,52	575±6
30	16	200	6,84	467±3
50	16	200	4,68	426±6

Η αναλογία των αλεύρων επηρέασε την SME. Οι τιμές της SME για τα προϊόντα με αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο 10% και 50% ήταν παρόμοιες, ενώ για αναλογία 30% η SME αυξήθηκε. Η προσθήκη του αλεύρου φακής στο μίγμα αλλάζει τη χημική σύσταση του υλικού, αφού αυξάνει το ποσοστό των πρωτεϊνών και των διαιτητικών ινών. Κατά συνέπεια θα επηρεάζεται η μακρομοριακή δομή του προϊόντος. Οι μεταβολές της μακρομοριακής δομής επηρεάζουν τις μεταβολές του ιξώδους του τήγματος. Η αλληλεπίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και της συγκέντρωσης των υλικών είναι πιθανό να επηρεάζουν την κατανάλωση SME κατά τη διάρκεια της εκβολής.



Σχήμα 9.4-1 Ισόθερμοι ροφήσεως (25°C) των τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο (Πρότυπο GAB).

9.4.2 Ισόθερμοι Ροφήσεως Νερού

Τα πειραματικά δεδομένα των ισόθερμων προσρόφησης νερού των τροφίμων εκβολής από φακή και αραβοσιτάλευρο παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.4-1. Στον Πίνακα 13-8 του παραρτήματος συνοψίζονται αναλυτικά οι τιμές των δεδομένων προσρόφησης νερού των τροφίμων εκβολής. Γενικά οι τιμές της υγρασίας των τροφίμων εκβολής κυμάνθηκε από 3,5 g/100g ξ.στ. έως 24,5 g/100g ξ.στ.. Οι ισόθερμες προσρόφησης νερού των τροφίμων εκβολής εμφάνισαν τη χαρακτηριστική σιγμοειδή καμπύλη, τυπική για πολλά τρόφιμα. Τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόσθηκαν στο πρότυπο GAB. Οι καμπύλες στο σχήμα αναπαριστούν την από το πρότυπο προβλεπόμενη ισόθερμο ροφήσεως κάθε δείγματος.

Οι τιμές των παραμέτρων του προτύπου GAB συνοψίζονται στον Πίνακα 9-3. Οι τιμές του R^2 επιβεβαιώνουν ότι οι ισόθερμοι ροφήσεως περιγράφονται ικανοποιητικά από το πρότυπο GAB. Οι παράμετροι του προτύπου GAB έχουν φυσική σημασία. Η παράμετρος *C* ορίζεται ως ο λόγος της χαρακτηριστικής συνάρτησης του πρώτου μορίου που προσροφάται σε μία θέση και της χαρακτηριστικής συνάρτησης των μορίων που προσροφώνται πέρα από το πρώτο μόριο στην πολυστιβάδα. Η παράμετρος *C* αποτελεί μέτρο της δύναμης που συνδέεται το νερό στις αρχικές θέσεις σύνδεσης. Όσο μεγαλύτερο είναι το *C*, τόσο ισχυρότερα είναι το νερό συνδεδεμένο στη μονομοριακή στιβάδα και τόσο μεγαλύτερη η διαφορά στην ενθαλπία μεταξύ των μορίων της μονομοριακής στιβάδας και αυτών της πολυστιβάδας. Η παράμετρος *K* ορίζεται ως ο λόγος της χαρακτηριστικής συνάρτησης των μορίων του κύριου όγκου του νερού και της χαρακτηριστικής συνάρτησης των μορίων που είναι προσροφημένα στην πολυστιβάδα. Το *K* ονομάζεται παράγοντας διόρθωσης, αφού διορθώνει τις ιδιότητες των μορίων της πολυστιβάδας σε σχέση με αυτές του κύριου όγκου του νερού. Όταν το *K* προσεγγίζει την τιμή 1, σχεδόν δεν υπάρχει καμία διάκριση μεταξύ των μορίων της πολυστιβάδας και των μορίων του νερού. Σε αυτήν την περίπτωση τα μόρια νερού πάνω από τη μονομοριακή στιβάδα είναι δομημένα στην πολυστιβάδα, αλλά έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα μόρια του κύριου όγκου του νερού. Όσο περισσότερο δομημένα είναι τα προσροφημένα μόρια στην πολυστιβάδα, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του *K* (Quirijns, van Boxtel, van Loon & van Straten, 2005).

Η τιμή του *C* των τροφίμων εκβολής με αναλογία 10% φακή/αραβοσιτάλευρο ήταν πολύ χαμηλές. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το νερό στη μονοστιβάδα του προϊόντος είναι λιγότερο δεσμευμένο και υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην ενθαλπία μεταξύ των μορίων της μονοστιβάδας και της πολυστιβάδας. Τα δείγματα που περιείχαν αναλογία 10% φακή/αραβοσιτάλευρο παρουσίασαν και τις χαμηλότερες τιμές για την παράμετρο *K*. Γενικά, από τις τιμές των παραμέτρων του προτύπου GAB για τα τρόφιμα εκβολής, είναι φανερό ότι η μονοστιβάδα έχει διαφορετικές ιδιότητες από ότι η πολυστιβάδα και ότι η πολυστιβάδα συμπεριφέρεται παρόμοια με τον κύριο όγκο νερού ($C >> 1$ και $K \approx 1$) (Quirijns et al., 2005).

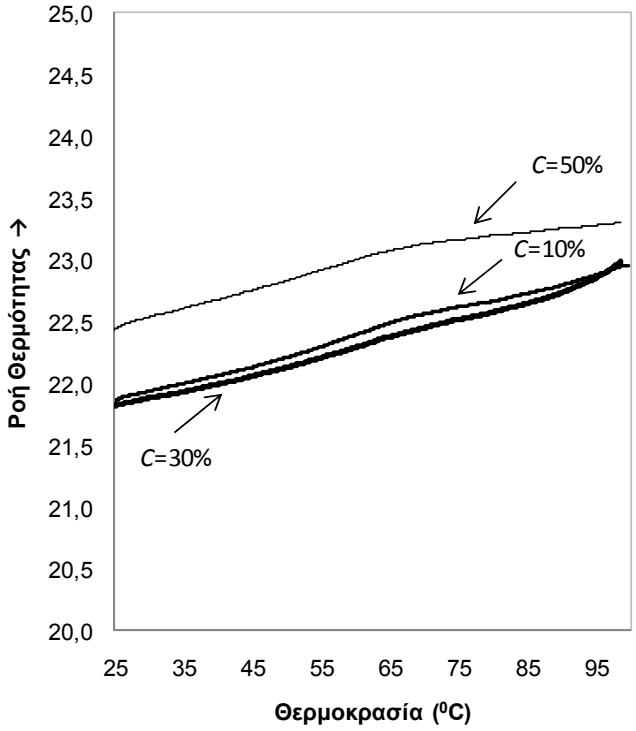
Πίνακας 9-3 Αποτελέσματα παλινδρόμησης του προτύπου GAB για τα τρόφιμα εκβολής.

Συνθήκες εκβολής και σύσταση τροφοδοσίας				Παράμετροι GAB[1]			
C (%)	*X* (% wb)	*T* (°C)	*F* (kg/h)	*C*	*K*	X_m	R^2
10	16	200	4,68	8,07±1,56	0,73±0,02	6,30±0,39	0,998
30	13	200	4,68	26,87±3,94	0,85±0,00	4,80±0,08	0,999
30	19	200	4,68	36,68±9,86	0,86±0,01	4,64±0,13	0,999
30	16	170	4,68	18,66±2,95	0,84±0,01	4,93±0,11	0,999
30	16	200	4,68	23,15±5,31	0,85±0,01	4,82±0,13	0,999
30	16	230	4,68	23,24±4,73	0,85±0,01	4,87±0,12	0,999
30	16	200	2,52	22,51±1,91	0,84±0,00	4,87±0,05	0,999
30	16	200	6,84	14,39±3,35	0,83±0,01	5,55±0,22	0,999
50	16	200	4,68	17,59±5,24	0,85±0,01	4,52±0,19	0,998

[1]σε όλες τις περιπτώσεις $p<0,001$

9.4.3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εκβολής υπολογίσθηκε από το μέσο σημείο της βηματικής μεταβολής τη ειδικής θερμότητας της δεύτερης σάρωσης που προέκυψε από το θερμογράφημα της δοκιμής DSC. Τα θερμογραφήματα των τροφίμων εκβολής παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.4-2. Οι τιμές της έναρξης (onset), του μέσου σημείου (midpoint), του καταληκτικού σημείου (endpoint) και του ΔC_p της υαλώδους μετάπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 13-9 στο Παράρτημα.



Σχήμα 9.4-2 Θερμογράφημα DSC που υποδεικνύει την υαλώδη μετάπτωση των τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο (*X*=16%, *T*=200°C, *F*=4,68kg/h, a_w=0,75).

Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας φαίνεται ότι επηρέασε τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Σχήμα 9.4-3). Η T_g παρουσίασε μια ελάχιστη τιμή στα ενδιάμεσα επίπεδα παροχής, για ενεργότητα νερού έως 0,53, ενώ για τις υψηλότερες τιμές ενεργότητας μειώθηκε. Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας επηρεάζει την ένταση της μηχανικής κατεργασίας κατά τη διάρκεια της εκβολής, αφού μειώνει τις τιμές της SME. Κατά συνέπεια οι χαμηλότερες τιμές της SME προκαλούν τη μείωση της έκτασης της μοριακής υποβάθμισης που υφίσταται το υλικό κατά τη διάρκεια της εκβολής. Η κινητικότητα των μορίων είναι περιορισμένη καθώς η δομή του προϊόντος καθίσταται πιο συμπαγής και έτσι η T_g αυξάνεται. Γι' αυτό το λόγο είναι πιθανή η παρουσία του ελάχιστου για την T_g, στις ενδιάμεσες τιμές ενεργότητας νερού. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί στο παρελθόν για διάφορα προϊόντα με βάση το άμυλο (Bindzus, Livings, Gloria-Hernandez, Fayard, van Lengerich & Meuser, 2002; Kaletunc et al., 1993).

Η τιμές της T_g αυξήθηκαν με τη θερμοκρασία εκβολής (Σχήμα 9.4-3). Η μοριακή υποβάθμιση που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της εκβολής δεν είναι μόνο μηχανική, αλλά και θερμική. Επιπρόσθετα η εκβολή είναι μια διεργασία υψηλής θερμοκρασίας-βραχέως χρόνου (HTST). Η αυξημένη υποβάθμιση λόγω της υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να ευθύνεται για την αύξηση της T_g. Αυτά τα προϊόντα εκβολής, σε κάθε τιμή ενεργότητας νερού, θα είναι ασταθή, καθώς η πιθανότητα των μοριακών κινήσεων ευνοείται από την παρουσία κλασμάτων μικρού μοριακού βάρους (Lazou & Krokida, 2011). Το μαλάκωμα της δομής, που προκύπτει λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας εκβολής, έχει παρατηρηθεί για διάφορα αμυλούχα τρόφιμα (Barrett, 2003; Lazou et al., 2010b).

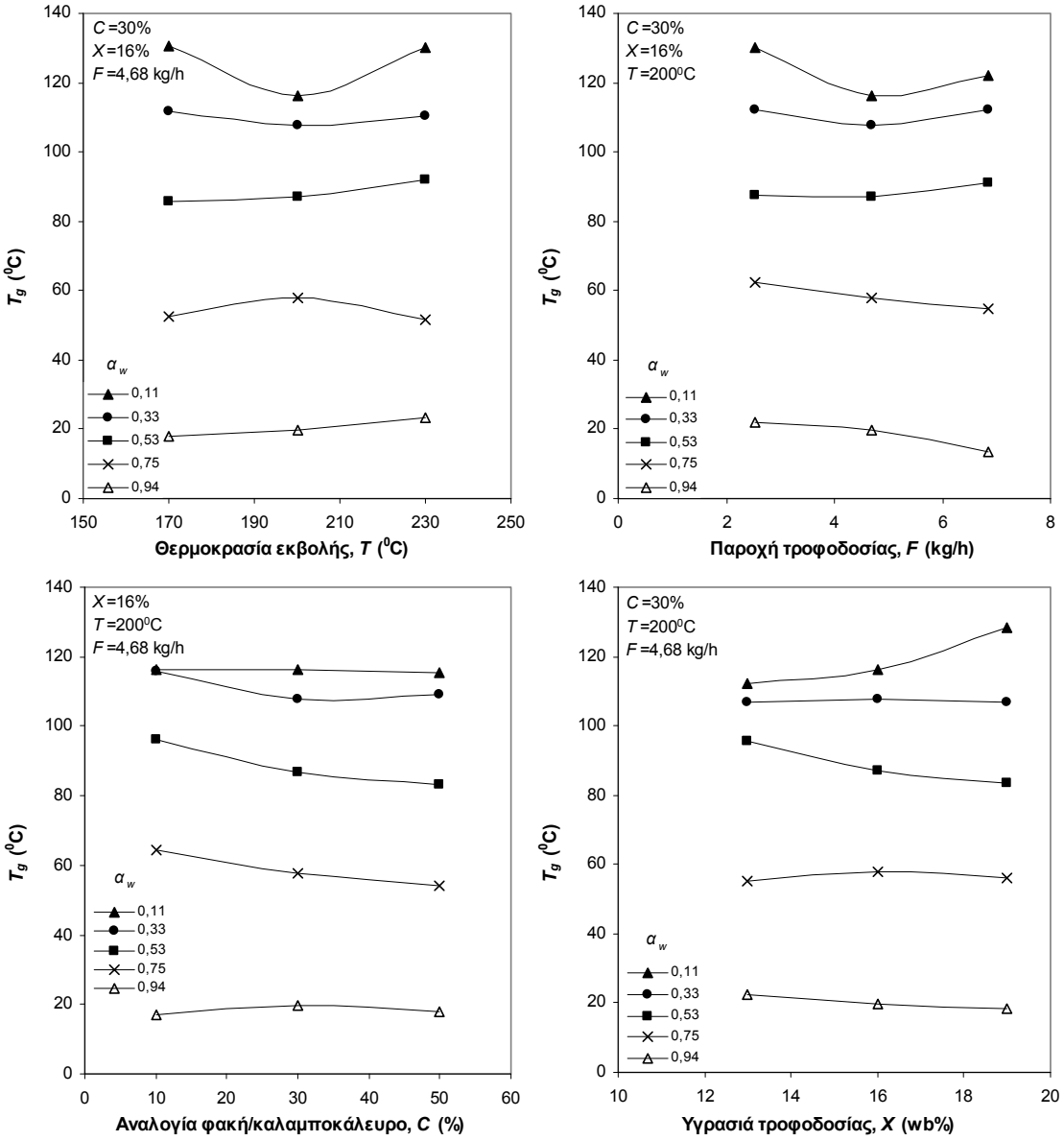
Η αύξηση της αναλογίας των υλικών προκάλεσε μεταβολή της T_g των τροφίμων εκβολής (Σχήμα 9.4-3). Η προσθήκη φακής στο μίγμα που υφίσταται εκβολή μείωσε τις τιμές της T_g. Η προσθήκη αλεύρου φακής αυξάνει το περιεχόμενο των πρωτεϊνών και διαιτητικών ινών του τροφίμου. Οι πρωτεΐνες και οι διαιτητικές ίνες ενισχύουν το πλέγμα του τροφίμου που υφίσταται εκβολή και δημιουργούνται έτσι πιο σκληρές δομές και υφές (Anton et al., 2009; Lazou et al., 2010b). Οι μεταβολές στη μικροδομή λόγω των αλλαγών στη σύνθεση του τροφίμου επηρεάζουν τις μοριακές κινήσεις και κατά συνέπεια τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εκβολής.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εκβολής συναρτήσει των συνθηκών επεξεργασίας, της σύστασης των υλικών και της ενεργότητας νερού παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.4-3. Η πλαστικοποιητική δράση του νερού παρατηρήθηκε για όλα τα εξεταζόμενα τρόφιμα εκβολής. Τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόσθηκαν στην εξίσωση Gordon-Taylor και εκτιμήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων k και T_{g1}. Τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-4. Η πλαστικοποίηση λόγω της προσθήκης νερού παρατηρείται για διάφορους λόγους. Κατά πρώτον οφείλεται στη χημική συγγένεια του νερού με τα μακρομοριακά συστατικά και τις αλληλεπιδράσεις με τις φορτισμένες και πολικές ομάδες τους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη θωράκιση των ενδο- και δια-μοριακών αλληλεπιδράσεων. Επίσης το νερό αυξάνει την απόσταση μεταξύ των μακρομορίων και μειώνει τις διαμοριακές αλληλεπιδράσεις λόγω της διάλυσης στο νερό. Η μοριακή κινητικότητα του νερού, ως ένας διαλύτης

χαμηλού ιξώδους μειώνει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης καθιστώντας το υλικό πιο μαλακό. Αυτός ο μηχανισμός πλαστικοποίησης μαζί με διάφορους παράγοντες όπως το μικρό μοριακό βάρους του νερού σε σχέση με τα συστατικά του τροφίμου, η χαμηλή πυκνότητά του, η υψηλή διηλεκτρική του σταθερά, η ιδιαίτερα έντονη ικανότητά του να σχηματίζει δεσμούς υδρογόνου και τη χαμηλή T_g καθιστούν το νερό τον αποτελεσματικότερο πλαστικοποιητή στα τρόφιμα και τον καλύτερο διαλύτη για πολικά και φορτισμένα βιοπολυμερή (Tolstoguzov, 2000).

Οι τιμές της T_g των τροφίμων εκβολής με άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο κυμάνθηκαν από 122°C έως 19°C, για περιεχόμενη υγρασία περίπου από 3,6% έως 22,8%. Η T_g προϊόντων εκβολής από άμυλο σίτου, τα οποία επεξεργάσθηκαν σε παρόμοιες τιμές ειδικής μηχανικής ενέργειας κυμανθήκαν από 160°C έως 70°C, με την περιεχόμενη υγρασία να κυμαίνεται από 5% έως 13%, αντίστοιχα (Bindzus et al., 2002). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τροφίμων εκβολής από άμυλο υψηλό σε αμυλοπηκτίνη μειώθηκε από 105°C σε 38°C, με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας από 0% έως 11% (Kaletunc et al., 1993). Η μείωση της T_g παρατηρήθηκε επίσης για προϊόντα εκβολής με κρέας και άμυλο (Moraru, Lee, Karwe & Kokini, 2002).

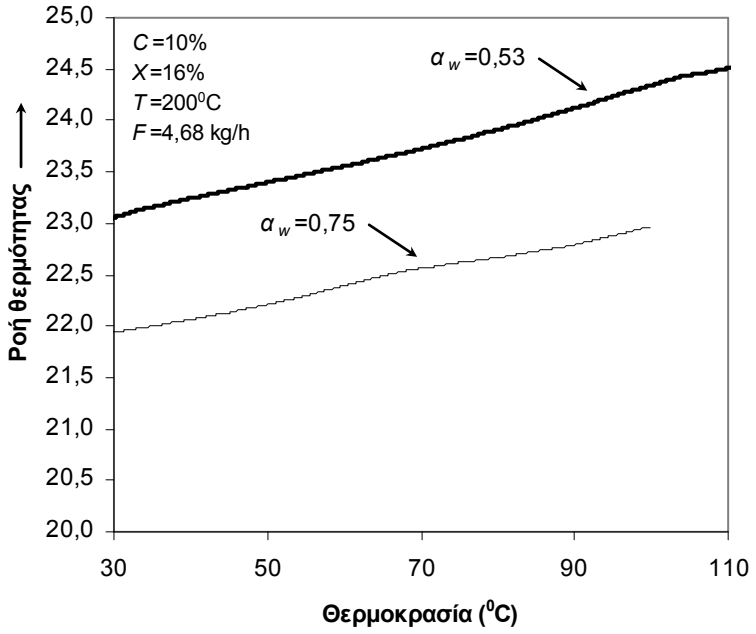
Κατά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από το μέσο σημείο της βηματικής μεταβολής της ειδικής θερμότητας, παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή αυτή ήταν μικρότερη σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας (Σχήμα 9.4-4). Η μεταβολή αυτή έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν για το άμυλο αραβοσίτου, το άλευρο βρώμης, το προζελατινοποιημένο άμυλο αραβοσίτου και το άμυλο σίτου (Brent, Mulvaney, Cohen & Bartsch, 1997; Zelenzak et al., 1987). Η ευρύτερη διασπορά και η μετατόπιση της περιοχής μετάπτωσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες είναι χαρακτηριστική των μερικώς κρυσταλλικών πολυμερών, παρά των άμορφών θερμοπλαστικών πολυμερών (Brent et al., 1997). Κατ' αυτόν τον τρόπο, όλα τα εξεταζόμενα τήγματα που υφίστανται εκβολή μπορεί να έχουν ένα κοινό άμορφο τμήμα, το οποίο μπορεί να σχετίζεται με το κλάσμα της αμυλοπηκτίνης του αμύλου. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε μία κύρια χαλάρωση για όλα τα τρόφιμα εκβολής, παρά το γεγονός ότι θα μπορούσαν να υπάρχουν διαφορετικές θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε ξεχωριστό συστατικό του τροφίμου.



Σχήμα 9.4-3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τροφίμων εκβολής ως συνάρτηση των συνθηκών επεξεργασίας, της σύστασης και της ενεργότητας νερού.

Πίνακας 9-4 Τιμές της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα εξεταζόμενα τρόφιμα εκβολής.

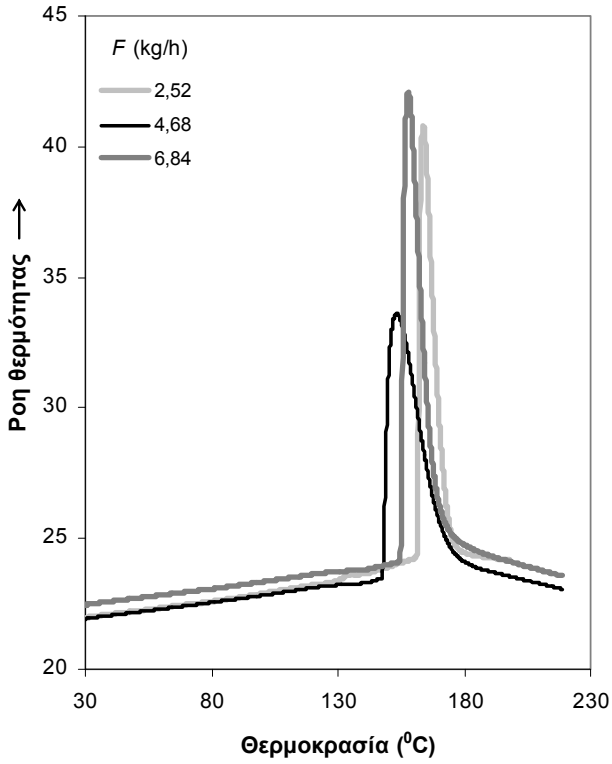
Συνθήκες εκβολής & σύσταση υλικών				Παράμετροι Gordon-Taylor			
C (%)	X (% wb)	T (°C)	F (kg/h)	k	T_{gl} (K)	R^2	p-value
10	16	200	4,68	3,76±0,64	428,17±11,52	0,944	0,000
30	13	200	4,68	3,59±0,46	436,65±9,67	0,973	0,000
30	19	200	4,68	4,77±0,32	453,37±5,71	0,991	0,000
30	16	170	4,68	4,07±0,19	442,19±3,73	0,997	0,000
30	16	200	4,68	3,65±0,18	427,28±3,49	0,995	0,000
30	16	230	4,68	4,70±0,35	446,47±6,65	0,990	0,000
30	16	200	2,52	4,60±0,29	447,06±5,54	0,993	0,000
30	16	200	6,84	4,85±0,27	446,05±5,48	0,993	0,000
50	16	200	4,68	3,86±0,32	423,16±5,02	0,986	0,000



Σχήμα 9.4-4 Βηματική μεταβολή ροής θερμότητας για διαφορετικές ενεργότητες νερού (θερμογράφημα DSC). Παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή στα υψηλότερα επίπεδα ενεργότητας νερού.

9.4.4 Τήξη συμπλόκου αμυλόζης-λιπιδίων

Κατά τη διάρκεια θέρμανσης των τροφίμων εκβολής από μίγματα φακής και αραβοσιτάλευρου παρουσιάσθηκε μια ενδόθερμη μεταβολή (Σχήμα 9.4-5). Η έναρξη, η κορυφή και η θερμοκρασία λήξης του φαινομένου παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-5. Το εύρος της ενδόθερμης μεταβολής για όλα τα προϊόντα εκβολής ήταν περίπου 20°C. Η θερμοκρασία κορυφής είναι παρόμοια για όλα τα τρόφιμα που εξετάστηκαν.



Σχήμα 9.4-5 Ενδόθερμη κορυφή προϊόντων εκβολής για a_w=0,33, με *X*=16% και *C*=30%, επεξεργασμένα σε *T*=200°C.

Η ενδόθερμη μεταβολή οφείλεται στην τήξη των συμπλόκων αμυλόζης και λιπιδίων, τα οποία σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της εκβολής (Bhatnagar & Hanna, 1994b). Ο σχηματισμός αυτών των συμπλόκων συμβαίνει λόγω της ικανότητας της αμυλόζης να δεσμεύει λιπίδια, όπως τα λιπαρά οξέα. Στο παρελθόν έχει μελετηθεί ο σχηματισμός των συμπλόκων αυτών κατά τη διάρκεια της εκβολής, με εκβολέα διπλού κοχλία (Colonna et al., 1983; Guzman et al., 1992). Η εκβολή αμύλου μανιόκας, πατάτας και αραβοσίτου με την παρουσία εγγενών ή προστιθέμενων κορεσμένων και ακόρεστων λιπαρών οξέων, που περιέχουν 12-20 άτομα άνθρακα, μονοστεατικό εστέρα της γλυκερόλης και στεατογαλακτικού νατρίου είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό του συμπλόκου V-αμυλόζης. Η συγκέντρωση και το είδος των λιπιδίων και του αμύλου που βρίσκονται στο μίγμα που υφίσταται εκβολή επηρεάζουν το σχηματισμό των συμπλόκων. Όλα τα εξετασθέντα τρόφιμα εκβολής εμφάνισαν παρόμοια ενδόθερμη περιοχή πιθανώς λόγω της παρόμοιας σύστασης στην τροφοδοσία (Lazou et al., 2011).

Πίνακας 9-5 Ενδόθερμη κορυφή τροφίμων εκβολής.

Συνθήκες εκβολής & σύσταση υλικών				Ενδόθερμη κορυφή			
C (%)	X (% wb)	T (°C)	F (kg/h)	T_m onset (°C)	T_m peak (°C)	T_m end (°C)	ΔH (J/g)
10	16	200	4,68	159,6±1,87	161,89±1,25	171,16±0,51	134,79±17,28
30	13	200	4,68	150,03±4,3	155,53±0,04	168,39±4,18	111,56±14,34
30	16	170	4,68	154,95±2,66	157,07±2,21	165,79±0,4	131,35±7,95
30	16	200	2,52	155,44±1,43	157,2±1,69	164,44±2,43	101,98±9,66
30	16	200	4,68	154,53±9,44	157,79±6,52	169,86±1,72	134,45±20,11
30	16	200	6,84	150,88±5,5	153,45±5,31	164,02±3,9	125,33±7,83
30	16	230	4,68	157,05±7,37	159,63±6,74	170,61±3,08	123,85±6,17
30	19	200	4,68	159,73±0,51	161,93±0,64	170,83±0,66	140,26±0,59
50	16	200	4,68	155,07±0,88	157,07±0,53	165,85±1,85	112,24±13,02

9.5 Συμπεράσματα

Μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας και της σύστασης τροφοδοσίας στις μεταπτώσεις φάσεως τροφίμων εκβολής από μίγματα αραβοσιτάλευρου και φακής. Η ειδική μηχανική ενέργεια κατά τη διάρκεια της εκβολής μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την παροχή τροφοδοσίας και την υγρασία τροφοδοσίας. Τα χαρακτηριστικά προσρόφησης υγρασίας των τροφίμων εκβολής μελετήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και περιγράφηκαν ικανοποιητικά από το πρότυπο GAB. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε από την παροχή του υλικού τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε με την παροχή τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο και αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής. Σε όλα τα τρόφιμα το νερό έδρασε σαν πλαστικοποιητής. Οι τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εκβολής κυμάνθηκαν από 122°C έως 19°C, για περιεχόμενη υγρασία περίπου από 3,6% έως 22,8%. Η πλαστικοποιητική δράση του νερού περιγράφηκε καλά από την εξίσωση Gordon-Taylor. Κατά τη διάρκεια της εκβολής των μιγμάτων αραβοσιτάλευρου και φακής σχηματίσθηκαν σύμπλοκα μεταξύ αμυλόζης και λιπιδίων, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την ενδόθερμη κορυφή του θερμογραφήματος DSC. Η γνώση της πλαστικοποιητικής δράσης του νερού και των χαρακτηριστικών ροφήσεως νερού είναι απαραίτητες για τη επιλογή των συνθηκών αποθήκευσης και τη βελτίωση της σταθερότητας των τροφίμων.

10 Συμπεράσματα και προοπτικές

Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα των τροφίμων εκβολής επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες επεξεργασίας και τη σύσταση της πρώτης ύλης. Για την περιγραφή των ενόργανων ιδιοτήτων ποιότητας αναπτύχθηκαν απλά μαθηματικά πρότυπα, που επιτρέπουν την παραγωγή διογκωμένων τροφίμων εκβολής με προκαθορισμένες ιδιότητες. Επιπροσθέτως, η συσχέτιση των ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής έδωσε σημαντικές πληροφορίες οι οποίες είναι χρήσιμες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό τους. Η παραγωγή αποδεκτών προϊόντων εκβολής από άλευρο φακής ολικής άλεσης είναι εφικτή, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις συνθήκες επεξεργασίας και τη σύσταση του υλικού τροφοδοσίας.

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της κάθε ιδιότητας σημειώνονται ως εξής:

- *Χρόνος παραμονής*: Για την πρόβλεψη του μέσου χρόνου παραμονής αναπτύχθηκε ένα εκθετικό μαθηματικό πρότυπο. Έχοντας ως συνθήκες αναφοράς N_0=200 rpm, F_0=0,001 kg/s, T_0=200°C και X_0=10% υ.β., βρέθηκε ότι ο μέσος χρόνος παραμονής επηρεαζόταν σημαντικά από το e_{f0} κενό κλάσμα εκβολέα στις συνθήκες αναφοράς, την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, την παροχή τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Βρέθηκε ακόμη ότι με αύξηση της παροχής του υλικού τροφοδοσίας συμβαίνει μείωση του μέσου χρόνου παραμονής.

- *Δομικές ιδιότητες*: Οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας για τα προϊόντα εκβολής με αραβοσιτάλευρο κυμάνθηκαν από 0,08 g/cm^3 έως 0,18 g/cm^3 και για τα προϊόντα εκβολής με φακή από 0,08 g/cm^3 έως 0,22 g/cm^3 Βρέθηκε ακόμη ότι η φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής και αυξήθηκε με την παροχή τροφοδοσίας, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Το πορώδες επηρεάσθηκε με αντίστροφο τρόπο από ότι η φαινόμενη πυκνότητα από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές του μεταξύ των προϊόντων ήταν μεγαλύτερες του 0,85, με τα προϊόντα από σκέτο αραβοσιτάλευρο να παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές. Ο συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής αυξήθηκε με την παροχή του υλικού τροφοδοσίας και μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την υγρασία τροφοδοσίας και την αναλογία φακή προς αραβοσιτάλευρο. Οι τιμές του συντελεστή διόγκωσης κυμάνθηκαν από 1,53 έως 3,07, για τα προϊόντα από αραβοσιτάλευρο, και από 1,18 έως 3,07, για τα προϊόντα με άλευρο φακής. Οι παράγοντες που ευνοούν την ανάπτυξη της κυψελοειδούς-διογκωμένης δομής των προϊόντων εκβολής, μειώνουν τη φαινόμενή τους πυκνότητα. Η πραγματική πυκνότητα των τροφίμων εκβολής επηρεάζεται μόνο από τη σύσταση του τροφίμου. Το εκθετικό μαθηματικό πρότυπο που αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη της φαινόμενης πυκνότητας και του συντελεστή διόγκωσης, το οποίο περιλαμβάνει τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύσταση της πρώτης ύλης, περιγράφει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα.

- *Ιδιότητες υφής*: Το εκθετικό μαθηματικό πρότυπο, που αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη των ενόργανων ιδιοτήτων υφής (μέτρο ελαστικότητας και αριθμός θραύσεων

κατά τη συμπίεση) των τροφίμων εκβολής, περιέγραψε με ακρίβεια τις μεταβολές των ιδιοτήτων με τις παραμέτρους της διεργασίας και τη σύσταση της πρώτης ύλης. Το μέτρο ελαστικότητας και ο αριθμός των θραύσεων κατά τη συμπίεση των προϊόντων εκβολής μειώθηκαν με τη θερμοκρασία εκβολής. Επιπρόσθετα η θερμοκρασία εκβολής μείωσε την οργανοληπτική διάμετρο και τη σκληρότητα των προϊόντων και βελτίωσε το αφρώδες τους. Η παροχή του υλικού τροφοδοσίας και η υγρασία αύξησε τον αριθμό των θραύσεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και μείωσε το μέτρο ελαστικότητας. Η οργανοληπτική διάμετρος βελτιώθηκε με την παροχή τροφοδοσίας. Η αύξηση της παροχής και της υγρασίας τροφοδοσίας είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκληρότερων προϊόντων. Η προσθήκη του αλεύρου φακής επηρέαζε αρνητικά τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση και αύξησε τη σκληρότητα των προϊόντων. Η συσχέτιση των ενόργανων και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών υπέδειξε ότι η οργανοληπτική διάμετρος συσχετίζεται με το συντελεστή διόγκωσης και η τραγανότητα με τον αριθμό των θραύσεων κατά τη συμπίεση και το συντελεστή διόγκωσης. Επιπρόσθετα η φαινόμενη πυκνότητα συσχετίσθηκε θετικά με το μέτρο ελαστικότητας. Είναι εφικτή πρόβλεψη των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής με προσθήκη αλεύρου φακής, τα οποία είναι κρίσιμα για την αποδοχή των προϊόντων από τους καταναλωτές, μέσω των ενόργανων μετρήσεων χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις συσχέτισης.

- *Λειτουργικές ιδιότητες*: Οι τιμές της ΙΑΝ των τροφίμων εκβολής κυμάνθηκαν από 4,35 έως 6,06 g/g δείγματος, οι τιμές της ΙΔΝ από 8,88 έως 41,71 g/100 g δείγματος και οι τιμές της ΙΑΕ κυμάνθηκαν από 0,91 έως 5,45 mL/g Η θερμοκρασία εκβολής προκάλεσε αύξηση των τιμών όλων των εξεταζόμενων λειτουργικών ιδιοτήτων (ΙΑΝ, ΙΔΝ και ΙΑΕ), ενώ η παροχή του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε τη μείωσή τους. Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας προκάλεσε αύξηση της ΙΑΝ, ενώ είχε την αντίστροφη επίδραση στην ΙΔΝ και στην ΙΑΕ. Η αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο μείωσε την ΙΑΝ και την ΙΑΕ, αλλά δεν παρατηρήθηκε κάποια ξεκάθαρη μεταβολή της ΙΔΝ με την παράμετρο αυτή. Συγκριτικά, τα τρόφιμα εκβολής από αραβοσιτάλευρο είχαν υψηλότερες τιμές λειτουργικών ιδιοτήτων από αυτές των τροφίμων από μίγματα φακής. Ιδιαιτέρως δε, τα προϊόντα με υψηλά ποσοστά οσπρίου εμφανίζουν μειωμένη λειτουργικότητα. Η συσχέτιση μεταξύ των δειγμάτων υπέδειξε ότι μπορεί να επιτευχθεί η επιλογή δειγμάτων με επιθυμητή λειτουργικότητα. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται, για την παραγωγή ενός προϊόντος τροφίμου, συστατικό με υψηλή συνδετική ικανότητα και υψηλός βαθμός ψησίματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παραχθέντα τρόφιμα εκβολής. Οι συνθήκες που εξασφαλίζουν την επιθυμητή λειτουργικότητα είναι η παροχή τροφοδοσίας να κυμαίνεται από 2,52 kg/h έως 4,68 kg/h και το μίγμα να μην περιέχει περισσότερο από 30% άλευρο φακής.

- *Οργανοληπτικές ιδιότητες*: Η θερμοκρασία εκβολής μείωσε τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης (ομοιογενής δομή, πορώδες και διάμετρος), την αλευρώδη γεύση-οσμή, την τραγανότητα και τη σκληρότητά τους, ενώ η παροχή του υλικού τροφοδοσίας βελτίωσε τα χαρακτηριστικά εμφάνισης, αλλά αύξησε τη σκληρότητα των προϊόντων. Η υγρασία του υλικού τροφοδοσίας αύξησε την οργανοληπτική σκληρότητα των δειγμάτων και χειροτέρεψε τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης και την ενυδάτωσή τους. Η προσθήκη του

αλεύρου φακής είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκοτεινόχρωμων προϊόντων, τα οποία δεν ήταν ιδιαιτέρως ελκυστικά στους δοκιμαστές. Η ολική αποδοχή των προϊόντων εκβολής γενικά μειώθηκε με την προσθήκη του αλεύρου φακής σε ποσοστό 50%. Τα πιο αποδεκτά τρόφιμα εκβολής ήταν αυτά που περιείχαν 13% αρχική υγρασία, ποσοστό φακής μικρότερο από 50% και επεξεργάσθηκαν σε θερμοκρασία 170°C. Επιπροσθέτως τα τρόφιμα αυτά εμφανίζουν ομοιόμορφη και διογκωμένη δομή , είναι τραγανά, αφράτα, σχετικά μαλακά και έχουν καλή ενυδάτωση κατά τη μάσηση. Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής καθορίζονται από το συνδυασμό των συνθηκών επεξεργασίας και της σύστασης των πρώτων υλών. Η συσχέτιση των δειγμάτων με βάση τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά έδειξε ότι η τραγανότητα συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της εμφάνισης και την ολική αποδοχή των προϊόντων. Επιπροσθέτως, η σκληρότητά τους συσχετίζεται θετικά με την αλευρώδη γεύση-οσμή και αρνητικά με το αφρώδες, την ενυδάτωση και την καμένη γεύση-οσμή. Τα πιο αποδεκτά προϊόντα ήταν αυτά που περιέχουν αναλογίες υλικών από 0 έως 30%, χαμηλή υγρασία τροφοδοσίας (X<19%) και έχουν επεξεργασθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (T<230°C).

- *Μεταπτώσεις φάσεων*: Η ειδική μηχανική ενέργεια κατά τη διάρκεια της εκβολής μειώθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής, την παροχή τροφοδοσίας και την υγρασία τροφοδοσίας. Τα χαρακτηριστικά προσρόφησης υγρασίας των τροφίμων εκβολής μελετήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και περιγράφηκαν ικανοποιητικά από το πρότυπο GAB. Η υαλώδης μετάπτωση των τροφίμων εκβολής επηρεάσθηκε από την παροχή του υλικού τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε με την παροχή τροφοδοσίας και την αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο και αυξήθηκε με τη θερμοκρασία εκβολής. Σε όλα τα τρόφιμα το νερό έδρασε σαν πλαστικοποιητής. Οι τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εκβολής κυμάνθηκαν από 122°C έως 19°C, για περιεκτικότητες υγρασίας από 3,6% έως 22,8%. Η πλαστικοποιητική δράση του νερού περιγράφηκε καλά από την εξίσωση Gordon-Taylor. Κατά τη διάρκεια της εκβολής των μιγμάτων αραβοσιτάλευρου και φακής σχηματίσθηκαν σύμπλοκα μεταξύ αμυλόζης και λιπιδίων, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την ενδόθερμη κορυφή του θερμογραφήματος DSC. Η γνώση της πλαστικοποιητικής δράσης του νερού και των χαρακτηριστικών ροφήσεως είναι απαραίτητες στην επιλογή των συνθηκών αποθήκευσης και τη βελτίωση της σταθερότητας των τροφίμων.

Οι προοπτικές σε ερευνητικό επίπεδο για περαιτέρω μελέτη που προκύπτουν από την παρούσα διατριβή είναι οι ακόλουθες:

- Η διερεύνηση των ιδιοτήτων τροφίμων εκβολής, από άλλα είδη οσπρίου, καθώς και επίδραση άλλης αμυλούχας βάσης, όπως δημητριακά εκτός του σίτου και αραβοσίτου.

- Η περαιτέρω απάντηση ερωτημάτων που θα προκύψουν πάνω στη δυναμική σχηματισμού της δομής σε προϊόντα με υψηλή περιεκτικότητα διαιτητικών ινών.

- Η μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς του τήγματος κατά τη διάρκεια της εκβολής, η οποία είναι καθοριστική για τη διαμόρφωση των ιδιοτήτων δομής και υφής.

- Η μελέτη της επίδρασης του ποσοστού της αμυλόζης στις ιδιότητες ποιότητας των τροφίμων εκβολής.
- Η μελέτη της οξείδωσης των προϊόντων εκβολής, για την εκτίμηση του χρόνου ζωής τους.
- Η μελέτη και ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη μέτρηση της επίδρασης της εκβολής στα φυσικά αντιοξειδωτικά και των λιπιδίων στην υαλώδη κα ελαστική κατάσταση.
- Η μελέτη της θρεπτικής αξίας των προϊόντων εκβολής και της επίδρασης της διεργασίας πάνω σε θρεπτικά όπως οι βιταμίνες και τα ιχνοστοιχεία.
- Η ανάπτυξη τεχνολογίας για την παραγωγή νέων και καινοτόμων προϊόντων με μοναδική δομή και υφή.

11 Ονοματολογία

Αγγλικά

C	αναλογία φακή/αραβοσιτάλευρο,	(-)
	Σταθερά	(-)
d	διάμετρος τροφίμου	(cm)
d_{die}	διάμετρος μήτρας εκβολέα	(mm)
E	μέτρο ελαστικότητας	(MPa)
ERH	σχετική υγρασία ισορροπίας αέρα	(-)
Exp	συντελεστής διόγκωσης	(-)
F	παροχή τροφοδοσίας	(kg/h)
K	σταθερά	(-)
K_w	ισχύς του κινητήρα εκβολέα	
L	μήκος τροφίμου	(cm)
m	μάζα του τροφίμου	(g)
n	εκθέτης μαθηματικών προτύπων	(-)
N	ταχύτητα περιστροφής κοχλιών,	(rpm)
	αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση	(-)
PC	Κύρια συνιστώσα	(-)
P_w^v	τάση ατμών νερού	(Torr)
SME	ειδική μηχανική ενέργεια	(kJ/kg)
T	θερμοκρασία	(°C)
T_r	ροπή του κινητήρα	
	κατά τη διάρκεια της εκβολής	(%)
V_s	όγκος στερεού	(g/cm^3)
w	κλάσμα μάζας	(-)
X_m	περιεκτικότητα υγρασίας μονοστιβάδας	(g/100g ξ.στ)
T_g	θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης	(°C)
X	υγρασία	(% υ.β)

Ελληνικά

α_w	ενεργότητα ύδατος	(-)
ρ_α	φαινόμενη πυκνότητα	(g/cm^3)
ρ_t	πραγματική πυκνότητα	(g/cm^3)
ε	πορώδες	(-)
σ_B	τάση θραύσης	(kPa)
ε_B	παραμόρφωση κατά τη θραύση	(-)
ΙΑΝ	ικανότητα απορρόφησης νερού	(g/ g δείγματος)
ΙΔΝ	ικανότητα διαλυτότητας σε νερό	(g/100 g δείγματος)
ΙΑΕ	ικανότητα απορρόφησης ελαίου	(mL/ g δείγματος)

12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agbisit, R., Alavi, S., Cheng, E., Herald, T., & Trater, A. (2007). Relationships between microstructure and mechanical properties of cellular cornstarch extrudates. *Journal of Texture Studies*, *38*(2), 199-219.

Aguilera, J. M., Crisafulli, E. B., Lusas, E. W., Uebersax, M. A., & Zabik, M. E. (1984). Air Classification and Extrusion of Navy Bean Fractions. *Journal of Food Science*, *49*(2), 543-546.

Aguilera, J. M., Lillford, P. J., Corradini, M. G., & Peleg, M. (2008). Solid Food Foams. *Food Materials Science* (pp. 169-202): Springer New York.

Aguilera, J. M., & Stanley, D. W. (1999). *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*. Gaithersburg: Aspen Publishers.

Ali, Y., Hanna, M. A., & Chinnaswamy, R. (1996). Expansion Characteristics of Extruded Corn Grits. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, *29*(8), 702-707.

Alonso, R., Orúe, E., Zabalza, M. J., Grant, G., & Marzo, F. (2000). Effect of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*(3), 397-403.

Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2008). Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering*, *84*(2), 231-242.

Altomare, R. E., & Ghossi, P. (1986). An Analysis of Residence Time Distribution Patterns in A Twin Screw Cooking Extruder. *Biotechnology Progress*, *2*(3), 157-163.

Alvarez-Martinez, L., Kondury, K. P., & Harper, J. M. (1988). A General Model for Expansion of Extruded Products. *Journal of Food Science*, *53*(2), 609-615.

Ampe, C., Van Damme, J., De Castro, L., Sampaio, M. J., Van Montagu, M., & Vanderkerckhove, J. (1986). The amino acid sequence of the 2S sulphur-rich proteins from seeds of Brazil nut (Bertholletia excelsa H.B.K.). *Eur J Biochem 159*, 597–604.

Anderson, R. A., Conway, H. F., & Peplinski, A. J. (1970). Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. *Starch - Stärke*, *22*(4), 130-135.

Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., & Griffin, E. L., JR. (1969). Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today*, *14*(87-108).

Andersson, Y., & Hedlund, B. (1990). Extruded wheat flour: Correlation between processing and product quality parameters. *Food Quality and Preference*, *2*(4), 201-216.

Anton, A. A., & Luciano, F. B. (2007). Instrumental textural evaluation of extruded snack foods: A review. *Ciencia y Tecnologia Alimentaria*, *54*, 245–251.

Anton, A. A., Gary Fulcher, R., & Arntfield, S. D. (2009). Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (Phaseolus

vulgaris L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chemistry*, *113*(4), 989-996.

Anton, A. A., & Luciano, F. B. (2007). Instrumental texture evaluation of extruded snack foods: a review. *Cienc. Tecnol. Aliment.*, *5*(4), 245-251.

Anuonye, J. C., Badifu, G. I. O., Inyang, C. U., Akpapunam, M. A., & Mazza, M. (2007). Effect of Extrusion Variables on Torque, Specific Mechanical Energy,Volumetric Flow Rate and Residence Time of Blends of mAcha/Soybean- A Response Surface Analysis. *Journal of Food Technology*, *5*(2), 157-163.

AOAC (1975). *Official methods of analysis of AOAC international*. Washington, DC, USA: Association of Official Analytical Chemists (AOAC).

Arêas, J. A. G. (1992). Extrusion of food proteins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *32*(4), 365 - 392.

Artz, W. E., Warren, C., & Villota, R. (1990). Twin-Screw Extrusion Modification of a Corn Fiber and Corn Starch Extruded Blend. *Journal of Food Science*, *55*(3), 746-754.

Atkins, P. (1998). *Physical Chemistry*. Oxford: Oxford University Press.

Avellone, G., Di Garbo, V., Abruzzese, G., Bono, M., Avellone, G., Raneli, G., De Simone, R., & Licata, G. (2003). Cross-over study on effects of Mediterranean diet in two randomly selected population samples. *Nutrition Research*, *23*(10), 1329-1339.

Aw, T. L., & Swanson, B. G. (1985). Influence of Tannin on Phaseolus vulgaris Protein Digestibility and Quality. *Journal of Food Science*, *50*(1), 67-71.

Baghurst, P. A., Baghurst, K. I., & Record, S. J. (1996). Dietary fibre, nonstarch polysaccharides and resistant starch – a review. *Food Australia*, *48*, S3–5.

Balandran-Quintana, R. R., Barbosa-Canovas, G. V., Zazueta-Morales, J. J., Anzaldua-Morales, A., & Quintero-Ramos, A. (1998). Functional and Nutritional Properties of Extruded Whole Pinto Bean Meal (Phaseolus Vulgaris L.). *Journal of Food Science*, *63*(1), 113-116.

Barrett, A., Kaletunc, G., Rosenburg, S., & Breslauer, K. (1995). Effect of sucrose on the structure, mechanical strength and thermal properties of corn extrudates. *Carbohydrate Polymers*, *26*(4), 261-269.

Barrett, A. H. (2003). Characterization of Macrostructures in Extruded Products. In: G. Kaletunc, & K. J. Breslauer, *Characterization of cereals and flours: Properties, analysis and applications*. Boca Raton: CRC Press.

Barrett, A. H., Cardello, A. V., Lesher, L. L., & Taub, I. A. (1994a). Cellularity, mechanical failure, and textural perception of corn meal extrudates. *Journal of Texture Studies*, *25*(1), 77-95.

Barrett, A. H., & Peleg, M. (1992a). Extrudate Cell Structure-Texture Relationships. *Journal of Food Science*, *57*(5), 1253-1257.

Barrett, A. H., Rosenberg, S., & Ross, E. W. (1994b). Fracture Intensity Distributions during Compression of Puffed Corn Meal Extrudates: Method for Quantifying Fracturability. *Journal of Food Science*, *59*(3), 617-620.

Barrett, A. M., Normand, M. D., Peleg, M., & Ross, E. (1992b). Characterization of the Jagged Stress-strain Relationships of Puffed Extrudates using the Fast Fourier Transform and Fractal Analysis. *Journal of Food Science*, *57*(1), 227-232.

BeMiller, J. N., & Whistler, R. L. (1996). Carbohydrates. In: O. R. Fennema, *Food Chemistry* (pp. 157-223). New York, U.S.A: Marcel Dekker.

Bencini, M. C. (1986). Functional properties of drum-dried chickpea (Cicer arietinum L.) flours. *Journal of Food Science*, *51*(6), 1518–1521.

Bender, D. A., & Bender, A. E. (1999). *Benders' Dictionary of Nutrition and Food Technology*. Abington: Woodhead Publishing.

Berrios, J. D. J., Tang, J., & Swanson, B. G. (2008). Extruded legumes. United States: United States of America, as represented By the Secretary of Agriculture (Washington, DC, US),Washington State University Research Foundation (Pullman, WA, US).

Berset, C. (1989). Color. In: C. Mercier, P. Linko, & J. M. Harper, *Extrusion Cooking* (pp. 247-320). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc.

Bhatnagar, S., & Hanna, M. A. (1994a). Amylose lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal chemistry*, *71*(6), 582–587.

Bhatnagar, S., & Hanna, M. A. (1994b). Extrusion processing conditions for amylase lipid complexing. *Cereal chemistry*, *71*(6), 587–593.

Bhattacharya, M., Hanna, M. A., & Kaufman, R. E. (1986). Textural Properties of Extruded Plant Protein Blends. *Journal of Food Science*, *51*(4), 988-993.

Bhattacharya, S. (1997). Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: Extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering*, *32*(1), 83-99.

Bhattacharya, S., Das, H., & Bose, A. N. (1988). Effect of extrusion process variables on in-vitro protein digestibility of fish-wheat flour blends. *Food Chemistry*, *28*(3), 225-231.

Biliaderis, C. G., Page, C. M., Maurice, T. J., & Juliano, B. O. (1986). Thermal characterization of rice starches: a polymeric approach to phase transitions of granular starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *34*(1), 6-14.

Bindzus, W., Livings, S. J., Gloria-Hernandez, H., Fayard, G., van Lengerich, B., & Meuser, F. (2002). Glass Transition of Extruded Wheat, Corn and Rice Starch. *Starch - Stärke*, *54*(9), 393-400.

Bjorck, I., & Asp, N. G. (1983). The effects of extrusion cooking on nutritional value-A literature review. *Journal of Food Engineering*, *2*(4), 281-308.

Bora, P. S. (2002). Functional properties of native and succinylated lentil (Lens culinaris) globulins. *Food Chemistry*, *77*(2), 171-176.

Bora, P. S. (2003). Effect of acetylation on the functional properties of lentil (Lens culinaris) globulin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *83*(2), 139-141.

Bott, L., & Chambers, E. (2006). Sensory characteristics of combinations of chemicals potentially associated with beany aroma in foods. *Journal of Sensory Studies*, *21*(3), 308-321.

Bourne, M. C. (1994). Converting from empirical to rheological tests on foods—it's a matter of time. *Cereal Foods World*, *39*(11), 37–39.

Bouvier, J. M., Bonneville, R., & Goullieux, A. (1997). Instrumental methods for the measurement of extrudate crispness. *Agro-Food-Industry Hi-Techology*, *8*, 16-19.

Boyer, R. (1977). Transitions and relaxations in amorphous and semicrystalline organic polymers and copolymers. *ncyclopedia of Polymer Science and Technology, Suppl.*, vol. II (pp. 745-839). New York: Wiley.

Bredie, W. L. P., Mottram, D. S., & Guy, R. C. E. (1998). Aroma Volatiles Generated during Extrusion Cooking of Maize Flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *46*(4), 1479-1487.

Brennan, J. G., & Jowitt, R. (1977). Some factors affecting the objective study of food texture. In: G. G. Birch, J. G. Brennan, & K. J. Parker, *Sensory properties of foods* (pp. 227–245). London: Applied Science.

Brent, J. J. L., Mulvaney, S. J., Cohen, C., & Bartsch, J. A. (1997). Thermomechanical Glass Transition of Extruded Cereal Melts. *Journal of Cereal Science*, *26*(3), 301-312.

Bressani, R., Elias, L. G., & Braham, J. E. (1982). Reduction of digestibility of legume protein by tannins. *J Plants Food 4*, 43–55.

Brodribb, A. J., & Humphreys, D. M. (1976). Diverticular disease: three studies, Part III: Metabolic effects of bran. *The British Medical Journal*, *1*(6007), 428-430

Bruin, S., & Jongen, T. R. G. (2003). Food Process Engineering: The Last 25 Years and Challenges Ahead. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *2*(2), 42-81.

Bruin, S., & Luyben, K. C. A. M. (1980). Drying of food materials. In: S. Majumdar, *Advances in Drying*, vol. 1 (p. 156). New York: Hemisphere Publ. Co.

Bruin, S., Zuilichem, D. J., & Stolp, W. (1978). A review of fundamental and engineering aspecta of extrusion of biopolymers in a single-screw extruder. *Journal of Food Process Engineering*, *2*(1), 1-37.

Burgess, L. D., & Stanley, D. W. (1976). Research note - a possible mechanism for thermal texturization of soya bean protein. *Canadian Institute of Food Science & Technology Journal*, *9*, 228-231.

Cai, W., & Diosady, L. L. (1993). Modeling of expansion and water solubility index of wheat starch during extrusion cooking. *Acta Alimentaria*, *22*(3), 181-192.

Camire, M. E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In: M. N. Riaz, *Extruders in food applications* (pp. 127-147). Boca Raton: CRC Press.

Camire, M. E., & Flint, S. I. (1991). Thermal processing effects on dietary fiber composition and hydration capacity in corn meal, oat meal, and potato peels. *Cereal chemistry*, *68*(6), 645-647.

Camire, M. E., & King, C. C. (1991). Protein and Fiber Supplementation Effects on Extruded Cornmeal Snack Quality. *Journal of Food Science*, *56*(3), 760-763.

Camire, M. E., Violette, D., Dougherty, M. P., & McLaughlin, M. A. (1997). Potato peel dietary fiber composition: effects of peeling and extrusion cooking processes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *45*, 1404-1408.

Camire, M. E., Zhao, J., Dougherty, M. P., & Bushway, R. J. (1995). In Vitro Binding of Benzo[a]pyrene by Extruded Potato Peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *43*(4), 970-973.

Camire, M. E., Zhao, J., & Violette, D. A. (1993). In vitro binding of bile acids by extruded potato peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *41*(12), 2391-2394.

Casey, R., Domoney, C., & Ellis, N. (1986). Legume storage proteins and their genes. *Oxf. Surv. Plant Mol. Cell. Biol.* , *3*, 1-95.

Chang, Y. K., Martinez-Bustos, F., & Lara, H. (1998). Effect of Some Extrusion Variables on Rheological Properties and Physicochemical Changes of Cornmeal Extruded by Twin Screw Extruder. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *15*(4), 370-381.

Chang, Y. K., Martinez-Bustos, F., Park, T. S., & Kokini, J. L. (1999). The influence of specific mechanical energy on cornmeal viscosity measured by an on-line system during twin-screw extrusion. . *Brazilian Journal og Chemical Engineering*, *16*(3), 285-295.

Chanvrier, H., Colonna, P., Della Valle, G., & Lourdin, D. (2005). Structure and mechanical behaviour of corn flour and starch-zein based materials in the glassy state. *Carbohydrate Polymers*, *59*(1), 109-119.

Chanvrier, H., Della Valle, G., & Lourdin, D. (2006). Mechanical behaviour of corn flour and starch-zein based materials in the glassy state: A matrix-particle interpretation. *Carbohydrate Polymers*, *65*(3), 346-356.

Chauhan, G. S., & Bains, G. S. (1988). Effect of some extruder variables on physico-chemical properties of extruded rice-legume blends. *Food Chemistry*, *27*(3), 213-224.

Chauhan, G. S., Sharma, P., & Bains, G. S. (2003). Effect of Extrusion Cooking on X-Ray Diffraction Characteristics of Rice and Riceâ€"Legume Blends. *International Journal of Food Properties*, *6*(1), 127 - 133.

Chávez-Jáuregui, R. N., Silva, M. E. M. P., & Arĕas, J. A. G. (2000). Extrusion Cooking Process for Amaranth (Amaranthus caudatus L.). *Journal of Food Science*, *65*(6), 1009-1015.

Chen, C. S. (1971). Equilibrium moisture curves for biological materials. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, *14*, 924-926.

Chen, F. L., Wei, Y. M., Zhang, B., & Ojokoh, A. O. (2010). System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range. *Journal of Food Engineering*, *96*(2), 208-213.

Chen, J., Serafin, F. L., Pandya, R. N., & Daun, H. (1991). Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *Journal of Food Science*, *56*(1), 84-89.

Cheng, E. M., Alavi, S., Pearson, T., & Agbisit, R. (2007). Mechanical-acoustic and sensory evaluations of cornstarch-whey protein isolate extrudates. *Journal of Texture Studies*, *38*(4), 473-498.

Cheng, H., & Friis, A. (2010). Modelling extrudate expansion in a twin-screw food extrusion cooking process through dimensional analysis methodology. *Food and Bioproducts Processing*, *88*(2-3), 188-194.

Cheyne, A., Barnes, J., Gedney, S., & Wilson, D. I. (2005). Extrusion behaviour of cohesive potato starch pastes: II. Microstructure-process interactions. *Journal of Food Engineering*, *66*(1), 13-24.

Chinnaswamy, R. (1993). Basis of cereal starch expansion. *Carbohydrate Polymers*, *21*(2-3), 157-167.

Chirife, J., & Iglesias, H. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods Part 1- A review. *J. Food Technol.*, *15*, 159-174.

Choi, I.-D., Phillips, R. D., & Resurreccion, A. V. A. (2007). Consumer-Based Optimization of a Third-Generation Product Made from Peanut and Rice Flour. *Journal of Food Science*, *72*(7), S443-S449.

Choudhury, G. S., & Gautam, A. (1998a). Comparative study of mixing elements during twin-screw extrusion of rice flour. *Food Research International*, *31*(1), 7-17.

Choudhury, G. S., & Gautam, A. (1998b). On-line Measurement of Residence Time Distribution in a Food Extruder. *Journal of Food Science*, *63*(3), 529-534.

Chung, D. S., & Pfost, H. B. (1967). Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. II. Development of the general isotherm equation. *Trans. ASAE*, *10*, 552-555.

Claude, J., & Ubbink, J. (2006). Thermal degradation of carbohydrate polymers in amorphous states: A physical study including colorimetry. *Food Chemistry*, *96*(3), 402-410.

Cocero, A. M., & Kokini, J. L. (1991). The study of the glass transition of glutenin using small amplitude oscillatory rheological measurements and differential scanning calorimetry. *Journal of Rheology*, *35*(2), 257-270.

Colonna, P., Doublier, J. L., Melcion, J. P., de Monredon, F., & Mercier, C. (1984). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. I. Physical and macromolecular modification. *Cereal chemistry*, *61*, 538-543.

Colonna, P., & Mercier, C. (1983). Macromolecular modifications of manioc starch components by extrusion-cooking with and without lipids. *Carbohydrate Polymers*, *3*(2), 87-108.

Colonna, P., Tayeb, J., & Mercier, C. (1989). Extrusion cooking of starch and starchy products. In: C. Mercier, P. Linko, & J. M. Harper, *Extrusion Cooking* (pp. 247-319). St Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

Corradini, M. G., & Peleg, M. (2006). Direction reversals in the mechanical signature of cellural snacks: A measrure of brittleness? *Journal of Texture Studies*, *37*(5), 538-552.

Corradini, M. G., & Peleg, M. (2008a). Solid Food Foams. In: J. M. Aguilera, & P. J. Lillford, *Food Material Science: Principles and Practice* (pp. 169-202). New York: Springer.

Corradini, M. G., & Peleg, M. (2008b). Solid Food Foams. *Food Materials Science* (pp. 169-202).

Couchman, P. R., & Karasz, F. E. (1978). A Classical Thermodynamic Discussion of the Effect of Composition on Glass-Transition Temperatures. *Macromolecules*, *11*(1), 117-119.

Coultate, T. P. (2002). *Foods: The Chemistry of its components*. London, UK: Royal Society of Chemistry.

Dalgetty, D. D., & Baik, B. K. (2003). Isolation and characterization of cotyledon fibers from peas, lentils, and chickpeas. *Cereal Chemistry*, *80*(3), 310-315.

De Feo, V., Aquino, R., Menghini, A., Ramundo, E., & Senatore, F. (1992). Traditional Phytotherapy in the peninsula Sorrentina, Campania, Southern Italy. *J Ethnopharmacol.*, *36*, 113–125.

De Graaf, E. M., Madeka, H., Cocero, A. M., & Kokini, J. L. (1993). Determination of the Effect of Moisture on Gliadin Glass Transition Using Mechanical Spectrometry and Differential Scanning Calorimetry. *Biotechnology Progress*, *9*(2), 210-213.

Decker, E., Beecher, G., Slavin, J., Miller, H. E., & Marquart, L. (2002). Whole grains as a source of antioxidants. *Cereal Foods World*, *47*(8), 370-373.

Della Valle, G., Kozlowski, C. P., & Tayeb, J. (1989). Starch transformation estimated by the energy balance on a twin screw extruder. *Lebesm. Wiss. Technol.*, *22*, 279–286.

Della Valle, G., Vergnes, B., Colonna, P., & Patria, A. (1997). Relations between rheological properties of molten starches and their expansion behaviour in extrusion. *Journal of Food Engineering*, *31*(3), 277-296.

deMan, J. M. (1999). Proteins. *Principles of Food Chemistry* (pp. 111-152). USA: Springer.

Díaz, O., Pereira, C. D., & Cobos, A. (2004). Functional properties of ovine whey protein concentrates produced by membrane technology after clarification of cheese manufacture by-products. *Food Hydrocolloids*, *18*(4), 601-610.

Dijksterhuis, G., Luyten, H., de Wijk, R., & Mojet, J. (2007). A new sensory vocabulary for crisp and crunchy dry model foods. *Food Quality and Preference*, *18*(1), 37-50.

Ding, Q.-B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, *73*(2), 142-148.

Ding, Q.-B., Ainsworth, P., Tucker, G., & Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, *66*(3), 283-289.

Dogan, H., & Kokini, J. L. (2007). Psychophysical markers for crispness and influence of phase behavior and structure. *Journal of Texture Studies*, *38*(3), 324-354.

Donovan, J. W., Lorenz, K., & Kulp, K. (1979). Differential scanning calorimetry of heat-moisture treated wheat and potato starches. *Cereal chemistry*, *60*(5), 381–387.

Drago, S., Velasco-González, O., Torres, R., González, R., & Valencia, M. (2007). Effect of the Extrusion on Functional Properties and Mineral Dialyzability from Phaseolus Vulgaris Bean Flour. *Plant Foods for Human Nutrition (Formerly Qualitas Plantarum)*, *62*(2), 43-48.

Duizer, L. (2001). A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. *Trends in Food Science & Technology*, *12*(1), 17-24.

Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, *77*(2), 67-82.

Duranti, M., & Gius, C. (1997). Legume seeds: protein content and nutritional value. *Field Crops Research*, *53*(1-3), 31-45.

Dworschak, E. (1980). Nonenzyme browning and its effect on protein nutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *13*, 1-40.

Eisenberg, A. (1984). The glassy state and the glass transition. In: J. E. Mark, A. Eisenberg, W. W. Gaessley, L. Mandelkern, & J. Koenig, *Physical Properties of Polymers* (pp. 55-95). Washington, DC: Am Chem Soc.

Ellis, R. P., Cochrane, M. P., Dale, M. F. B., Duffus, C. M., Lynn, A., Morrison, I. M., Prentice, R. D. M., Swanston, J. S., & Tiller, S. A. (1998). Starch production and industrial use. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *77*(3), 289-311.

Fairweather-Tait, S., Portwood, D., Symss, L., Eagles, J., & Minski, M. (1989). Iron and zinc absorption in human subjects from a mixed meal of extruded and nonextruded wheat bran and flour. *Am J Clin Nutr*, *49*(1), 151-155.

Faller, J. Y., & Heymann, H. (1996). Sensory and physical properties of extruded potato puffs. *Journal of Sensory Studies*, *11*(3), 227-245.

Fan, T. Y., & Sosulski, F. W. (1974). Dispersibility and isolation of proteins from legume flours. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, *7*(4), 256-259.

Faraj, A., Vasanthan, T., & Hoover, R. (2004). The effect of extrusion cooking on resistant starch formation in waxy and regular barley flours. *Food Research International*, *37*(5), 517-525.

Faubion, J. M., & Hoseney, R. C. (1982). High-temperature short-time extrusion of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. *Cereal chemistry*, *59*, 529-533.

Fellows, P. J. (2000). *Food processing techology: principles and practice*. London: Ellis Horwood.

Fennema, O. R. (1996). *Food chemistry*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Fernandez-Gutierrez, J. A., Martin-Martinez, E. S., Martinez-Bustos, F., & Cruz-Orea, A. (2004). Physicochemical Properties of Casein-Starch Interaction Obtained by Extrusion Process. *Starch - Stärke*, *56*(5), 190-198.

FFT(Food_For_Thought) (2011). Savoury Snacks in Europe (Potato Crisps, Nuts, Savoury Biscuits, Extruded Snacks). http://www.fft.com/index.php?module=rspecial&page=specialReports.

Figura, L. O., & Teixeira, A. A. (2007). *Food Physics: Physical Properties – Measurement and Application*. Berlin, Germany: Springer.

Fornal, L., Soral-Smietana, M., Smietana, Z., & Szpendowski, J. (1987). Chemical characteristics and physico-chemical properties of the extruded mixtures of cereal starches. *Starch - Stärke*, *39*(3), 75-78.

Fox, T. G., & Flory, P. J. (1950). Second-order transition temperatures and related properties of polystyrene. I. Influence of molecular weight. *J Appl Phys*, *21*, 581-590.

Frame, N. D. (1994). *The technology of extrusion cooking*. London: Blakie Academic & Professional.

Francis, F. J. (1983). Colorimetry of foods. In: M. Peleg, & E. B. Bagley, *Physical Properties of Foods* (pp. 105–123). Westport: AVI.

Frazier, P. J., Crawshaw, A., Daniels, N. W. R., & Russell Eggitt, P. W. (1983). Optimisation of process variables in extrusion texturing of soya. *Journal of Food Engineering*, *2*(2), 79-103.

Galloway, G. I., Biliaderis, C. G., & Stanley, D. W. (1989). Properties and Structure of Amylose-Glyceryl Monostearate Complexes Formed in Solution or on Extrusion of Wheat Flour. *Journal of Food Science*, *54*(4), 950-957.

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Foams*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: Cambridge University Press.

Godavarti, S., & Karwe, M. V. (1997). Determination of Specific Mechanical Energy Distribution on a Twin-Screw Extruder. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *67*(4), 277-287.

Gogoi, B. K., & Yam, K. L. (1994). Relationships between residence time and process variables in a corotating twin-screw extruder. *Journal of Food Engineering*, *21*(2), 177-196.

Gomez, M. H., & Aguilera, J. M. (1983). Changes in the Starch Fraction During Extrusion-cooking of Corn. *Journal of Food Science*, *48*(2), 378-381.

Gomez, M. H., & Aguilera, J. M. (1984). A Physicochemical Model for Extrusion of Corn Starch. *Journal of Food Science*, *49*(1), 40-43.

González, R. J., Torres, R. L., De Greef, D. M., & Guadalupe, B. A. (2006). Effects of extrusion conditions and structural characteristics on melt viscosity of starchy materials. *Journal of Food Engineering*, *74*(1), 96-107.

Gordon, D. (1999). Defining dietary fiber. *Cereal Foods World*, *44*(2), 74.

Gordon, M., & Taylor, J. S. (1952). Ideal copolymers and the 2nd-order transitions of synthetic rubbers.1. Non-crystalline copolymers. *Journal of Applied Chemistry*, *2*, 493–500.

Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards–A. Physics and Chemistry*, *81A*(1), 89-96.

Guan, J., & Hanna, M. A. (2004). Functional properties of extruded foam composites of starch acetate and corn cob fiber. *Industrial Crops and Products*, *19*(3), 255-269.

Guarrera, P. M. (2005). Traditional phytotherapy in central Italy (Marche, Abruzzo, and Latium). *Fitoterapia*, *76*, 1-25.

Gueguen, J., & Cerlettiand, P. (1994). Proteins of some legume seeds: soybean, pea, fababean and lupin. In: B. J. F. Hudson, *New and Developing Sources of Food Proteins* (pp. 145–183). London: Chapman and Hall.

Guessasma, S., Chaunier, L., Della Valle, G., & Lourdin, D. (2011). Mechanical modelling of cereal solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, *22*(4), 142-153.

Gujska, E., & Khan, K. (1990). Effect of Temperature on Properties of Extrudates from High Starch Fractions of Navy, Pinto and Garbanzo Beans. *Journal of Food Science*, *55*(2), 466-469.

Gujska, E., & Khan, K. (1991a). Feed Moisture Effects on Functional Properties, Trypsin Inhibitor and Hemagglutinating Activities of Extruded Bean High Starch Fractions. *Journal of Food Science*, *56*(2), 443-447.

Gujska, E., & Khan, K. (1991b). Functional Properties of Extrudates from High Starch Fractions of Navy and Pinto Beans and Corn Meal Blended with Legume High Protein Fractions. *Journal of Food Science*, *56*(2), 431-435.

Guy, R. (2001). *Extrusion Cooking: Technologies and applications*. Boca Raton: CRC Press.

Guy, R. C. E. (1994). Raw material for extrusion cooking processes. In: N. D. Frame, *The Technology of Extrusion Cooking* (pp. 52-72). London: Blakie Academic & Professional.

Guy, R. C. E., & Home, A. E. (1988). Extrusion and co-extrusion of cereals. In: J. M. V. Blanshard, & J. R. Mitchell, *Food Structure - Its Creation and Evaluation* (pp. 331-349). London: Butterworth-Heinemann.

Guzman, T. C., Lee, T.-C., & Chichester, C. O. (1992). Lipid binding during extrusion cooking. In: J. L. Kokini, C. T. Ho, & M. V. Karwe, *Food Extrusion Science and Technology* (pp. 427-436). New York: Marcel Dekker.

Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, *43*(1), 38-46.

Hager, D. F. (1984). Effects of extrusion upon soy concentrate solubility. *J. Agric. Food Chem.*, *32*(2), 293-296.

Halsey, G. D. (1948). Physical adsorption of non-uniform surfaces. *J. Chem. Phys.*, *16*(10), 931-937.

Halsey, G. D. (1952). The role of surface heterogeneity in adsorption. *Adv. Catalysis*, *4*, 211.

Harper, J. M. (1980). *Extrusion of foods*. Boca Raton: CRC Press.

Harper, J. M. (1986). Extrusion texturization of foods. *Food Technology*, *40*(3), 70-76.

Hayter, A., Kirby, A. R., & Smith, A. C. (1989). The physical properties of extruded food foams. In: H. G. Ang, *Trends in Food Processing*, vol. 1 (pp. 265–274). Singapore: Institute of Food Science and Technology.

Hayter, A. L., & Smith, A. C. (1988). The mechanical properties of extruded food foams. *Journal of Materials Science*, *23*(2), 736-743.

Heidenreich, S., Jaros, D., Rohm, H., & Ziems, A. (2004). Relationship between water activity and crispness of extrded rice crisps. *Journal of Texture Studies*, *35*(6), 621-633.

Henderson, S. M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *.Agric. Eng.*, *33*, 29-32.

Hernandez-Diaz, J. R., Quintero-Ramos, A., Barnard, J., & Balandran-Quintana, R. R. (2007). Functional Properties of Extrudates Prepared with Blends of Wheat Flour/Pinto Bean Meal with Added Wheat Bran. *Food Science and Technology International*, *13*(4), 301-308.

Hill, S. (1996). Emulsions. In: G. M. Hall, *Methods of testing protein functionality* (pp. 153-185). London, UK: Blackie Academic & Professional.

Holland, B., Unwin, I. D., & Buss, D. H. (1988). *Cereals and Cereal Products. Third Supplement to McCance and Widdowson's The Composition of Foods*. Nottingham: Royal Society of Chemistry.

Hoover, R., & Sosulski, F. W. (1990). Composition, structure, functionality and chemical modification of legume starches: A review. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, *69*(1), 79-92.

Horstaman, C., Schlesier, B., Otto, A., Kostka, S., & Muntz, K. (1993). Polymorphism of legumin subunits from field bean (Vicia faba L. var. minor) and its relation to the corresponding multigene family. *Theor. Appl. Gen.*, *86*, 867 - 864.

Hoseney, R. C. (1994). *Principles of cereal science and technology*. USA: American Association of Cereal Chemists.

Huang, C. L., & Sumpio, B. E. (2008). Olive Oil, the Mediterranean Diet, and Cardiovascular Health. *Journal of the American College of Surgeons*, *207*(3), 407-416.

Huang, D. (2001). Selecting an optimum starch for snack development. *Cereal Foods World*, *46*(6), 237-239.

Huber, A. T., & Gibson, L. J. (1988). Anisotropy of foams. *Journal of Materials Science*, *23*(8), 3031-3040.

Huber, G. R. (2001). Snack Foods from Cooking Extruders. In: R. W. Lucas, & L. W. Rooney, *Snacks Food Processing* (pp. 1-33). Boca Raton, FL: CRC Press.

Huth, M., Dongowski, G., Gebhardt, E., & Flamme, W. (2000). Functional Properties of Dietary Fibre Enriched Extrudates from Barley. *Journal of Cereal Science*, *32*(2), 115-128.

Iglesias, H., & Chirife, J. (1978). An empirical equation for fitting water sorption isotherms of fruits and related products. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, *11*, 12-15.

Iglesias, H., Chirife, J., & Viollaz, P. (1976). Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. *International Journal of Food Science & Technology*, *11*(1), 91-101.

Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1982). *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components*. New York: Academic Press.

Ilo, S., Tomschik, U., Berghofer, E., & Mundigler, N. (1996). The Effect of Extrusion Operating Conditions on the Apparent Viscosity and the Properties of Extrudates in Twin-Screw Extrusion Cooking of Maize Grits. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, *29*(7), 593-598.

Iwe, M. O. (1998). Effects of extrusion cooking on functional properties of mixtures of full-fat soy and sweet potato. *Plant Foods for Human Nutrition (Formerly Qualitas Plantarum)*, *53*(1), 37-46.

Jones, J. M. (2006). Nutrition. *Cereal Foods World*, *51*(5), 284-286.

Jowitt, R. (1974). The terminology of food texture. *Journal of Texture Studies*, *5*(3), 351-358.

Kühn, J. (1964). A new theoretical analysis of adsorption phenomena. Introductory part: The characteristic expression of the main regular types of adsorption isotherms by a single simple equation. *Journal of Colloid Science*, *19*, 685-698.

Kadan, R. S., Bryant, R. J., & Pepperman, A. B. (2003). Functional Properties of Extruded Rice Flours. *Journal of Food Science*, *68*(5), 1669-1672.

Kaletunc, G., & Breslauer, K. J. (1993). Glass Transition of Extrudates: Relationship with Processing-Induced Fragmentation and End-Product Attributes. *Cereal Chemistry*, *70*(5), 548-552.

Kaletunç, G., & Breslauer, K. J. (1996). Construction of a wheat-flour state diagram. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *47*(5), 1267-1288.

Kaletunç, G., & Breslauer, K. J. (2003). Calorimetry of pre- and post-extruded cereal flours. In: G. Kaletunç, & K. J. Breslauer, *Characterization of cereals and flours. Properties, analysis, and applications* (pp. 1-35). New York, USA: Marcel Dekker.

Kalichevsky, M. T., Blanshard, J. M. V., & Marsh, R. D. L. (1993a). Applications of mechanical spectroscopy to the study of glassy biopolymers and related systems. In: B. J.M.V., & P. J. Lillford, *The Glassy State in Foods* (pp. 133-156). Nottingham, UK: University Press.

Kalichevsky, M. T., Jaroszkiewicz, E. M., Ablett, S., Blanshard, J. M. V., & Lillford, P. J. (1992). The glass transition of amylopectin measured by DSC, DMTA and NMR. *Carbohydrate Polymers*, *18*(2), 77-88.

Kalichevsky, M. T., Jaroszkiewicz, E. M., & Blanshard, J. M. V. (1993b). A study of the glass transition of amylopectin--sugar mixtures. *Polymer*, *34*(2), 346-358.

Kao, S. V., & Allison, G. R. (1984). Residence time distribution in a twin screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, *24*(9), 645-651.

Kinsella, J. E. (1976). Functional properties of proteins in foods: A survey. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *7*, 219–238.

Kodagoda, L. P., Yeung, C. Y., Nakai, S., & Powrie, W. D. (1973). Preparation of protein isolates from Rapeseed flour. *Canadian Institute of Food Science & Technology Journal*, *6*(3), 135-141.

Kokini, J. L., Ho, C. T., & Karwe, M. V. (1992). *Food extrusion Science and technology*. New York: Marcel Dekker.

Kollengode, A. N. R., & Hanna, M. A. (1997a). Cyclodextrin complexed flavors retention in extruded starches. *Journal of Food Science*, *62*(5), 1057-1060.

Kollengode, A. N. R., & Hanna, M. A. (1997b). Flavor retention in pregelatinized and internally flavored starch extrudates. *Cereal chemistry*, *74*(4), 396–399.

Koshiyama, I. (1983). Storage proteins of soybean. In: W. Gottschalk, & H. P. Mulle, *Seed ProteinsBiochemistry, Genetics, Nutritive Value* (p. 428): The Hague: Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk

Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology: An International Journal*, *15*(10), 2441 - 2458.

Kulp, K., & Ponte, J. G. (2000). *Handbook of Cereal Science and Technology*. New York: Marcel Dekker.

Kumagai, H., Kumagai, H., & Yano, T. (1993). Critical bubble radius for expansion in extrusion cooking. *Journal of Food Engineering*, *20*(4), 325-338.

Kupongsak, S., & Tan, J. (2006). Control of a food process based on sensory evaluations. *Journal of Food Process Engineering*, *29*(6), 675-688.

Launay, B., & Lisch, J. M. (1983). Twin-screw extrusion cooking of starches: Flow behaviour of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates. *Journal of Food Engineering*, *2*(4), 259-280.

Lazou, A., & Krokida, M. (2010a). Functional properties of corn and corn-lentil extrudates. *Food Research International*, *43*(2), 609-616.

Lazou, A., & Krokida, M. (2010b). Structural and textural characterization of corn-lentil extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, *100*(3), 392-408.

Lazou, A., & Krokida, M. (2011). Thermal characterisation of corn-lentil extruded snacks. *Food Chemistry*, *127*(4), 1625-1633.

Lazou, A., Krokida, M., & Tzia, C. (2010c). Sensory properties and acceptability of corn and lentil extruded puffs. *Journal of Sensory Studies*, *25*(6), 838-860.

Lazou, A. E., Krokida, M. K., Karathanos, V. T., & Marinos-Kouris, D. (2010d). Mechanical Properties of Corn-Legume Based Extrudates. *International Journal of Food Properties*, *13*(4), 847 - 863.

Lazou, A. E., Michailidis, P. A., Thymi, S., Krokida, M. K., & Bisharat, G. I. (2007). Structural Properties of Corn-Legume Based Extrudates as a Function of Processing Conditions and Raw Material Characteristics. *International Journal of Food Properties*, *10*(4), 721 - 738.

Le Meste, M., Champion, D., Roudaut, G., Blond, G., & Simatos, D. (2002). Glass Transition and Food Technology: A Critical Appraisal. *Journal of Food Science*, *67*(7), 2444-2458.

Lee, K.-A., & Brennand, C. P. (2005). Physico-chemical, textural and sensory properties of a fried cookie system containing soy protein isolate. *International Journal of Food Science & Technology*, *40*(5), 501-508.

Levine, H., & Slade, L. (1990). Influences of the glassy and rubbery states on the thermal, mechanical and structural properties of doughs and baked products. In: H. Faridi, & J. M. Faubion, *Dough Rheology and Baked Product Texture* (pp. 157–330). New York: Van Nostrand Reinhold.

Levine, H., & Slade, L. (1993). The glassy state in applications for the food industry, with an emphasis on cookie and cracker production. In: J. M. V. Blanshard, & P. J. Lillford, *The Glassy State in Foods* (pp. 333–373). Nottingham, UK: University Press.

Levine, L., & Miller, R. C. (2007). Extrusion processes. In: D. R. Heldman, & D. B. Lund, *Handbook of Food Engineering* (pp. 799-846). Roca Raton: CRC Press.

Lewicki, P. P. (2009). Data and Models of Water Activity II: Solid Foods. In: M. S. Rahman, *Food Properties Handbook* (pp. 67-153). New York: CRC Press.

Li, M., & Lee, T.-C. (2000). Effect of Extrusion Temperature on the Solubility and Molecular Weight of Lentil Bean Flour Proteins Containing Low Cysteine Residues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*(3), 880-884.

Li, S.-q., Zhang, H. Q., Tony Jin, Z., & Hsieh, F.-h. (2005). Textural modification of soya bean/corn extrudates as affected by moisture content, screw speed and soya bean concentration. *International Journal of Food Science and Technology*, *40*(7), 731-741.

Liadakis, G. N., Floridis, A., Tzia, C., & Oreopoulou, V. (1993). Protein isolates with reduced gossypol content from screw-pressed cottonseed meal. *J. Agric. Food Chem.*, *41*(6), 918-922.

Liang, M., Huff, H. E., & Hsieh, F. H. (2002). Evaluating Energy Consumption and Efficiency of a Twin-Screw Extruder. *Journal of Food Science*, *67*(5), 1803-1807.

Lin, J. K., & Armstrong, D. J. (1990). Process variables affecting residence time distributions of cereals in an intermeshing, counter-rotating, twin-screw extruder. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, *33*(6), 1971-1978

Lin, S., Huff, H. E., & Hsieh, F. (2002). Extrusion Process Parameters, Sensory Characteristics, and Structural Properties of a High Moisture Soy Protein Meat Analog. *Journal of Food Science*, *67*(3), 1066-1072.

Liu, R. H. (2007). Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science*, *46*(3), 207-219.

Liu, Y., Hsieh, F., Heymann, H., & Huff, H. E. (2000). Effect of Process Conditions on the Physical and Sensory Properties of Extruded Oat-Corn Puff. *Journal of Food Science*, *65*(7), 1253-1259.

Lombardi-Boccia, G., Lullo, G. D., & Carnovale, E. (1991). *In-vitro* iron dialysability from legumes: Influence of phytate and extrusion cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *55*(4), 599-605.

Luyten, H., & Vliet, T. V. (2006). Acoustic emission, fracture behavior anf morphology of dry crispy foods: A discussion article. *Journal of Texture Studies*, *37*(3), 221-240.

Macrae, R., Robinson, R. K., & Sadler, M. J. (1993). *Encyclopaedia of Food Science, Food Technology and Nutrition*. London: Academic Press.

Maga, J. A., & Sizer, C. E. (1978). Ascorbic acid and thiamin retention during extrusion of potato flakes. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, *11*(4), 192-194.

Makri, E., Papalamprou, E., & Doxastakis, G. (2005). Study of functional properties of seed storage proteins from indigenous European legume crops (lupin, pea, broad bean) in admixture with polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, *19*(3), 583-594.

Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2003). *Food process design*. New York: Marcel Dekker.

Maroulis, Z. B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D., & Saravacos, G. D. (1988). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *Journal of Food Engineering*, *7*(1), 63-78.

Martinez, C., & Prodolliet, J. (1996). Determination of Amylose in Cereal and Non-Cereal Starches by a Colorimetric Assay: Collaborative Study. *Starch - Stärke*, *48*(3), 81-85.

Marzec, A., Lewicki, P. P., & Ranachowski, Z. (2007). Influence of water activity on acoustic emission of flat extruded bread. *Journal of Food Engineering*, *79*(2), 410-422.

Matthey, F. P., & Hanna, M. A. (1997). Physical and Functional Properties of Twin-screw Extruded Whey Protein Concentrate-Corn Starch Blends. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, *30*(4), 359-366.

Mazumder, P., Roopa, B. S., & Bhattacharya, S. (2007). Textural attributes of a model snack food at different moisture contents. *Journal of Food Engineering*, *79*(2), 511-516.

McPherson, A. E., Bailey, T. B., & Jane, J. (2000). Extrusion of cross-linked hydroxypropylated corn starches. I. Pasting properties. *Cereal chemistry*, *77*(3), 320–325.

McWilliams, M. (1993). *Foods: Experimental Perspectives*. New York: Macmillan Publishing Company.

Mercier, C., & Feillet, P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion cooking of cereal products. *Cereal chemistry*, *52*, 283-297.

Mercier, C., Linko, P., & Harper, J. M. (1989). Extrusion Cooking. *American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA*, 339-370.

Mezreb, K., Goullieux, A., Ralainirina, R., & Queneudec, M. (2003). Application of image analysis to measure screw speed influence on physical properties of corn and wheat extrudates. *Journal of Food Engineering*, *57*(2), 145-152.

Michailidis, P. A., Krokida, M. K., Bisharat, G. I., Marinos-Kouris, D., & Rahman, M. S. (2009). Measurement of Density, Shrinkage, and Porosity. In: M. S. Rahman, *Food Properties Handbook* (pp. 398-415). New York: CRC Press.

Miller, H. E., Rigelhof, F., Marquart, L., Prakash, A., & Kanter, M. (2000). Antioxidant content of whole grain breakfast cereals, fruits and vegetables. *Journal of the American College of Nutrition*, *19*, 312S–319S.

Mohamed, A. A. A., Jowitt, R., & Brennan, J. G. (1982). Instrumental and sensory evaluation of crispness: I--In friable foods. *Journal of Food Engineering*, *1*(1), 55-75.

Moore, G. (1994). Snack food extrusion. In: N. D. Frame, *The Technology of Extrusion Cooking* (pp. 110–143). London: Blackie Academic and Professional.

Moraru, C. I., & Kokini, J. L. (2003). Nucleation and Expansion During Extrusion and Microwave Heating of Cereal Foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *2*(4), 147-165.

Moraru, C. I., Lee, T.-C., Karwe, M. V., & Kokini, J. L. (2002). Phase Behavior of a Meat-Starch Extrudate Illustrated on a State Diagram. *Journal of Food Science*, *67*(8), 3026-3032.

Morr, C. V., German, B., Kinsella, J. E., Regenstein, J. M., Buren, J. P. V., Kilara, A., Lewis, B. A., & Mangino, M. E. (1985). A Collaborative Study to Develop a

Standardized Food Protein Solubility Procedure. *Journal of Food Science*, *50*(6), 1715-1718.

Morrison, W. R., & Laignelet, B. (1983). An improved colorimetric procedure for determining apparent and total amylose in cereal and other starches. *Journal of Cereal Science*, *1*(1), 9-20.

Moscicki, L., & Wojtowicz, A. (2011). Raw Materials in the Production of Extrudates. In: L. Moscicki, *Extrusion-Cooking Techniques: Applications, Theory and Sustainability* (pp. 45-63). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Muelenaere, H. J. H., & Buzzard, J. C. (1969). Cooker extruders in service of world feeding. *Food Technology*, *24*, 71-77.

Murray, D. R. (1979). A storage role of albumin in pea cotyledons. *Plant Cell Environ*, *2*, 221-226.

Myllärinen, P., Buleon, A., Lahtinen, R., & Forssell, P. (2002). The crystallinity of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*, *48*(1), 41-48.

Naes, T., & Risvik, E. (1996). *Multivariate Analysis of Data in Sensory Science*. New York: Elsevier Science.

Narayana, K., & Narasinga Rao, M. (1982). Functional Properties of Raw and Heat Processed Winged Bean (Psophocarpus tetragonolobus) Flour. *Journal of Food Science*, *47*(5), 1534-1538.

Nelson, A. L. (2001). *High-fiber ingredients*. St. Paul, MN: Eagan Press.

Nuebel, C., & Peleg, M. (1993). Compressive Stress-Strain Relationships of Two Puffed Cereals in Bulk. *Journal of Food Science*, *58*(6), 1356-1360.

Nygren, C., Hallmans, G., Jonsson, L., & Asp, N.-G. (1982). Effects of processed rye and wheat bran on glucose metabolism. In: *International Symposium on Fibre in Human and Animal Nutrition*. Palmerston North, New Zealand.

Obatolu, V. A., Omueti, O. O., & Adebowale, E. A. (2006). Qualities of extruded puffed snacks from maize/soybean mixture. *Journal of Food Process Engineering*, *29*(2), 149-161.

Ohr, L. M. (2010). From beans to nuts. *Food Technology*, *64*(4), 61-66.

Okarter, N., & Liu, R. H. (2010). Health Benefits of Whole Grain Phytochemicals. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *50*(3), 193 - 208.

Oliveira, M. A., Moller-Holst, S., Haaland, H., & Roselund, G. (1992). The effects of process parameters on expansion of extruded feeds. In: J. L. Kokini, C. T. Ho, & M. V. Karwe, *Food Extrusion Science and Technology* (pp. 669-). New York: Marcel Dekker.

Onwulata, C., & Heymann, H. (1994). Sensory properties of extruded corn meal related to the spatial distribution of process conditions. *Journal of Sensory Studies*, *9*(1), 101-112.

Onwulata, C. I., Smith, P. W., Konstance, R. P., & Holsinger, V. H. (2001). Incorporation of whey products in extruded corn, potato or rice snacks. *Food Research International*, *34*(8), 679-687.

Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. Isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, *65*, 419-421.

Panagiotakos, D. B. (2005). More evidence that a healthy lifestyle matters: Converting epidemiology to policy. *Evidence-Based Healthcare and Public health*, *9*(2), e1-e2.

Panagiotakos, D. B., Pitsavos, C., & Stefanadis, C. (2006). Dietary patterns: A Mediterranean diet score and its relation to clinical and biological markers of cardiovascular disease risk. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, *16*(8), 559-568.

Patel, M. T., & Kilara, A. (1990). Studies on Whey Protein Concentrates. 2. Foaming and Emulsifying Properties and their Relationships with Physicochemical Properties. *Journal of Dairy Science*, *73*(10), 2731-2740.

Pearce, K. N., & Kinsella, J. E. (1978). Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *26*(3), 716-723.

Peleg, M. (1983). The semantics of rheology and texture. *Food Technology*, *37*(11), 54-61.

Peleg, M., & Normand, M. D. (1993). Determination of the Fractal Dimension of the Irregular, Compressive Stress-Strain Relationships of brittle, crumbly particulates. *Particle and Particle Systems Characterization*, *10*(6), 301-307.

Pérez-López, F. R., Chedraui, P., Haya, J., & Cuadros, J. L. (2009). Effects of the Mediterranean diet on longevity and age-related morbid conditions. *Maturitas*, *64*(2), 67-79.

Pinnavaia, G., & Pizzirani, S. (1998). Evaluation of the Degree of Gelatinization of Starchy Products by Water Holding Capacity. *Starch - Stärke*, *50*(2-3), 64-67.

Politz, M. L., Timpa, J. D., & Wasserman, B. P. (1994). Quantitative measurement of extrusion-induced starch fragmentation products in maize flour using nonaqueous automated gel-permeation chromatography. *Cereal chemistry*, *71*(6), 532-536

Politz, M. L., Timpa, J. D., White, A. R., & Wasserman, B. P. (1994). Non-aqueous gel permeation chromatography of wheat starch in dimethylacetamide (DMAC) and LiCl: extrusion-induced fragmentation. *Carbohydrate Polymers*, *24*(2), 91-99.

Popescu, O., Popescu, D. C., Wilder, J., & Karwe, M. V. (2001). A new approach to modelling and control of food extrusion process using artificial neural network and expert system. *Journal of Food Process Engineering*, *24*(1), 17-36.

Porres, J. M., Urbano, G., Fernández-Fígares, I., Prieto, C., Pérez, L., & Aguilera, J. F. (2002). Digestive utilisation of protein and amino acids from raw and heated lentils by growing rats. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *82*(14), 1740-1747.

Poste, L. M., Mackie, D. A., Butler, G., & Larmond, E. (1991). *Laboratory Methods for Sensory Analysis of Food*. Ottawa, Canada: Agriculture Canada.

Pιrez, A. A., Drago, S. R., Carrara, C. R., De Greef, D. M., Torres, R. L., & Gonzαlez, R. J. (2008). Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity. *Journal of Food Engineering*, *87*(3), 333-340.

Qu, D., & Wang, S. S. (1994). Kinetics of the Formations of Gelatinized and Melted Starch at Extrusion Cooking Conditions. *Starch - Stärke*, *46*(6), 225-229.

Quirijns, E. J., van Boxtel, A. J. B., van Loon, W. K. P., & van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *85*(11), 1805-1814.

Rahman, M. S. (1995). *Food Properties Handbook*. Boca Raton: CRC Press.

Rahman, M. S., & Labuza, T. P. (1999). Water activity and food preservation. In: M. S. Rahman, *Handbook of Food Preservation* (pp. 339–382). New York: Marcel Dekker.

Rahman, M. S., & Sablani, S. S. (2009). Water Activity Measurement Methods of Foods. In: M. S. Rahman, *Food Properties Handbook* (pp. 9-33). New York: CRC Press.

Ravi, R., Roopa, B. S., & Bhattacharya, S. (2007). Texture evaluation by uniaxial compression of some snack foods. *Journal of Texture Studies*, *38*(1), 135-152.

Regenstein, J. M., & Regenstein, C. E. (1984). Protein Functionality for Food Scientists. *Food Protein Chemistry* (pp. 274-334). Florida: Academic Press

Riaz, M. N. (2000). *Extruders in food applications*. Boca Raton: CRC Press.

Rizvi, S. S. H., & Benado, A. L. (1984). Thermodynamic properties of dehydrated foods. *Food Technology*, *38*(3), 83-92.

Robin, F., Engmann, J., Pineau, N., Chanvrier, H., Bovet, N., & Della Valle, G. (2010). Extrusion, structure and mechanical properties of complex starchy foams. *Journal of Food Engineering*, *98*(1), 19-27.

Rocha-Guzman, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Gonzalez-Laredo, R. F., Castillo-Antonio, P. A., Delgado-Licon, E., & Ibarra-Perez, F. (2006). Functional properties of three common bean (Phaseolus vulgaris) cultivars stored under accelerated conditions followed by extrusion. *LWT - Food Science and Technology*, *39*(1), 6-10.

Rohde, F., Normand, M. D., & Peleg, M. (1993). Effect of equilibrium relative humidity on the mechanical signatures of brittle food materials. *Biotechnol. Prog.*, *9*(5), 497-503.

Romaguera, D., Bamia, C., Pons, A., Tur, J. A., & Trichopoulou, A. (2009). Food patterns and Mediterranean diet in western and eastern Mediterranean islands. *Public Health Nutrition*, *12*(08), 1174-1181.

Roos, Y., & Karel, M. (1991). Water and Molecular Weight Effects on Glass Transitions in Amorphous Carbohydrates and Carbohydrate Solutions. *Journal of Food Science*, *56*(6), 1676-1681.

Roudaut, G., Dacremont, C., Valles Pamies, B., Colas, B., & Le Meste, M. (2002). Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science & Technology*, *13*(6-7), 217-227.

Ryan, C. A. (1990). Protease inhibitors in plants: genes for improving defenses against insects and pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.*, *28*, 425-449.

Ryu, G. H., & Ng, P. K. W. (2001). Effects of Selected Process Parameters on Expansion and Mechanical Properties of Wheat Flour and Whole Cornmeal Extrudates. *Starch - Stärke*, *53*(3-4), 147-154.

Ryu, G. H., & Walker, C. E. (1994). Cell Structure of Wheat Flour Extrudates Produced with Various Emulsifiers. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, *27*(5), 432-441.

Rzedzicki, Z., & Fornal, J. (1999). Influence of process parameters on the physical properties and microstructure of everlasting pea (Lathyrus Sativus) extrudate. *Int. Agrophysics*, *13*(1), 103-117.

Sablani, S. S., & Rahman, M. S. (2003). Using neural networks to predict thermal conductivity of food as a function of moisture content, temperature and apparent porosity. *Food Research International*, *36*(6), 617-623.

Sacchetti, G., Pinnavaia, G. G., Guidolin, E., & Rosa, M. D. (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*(5), 527-534.

Saeleaw, M., & Schleining, G. (2011). A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic-mechanical destructive techniques. *Journal of Food Engineering*, *105*(3), 387-399.

Sandoval, A. J., Nuρez, M., Móller, A. J., Valle, G. D., & Lourdin, D. (2009). Glass transition temperatures of a ready to eat breakfast cereal formulation and its main components determined by DSC and DMTA. *Carbohydrate Polymers*, *76*(4), 528-534.

Saravacos, G. D., & Maroulis, Z. B. (2001). Food structure and transport properties. In: G. D. Saravacos, & Z. B. Maroulis, *Transport properties of foods* (pp. 29-50). New York: CRC Press.

Sarwar, G., & Peace, R. (1986). Comparisons between true digestibility of total nitrogen and limiting amino acids in vegetables fed to rats. *J Nutr*, *114*, 1172-1184.

Sathe, S. K., Deshpande, S. S., & Salunkhe, D. K. (1982). Functional Properties of Winged Bean [Psophocarpus tetragonolobus (L.) DC] Proteins. *Journal of Food Science*, *47*(2), 503-509.

Scarafoni, A., & Duranti, M. (2002). *Grain Legume 37*, 10.

Senanayake, S. A. M. A. N. S., & Clarke, B. (1999). A simplified twin screw co-rotating food extruder: design, fabrication and testing. *Journal of Food Engineering*, *40*(1-2), 129-137.

Séne, M., Thévenot, C., & Prioul, J. L. (1997). Simultaneous Spectrophotometric Determination of Amylose and Amylopectin in Starch from Maize Kernel by Multi-wavelength Analysis. *Journal of Cereal Science*, *26*(2), 211-221.

Shpande, S. S., & Nielsen, S. S. (1987). In Vitro Enzymatic Hydrolysis of Phaseolin, the Major Storage Protein of Phaseolus Vulgaris L. *Journal of Food Science*, *52*(5), 1326-1329.

Singh, B., Sekhon, K. S., & Singh, N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry*, *100*(1), 198-202.

Skierkowski, K., Gujska, E., & Khan, K. (1990). Instrumental and Sensory Evaluation of Textural Properties of Extrudates from Blends of High Starch/High Protein Fractions of Dry Beans. *Journal of Food Science*, *55*(4), 1081-1083.

Slade, L., & Levine, H. (1993). The glassy state phenomenon in food molecules. In: J. M. V. Blanshard, & P. J. Lillford, *The Glassy State in Foods* (pp. 35-101). Nottingham, UK: University Press.

Slade, L., & Levine, H. (1994). Water and the glass transition -- Dependence of the glass transition on composition and chemical structure: Special implications for flour functionality in cookie baking. *Journal of Food Engineering*, *22*(1-4), 143-188.

Sloan, A. E. (2010a). Consumers are big fans of small appliances. *Food Technology*, *64*(5), 18-19.

Sloan, A. E. (2010b). Top 10 functional food trends. *Food Technology*, *64*(4), 23-43.

Smith, A. C. (2003). Textural characterization of extruded materials and influence of common additives. In: G. Kaletunc, & K. J. Breslauer, *Characterization of Cereals and Flours: Properties, Analysis And Applications* (pp. 311-351). New York: CRC Press.

Smith, S. E. (1947). The sorption of water vapor by high polymers. *Journal of the American Chemical Society*, *69*, 646-651.

Sperling, L. (1992). *Introduction to Physical Polymer Science*. New York: Wiley.

Stanley, D. W. (1986). Chemical and structural determinants of texture of fabricated foods. *Food Technology*, *40*(3), 65-68.

Stanley, D. W. (1989). Protein reactions during extrusion cooking. In: C. Mercier, P. Linko, & J. M. Harper, *Extrusion Cooking* (pp. 321-342). St Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

Stone, H., & Sidel, J. L. (1995). Strategic applications for sensory evaluation in a global market. *Food Technology*, *49*(2), 80-89.

Sumner, A. K., Nielsen, M. A., & Youngs, C. G. (1981). Production and Evaluation of Pea Protein Isolate. *Journal of Food Science*, *46*(2), 364-366.

Sun, Y., & Muthukumarappan, K. (2002). Changes in functionality of soy-based extrudates during single screw extrusion processing. *International Journal of Food Properties*, *5*(2), 379 - 389.

Szczesniak, A. S. (1963). Objective Measurements of Food Texture. *Journal of Food Science*, *28*(4), 410-420.

Taggart, P. (2000). Starch as an ingredient: manufacture and applications. In: A.-C. Eliasson, *Starch in food: Structure, function and applications*. Boca-Raton, USA: CRC Press.

Tan, J., Zhang, H., & Gao, X. (1997). SEM image processing for food structure analysis. *Journal of Texture Studies*, *28*(6), 657-672.

Tayeb, J., Della Valle, G., Barrès, C., & Vergnes, B. (1992). Simulation of transport phenomena in twin screw extruders. In: J. L. Kokini, C. T. Ho, & M. V. Karwe, *Food Extrusion Science and Technology* (pp. 41-70). New York: Marcel Dekker.

Tharanathan, R. N., & Mahadevamma, S. (2003). Grain legumes--a boon to human nutrition. *Trends in Food Science & Technology*, *14*(12), 507-518.

Theander, O., & Westerlund, E. (1987). Studies on Chemical Modifications in Heat-processed Starch and Wheat Flour. *Starch - Stärke*, *39*(3), 88-93.

Thymi, S., Krokida, M. K., Pappa, A., & Maroulis, Z. B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering*, *68*(4), 519-526.

Todd, D. B. (1975). Residence time distribution in twin-screw extruders. *Polymer Engineering & Science*, *15*(6), 437-443.

Tolstoguzov, V. B. (2000). The importance of glassy biopolymer components in food. *Nahrung/Food*, *44*(2), 76-84.

Trichopoulou, A., Bamia, C., & Trichopoulos, D. (2009). Anatomy of health effects of Mediterranean diet: Greek EPIC prospective cohort study. *BMJ*, *338*(jun23_2), b2337-.

Tucci, M., Capparelli, R., Costa, A., & Rao, R. (1991). Molecular heterogeneity and genetics of Vicia faba seed storage proteins. *Theor. Appl. Genet.*, *81*, 50–58.

Ueberreiter, K., & Kanig, G. (1952). Self-plasticization of polymers. *J Coll Sci*, *7*, 569-583.

Ummadi, P., Chenoweth, W. L., & Uebersax, M. A. (1995). The influence of extrusion processing on iron dialyzability, phytates and tannins in legumes. *Journal of Food Processing and Preservation*, *19*(2), 119-131.

Valles Pamies, B., Roudaut, G., Dacremont, C., Le Meste, M., & Mitchell, J. R. (2000). Understanding the texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*(11), 1679-1685.

Van Hecke, E., Allaf, K., & Bouvier, J. M. (1998). Texture and structure of crispy-puffed food products part II: Mechanical properties in puncture. *Journal of Texture Studies*, *29*(6), 617-632.

Van Zuilichem, D. J., Jager, T., Stolp, W., & de Swart, J. G. (1988). Residence time distributions in extrusion cooking. Part III: Mathematical modelling of the axial mixing in

a conical, counter-rotating, twin-screw extruder processing maize grits. *Journal of Food Engineering*, *8*(2), 109-127.

Vara-Ubol, S., Chambers, E., & Chambers, D. H. (2004). Sensory characteristics of chemical compouds potentially associated with beany aroma in foods. *Journal of Sensory Studies*, *19*(1), 15-26.

Varo, P., Laine, R., & Koivistoinen, P. (1983). Effect of heat treatment on dietary fiber: interlaboratory study. *J Assoc Off Anal Chem*, *66*(4), 933-938.

Varo, P., Veijalainen, K., & Koivistoinen, P. (1984). Effect of heat treatment on the dietary fibre contents of potato and tomato. *International Journal of Food Science & Technology*, *19*(4), 485-492.

Vickers, Z., & Bourne, M. C. (1976). A psychoacoustical theory of crispness. *Journal of Food Science*, *41*(5), 1158-1164.

Vickers, Z. M. (1985). The relationships of pitch, loudness and eating technique to judgments of the crispness and crunchiness of food sound. *Journal of Texture Studies*, *16*(1), 85-95.

Vickers, Z. M. (1988). Evaluation of crispness. In: J. M. V. Blanshard, & J. R. Mitchell, *Food Structure: Its Creation and Evaluation* (pp. 433-448). London: Butterworths.

Vincent, J., F. V. (1998). The quantification of crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *78*(2), 162-168.

Walstra, P. (2003). Proteins. *Physical Chemistry of Foods* (pp. 203-248). New York: Marcel Dekker, Inc.

Wang, L., Ganjyal, G. M., Jones, D. D., Weller, C. L., & Hanna, M. A. (2005). Modeling of bubble growth dynamics and nonisothermal expansion in starch-based foams during extrusion. *Advances in Polymer Technology*, *24*(1), 29-45.

Wang, N., Bhirud, P. R., & Tyler, R. T. (1999). Extrusion Texturization of Air-Classified Pea Protein. *Journal of Food Science*, *64*(3), 509-513.

Wang, W. M., & Klopfenstein, C. F. (1993). Effect of Twin-Screw Extrusion on the Nutritional Quality of Wheat, Barley, and Oats. *Cereal chemistry*, *70*(6), 712-715.

Wang, Y., & Tan, J. (2000). Dual-target predictive control and application in food extrusion. *Control Engineering Practice*, *8*(9), 1055-1062.

Warburton, S. C., Donald, A. M., & Smith, A. C. (1992). Structure and mechanical properties of brittle starch foams. *Journal of Materials Science*, *27*(6), 1469-1474.

Ward, I. M. (1983). *Mechanical Properties of Solid Polymers*. New York: Wiley Interscience.

Wolf, D., Holin, N., & White, D. H. (1986). Residence time distribution in a commercial twin-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, *26*(9), 640-646.

Wolf, D., & White, D. H. (1976). Experimental study of the residence time distribution in plasticating screw extruders. *AIChE Journal*, *22*(1), 122-131.

Wood, P. (1997). Functional foods for health: opportunities for novel cereal processes and products. In: G. M. Campbell, C. Webb, & S. L. McKee, *Cereals Novel Uses and Processes* (pp. 233–239). New York: Plenum Press.

Wright, D. J. (1986). The seed globulins. In: B. J. F. Hudson, *Development in Food Proteins*, vol. 5 (pp. 81–157). Amsterdam: Elsevier.

Wulansari, R., Mitchell, J. R., & Blanshard, J. M. V. (1999). Starch Conversion During Extrusion as Affected by Added Gelatin. *Journal of Food Science*, *64*(6), 1055-1058.

Wunderlich, B. (1990). *Thermal Analysis*. San Diego, CA: Academic Press.

Yeh, A., I. , Hwang, S.-J., & Guo, J.-J. (1992). Effects of screw speed and feed rate on residence time distribution and axial mixing of wheat flour in a twin-screw extruder. *Journal of Food Engineering*, *17*(1), 1-13.

Yeu, K., Lee, Y., & Lee, S. Y. (2008). Consumer Acceptance of an Extruded Soy-Based High-Protein Breakfast Cereal. *Journal of Food Science*, *73*(1), S20-S25.

Yu, X., Houtman, C., & Atalla, R. H. (1996). The complex of amylose and iodine. *Carbohydrate Research*, *292*, 129-141.

Zelenzak, K. J., & Hoseney, R. C. (1987). The Glass Transition in Starch. *Cereal Chemistry*, *64*(2), 121-124.

Zhang, Q., Yang, S. X., Mittal, G. S., & Yi, S. (2002). AE-Automation and Emerging Technologies: Prediction of Performance Indices and Optimal Parameters of Rough Rice Drying using Neural Networks. *Biosystems Engineering*, *83*(3), 281-290.

Zheng, C., Sun, D.-W., & Zheng, L. (2006). Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection - a review. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(12), 642-655.

Zobel, H. F. (1988). Molecules to Granules: A Comprehensive Starch Review. *Starch - Stärke*, *40*(2), 44-50.

Σούκουλης, Χ. (2009). Μελέτη δράσης των κρυοπροστατευτικών υλικών στην παραγωγή κατεψυγμένων επιδορπίων γάλακτος. *Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων* (pp. 134-155). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τζιά, Κ. (2009). Ποιότητα Τροφίμων. In: Κ. Τζιά, Π. Ταούκης, & Β. Ωραιοπούλου, *Επιστήμη και Μηχανική Τροφίμων: Συστατικά-Ιδιότητες-Ποιότητα-Μικροβιολογία-Ρεολογία-Συσκευασία* (pp. 185-221). Αθήνα: Ε.Μ. Πολυτεχνείο.

Υπ.Α.Α.Τ. (2007a). *Προοπτικές ανάπτυξης τομέα οσπρίων και κτηνοτροφικών φυτών*. Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ελλάδα.

Υπ.Α.Α.Τ. (2007b). *Προοπτικές στον τομέα σιτηρών*. Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ελλάδα.

13 Παράρτημα

Πίνακας 13-1 Μέσος χρόνος παραμονής (πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές) με βάση το πρότυπο του Πίνακα 4-5.

Υγρασία τροφοδοσίας *X* (%υ.β)	Θερμοκρασία εκβολής T (°C)	Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών *N* (rpm)	Παροχή τροφοδοσίας *F* (kg/s)	*τ exp* (s)	*τ pre* (s)	Υγρασία τροφοδοσίας *X* (%υ.β)	Θερμοκρασία εκβολής *T* (°C)	Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών *N* (rpm)	Παροχή τροφοδοσίας *F* (kg/s)	*τ exp* (s)	*τ pre* (s)
19	150	200	0,0004	63	50	19	150	250	0,0010	29	31
19	150	150	0,0004	49	58	19	150	200	0,0010	28	29
16	150	200	0,0004	54	47	16	150	200	0,0010	32	31
16	150	250	0,0004	41	39	16	150	150	0,0010	35	39
16	150	150	0,0004	61	59	16	200	150	0,0010	43	41
13	150	200	0,0004	46	50	13	200	250	0,0010	28	31
19	200	200	0,0004	55	52	19	200	200	0,0010	36	38
19	200	150	0,0004	56	57	19	200	200	0,0010	31	32
13	150	150	0,0004	54	50	19	200	200	0,0010	34	33
13	230	250	0,0004	48	47	19	230	250	0,0010	32	31
19	150	250	0,0005	32	38	19	230	150	0,0010	41	42
16	200	150	0,0005	58	63	19	200	150	0,0010	38	36
13	150	200	0,0005	40	37	13	200	200	0,0010	35	33
19	230	150	0,0005	56	56	13	200	250	0,0010	30	30
16	230	150	0,0005	58	61	13	200	150	0,0010	43	43
13	200	200	0,0005	49	51	13	230	250	0,0010	30	31
13	200	250	0,0005	42	45	13	230	200	0,0010	36	40
13	150	250	0,0005	36	35	13	230	150	0,0010	43	41
13	150	200	0,0005	43	45	19	150	200	0,0013	36	29
13	200	150	0,0005	54	53	19	150	250	0,0013	27	26
19	150	150	0,0006	48	52	16	150	250	0,0013	28	27
16	150	150	0,0006	44	45	16	200	200	0,0013	32	31
19	230	200	0,0006	46	50	16	200	150	0,0013	38	35
19	230	250	0,0006	42	43	16	200	250	0,0013	26	30
16	230	250	0,0006	45	48	16	200	250	0,0013	25	30
16	230	200	0,0006	55	49	19	200	200	0,0013	32	31
13	230	250	0,0006	47	44	19	200	250	0,0013	30	27
13	230	200	0,0006	52	51	16	230	200	0,0013	31	32
13	230	150	0,0006	55	56	19	230	200	0,0013	33	34
19	150	200	0,0007	40	39	19	230	150	0,0013	36	34
19	150	200	0,0007	39	40	16	230	250	0,0013	28	29
16	150	200	0,0007	37	43	16	230	150	0,0013	37	36
16	200	200	0,0007	39	40	19	200	150	0,0013	38	32
16	200	150	0,0007	43	48	13	200	250	0,0013	25	27
16	200	250	0,0007	33	38	13	230	200	0,0013	33	32
13	200	250	0,0007	33	34	13	230	200	0,0013	33	32
19	200	250	0,0007	38	39	19	150	250	0,0015	27	25
16	230	150	0,0007	46	45	19	150	200	0,0015	28	27
13	200	200	0,0007	44	41	16	200	200	0,0015	28	27
13	150	200	0,0007	36	36	19	200	200	0,0015	32	28
13	200	150	0,0007	48	47	19	230	250	0,0015	29	28
13	230	250	0,0007	42	39	16	230	200	0,0015	30	28
16	150	200	0,0008	35	34	13	230	250	0,0013	33	30
16	150	250	0,0008	28	31	13	230	250	0,0015	28	28
16	200	200	0,0008	38	38	16	200	250	0,0016	25	24
16	230	250	0,0008	37	38	19	230	200	0,0016	27	28
16	230	200	0,0008	41	39	16	230	250	0,0016	27	26
19	200	150	0,0008	42	46	19	200	200	0,0018	31	25
13	200	250	0,0008	39	34	19	230	200	0,0018	29	27
13	150	250	0,0008	26	30	19	200	250	0,0019	28	22
13	200	250	0,0008	32	36	16	230	250	0,0019	24	22
13	230	200	0,0008	40	42	19	230	250	0,0020	24	21
13	230	150	0,0008	46	44						
13	230	150	0,0008	44	41						
19	150	200	0,0010	26	30						
19	150	200	0,0010	36	33						
19	150	200	0,0010	33	33						
19	150	150	0,0010	41	38						
19	150	150	0,0010	37	34						
19	150	250	0,0010	27	32						

Πίνακας 13-2 Δομικές ιδιότητες τροφίμων εκβολής (φαινόμενη πυκνότητα, συντελεστής διόγκωσης και πορώδες).

Συνθήκες εκβολής και σύσταση πρώτων υλών						Δομικές Ιδιότητες τροφίμων εκβολής			
C **(%)**	***X*** **(% υ.β.)**	***T*** **(°C)**	***F*** **(kg/h)**	ρ_α (g/cm^3)	$\rho_{\alpha\ pre}$ (g/cm^3)	***Exp. Ratio***	***Exp. Ratio$_{pre}$***	***Πορώδες***	***Πορώδες$_{pre}$***
0	13	170	2,52	0,086±0,004	0,104	2,652±0,106	2,411	0,937±0,005	0,928
0	13	170	4,68	0,089±0,006	0,109	2,982±0,12	3,114	0,933±0,008	0,925
0	13	200	2,52	0,087±0,011	0,096	2,037±0,119	2,021	0,944±0,006	0,934
0	13	200	4,68	0,089±0,004	0,100	2,209±0,101	2,610	0,931±0,006	0,931
0	13	230	2,52	0,105±0,005	0,089	1,725±0,083	1,736	0,935±0,005	0,939
0	13	230	4,68	0,08±0,008	0,093	2,322±0,036	2,243	0,94±0,005	0,936
0	13	230	6,84	0,094±0,001	0,095	2,707±0,052	2,506	0,935±0,003	0,934
0	16	170	2,52	0,13±0,005	0,122	2,487±0,086	2,274	0,915±0,004	0,916
0	16	170	4,68	0,126±0,004	0,128	3,07±0,175	2,937	0,915±0,006	0,912
0	16	200	2,52	0,111±0,008	0,112	1,968±0,071	1,906	0,922±0,004	0,923
0	16	200	4,68	0,107±0,005	0,117	2,428±0,079	2,462	0,922±0,004	0,919
0	16	200	6,84	0,103±0,01	0,119	2,87±0,047	2,881	0,916±0,005	0,917
0	16	230	2,52	0,112±0,004	0,104	1,735±0,064	1,638	0,918±0,004	0,929
0	16	230	4,68	0,097±0,006	0,108	2,215±0,16	2,115	0,933±0,004	0,925
0	16	230	6,84	0,108±0,003	0,112	2,729±0,157	2,475	0,93±0,003	0,923
0	19	170	2,52	0,137±0,013	0,138	2,339±0,075	2,166	0,9±0,012	0,905
0	19	170	4,68	0,154±0,007	0,145	2,852±0,12	2,798	0,896±0,007	0,900
0	19	170	6,84	0,177±0,007	0,149	2,977±0	3,274	0,887±0,005	0,897
0	19	200	2,52	0,123±0,005	0,127	1,746±0,036	1,816	0,91±0,004	0,913
0	19	200	4,68	0,124±0,003	0,133	2,427±0,127	2,346	0,916±0,002	0,908
0	19	200	6,84	0,147±0,007	0,137	2,711±0,166	2,744	0,902±0,002	0,906
0	19	230	2,52	0,123±0,009	0,118	1,527±0,091	1,560	0,917±0,007	0,919
0	19	230	4,68	0,111±0,008	0,123	2,075±0,122	2,015	0,914±0,002	0,915
0	19	230	6,84	0,13±0,002	0,127	2,496±0,023	2,358	0,909±0,004	0,913
10	13	170	2,52	0,088±0,001	0,111	2,531±0,028	2,348	0,941±0,001	0,926
10	13	170	4,68	0,105±0,006	0,117	3,007±0,133	3,033	0,927±0,006	0,923
10	13	200	2,52	0,088±0,001	0,102	1,646±0,213	1,968	0,939±0,005	0,932
10	13	200	4,68	0,092±0,002	0,107	2,339±0,137	2,542	0,937±0,002	0,929
10	13	230	2,52	0,115±0,003	0,095	1,188±0,269	1,691	0,94±0,005	0,937
10	13	230	4,68	0,095±0,014	0,099	2,135±0,208	2,184	0,938±0,009	0,934
10	16	170	2,52	0,129±0,001	0,130	2,443±0,11	2,214	0,911±0	0,914
10	16	170	4,68	0,128±0,001	0,136	3,072±0,111	2,861	0,912±0,001	0,910
10	16	200	2,52	0,111±0,003	0,119	1,401±0,013	1,856	0,914±0,001	0,921
10	16	200	4,68	0,111±0,003	0,125	2,398±0,03	2,398	0,917±0,004	0,918
10	16	200	6,84	0,122±0	0,128	2,695±0,015	2,805	0,917±0,001	0,915
10	16	230	2,52	0,125±0	0,110	1,315±0,052	1,595	0,925±0,005	0,927
10	16	230	4,68	0,107±0,005	0,116	1,963±0,056	2,060	0,928±0,003	0,923
10	16	230	6,84	0,125±0,002	0,119	2,683±0,11	2,410	0,918±0,001	0,921
10	19	170	2,52	0,157±0,006	0,148	2,142±0,022	2,110	0,9±0,012	0,905
10	19	170	4,68	0,185±0,005	0,155	2,658±0,065	2,725	0,892±0,007	0,898
10	19	170	6,84	0,189±0,005	0,159	2,706±0,006	3,189	0,891±0,009	0,895
10	19	200	2,52	0,132±0,009	0,135	1,578±0,089	1,768	0,898±0,004	0,911
10	19	200	4,68	0,152±0,006	0,142	2,156±0,047	2,284	0,904±0,007	0,906
10	19	200	6,84	0,172±0,004	0,146	2,458±0,005	2,673	0,9±0,003	0,904
10	19	230	2,52	0,126±0,002	0,125	1,229±0,031	1,519	0,926±0,002	0,917
10	19	230	4,68	0,129±0,004	0,131	1,949±0,08	1,963	0,917±0,003	0,913
10	19	230	6,84	0,15±0,004	0,135	2,535±0,077	2,296	0,904±0,007	0,911
30	13	170	2,52	0,1±0,002	0,130	2,319±0,158	2,204	0,935±0,003	0,915
30	13	200	2,52	0,129±0,021	0,119	1,89±0,144	1,848	0,917±0,012	0,922
30	13	200	4,68	0,143±0,002	0,125	2,405±0,097	2,387	0,907±0,003	0,919
30	13	230	2,52	0,137±0,003	0,111	1,387±0,03	1,588	0,924±0,007	0,928
30	13	230	4,68	0,116±0,015	0,116	1,983±0,142	2,051	0,924±0,007	0,925
30	13	230	6,84	0,155±0,005	0,119	2,14±0,041	2,400	0,919±0	0,922
30	16	170	2,52	0,14±0,002	0,152	2,226±0,044	2,079	0,909±0,003	0,901
30	16	170	4,68	0,161±0,005	0,159	2,909±0,017	2,686	0,891±0,004	0,897
30	16	200	2,52	0,127±0,003	0,139	1,657±0,058	1,743	0,916±0,003	0,910
30	16	200	4,68	0,129±0,004	0,146	2,462±0,078	2,251	0,908±0,005	0,905
30	16	200	6,84	0,127±0,007	0,150	2,706±0,065	2,634	0,907±0,006	0,902
30	16	230	2,52	0,159±0,012	0,135	1,311±0,019	1,497	0,916±0,003	0,916
30	16	230	4,68	0,136±0,001	0,129	1,691±0,009	1,934	0,911±0,003	0,912
30	16	230	6,84	0,129±0,003	0,139	2,369±0,26	2,263	0,917±0,001	0,910
30	19	170	2,52	0,179±0	0,172	1,92±0,024	1,981	0,883±0,002	0,888
30	19	170	4,68	0,199±0,005	0,180	2,656±0,012	2,559	0,88±0,008	0,883
30	19	170	6,84	0,224±0,003	0,186	2,724±0,017	2,994	0,87±0,008	0,879
30	19	200	2,52	0,155±0,009	0,158	1,428±0,02	1,660	0,899±0,004	0,897
30	19	200	4,68	0,155±0,002	0,165	2,203±0,102	2,145	0,901±0,007	0,892
30	19	200	6,84	0,177±0,004	0,170	2,463±0,002	2,510	0,884±0,003	0,889
30	19	230	2,52	0,144±0,005	0,146	1,38±0,049	1,427	0,907±0,008	0,905
30	19	230	4,68	0,134±0,004	0,153	1,848±0,177	1,843	0,901±0	0,900

30	19	230	6,84	0,144±0,006	0,158	2,208±0,123	2,156	0,903±0,005	0,897
50	13	170	2,52	0,186±0,005	0,160	2,423±0,042	2,026	0,892±0,009	0,895
50	13	170	4,68	0,176±0,005	0,168	2,676±0,069	2,617	0,89±0,01	0,890
50	13	200	2,52	0,186±0,007	0,147	1,581±0,116	1,698	0,899±0,004	0,904
50	13	200	4,68	0,172±0,011	0,154	2,236±0,098	2,194	0,896±0,002	0,899
50	13	200	6,84	0,167±0,002	0,158	2,506±0,072	2,567	0,888±0	0,896
50	13	230	2,52	0,161±0,002	0,136	1,58±0,207	1,459	0,909±0	0,911
50	13	230	4,68	0,154±0,008	0,142	2,022±0,08	1,885	0,909±0	0,906
50	13	230	6,84	0,166±0,008	0,147	2,443±0,021	2,205	0,898±0,006	0,904
50	16	170	2,52	0,159±0,005	0,187	1,938±0,113	1,911	0,886±0,01	0,877
50	16	170	4,68	0,186±0,002	0,195	2,627±0,061	2,469	0,877±0,003	0,872
50	16	170	6,84	0,196±0,01	0,201	2,587±0,001	2,888	0,868±0,008	0,868
50	16	200	2,52	0,181±0,016	0,171	1,387±0,13	1,602	0,885±0,004	0,888
50	16	200	4,68	0,151±0,004	0,179	2,132±0,051	2,069	0,894±0,005	0,882
50	16	200	6,84	0,172±0,005	0,184	2,448±0,026	2,421	0,883±0,005	0,879
50	16	230	2,52	0,202±0,001	0,159	1,229±0,032	1,376	0,879±0,008	0,896
50	16	230	4,68	0,169±0,01	0,166	1,729±0,042	1,778	0,89±0,008	0,891
50	16	230	6,84	0,168±0,004	0,171	2,268±0,048	2,080	0,889±0,002	0,888
50	19	170	2,52	0,209±0,001	0,212	1,951±0,085	1,821	0,858±0	0,861
50	19	170	4,68	0,217±0	0,222	2,354±0,022	2,352	0,859±0,003	0,854
50	19	170	6,84	0,224±0,002	0,228	2,736±0,004	2,752	0,849±0	0,850
50	19	200	2,52	0,184±0,006	0,194	1,271±0,063	1,526	0,878±0,002	0,872
50	19	200	4,68	0,191±0,006	0,203	1,867±0,023	1,971	0,872±0,005	0,866
50	19	200	6,84	0,179±0	0,209	2,326±0,087	2,306	0,869±0,002	0,863
50	19	230	2,52	0,17±0,011	0,180	1,262±0,097	1,311	0,884±0,017	0,882
50	19	230	4,68	0,16±0,002	0,189	1,737±0,005	1,694	0,878±0,002	0,876
50	19	230	6,84	0,196±0,009	0,194	2,139±0,023	1,982	0,872±0,005	0,873

Πίνακας 13-3 Ιδιότητες υφής τροφίμων εκβολής (μέτρο ελαστικότητας και αριθμός θραύσεων κατά τη συμπίεση).

C (%)	*X* (% υ.β.)	*T* (°C)	*F* (kg/h)	*E* (MPa)	*Epre* (MPa)	*N*	*Npre*
0	13	170	2,52	0,772±0,037	0,799	14,3±1,2	11,9
0	13	170	4,68	0,767±0,055	0,770	16,8±2,7	18,5
0	13	200	2,52	0,746±0,054	0,783	6,4±2	7,2
0	13	200	4,68	0,711±0,081	0,755	7,7±2,4	11,3
0	13	230	4,68	0,676±0,063	0,742	5,3±0,8	7,4
0	13	230	2,52	1,08±0,083	0,770	3,4±0,3	4,7
0	13	230	6,84	0,83±0,101	0,730	10,3±0,9	9,0
0	16	170	2,52	1,011±0,042	1,020	16,1±1,1	10,9
0	16	170	4,68	0,985±0,047	0,983	19,9±2,5	17,0
0	16	200	2,52	0,993±0,084	1,000	6,4±1,4	6,7
0	16	200	4,68	0,849±0,105	0,964	11,8±1,9	10,4
0	16	200	6,84	0,889±0,15	0,952	14,5±2,4	13,6
0	16	230	2,52	1,106±0,121	0,983	4,7±1,5	4,4
0	16	230	4,68	0,894±0,081	0,947	8±1,4	6,8
0	16	230	6,84	0,871±0,065	0,947	13,6±0,6	8,9
0	19	170	2,52	1,722±0,171	1,249	12±1	10,2
0	19	170	4,68	1,122±0,226	1,203	16,9±1	15,8
0	19	170	6,84	1,347±0,186	1,176	18,5±1,5	20,8
0	19	200	2,52	1,186±0,126	1,225	4,8±0,2	6,2
0	19	200	4,68	1,227±0,15	1,180	8,1±1	9,7
0	19	200	6,84	1,074±0,121	1,153	13,4±2,3	12,7
0	19	230	2,52	1,15±0,121	1,204	2,6±0,3	4,1
0	19	230	4,68	1,09±0,098	1,160	5,8±1,8	6,3
0	19	230	6,84	1,221±0,044	1,133	8,7±2,9	8,3
10	13	170	2,52	0,854±0,001	0,842	9,7±0,5	11,7
10	13	170	4,68	0,798±0,114	0,811	15,8±1,4	18,3
10	13	200	2,52	0,754±0,044	0,826	1,1±0,5	7,2
10	13	230	2,52	0,821±0,042	0,812	1,2±0,2	4,7
10	13	200	4,68	0,779±0,061	0,795	10,8±2,4	11,2
10	13	230	4,68	0,663±0,022	0,782	4,7±0,9	7,3
10	16	170	2,52	0,915±0,168	1,075	10,9±1,9	10,8
10	16	170	4,68	0,953±0,026	1,036	18,8±2,5	16,8
10	16	200	2,52	0,939±0,048	1,054	1,3±0,5	6,6
10	16	200	4,68	0,859±0,102	1,015	9,6±0,8	10,3
10	16	200	6,84	0,95±0,049	0,992	13,3±1,8	13,5
10	16	230	2,52	0,922±0,101	1,036	1,7±0,1	4,3
10	16	230	4,68	0,852±0,078	0,998	3,4±0,6	6,7
10	16	230	6,84	1,068±0,037	0,976	11,8±1,1	8,8
10	19	170	2,52	1,472±0,161	1,317	8,5±1,4	10,1
10	19	170	4,68	1,203±0,414	1,268	15±2,5	15,7
10	19	170	6,84	1,64±0,039	1,239	18,5±0,7	20,5
10	19	200	2,52	1,143±0,071	1,291	2,6±0	6,1
10	19	200	4,68	1,268±0,152	1,243	8,9±0,5	9,6
10	19	200	6,84	1,308±0,185	1,215	11,8±0,6	12,6
10	19	230	2,52	1,329±0,046	1,269	1,1±0,2	4,0
10	19	230	4,68	1,117±0,077	1,222	4±1,9	6,3
10	19	230	6,84	1,24±0,13	1,194	9,8±0,3	8,2
30	13	170	2,52	0,747±0,128	0,955	12,4±0	11,4
30	13	200	2,52	1,002±0,148	0,936	6,8±2,8	7,0
30	13	230	2,52	0,909±0,025	0,920	5,8±2,1	4,6
30	13	200	4,68	1,027±0,005	0,901	11,3±1,5	10,9
30	13	230	4,68	0,913±0,219	0,886	8,8±0,4	7,1

30	13	230	6,84	1,193±0,086	0,866	11±1	9,4
30	16	170	2,52	0,737±0,024	1,219	13,4±0,1	10,5
30	16	170	4,68	0,982±0,004	1,174	18,3±1,8	16,4
30	16	200	2,52	1,1±0,121	1,195	5,3±0,9	6,4
30	16	200	4,68	1,049±0,086	1,151	13,4±1,5	10,0
30	16	200	6,84	1,07±0,028	1,125	14±0,7	13,1
30	16	230	2,52	1,539±0,064	1,175	3±1,4	4,2
30	16	230	4,68	1,058±0,105	1,132	7,6±0,6	6,6
30	16	230	6,84	1,08±0,162	1,106	9,9±3	8,6
30	19	170	2,52	1,358±0,186	1,492	10,1±1,5	9,8
30	19	170	4,68	1,556±0,341	1,437	17,7±0,5	15,3
30	19	170	6,84	1,671±0,206	1,405	18,8±2,2	20,0
30	19	200	2,52	1,606±0,027	1,463	4,7±0,9	6,0
30	19	200	4,68	1,329±0,078	1,409	10,5±0,7	9,3
30	19	200	6,84	1,402±0,262	1,377	11,8±0,3	12,2
30	19	230	2,52	1,4±0,088	1,438	2±0,5	3,9
30	19	230	4,68	1,218±0,038	1,385	5,5±0,4	6,1
30	19	230	6,84	1,13±0,067	1,354	8,3±3,3	8,0
50	13	170	2,52	1,314±0,073	1,129	13,1±1,3	11,1
50	13	170	4,68	1,198±0,13	1,087	16±1	17,2
50	13	200	2,52	1,158±0,044	1,107	7,3±1,9	6,8
50	13	200	4,68	1,24±0,012	1,066	11,2±0,8	10,5
50	13	200	6,84	1,253±0,009	1,042	13,6±0,1	13,8
50	13	230	2,52	1,241±0,033	1,088	6,5±2,1	4,4
50	13	230	4,68	1,04±0,215	1,048	10,3±0,7	6,9
50	13	230	6,84	1,289±0,034	1,024	10±0,7	9,0
50	16	170	2,52	1,013±0,162	1,441	11,4±0,3	10,2
50	16	170	4,68	1,198±0,142	1,388	18,3±1,3	15,8
50	16	170	6,84	1,064±0,178	1,357	17,3±4,2	20,8
50	16	200	2,52	1,386±0,054	1,413	2±0	6,2
50	16	200	4,68	1,241±0,077	1,361	10,9±1,6	9,7
50	16	200	6,84	1,213±0,021	1,330	16,1±2,1	12,7
50	16	230	2,52	1,519±0,137	1,389	3,9±0,8	4,1
50	16	230	4,68	1,421±0,109	1,338	6,1±1,6	6,3
50	16	230	6,84	1,306±0,03	1,308	9,7±1,5	8,3
50	19	170	2,52	1,849±0,15	1,765	10,1±1	9,5
50	19	170	4,68	1,868±0,22	1,700	13,1±0,1	14,8
50	19	170	6,84	1,652±0,357	1,661	16,7±0,1	19,4
50	19	200	2,52	1,993±0,056	1,730	1,8±0,4	5,8
50	19	200	4,68	1,703±0,029	1,666	7,8±0,8	9,0
50	19	200	6,84	1,83±0,109	1,628	11,6±1,7	11,8
50	19	230	2,52	1,523±0,023	1,701	1,3±0,9	3,8
50	19	230	4,68	1,508±0,118	1,638	7,1±0,5	5,9
50	19	230	6,84	1,597±0,094	1,601	8,7±0,9	7,8

Πίνακας 13-4 Χαρακτηριστικά εμφάνισης προϊόντων εκβολής.

Συνθήκες εκβολής και σύσταση πρώτων υλών				Χαρακτηριστικά εμφάνισης			
C (%)	*X* (% υ.β.)	*T* (ºC)	*F* (kg/h)	Εμφάνιση	Πορώδες	Διάμετρος	Χρώμα
0	13	170	2,52	7,14±0,90^{j}	5,69±0,88^{h}	5,88±0,99^{h}	6,38±0,74^{h}
0	13	170	4,68	7,71±0,95^{k}	7,00±0,82^{k}	8,14±0,90^{m}	6,08±0,66^{gh}
0	13	200	2,52	2,00±0,71^{b}	2,50±0,71^{bc}	2,50±0,71^{c}	6,75±0,35^{i}
0	13	200	4,68	6,83±0,98^{i}	4,13±0,99^{e}	4,14±0,90^{e}	5,88±0,83^{g}
0	13	230	2,52	3,25±0,35^{c}	2,25±0,35^{b}	1,25±0,35^{ab}	5,50±0,71^{fg}
0	13	230	4,68	6,71±0,95^{i}	5,00±0,82^{fg}	5,43±0,98^{g}	4,57±0,95^{de}
0	16	170	2,52	5,86±0,90^{g}	6,00±0,93^{h}	5,25±0,71^{g}	5,88±0,99^{g}
0	16	170	4,68	6,29±0,95^{h}	7,29±0,95^{l}	7,71±0,76^{l}	7,43±0,79^{j}
0	16	200	2,52	2,71±0,76^{c}	1,71±0,95^{b}	1,71±0,76^{b}	2,57±0,53^{a}
0	16	200	4,68	6,86±0,69^{i}	4,75±0,89^{ef}	5,00±0,93^{fg}	6,50±0,76^{hi}
0	16	200	6,84	6,14±0,90^{h}	6,86±0,90^{k}	7,14±0,90^{k}	7,25±0,76^{j}
0	16	230	2,52	1,50±0,71^{ab}	2,25±0,35^{b}	3,00±0,71^{c}	6,50±0,71^{hi}
0	16	230	4,68	5,07±0,93^{ef}	5,07±0,93^{fg}	4,43±0,98^{e}	4,71±0,95^{e}
0	16	230	6,84	5,14±0,90^{f}	4,50±0,76^{e}	5,13±0,83^{g}	5,50±0,53^{fg}
0	19	170	2,52	3,25±0,35^{c}	5,25±0,35^{g}	3,75±0,35^{d}	5,75±0,35^{g}
0	19	170	4,68	5,93±0,93^{g}	5,57±0,98^{gh}	6,71±0,95^{j}	7,57±0,53^{j}
0	19	170	6,84	5,25±0,35^{f}	5,25±0,35^{g}	6,25±0,35^{i}	6,50±0,71^{hi}
0	19	200	2,52	2,50±0,71^{bc}	2,75±0,35^{c}	2,50±0,71^{c}	6,00±0,71^{gh}
0	19	200	4,68	4,57±0,79^{e}	5,43±0,98^{g}	4,86±0,90^{f}	4,71±0,95^{e}
0	19	200	6,84	5,86±0,90^{g}	5,88±0,83^{h}	6,75±0,71^{j}	6,71±0,76^{i}
0	19	230	2,52	2,50±0,71^{bc}	2,50±0,71^{bc}	2,25±0,35^{b}	6,75±0,35^{i}
0	19	230	4,68	4,86±0,90^{e}	3,83±0,98^{d}	3,57±0,79^{de}	4,57±0,98^{de}
0	19	230	6,84	5,29±0,95^{f}	5,00±0,82^{fg}	5,29±0,95^{g}	6,57±0,98^{i}
10	13	170	2,52	6,58±0,49^{i}	4,20±0,84^{e}	6,25±0,99^{i}	5,08±0,80^{fg}
10	13	170	4,68	7,33±0,52^{j}	6,08±0,80^{hi}	7,75±0,76^{l}	6,00±0,89^{gh}
10	13	200	2,52	2,50±0,71^{bc}	3,50±0,71^{cd}	2,25±0,35^{b}	5,25±0,35^{g}
10	13	200	4,68	4,58±0,92^{e}	3,67±0,82^{d}	4,17±0,98^{e}	3,83±0,98^{c}
10	13	230	2,52	1,50±0,71^{ab}	1,50±0,71^{ab}	1,25±0,35^{ab}	6,25±0,35^{h}
10	13	230	4,68	6,29±0,86^{h}	5,07±0,93^{fg}	5,07±1,24^{fg}	7,36±0,63^{j}
10	16	170	2,52	5,08±0,80^{ef}	5,33±0,52^{g}	4,17±0,41^{e}	5,75±0,99^{g}
10	16	170	4,68	5,83±0,75^{g}	6,67±0,52^{k}	6,83±0,75^{j}	6,00±0,63^{gh}
10	16	200	2,52	2,33±0,98^{b}	1,25±0,42^{a}	1,17±0,41^{a}	5,33±0,52^{g}
10	16	200	4,68	5,17±0,75^{f}	4,83±0,75^{f}	4,33±0,52^{e}	6,08±0,92^{gh}
10	16	200	6,84	5,83±0,98^{g}	6,17±0,75^{i}	6,25±0,99^{i}	5,83±0,93^{g}
10	16	230	2,52	3,50±0,71^{cd}	2,50±0,71^{bc}	2,50±0,71^{c}	6,50±0,71^{hi}
10	16	230	4,68	4,75±0,99^{e}	4,25±0,99^{e}	3,83±0,98^{d}	4,92±0,92^{e}
10	16	230	6,84	6,50±0,84^{h}	4,08±0,92^{de}	6,42±0,49^{i}	7,50±0,50^{j}
10	19	170	2,52	4,50±0,71^{de}	6,00±0,71^{hi}	4,50±0,71^{ef}	5,50±0,71^{fg}
10	19	170	4,68	5,83±0,98^{g}	6,42±0,97^{i}	6,42±0,92^{i}	5,83±0,98^{g}
10	19	170	6,84	5,50±0,71^{f}	5,50±0,71^{gh}	6,25±0,35^{i}	5,00±0,71^{ef}
10	19	200	2,52	2,50±0,71^{bc}	3,50±0,71^{cd}	2,25±0,35^{b}	4,25±0,35^{d}
10	19	200	4,68	4,00±0,89^{d}	4,75±0,76^{ef}	4,25±0,88^{e}	6,08±0,92^{gh}
10	19	200	6,84	4,75±0,88^{e}	5,17±0,98^{g}	5,17±0,98^{g}	5,92±0,80^{g}
10	19	230	2,52	3,00±0,71^{c}	3,00±0,71^{c}	2,50±0,71^{c}	8,00±0,71^{k}
10	19	230	4,68	2,92±0,80^{c}	5,00±0,89^{fg}	2,58±0,92^{c}	5,67±0,82^{g}
10	19	230	6,84	5,00±0,89^{ef}	5,17±0,98^{g}	4,92±0,66^{f}	7,25±0,61^{j}
30	13	170	2,52	6,75±0,99^{i}	5,00±0,89^{fg}	5,25±0,61^{g}	5,58±0,80^{fg}
30	13	200	2,52	4,25±0,35^{d}	5,00±0,71^{fg}	2,25±0,35^{b}	6,50±0,71^{hi}
30	13	200	4,68	6,79±0,91^{i}	4,86±0,90^{f}	6,29±0,95^{i}	5,50±0,50
30	13	230	2,52	1,25±0,35^{a}	1,25±0,35^{a}	1,75±0,35^{b}	3,25±0,35^{b}
30	13	230	4,68	4,86±0,90^{e}	4,07±0,93^{de}	4,14±0,90^{e}	5,07±0,93^{fg}
30	13	230	6,84	6,00±0,71^{g}	6,17±0,29^{i}	5,25±0,96^{g}	5,00±0,82^{ef}
30	16	170	2,52	4,92±0,92^{e}	5,58±0,86^{gh}	4,33±0,75^{e}	3,75±0,88^{c}
30	16	170	4,68	6,58±0,58^{hi}	6,33±0,98^{i}	7,33±0,82^{k}	5,75±0,94^{g}
30	16	200	2,52	1,93±0,61^{b}	3,33±0,98^{c}	1,71±0,81^{b}	4,50±0,50^{de}
30	16	200	4,68	5,14±0,90^{f}	4,79±0,95^{f}	5,14±0,94^{g}	5,50±0,82^{gh}

30	16	200	6,84	6,86±0,24^{i}	6,43±0,79^{i}	6,36±0,48^{i}	5,21±0,91^{g}
30	16	230	2,52	2,00±0,71^{b}	1,50±0,71^{ab}	2,25±0,35^{b}	4,25±0,35^{d}
30	16	230	4,68	3,21±0,81^{c}	3,00±0,96^{c}	2,07±0,73^{b}	5,29±0,95^{g}
30	16	230	6,84	6,71±0,39^{i}	5,86±0,90^{h}	6,29±0,49^{i}	5,43±0,93^{g}
30	19	170	2,52	5,50±0,71^{f}	4,50±0,71^{ef}	3,50±0,71^{c}	4,25±0,35^{d}
30	19	170	4,68	4,92±0,86^{e}	5,33±0,82^{g}	6,17±0,98^{i}	4,33±0,75^{d}
30	19	170	6,84	4,83±0,98^{e}	5,17±0,93^{g}	5,83±0,98^{h}	4,58±0,92^{e}
30	19	200	2,52	2,75±0,35^{c}	4,00±0,71^{de}	2,25±0,35^{b}	4,25±0,35^{d}
30	19	200	4,68	3,57±0,45^{cd}	3,93±0,93^{d}	4,86±0,90^{f}	4,86±0,90^{e}
30	19	200	6,84	6,07±0,61^{gh}	5,64±0,63^{h}	6,00±0,58^{h}	4,50±0,96^{de}
30	19	230	2,52	1,50±0,71^{ab}	1,50±0,71^{ab}	1,75±0,35^{b}	3,50±0,71^{bc}
30	19	230	4,68	2,86±0,85^{c}	2,33±0,82^{bc}	2,14±0,85^{b}	5,29±0,95^{g}
30	19	230	6,84	4,17±0,98^{d}	5,00±0,94^{fg}	3,67±0,82^{d}	6,50±0,55^{hi}
50	13	170	2,52	5,17±0,75^{f}	4,83±0,98^{f}	4,92±0,80^{f}	3,33±0,52^{b}
50	13	170	4,68	5,08±0,80^{ef}	4,50±0,84^{ef}	6,10±0,74^{i}	2,60±0,55^{a}
50	13	200	2,52	2,25±0,35^{b}	3,25±0,35^{c}	4,00±0,71^{d}	5,25±0,35^{g}
50	13	200	4,68	4,33±0,82^{d}	5,67±0,82^{h}	4,75±0,88^{ef}	3,33±0,82^{b}
50	13	200	6,84	5,75±0,35^{fg}	6,00±0,71^{hi}	6,25±0,35^{i}	3,50±0,71^{bc}
50	13	230	2,52	1,50±0,71^{ab}	3,00±0,71^{c}	3,00±0,71^{c}	4,25±0,35^{d}
50	13	230	4,68	5,07±0,93^{ef}	4,79±0,57^{f}	4,29±0,99^{e}	5,14±0,94^{g}
50	13	230	6,84	5,50±0,71^{f}	5,50±0,71^{gh}	6,75±0,35^{j}	5,75±0,35^{g}
50	16	170	2,52	2,75±0,88^{c}	3,17±0,98^{c}	3,00±0,84^{c}	3,42±0,92^{b}
50	16	170	4,68	4,86±0,94^{e}	4,08±0,92^{de}	6,75±0,88^{j}	2,71±0,76^{a}
50	16	170	6,84	5,75±0,35^{fg}	4,50±0,71^{ef}	7,25±0,35^{k}	3,75±0,35^{c}
50	16	200	2,52	1,86±0,90^{b}	1,71±0,95^{b}	1,50±0,76^{b}	3,21±0,95^{b}
50	16	200	4,68	2,83±0,41^{c}	5,17±0,98^{g}	3,75±0,99^{d}	3,25±0,76^{b}
50	16	200	6,84	5,93±0,93^{g}	5,07±0,93^{fg}	6,79±0,70^{j}	4,36±0,85^{d}
50	16	230	2,52	2,25±0,35^{b}	1,75±0,35^{b}	2,00±0,71^{b}	3,25±0,35^{b}
50	16	230	4,68	4,21±0,81^{d}	4,07±0,93^{de}	3,93±0,73^{d}	5,14±0,90^{g}
50	16	230	6,84	3,92±0,92^{d}	5,08±0,92^{fg}	5,33±1,03^{g}	4,25±0,42^{d}
50	19	170	2,52	4,50±0,71^{de}	3,25±0,35^{c}	4,00±0,71^{d}	3,25±0,35
50	19	170	4,68	3,86±0,90^{d}	3,83±0,98^{d}	4,33±0,82^{e}	3,71±0,95^{c}
50	19	170	6,84	5,25±0,35^{f}	3,75±0,35^{d}	7,25±0,35^{k}	2,75±0,35^{a}
50	19	200	2,52	3,25±0,35^{c}	2,75±0,35^{c}	2,00±0,71^{b}	6,50±0,71^{hi}
50	19	200	4,68	3,14±0,69^{c}	3,43±0,84^{cd}	4,00±0,91^{d}	3,71±0,81^{c}
50	19	200	6,84	4,00±0,95^{d}	5,58±0,92	5,33±0,88^{g}	3,83±0,52^{c}
50	19	230	2,52	2,25±0,35^{b}	1,50±0,71^{ab}	2,00±0,71^{b}	2,75±0,35^{a}
50	19	230	4,68	2,86±0,75c	3,25±0,99^{c}	2,14±0,63^{b}	3,64±0,99^{c}
50	19	230	6,84	3,86±0,90^{d}	3,93±0,93^{d}	4,43±0,93^{e}	3,71±0,95^{c}

$^{a-m}$Τα διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές (p<0,05) μεταξύ των τροφίμων εκβολής σύμφωνα με το κριτήριο Duncan.

Πίνακας 13-5 Χαρακτηριστικά γεύσης-οσμής τροφίμων εκβολής.

Συνθήκες εκβολής και σύσταση πρώτων υλών				Γεύση-Οσμή (Flavour)	
C (%)	*X* (% υ.β.)	*T* (ºC)	*F* (kg/h)	Αλευρώδες	Καμμένο
0	13	170	2,52	1,00±0,25[a]	1,43±0,79[a]
0	13	170	4,68	1,50±0,71[a]	2,33±0,58[c]
0	13	200	2,52	1,25±0,35[a]	4,50±0,71
0	13	200	4,68	2,75±0,35[d]	4,13±0,99[f]
0	13	230	2,52	1,25±0,35[a]	5,75±0,35[i]
0	13	230	4,68	1,25±0,50[a]	4,20±0,84[f]
0	16	170	2,52	4,50±0,50[g]	1,43±0,53[a]
0	16	170	4,68	4,17±0,98[g]	1,33±0,58[a]
0	16	200	2,52	1,00±0,25[a]	6,00±0,82[i]
0	16	200	4,68	3,00±0,82[d]	3,63±0,92[e]
0	16	200	6,84	4,17±0,98[g]	1,00±0,25[a]
0	16	230	2,52	1,25±0,35[a]	6,00±0,71[i]
0	16	230	4,68	2,80±0,45[d]	2,10±0,89[c]
0	16	230	6,84	4,75±0,96[h]	1,50±0,84[a]
0	19	170	2,52	5,75±0,35[j]	1,25±0,35[a]
0	19	170	4,68	4,50±0,58[g]	1,00±0,25[a]
0	19	170	6,84	6,25±0,35[k]	2,25±0,35[c]
0	19	200	2,52	4,50±0,71[g]	4,75±0,35[g]
0	19	200	4,68	4,75±0,96[h]	1,00±0,25[a]
0	19	200	6,84	5,00±0,87[h]	1,00±0,25[a]
0	19	230	2,52	3,75±0,35[f]	4,00±0,35[e]
0	19	230	4,68	1,25±0,50[a]	4,50±0,84[f]
0	19	230	6,84	4,00±0,71[f]	1,00±0,25[a]
10	13	170	2,52	1,50±0,71[a]	5,00±0,82[g]
10	13	170	4,68	2,67±0,58[d]	2,88±0,85[d]
10	13	200	2,52	1,25±0,35[a]	6,25±0,35[j]
10	13	200	4,68	2,50±0,50[c]	5,33±0,82
10	13	230	2,52	1,25±0,35[a]	7,25±0,35[k]
10	13	230	4,68	2,67±0,76[d]	3,50±0,71[d]
10	16	170	2,52	3,17±0,76[e]	4,50±0,58[f]
10	16	170	4,68	4,80±0,84[h]	1,17±0,29[a]
10	16	200	2,52	2,75±0,96[d]	4,10±0,89
10	16	200	4,68	4,75±0,96[h]	2,17±0,76[c]
10	16	200	6,84	4,60±0,89[h]	1,25±0,35[a]
10	16	230	2,52	1,25±0,35[a]	7,25±0,35[k]
10	16	230	4,68	2,25±0,96[c]	4,33±0,82[f]
10	16	230	6,84	3,50±0,50[e]	1,25±0,35[a]
10	19	170	2,52	5,25±0,35[i]	1,25±0,35[a]
10	19	170	4,68	6,80±0,84[l]	1,00±0,25[a]
10	19	170	6,84	5,50±0,71[i]	1,25±0,35[a]
10	19	200	2,52	5,50±0,71[i]	1,75±0,35[b]
10	19	200	4,68	5,67±0,82[j]	1,25±0,35[a]
10	19	200	6,84	5,70±0,84[j]	1,17±0,29[a]
10	19	230	2,52	1,50±0,71[a]	5,25±0,35[h]
10	19	230	4,68	3,63±0,95[f]	2,40±0,89[c]
10	19	230	6,84	5,00±0,63[h]	1,17±0,29[a]
30	13	170	2,52	1,25±0,35[a]	3,75±0,96[e]
30	13	200	2,52	1,25±0,35[a]	2,50±0,71[c]
30	13	200	4,68	1,80±0,84[b]	2,38±0,85[c]
30	13	230	2,52	1,25±0,35[a]	6,50±0,71[j]
30	13	230	4,68	1,70±0,97[b]	3,17±0,76[d]
30	13	230	6,84	2,50±0,71[c]	4,25±0,35[f]
30	16	170	2,52	4,00±0,94[f]	3,90±0,89[e]
30	16	170	4,68	5,00±0,89[h]	1,17±0,29[a]
30	16	200	2,52	3,33±0,93[e]	3,83±0,76[e]
30	16	200	4,68	2,00±0,82[b]	1,50±0,71[a]

30	16	200	6,84	2,40±0,55[c]	1,50±0,58[a]
30	16	230	2,52	1,25±0,35[a]	5,50±0,71[h]
30	16	230	4,68	2,25±0,61[c]	2,25±0,96[c]
30	16	230	6,84	2,36±0,85[c]	1,00±0,25[a]
30	19	170	2,52	4,50±0,71[g]	1,75±0,35[b]
30	19	170	4,68	5,20±0,91[i]	1,17±0,29[a]
30	19	170	6,84	5,83±0,76	2,17±0,76[c]
30	19	200	2,52	4,25±0,35[g]	5,50±0,71[h]
30	19	200	4,68	4,30±0,97[g]	1,50±0,71[a]
30	19	200	6,84	4,86±0,90[h]	1,33±0,58[a]
30	19	230	2,52	3,25±0,35[e]	3,50±0,71[d]
30	19	230	4,68	4,33±0,82[g]	2,17±0,76[c]
30	19	230	6,84	3,67±0,58[f]	1,75±0,50[b]
50	13	170	2,52	1,17±0,29[a]	2,33±0,58[c]
50	13	170	4,68	1,13±0,25[a]	1,63±0,75[b]
50	13	200	2,52	1,25±0,35[a]	6,25±0,35[j]
50	13	200	4,68	2,00±1,41[b]	2,50±0,71[c]
50	13	200	6,84	2,25±0,35[c]	4,25±0,35[f]
50	13	230	2,52	1,25±0,35[a]	5,00±0,71[g]
50	13	230	4,68	2,75±0,96[d]	3,00±0,82[d]
50	13	230	6,84	1,25±0,35[a]	4,75±0,35[g]
50	16	170	2,52	2,75±0,96[d]	3,50±0,71[d]
50	16	170	4,68	2,60±0,89[d]	1,50±0,71[a]
50	16	170	6,84	4,50±0,71	1,25±0,35[a]
50	16	200	2,52	3,50±0,87[e]	5,75±0,61[i]
50	16	200	4,68	1,25±0,35[a]	4,75±0,96[g]
50	16	200	6,84	3,25±0,76[e]	1,50±0,71[a]
50	16	230	2,52	1,25±0,35[a]	5,50±0,71[h]
50	16	230	4,68	2,75±0,96[d]	2,00±0,71[b]
50	16	230	6,84	1,33±0,58[a]	4,17±0,76[f]
50	19	170	2,52	5,50±0,71[i]	1,25±0,35[a]
50	19	170	4,68	3,75±0,96[f]	1,50±0,50[a]
50	19	170	6,84	6,25±0,35[k]	2,25±0,35[c]
50	19	200	2,52	1,25±0,35[a]	5,25±0,35[h]
50	19	200	4,68	3,33±0,82[e]	1,50±0,71[a]
50	19	200	6,84	3,50±0,58[e]	1,25±0,35[a]
50	19	230	2,52	1,25±0,35[a]	6,75±0,35[k]
50	19	230	4,68	3,63±0,95[f]	2,17±0,76[c]
50	19	230	6,84	3,75±0,76[f]	1,50±0,50[a]

[a-l]Τα διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές (p<0,05) μεταξύ των τροφίμων εκβολής σύμφωνα με το κριτήριο Duncan.

Πίνακας 13-6 Χαρακτηριστικά υφής τροφίμων εκβολής.

Συνθήκες εκβολής και σύσταση πρώτων υλών				Χαρακτηριστικά υφής				
C (%)	*X* (% υ.β.)	*T* (ºC)	*F* (kg/h)	Τραγανότητα	Αφρώδες	Σκληρότητα	Συγκολητικότητα	Ενυδάτωση
0	13	170	2,52	7,00±0,76^{k}	6,71±0,76^{l}	4,44±0,90^{f}	5,14±0,90^{g}	6,25±0,89^{j}
0	13	170	4,68	7,57±0,79^{l}	6,92±0,92^{l}	3,57±0,98^{de}	4,14±0,90^{e}	7,33±0,82^{l}
0	13	200	2,52	4,50±0,71^{f}	6,25±0,35^{k}	3,50±0,71^{de}	4,50±0,71^{ef}	6,25±0,35^{j}
0	13	200	4,68	6,43±0,79^{j}	6,17±0,98^{k}	4,25±0,89^{f}	5,14±0,85^{g}	7,50±0,76^{lm}
0	13	230	2,52	3,50±0,71^{d}	6,25±0,35^{k}	3,50±0,71^{de}	5,50±0,71^{gh}	6,25±0,35^{j}
0	13	230	4,68	6,86±0,90^{k}	7,71±0,76^{n}	3,07±0,93^{cd}	4,57±0,98^{ef}	7,57±0,98^{lm}
0	16	170	2,52	6,50±0,93^{jk}	5,00±0,82^{hi}	5,75±0,71^{i}	6,00±0,95^{hi}	4,50±0,76^{f}
0	16	170	4,68	6,86±0,69^{k}	4,00±0,82^{f}	5,86±0,69^{i}	5,57±0,98^{gh}	3,14±0,90^{d}
0	16	200	2,52	4,00±0,82^{e}	6,29±0,95^{k}	2,43±0,98^{b}	6,43±0,79^{i}	7,29±0,95^{l}
0	16	200	4,68	6,14±0,69^{j}	4,14±1,07^{g}	3,63±0,74^{e}	5,67±0,82^{h}	6,43±0,79^{j}
0	16	200	6,84	6,29±0,49^{j}	5,29±0,49^{i}	5,29±0,95^{h}	5,29±0,76^{g}	5,14±0,90^{h}
0	16	230	2,52	4,50±0,71^{f}	6,25±0,35^{k}	4,50±0,71^{fg}	5,50±0,71^{gh}	5,75±0,35^{i}
0	16	230	4,68	6,14±0,90^{j}	5,86±0,90^{j}	2,86±0,90^{c}	5,64±0,94^{h}	6,43±0,98^{j}
0	16	230	6,84	6,25±0,71^{j}	5,17±0,98^{i}	5,38±0,74^{h}	5,40±0,89^{g}	5,13±0,64^{h}
0	19	170	2,52	6,25±0,35^{j}	1,75±0,35^{b}	6,75±0,35^{k}	4,25±0,35^{e}	1,75±0,35^{a}
0	19	170	4,68	6,57±0,98^{jk}	2,86±0,69^{d}	6,86±0,90^{k}	5,86±0,90^{h}	2,29±0,49^{b}
0	19	170	6,84	7,25±0,35^{l}	2,25±0,35^{c}	7,25±0,35^{l}	2,25±0,35^{a}	2,25±0,35^{b}
0	19	200	2,52	4,50±0,71^{f}	6,00±0,71^{jk}	3,50±0,71^{de}	4,50±0,71^{ef}	5,00±0,71^{g}
0	19	200	4,68	5,86±0,90^{i}	4,71±0,95^{h}	5,71±0,95^{i}	4,57±0,98^{ef}	3,71±0,49^{e}
0	19	200	6,84	6,63±0,92^{k}	3,71±0,95^{f}	7,13±0,83^{l}	5,29±0,91^{g}	3,75±0,85^{e}
0	19	230	2,52	4,50±0,71^{f}	6,25±0,35^{k}	3,50±0,71^{de}	5,25±0,35^{g}	6,25±0,35^{j}
0	19	230	4,68	4,43±0,98^{f}	6,07±0,93^{jk}	2,71±0,95^{c}	5,43±0,79^{g}	7,00±0,82^{k}
0	19	230	6,84	6,43±0,79^{j}	6,21±0,91^{k}	4,43±0,98^{f}	5,14±0,90^{g}	6,83±0,98^{k}
10	13	170	2,52	6,25±0,76^{j}	6,75±0,88^{l}	3,50±0,84^{de}	3,83±0,98^{d}	6,83±0,93^{k}
10	13	170	4,68	6,92±0,49^{k}	6,83±0,98^{l}	3,00±0,89^{cd}	3,75±0,88^{d}	6,00±0,89^{i}
10	13	200	2,52	3,25±0,35^{d}	6,25±0,35^{k}	4,50±0,71^{fg}	4,50±0,71^{ef}	6,75±0,35^{k}
10	13	200	4,68	5,17±0,75^{h}	6,25±0,88^{k}	2,50±0,55^{b}	2,33±0,82^{a}	7,00±0,89^{k}
10	13	230	2,52	1,25±0,35^{a}	1,50±0,71^{b}	2,50±0,71^{b}	6,25±0,35^{i}	6,75±0,35^{k}
10	13	230	4,68	6,29±0,76^{j}	7,50±0,50^{m}	2,00±0,82^{a}	5,50±0,84^{gh}	7,64±0,94^{m}
10	16	170	2,52	5,33±0,52^{h}	3,83±0,41^{f}	4,92±0,92^{g}	4,83±0,98^{f}	4,08±0,80^{f}
10	16	170	4,68	6,92±0,92^{k}	3,00±0,89^{d}	6,67±0,52^{k}	4,83±0,98^{f}	3,17±0,98^{d}
10	16	200	2,52	2,58±0,92^{bc}	2,83±0,98^{d}	1,58±0,80^{a}	5,17±0,98^{g}	6,58±0,92^{k}
10	16	200	4,68	6,33±0,82^{j}	5,92±0,66^{j}	4,92±0,20^{g}	5,58±0,80^{gh}	5,67±0,52^{i}
10	16	200	6,84	5,83±0,75^{i}	4,33±0,75^{g}	5,17±0,98^{h}	5,50±0,55^{gh}	3,00±0,89^{c}
10	16	230	2,52	2,50±0,71^{bc}	3,50±0,71^{ef}	2,50±0,71^{b}	5,75±0,35^{h}	6,25±0,35^{j}
10	16	230	4,68	6,08±0,66^{ij}	5,75±0,99^{j}	2,83±0,75^{c}	3,67±0,75^{d}	6,83±0,98^{k}
10	16	230	6,84	6,33±0,52^{j}	4,83±0,98^{h}	4,00±0,63^{e}	3,50±0,84^{c}	3,42±0,92^{d}
10	19	170	2,52	6,00±0,71^{ij}	2,50±0,71^{c}	5,75±0,35^{i}	5,00±0,71^{f}	3,25±0,35^{d}
10	19	170	4,68	6,83±0,98^{k}	1,42±0,49^{b}	8,17±0,75^{m}	6,17±0,98^{i}	1,75±0,76^{a}
10	19	170	6,84	5,50±0,71^{h}	2,50±0,71^{c}	6,50±0,71^{j}	3,50±0,71^{c}	2,25±0,35^{b}
10	19	200	2,52	4,00±0,71^{e}	4,50±0,71^{gh}	4,25±0,35^{f}	4,25±0,35^{e}	6,25±0,35^{j}
10	19	200	4,68	4,67±0,52^{g}	3,50±0,84^{ef}	6,08±0,92^{ij}	4,50±0,84^{ef}	2,50±0,55^{b}
10	19	200	6,84	5,00±0,89^{g}	1,83±0,98^{b}	7,92±0,92^{m}	6,17±0,98^{i}	1,58±0,49^{a}
10	19	230	2,52	1,50±0,71^{a}	2,50±0,71^{c}	2,25±0,35^{b}	6,50±0,71^{i}	6,50±0,71^{jk}
10	19	230	4,68	4,17±0,98^{f}	3,67±0,82^{f}	4,33±0,82^{f}	5,25±0,99^{g}	5,83±0,75^{i}
10	19	230	6,84	6,50±0,84^{jk}	1,92±0,80^{b}	6,08±0,80^{ij}	3,33±0,52^{c}	1,92±0,80^{a}
30	13	170	2,52	6,67±0,82^{k}	7,83±0,75^{n}	2,50±0,89^{b}	3,50±0,55^{c}	7,58±0,92^{lm}
30	13	200	2,52	5,75±0,35^{i}	5,50±0,71^{ij}	3,50±0,71^{de}	3,50±0,71^{c}	6,75±0,35^{k}
30	13	200	4,68	7,00±0,76^{k}	5,79±0,81^{j}	3,64±0,99^{e}	3,43±0,98^{c}	5,64±0,85^{i}
30	13	230	2,52	4,00±0,71^{e}	4,00±0,71^{f}	4,25±0,35^{f}	5,50±0,71^{gh}	5,50±0,71^{hi}
30	13	230	4,68	6,21±0,91^{j}	7,07±0,89^{lm}	2,86±0,85^{c}	6,07±0,93^{hi}	6,79±0,81^{k}
30	13	230	6,84	6,75±0,50^{k}	6,13±0,75^{k}	5,00±0,91^{gh}	5,25±0,50^{g}	5,75±0,50^{i}
30	16	170	2,52	6,83±0,98^{k}	6,83±0,98^{l}	3,67±0,75^{e}	4,58±0,92^{ef}	5,58±0,74^{i}
30	16	170	4,68	6,92±0,92^{k}	3,58±0,92^{f}	6,00±0,89^{ij}	4,92±0,92^{f}	2,75±0,76^{c}
30	16	200	2,52	4,43±0,98^{f}	5,79±0,99^{j}	2,36±0,80^{b}	5,64±0,85^{h}	7,29±0,95^{l}
30	16	200	4,68	6,43±0,79^{j}	5,57±0,93^{ij}	4,29±0,91^{f}	3,43±0,98^{c}	5,14±0,63^{h}

30	16	200	6,84	6,71±0,49^{k}	6,71±0,95^{l}	4,14±0,90^{f}	4,07±0,93^{de}	5,64±0,99
30	16	230	2,52	1,50±0,71^{a}	2,75±0,35^{d}	6,25±0,35^{j}	6,75±0,35^{j}	6,50±0,71^{jk}
30	16	230	4,68	4,14±0,90^{f}	4,57±0,98^{gh}	2,93±0,84^{c}	3,86±0,90^{d}	4,93±0,93^{g}
30	16	230	6,84	6,57±0,79^{jk}	6,43±0,79^{k}	3,79±0,91^{e}	4,86±0,69^{f}	6,43±0,84^{j}
30	19	170	2,52	5,75±0,35^{i}	5,25±0,35^{i}	4,75±0,35^{g}	6,25±0,35^{i}	4,25±0,35^{f}
30	19	170	4,68	6,33±0,98^{j}	2,25±0,76^{c}	8,17±0,98^{m}	5,67±0,52^{h}	2,67±0,82^{c}
30	19	170	6,84	6,92±0,92^{k}	1,92±0,92^{b}	8,08±0,80^{m}	6,83±0,98^{j}	3,17±0,93^{d}
30	19	200	2,52	3,25±0,35^{d}	5,50±0,71^{ij}	3,50±0,71^{de}	6,75±0,35^{j}	6,50±0,71^{jk}
30	19	200	4,68	6,29±0,76^{j}	3,00±0,82^{d}	6,00±0,82^{ij}	3,21±0,99^{c}	3,29±0,81^{d}
30	19	200	6,84	6,50±0,87^{jk}	2,50±0,91^{c}	6,64±0,85^{k}	2,64±0,63^{b}	2,93±0,73^{c}
30	19	230	2,52	2,50±0,71^{bc}	3,50±0,71^{ef}	5,50±0,71^{h}	5,75±0,35^{h}	5,75±0,35^{i}
30	19	230	4,68	5,00±0,82^{g}	5,07±0,61^{hi}	3,86±0,90^{e}	4,29±0,95^{e}	5,64±0,69^{i}
30	19	230	6,84	5,92±0,92^{i}	5,17±0,93^{i}	4,75±0,88^{g}	4,00±0,89^{de}	5,92±0,86^{i}
50	13	170	2,52	6,75±0,76^{k}	3,67±0,82^{f}	5,33±0,98^{h}	3,00±0,89^{b}	4,92±0,80^{g}
50	13	170	4,68	6,67±0,52^{k}	2,33±0,98^{c}	5,67±0,52^{i}	2,67±0,82^{b}	2,33±0,82^{b}
50	13	200	2,52	5,00±0,71^{g}	6,50±0,71^{k}	4,00±0,71^{e}	5,00±0,71^{f}	5,50±0,71^{hi}
50	13	200	4,68	6,58±0,49^{jk}	5,50±0,89^{i}	4,58±0,92^{g}	3,92±0,66^{d}	5,58±0,92^{i}
50	13	200	6,84	6,50±0,71^{jk}	5,25±0,35^{i}	4,50±0,71^{fg}	4,50±0,71^{ef}	6,25±0,35j
50	13	230	2,52	4,50±0,71^{f}	7,25±0,35^{m}	3,25±0,35^{d}	5,50±0,71^{g}	6,25±0,35^{j}
50	13	230	4,68	6,21±0,70^{j}	7,00±0,71^{l}	4,43±0,98^{f}	3,67±0,82^{d}	5,33±0,52^{h}
50	13	230	6,84	6,50±0,71^{jk}	6,00±0,71j^{k}	4,00±0,71^{e}	6,75±0,35^{j}	5,25±0,35^{h}
50	16	170	2,52	6,25±0,99^{j}	4,17±0,98^{g}	3,83±0,82^{e}	4,83±0,26^{f}	5,83±0,93^{i}
50	16	170	4,68	6,93±0,61^{k}	3,79±0,95^{f}	4,79±0,91^{h}	2,71±0,70^{b}	2,79±0,57^{c}
50	16	170	6,84	7,25±0,35^{l}	1,25±0,35^{a}	8,00±0,71^{m}	4,50±0,71^{ef}	1,75±0,35^{a}
50	16	200	2,52	2,14±0,80^{b}	4,71±0,99^{h}	2,64±0,94^{c}	6,43±0,93^{i}	6,86±0,90^{k}
50	16	200	4,68	5,83±0,98^{i}	5,25±0,88^{i}	3,33±0,61^{d}	4,17±0,98^{e}	6,42±0,49^{j}
50	16	200	6,84	6,75±0,27^{k}	5,33±0,98^{i}	5,21±0,91^{h}	3,33±0,82^{c}	3,50±0,55^{d}
50	16	230	2,52	2,50±0,71^{bc}	7,25±0,35^{m}	3,50±0,71^{de}	5,00±0,71^{f}	7,25±0,35^{l}
50	16	230	4,68	6,07±0,93^{ij}	6,36±0,94^{k}	3,50±0,87^{de}	4,58±0,86^{ef}	6,43±0,45^{j}
50	16	230	6,84	6,50±0,45^{jk}	5,25±0,82^{i}	3,50±0,89^{de}	3,33±0,98^{c}	6,17±0,68^{j}
50	19	170	2,52	6,50±0,71^{jk}	4,50±0,71^{gh}	5,50±0,71^{h}	5,00±0,71^{f}	4,25±0,35^{f}
50	19	170	4,68	6,21±0,95^{j}	2,64±0,85^{d}	6,07±0,93^{ij}	3,36±0,85^{c}	1,86±0,75^{a}
50	19	170	6,84	7,50±0,71^{l}	1,25±0,35^{a}	7,50±0,71^{l}	4,50±0,71^{ef}	1,75±0,35^{a}
50	19	200	2,52	5,00±0,71^{g}	5,50±0,71^{ij}	4,00±0,71^{e}	6,00±0,71^{hi}	6,75±0,35
50	19	200	4,68	5,86±0,90^{i}	4,33±0,82^{g}	5,07±0,84^{gh}	3,86±0,69^{d}	5,21±0,91^{h}
50	19	200	6,84	6,00±0,89^{ij}	3,25±0,99^{e}	5,75±0,61^{i}	3,67±0,98^{d}	2,83±0,98^{c}
50	19	230	2,52	3,00±0,71^{c}	6,00±0,71^{jk}	4,00±0,71^{e}	5,25±0,35^{g}	6,50±0,71^{jk}
50	19	230	4,68	5,36±0,63^{h}	4,71±0,76^{h}	3,64±0,63^{e}	4,42±0,80^{e}	5,25±0,42^{h}
50	19	230	6,84	6,36±0,48^{j}	4,57±0,98^{gh}	5,64±0,48^{i}	4,00±0,82^{de}	4,29±0,81^{f}

$^{a-m}$Τα διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές (p<0,05) μεταξύ των τροφίμων εκβολής σύμφωνα με το κριτήριο Duncan.

Πίνακας 13-7 Λειτουργικές ιδιότητες τροφίμων εκβολής.

Συνθήκες Επεξεργασίας και Χαρακτηριστικά Υλικών				Λειτουργικές Ιδιότητες		
C (%)	*X* (% wb)	*T* (°C)	*F* (kg/h)	ΙΑΝ (g/g)	ΙΔΝ (g/100g)	ΙΑΕ (ml/g)
0	13	170	2,52	5,17±0,19^{e}	21,60±3,26^{f}	2,55±0,44^{k}
			4,68	5,09±0,15^{cd}	15,66±2,53^{b}	3,02±0,45^{l}
		200	2,52	5,00±0,31^{c}	32,79±3,63^{k}	5,35±0,32^{s}
			4,86	5,28±0,13^{f}	17,55±0,99^{c}	5,45±0,41^{t}
		230	2,52	5,07±0,49^{cd}	32,32±3,42^{k}	5,08±0,81^{r}
			4,68	5,29±0,13^{fg}	25,62±2,80^{i}	4,39±0,65^{q}
			6,84	5,41±0,03^{h}	17,01±0,41^{c}	5,41±0,28^{s}
	16	170	2,52	5,31±0,15^{fg}	16,65±0,6^{bc}	1,92±0,05^{h}
			4,68	5,15±0,32^{de}	12,84±0,71^{a}	1,54±0,19^{e}
		200	2,52	5,45±0,07^{h}	27,03±0,83^{j}	3,56±0,30^{o}
			4,68	5,41±0,18^{h}	17,47±0,79^{c}	2,80±0,28^{k}
			6,84	5,21±0,16^{ef}	12,71±1,77^{a}	2,61±0,48^{k}
		230	2,52	5,65±0,18^{j}	31,28±3,58	4,41±0,98^{q}
			4,68	5,59±0,12^{i}	20,27±2,71^{e}	5,11±0,71^{r}
			6,84	5,31±0,09^{fg}	14,13±2,10^{ab}	3,22±0,34^{m}
	19	170	2,52	5,43±0,10^{h}	13,61±1,95^{a}	1,87±0,20^{h}
			4,68	5,52±0,52^{i}	8,88±1,06^{a}	1,70±0,34^{g}
			6,84	5,25±0,36^{f}	9,02±0,59^{a}	1,48±0,22^{ef}
		200	2,52	5,87±0,17^{k}	21,59±2,75^{f}	3,56±0,54^{o}
			4,68	5,52±0,16^{i}	14,16±0,62^{ab}	2,94±0,61^{l}
			6,84	5,20±0,06^{e}	10,84±1,12^{a}	1,98±0,41^{i}
		230	2,52	5,88±0,26^{k}	30,29±1,51^{k}	5,11±0,77^{r}
			4,68	5,82±0,14^{k}	18,34±1,03^{d}	3,90±0,49^{o}
			6,84	5,27±0,17^{f}	10,50±0,22^{a}	2,40±0,56^{j}
10	13	170	2,52	5,12±0,07^{d}	27,78±0,59^{j}	3,04±0,28^{l}
			4,68	5,05±0,05^{cd}	23,82±1,02^{h}	2,11±0,11^{i}
		200	2,52	4,85±0,3^{c}	38,06±3,55^{l}	4,11±0,30^{p}
			4,68	5,30±0,17^{fg}	26,09±2,21^{i}	3,42±0,38^{n}
		230	2,52	4,35±0,45^{a}	41,71±2,06^{m}	3,37±0,46^{n}
			4,68	5,27±0,19^{f}	21,42±0,72^{f}	2,92±0,28^{l}
	16	170	2,52	5,16±0,05^{de}	21,14±0,57^{ef}	1,42±0,04^{cd}
			4,68	5,11±0,07^{d}	15,08±1,07^{b}	1,30±0,15^{b}
		200	2,52	5,29±0,14^{fg}	34,34±1,59^{l}	3,37±0,16^{n}
			4,68	5,33±0,02^{g}	17,97±0,55^{c}	1,87±0,23^{h}
			6,84	5,19±0,04^{e}	15,79±0,50^{b}	1,54±0,07^{e}
		230	2,52	5,09±0,44^{cd}	37,01±4,11^{l}	4,48±0,75^{q}
			4,68	5,64±0,10^{j}	25,91±0,75^{i}	3,23±0,17^{m}
			6,84	5,06±0,01^{cd}	13,40±0,47^{a}	1,56±0,17^{ef}
	19	170	2,52	5,08±0,02^{cd}	15,36±0,05^{b}	1,41±0,02^{c}
			4,68	4,85±0,05^{c}	11,41±1,06^{a}	1,00±0,27^{a}
			6,84	4,85±0,12^{c}	11,29±1,67^{a}	0,96±0,22^{a}
		200	2,52	5,60±0,32^{i}	26,30±4,03^{i}	2,80±0,60^{k}
			4,68	5,13±0,02^{d}	13,59±0,60^{a}	1,57±0,11^{f}
			6,84	4,94±0,04^{c}	10,90±0,06^{a}	1,37±0,03^{c}
		230	2,52	6,05±0,30^{l}	27,70±1,99^{j}	3,85±0,22^{o}
			4,68	5,53±0,17^{i}	17,52±2,22^{c}	2,36±0,34^{j}
			6,84	5,11±0,02^{d}	11,31±0,17^{a}	1,09±0,00^{b}
30	13	170	2,52	4,82±0,08^{c}	24,53±0,96^{h}	2,19±0,15^{j}
		200	2,52	5,36±0,11^{g}	20,23±2,49^{e}	1,88±0,20^{h}
			4,68	5,06±0,14^{cd}	16,02±0,63^{b}	1,50±0,20^{e}
		230	2,52	5,48±0,03^{h}	20,76±0,52^{ef}	2,03±0,25^{i}
			4,68	5,19±0,03^{e}	17,96±0,87^{c}	2,07±0,44^{i}
			6,84	4,93±0,01^{c}	15,53±0,64^{b}	1,57±0,03^{f}
	16	170	2,52	4,82±0,01^{c}	18,60±1,11^{d}	1,46±0,07^{d}
			4,68	4,51±0,00^{a}	13,24±0,17^{a}	1,41±0,05^{c}
		200	2,52	5,49±0,06^{h}	24,63±1,22^{h}	2,90±0,29^{l}

			4,68	5,26±0,06^{f}	18,31±0,03^{cd}	1,81±0,25^{h}
			6,84	5,32±0,12^{fg}	17,17±0,06^{c}	1,95±0,12^{i}
		230	2,52	6,06±0,12^{l}	23,96±3,46^{h}	2,96±0,04^{l}
			4,68	5,78±0,01^{k}	17,81±0,19^{c}	1,66±0,05^{f}
			6,84	5,21±0,31^{ef}	17,49±0,38^{c}	2,07±0,04^{i}
	19	170	2,52	4,66±0,01^{b}	15,06±0,68^{b}	1,29±0,14^{b}
			4,68	4,59±0,11^{b}	11,05±0,05^{a}	1,17±0,03^{b}
			6,84	4,46±0,34^{a}	9,60±0,25^{a}	1,24±0,01^{b}
		200	2,52	5,77±0,07^{k}	22,45±1,05^{g}	2,69±0,19^{k}
			4,68	5,21±0,00^{ef}	14,65±0,37^{ab}	1,84±0,08^{h}
			6,84	5,01±0,10^{c}	12,95±1,55^{a}	1,34±0,14^{b}
		230	2,52	6,06±0,04^{l}	19,15±1,37^{de}	2,54±0,31^{k}
			4,68	5,64±0,24^{j}	18,06±0,45^{c}	2,05±0,08^{i}
			6,84	4,92±0,19^{e}	14,91±0,89^{b}	1,86±0,19^{h}
50	13	170	2,52	4,69±0,06^{b}	17,00±0,61^{c}	1,08±0,01^{b}
			4,68	4,64±0,04^{b}	16,97±1,26^{c}	1,13±0,05^{b}
		200	2,52	4,67±0,45^{b}	20,79±0,70^{f}	1,38±0,09^{c}
			4,68	4,75±0,07^{bc}	19,00±0,61^{e}	1,32±0,02^{b}
			6,84	4,67±0,03^{b}	17,62±0,27^{c}	1,15±0,08^{b}
		230	2,52	5,03±0,09^{c}	22,60±0,39^{g}	1,64±0,05^{f}
			4,68	4,91±0,10^{c}	19,41±2,09^{de}	1,69±0,14^{g}
			6,84	4,66±0,04^{b}	18,09±0,83^{c}	1,65±0,08^{f}
	16	170	2,52	5,11±0,02^{d}	21,90±0,45^{f}	1,24±0,21^{b}
			4,68	5,04±0,14^{c}	18,70±0,65^{d}	1,14±0,21^{b}
			6,84	4,93±0,12^{c}	17,80±0,74^{c}	1,13±0,16^{b}
		200	2,52	5,42±0,09^{h}	25,24±0,14^{h}	2,30±0,27^{j}
			4,68	5,21±0,04^{ef}	22,40±1,93^{g}	1,37±0,18^{c}
			6,84	4,99±0,06^{c}	19,39±0,50^{de}	1,16±0,10^{b}
		230	2,52	5,67±0,15^{j}	24,44±0,94^{h}	2,27±0,13^{j}
			4,68	5,37±0,10^{g}	21,55±0,45^{f}	1,74±0,07^{g}
			6,84	4,86±0,06^{c}	19,20±1,05^{de}	1,39±0,00^{c}
	19	170	2,52	5,33±0,05^{g}	19,51±0,40^{e}	1,17±0,04^{b}
			4,68	4,99±0,24^{c}	15,78±2,33^{b}	1,14±0,00^{b}
			6,84	4,99±0,06^{c}	16,19±1,22^{b}	0,91±0,03^{a}
		200	2,52	5,43±0,13^{h}	24,03±0,26^{h}	2,49±0,35^{k}
			4,68	5,13±0,04^{d}	17,69±0,14^{c}	1,43±0,01^{d}
			6,84	5,15±0,04^{de}	17,77±0,71^{c}	1,20±0,07^{b}
		230	2,52	5,73±0,13^{k}	22,12±1,16^{g}	2,96±0,74^{l}
			4,68	5,55±0,19^{i}	18,58±0,22^{d}	1,59±0,14^{f}
			6,84	5,05±0,05^{cd}	18,41±0,04^{cd}	1,48±0,12^{e}

$^{a-t}$Τα διαφορετικά γράμματα μέσα στην ίδια στήλη υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές ($p<0,05$) μεταξύ των προϊόντων εκβολής σύμφωνα με το κριτήριο Duncan.

Πίνακας 13-8 Δεδομένα προσρόφησης νερού των προϊόντων εκβολής για θερμοκρασία 25°C.

Συνθήκες εκβολής και σύσταση τροφοδοσίας					
C (%)	X (% wb)	T (°C)	F (kg/h)	α_w	X (g/100g ξ.στ.)
10	16	200	4,68	0,11	3,147±0,038
10	16	200	4,68	0,33	5,572±0,059
10	16	200	4,68	0,53	8,426±0,116
10	16	200	4,68	0,75	12,93±0,003
10	16	200	4,68	0,94	18,785±0,456
30	13	200	4,68	0,11	3,878±0,086
30	13	200	4,68	0,33	6,146±0,084
30	13	200	4,68	0,53	8,149±0,042
30	13	200	4,68	0,75	12,912±0,042
30	13	200	4,68	0,94	23,053±0,384
30	19	200	4,68	0,11	3,413±0,656
30	19	200	4,68	0,33	6,673±0,142
30	19	200	4,68	0,53	9,374±0,1
30	19	200	4,68	0,75	13,618±0,395
30	19	200	4,68	0,94	24,453±0,037
30	16	170	4,68	0,11	3,887±0,047
30	16	170	4,68	0,33	6,496±0,091
30	16	170	4,68	0,53	8,405±0,115
30	16	170	4,68	0,75	12,487±0,026
30	16	170	4,68	0,94	24,026±0,045
30	16	200	4,68	0,11	3,728±0,126
30	16	200	4,68	0,33	6,136±0,647
30	16	200	4,68	0,53	8,061±0,104
30	16	200	4,68	0,75	12,985±0,277
30	16	200	4,68	0,94	23,237±0,08
30	16	230	4,68	0,11	3,706±0,015
30	16	230	4,68	0,33	6,08±0,066
30	16	230	4,68	0,53	8,393±0,081
30	16	230	4,68	0,75	12,749±0,141
30	16	230	4,68	0,94	22,914±0,195
30	16	200	2,52	0,11	3,572±0,171
30	16	200	2,52	0,33	5,863±0,368
30	16	200	2,52	0,53	8,482±0,038
30	16	200	2,52	0,75	12,801±0,104
30	16	200	2,52	0,94	22,996±0,368
30	16	200	6,84	0,11	3,678±0,413
30	16	200	6,84	0,33	6,32±0,393
30	16	200	6,84	0,53	8,431±0,19
30	16	200	6,84	0,75	12,842±0,027
30	16	200	6,84	0,94	23,578±0,009
50	16	200	4,68	0,11	3,337±0,129
50	16	200	4,68	0,33	5,373±0,348
50	16	200	4,68	0,53	7,354±0,415
50	16	200	4,68	0,75	12,444±0,525
50	16	200	4,68	0,94	22,239±0,425

Πίνακας 13-9 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τροφίμων εκβολής από άλευρο φακής και αραβοσιτάλευρο.

Συνθήκες εκβολής & σύσταση υλικών					Υαλώδης Μετάπτωση			
C (%)	X (% wb)	T (°C)	F (kg/h)	α_w	T_g onset (°C)	T_g mid (°C)	T_g end (°C)	ΔC_p (J/g·°C)
10	16	200	4,68	0,11	115,23±2,32	116,22±2,16	122,19±0,69	0,162±0,04
30	13	200	4,68	0,11	109,51±11,14	112,04±9,35	119,04±14,96	0,326±0,14
30	16	170	4,68	0,11	126,59±1,29	130,45±0,73	133,94±1,13	0,349±0,06
30	16	200	2,52	0,11	127,96±3,42	130,09±3,67	135,97±4,16	0,393±0,01
30	16	200	4,68	0,11	114,45±1,16	116,22±1,04	120,66±1,10	0,177±0,03
30	16	200	6,84	0,11	119,16±5,21	121,83±2,48	125,82±1,81	0,160±0,02
30	16	230	4,68	0,11	128,71±1,06	130,20±0,63	136,20±3,82	0,288±0,03
30	19	200	4,68	0,11	126,31±1,74	128,20±2,21	135,26±2,56	0,201±0,01
50	16	200	4,68	0,11	113,52±5,20	115,47±3,42	123,40±3,46	0,207±0,04
10	16	200	4,68	0,33	110,76±2,50	115,82±2,59	124,48±4,25	0,149±0,03
30	13	200	4,68	0,33	106,39±0,49	106,99±0,69	114,54±3,36	0,129±0,02
30	16	170	4,68	0,33	108,62±5,74	111,79±5,22	119,91±2,22	0,197±0,02
30	16	200	2,52	0,33	110,35±2,65	112,27±0,34	117,45±2,93	0,175±0,00
30	16	200	4,68	0,33	105,60±2,71	107,77±0,21	119,54±7,5	0,173±0,02
30	16	200	6,84	0,33	103,83±7,91	112,26±4,46	112,73±5,51	0,140±0,02
30	16	230	4,68	0,33	104,92±6,46	110,36±2,32	112,97±4,21	0,129±0,01
30	19	200	4,68	0,33	102,82±4,56	106,87±0,24	112,62±4,12	0,158±0,05
50	16	200	4,68	0,33	107,95±2,95	109,19±3,65	116,91±0,60	0,149±0,03
10	16	200	4,68	0,53	94,78±1,92	96,13±2,76	100,60±1,78	0,165±0,01
30	13	200	4,68	0,53	95,40±0,38	95,57±0,32	104,20±0,74	0,196±0,04
30	16	170	4,68	0,53	81,74±6,49	85,49±1,42	91,11±5,56	0,199±0,05
30	16	200	2,52	0,53	83,66±7,59	87,33±3,14	93,72±3,86	0,209±0,03
30	16	200	4,68	0,53	82,84±6,55	86,83±1,66	93,07±0,63	0,155±0,01
30	16	200	6,84	0,53	86,88±2,06	90,87±0,86	93,85±0,93	0,164±0,01
30	16	230	4,68	0,53	87,77±1,91	92,02±3,73	98,23±2,45	0,168±0,06
30	19	200	4,68	0,53	80,80±0,20	83,34±0,03	86,69±1,67	0,120±0,01
50	16	200	4,68	0,53	80,03±5,47	83,30±3,63	87,23±8,04	0,129±0,02
10	16	200	4,68	0,75	62,35±4,74	64,34±2,6	70,39±5,49	0,166±0,04
30	13	200	4,68	0,75	54,06±0,20	55,12±1,47	61,61±1,49	0,170±0,03
30	16	170	4,68	0,75	50,14±2,05	52,35±0,28	58,70±3,50	0,174±0,04
30	16	200	2,52	0,75	59,60±3,58	62,19±2,32	67,31±2,74	0,145±0,05
30	16	200	4,68	0,75	55,45±5,26	57,82±2,75	62,29±3,43	0,129±0,01
30	16	200	6,84	0,75	52,12±1,93	54,72±1,33	58,40±0,41	0,109±0,01
30	16	230	4,68	0,75	47,34±0,57	51,64±0,03	55,87±0,68	0,183±0,03
30	19	200	4,68	0,75	53,58±4,00	56,12±0,65	60,95±4,03	0,109±0,01
50	16	200	4,68	0,75	49,69±2,65	54,11±1,30	57,54±0,93	0,129±0,01
10	16	200	4,68	0,94	14,00±0,50	16,92±0,03	24,40±0,26	0,115±0,01
30	13	200	4,68	0,94	18,81±0,56	22,42±3,03	25,68±2,64	0,104±0,00
30	16	170	4,68	0,94	14,49±4,72	17,97±3,01	20,00±5,51	0,114±0,01
30	16	200	2,52	0,94	16,69±3,23	21,82±3,38	24,48±0,45	0,123±0,01
30	16	200	4,68	0,94	16,45±2,57	19,77±0,59	25,44±4,04	0,138±0,05
30	16	200	6,84	0,94	11,26±2,01	13,43±0,41	16,02±1,43	0,114±0,01
30	16	230	4,68	0,94	19,95±5,22	23,34±3,52	28,50±5,59	0,116±0,01
30	19	200	4,68	0,94	12,21±5,42	18,49±1,26	22,37±1,89	0,148±0,01
50	16	200	4,68	0,94	14,02±3,35	18,11±0,44	22,11±5,34	0,108±0,01