



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

# **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**  
**ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ Π. ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΥ**  
**ΧΗΜΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ 2014**



Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Μ. Κροκίδα, Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.) (Επιβλέπουσα)

Ζ. Μαρούλης, Καθηγητής ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

Δ. Μαρίνος-Κουρής, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Μ. Κροκίδα, Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.) (Επιβλέπουσα)

Ζ. Μαρούλης, Καθηγητής ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

Δ. Μαρίνος-Κουρής, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

Ι. Ζιώμας, Καθηγητής ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

Β. Καραθάνος, Καθηγητής (Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο)

Π. Ταούκης, Καθηγητής ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

Κ. Τζιά, Καθηγήτρια ΕΜΠ (Σ.Χ.Μ.)

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).»

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε με τη χρηματοδότηση από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας (ΕΛΚΕ) του ΕΜΠ.



*Στην οικογένειά μου*



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο «Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά τη χρονική περίοδο 2009-2014, υπό την επίβλεψη της Αναπληρώτριας Καθηγήτριας κ. Μαγδαληνής Κροκίδα. Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη τροφίμων καθορισμένης δομής. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση των διεργασιών της ξήρανσης και της εκβολής στα δομικά χαρακτηριστικά των παραχθέντων προϊόντων, καθώς και η εξάρτηση ποικίλων ιδιοτήτων ποιότητας, από αυτά.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της διατριβής και ειδικότερα:

Στην Αναπλ. Καθηγήτρια κ. Μαγδαληνή Κροκίδα για την ανάθεση της διδακτορικής διατριβής, την ουσιαστική συμβολή, καθοδήγηση και την πολύτιμη υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, μα περισσότερο απ' όλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τις πολύτιμες συμβουλές της, οι οποίες ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την αμέριστη συμπαράστασή της σε προσωπικό επίπεδο, η οποία στάθηκε ιδιαίτερα σημαντική και καθοριστική.

Στον Καθηγητή κ. Ζαχαρία Μαρούλη για τη συμβολή και βοήθειά του στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής, καθώς και την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Στον Ομότιμο Καθηγητή κ. Δημήτρη Μαρίνο-Κουρή για τις πολύτιμες συμβουλές του, την καθοδήγησή του και τη μετάδοση των σημαντικών γνώσεων του.

Στον Καθηγητή κ. Ιωάννη Ζιώμα, Διευθυντή του Εργαστηρίου Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών για την ουσιαστική βοήθειά του και συμπαράστασή του τόσο σε επιστημονικό, όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Στον Καθηγητή του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου κ. Βάιο Καραθάνο για την πολύ καλή συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοριστική συμβολή του στην ανάπτυξη και εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής, καθώς και τη συμβολή του στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, χωρίς τις οποίες δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διατριβής.

Στους Καθηγητές του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων κ. Κωνσταντίνα Τζιά και κ. Πέτρο Ταούκη για τη συνεργασία και καθοδήγησή τους, καθώς και τη βοήθειά τους στη διεξαγωγή των οργανοληπτικών ελέγχων, που πραγματοποιήθηκαν στο διαπιστευμένο κατά ISO 17025, Χώρο Οργανοληπτικών Δοκιμών του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων.

Στον Λέκτορα κ. Αστέριο Καραγιάννη-Μπακόλα για την πολύτιμη βοήθειά του, αλλά και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε στη διεξαγωγή των πειραμάτων ποροσιμετρίας υδραργύρου, τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αντώνη Καραντώνη για την πολύτιμη βοήθειά του στη διεξαγωγή των μετρήσεων ηλεκτροχημικής εμπέδησης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στα μέλη του Εργαστηρίου Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών και φίλους μου, Δρ. Χρήστο Μπουκουβάλα, κ. Παναγιώτη Μιχαηλίδη, Δρ. Νικόλαο Παναγιώτου, Δρ. Πένυ Ελένη, Δρ. Ιωάννα Κατσαβού, Δρ. Σπυριδούλα Ντεμίρη, Δρ. Φάνη Παπαγεωργίου, Δρ. Σοφία Παπαδάκη και την Υποψήφια Διδάκτωρ Κωνσταντίνα Κυριακοπούλου για την άριστη συνύπαρξη και συνεργασία, καθώς και την πολύτιμη βοήθειά τους, την καθημερινή στήριξή τους και τις συμβουλές τους τόσο σε ερευνητικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Δρ. Χρήστο Μπουκουβάλα για τη συμβολή του στην ανάπτυξη του προσομοιωτή και τον κ. Παναγιώτη Μιχαηλίδη για τη συμβολή του στην παραγωγή των προϊόντων εκβολής.

Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων για την άριστη συνεργασία και τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τους φοιτητές, Τάσο Μαστρογιάννη, Νίνα Παπαγεωργίου και Ευγενία Καρύδη, οι οποίοι εκτέλεσαν τη διπλωματική τους εργασία και συνεισέφεραν στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τους γονείς μου, την αδερφή μου και τους φίλους μου για την αγάπη τους, την υπομονή τους και τη συμπαράσταση τους σε κάθε δύσκολη στιγμή, χωρίς την οποία δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας διατριβής.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |      |
|---|------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....  | v    |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....                                       | vii  |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....                              | xiii |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....                               | xix  |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....                                | xxi  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....   | 1    |
| ABSTRACT.....   | 7    |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                       | 11   |
| 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ .....                        | 13   |
| 2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ .....                             | 17   |
| 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                      | 19   |
| 2.2 ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....                             | 19   |
| 2.2.1 Γενικά .....                                      | 19   |
| 2.2.2 Ορισμοί .....                                     | 20   |
| 2.2.3 Μέθοδοι προσδιορισμού δομικών ιδιοτήτων.....      | 23   |
| 2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΦΗΣ) .....          | 27   |
| 2.3.1 Γενικά .....                                      | 27   |
| 2.3.2 Ορισμοί .....                                     | 27   |
| 2.3.3 Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων .....   | 28   |
| 2.4 ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....                          | 30   |
| 2.4.1 Γενικά .....                                      | 30   |
| 2.4.2 Ορισμοί .....                                     | 30   |
| 2.4.3 Μέθοδοι προσδιορισμού ρεολογικών ιδιοτήτων .....  | 33   |
| 2.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ - ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΟΣ.....      | 35   |
| 2.5.1 Γενικά .....                                      | 35   |
| 2.5.2 Μέθοδοι προσδιορισμού ισόθερμων ρόφησης.....      | 36   |
| 2.6 ΜΕΤΑΠΤΩΞΕΙΣ ΦΑΣΕΩΝ .....                            | 41   |
| 2.6.1 Γενικά .....                                      | 41   |
| 2.6.2 Ορισμοί .....                                     | 41   |
| 2.6.3 Μέθοδοι προσδιορισμού των μεταπτώσεων φάσης ..... | 45   |
| 2.7 ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....                   | 47   |
| 2.7.1 Γενικά .....                                      | 47   |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |     |
|--|-----|
| 2.7.2 Ορισμοί .....                            | 48  |
| 2.7.3 Μέθοδοι οργανοληπτικών δοκιμών .....     | 50  |
| 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ .....      | 53  |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                             | 55  |
| 3.2 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....                      | 55  |
| 3.2.1 Γενικά.....                              | 55  |
| 3.2.2 Ξήρανση υπό κατάψυξη (Λυοφιλίωση).....   | 60  |
| 3.2.3 Ξήρανση σε ρεύμα αέρα.....               | 65  |
| 3.2.4 Ξήρανση υπό κενό .....                   | 67  |
| 3.2.5 Ωσμωτική αφυδάτωση .....                 | 69  |
| 3.3 ΕΚΒΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....                       | 73  |
| 3.3.1 Γενικά .....                             | 73  |
| 3.3.2 Εκβολείς .....                           | 75  |
| 3.3.3 Εφαρμογές .....                          | 83  |
| 3.3.4 Συστατικά υλικών εκβολής .....           | 84  |
| 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....                | 87  |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                              | 89  |
| 4.2 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....                      | 89  |
| 4.2.1 Πρώτες ύλες – Προετοιμασία υλικών.....   | 89  |
| 4.2.2 Ξήρανση υπό κατάψυξη .....               | 91  |
| 4.2.3 Προκατεργασία με ωσμωτική αφυδάτωση..... | 91  |
| 4.3 ΕΚΒΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....                       | 93  |
| 4.3.1 Πρώτες ύλες.....                         | 93  |
| 4.3.2 Προετοιμασία δειγμάτων .....             | 93  |
| 4.3.3 Εκβολή.....                              | 94  |
| 4.4 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....                 | 97  |
| 4.4.1 Αφυδατωμένα προϊόντα.....                | 97  |
| 4.4.2 Προϊόντα εκβολής.....                    | 98  |
| 4.5 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....                | 100 |
| 5. ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....                     | 101 |
| 5.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....                | 103 |
| 5.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....              | 103 |
| 5.2.1 Ξήρανση τροφίμων .....                   | 103 |
| 5.2.2 Εκβολή τροφίμων.....                     | 107 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....  | 109 |
| 5.3.1 Προσδιορισμός της πραγματικής πυκνότητας των προϊόντων .....  | 109 |
| 5.3.2 Προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας των προϊόντων .....   | 110 |
| 5.3.3 Προσδιορισμός του πορώδους των προϊόντων .....  | 111 |
| 5.3.4 Προσδιορισμός του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής.....   | 111 |
| 5.3.5 Προσδιορισμός της κατανομής πόρων των προϊόντων .....   | 111 |
| 5.3.6 Μικροσκοπία .....   | 112 |
| 5.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ .....  | 113 |
| 5.4.1 Αφυδατωμένο υπό κατάψυξη ρύζι.....  | 113 |
| 5.4.2 Αφυδατωμένα υπό κατάψυξη γεωργικά προϊόντα.....   | 114 |
| 5.4.3 Προϊόντα εκβολής.....   | 114 |
| 5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....   | 115 |
| 5.5.1 Επίδραση των συνθηκών ξήρανσης υπό κατάψυξη στις δομικές ιδιότητες προϊόντων ρυζιού .....                                 | 115 |
| 5.5.2 Επίδραση των συνθηκών ξήρανσης υπό κατάψυξη στις δομικές ιδιότητες γεωργικών προϊόντων.....                               | 121 |
| 5.5.3 Επίδραση των μεθόδων και συνθηκών ξήρανσης στις δομικές ιδιότητες γεωργικών προϊόντων.....                                | 125 |
| 5.5.4 Επίδραση των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών και των συνθηκών επεξεργασίας στις δομικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής ..... | 126 |
| 5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   | 136 |
| 6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ .....   | 139 |
| 6.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....   | 141 |
| 6.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....   | 142 |
| 6.2.1 Μηχανικές ιδιότητες.....  | 142 |
| 6.2.2 Ιδιότητες προσρόφησης - Ενεργότητα ύδατος.....  | 144 |
| 6.2.3 Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, $T_g$ ) .....  | 146 |
| 6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....  | 149 |
| 6.3.1 Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων .....   | 149 |
| 6.3.2 Προσδιορισμός των ιδιοτήτων προσρόφησης των προϊόντων.....  | 150 |
| 6.3.3 Προσδιορισμός της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων .....  | 151 |
| 6.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ .....  | 152 |
| 6.4.1 Μηχανικές ιδιότητες.....  | 152 |
| 6.4.2 Ιδιότητες προσρόφησης - Ενεργότητα ύδατος.....  | 153 |
| 6.4.3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης .....   | 153 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |     |
|---|-----|
| 6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....   | 154 |
| 6.5.1 Μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων.....  | 154 |
| 6.5.2 Ιδιότητες προσρόφησης των προϊόντων .....   | 162 |
| 6.5.3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων .....   | 166 |
| 6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   | 172 |
| 7. ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....   | 175 |
| 7.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....   | 177 |
| 7.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....   | 177 |
| 7.2.1 Εκβολή τροφίμων.....  | 177 |
| 7.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....  | 179 |
| 7.3.1 Παραγωγή προϊόντων.....   | 179 |
| 7.3.2 Προσδιορισμός των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής.....   | 179 |
| 7.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ .....  | 180 |
| 7.4.1 Προϊόντα εκβολής.....   | 180 |
| 7.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....   | 180 |
| 7.5.1 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής.....                                    | 180 |
| 7.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   | 190 |
| 8. ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ .....  | 193 |
| 8.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....   | 195 |
| 8.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....   | 195 |
| 8.2.1 Λειτουργία της μάσησης.....   | 195 |
| 8.2.2 Λειτουργία της πέψης.....   | 197 |
| 8.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....  | 200 |
| 8.3.1 Παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων.....  | 200 |
| 8.3.2 Εμβάπτιση σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό και το σάλιο .....  | 200 |
| 8.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ .....  | 203 |
| 8.4.1 Αύξηση βάρους των δειγμάτων που εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό.....                                | 203 |
| 8.4.2 Αποδέσμευση άλατος και σακχάρων των δειγμάτων που εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό και το σάλιο..... | 203 |
| 8.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....   | 204 |
| 8.5.1 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στην αύξηση βάρους δειγμάτων που εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού.....                 | 204 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.5.2 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στην αποδέσμευση άλατος δειγμάτων πατάτας που εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού και σάλιου ..... | 205 |
| 8.5.3 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στην αποδέσμευση σακχάρων δειγμάτων μπανάνας που εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού .....         | 209 |
| 8.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....  | 210 |
| 9. ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ .....   | 211 |
| 9.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....  | 213 |
| 9.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....  | 213 |
| 9.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....   | 215 |
| 9.3.1 Παραγωγή προϊόντων.....  | 215 |
| 9.3.2 Μέτρηση ρεολογικών ιδιοτήτων .....   | 215 |
| 9.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....  | 216 |
| 9.4.1 Ξήρανση προϊόντων με ποικίλες μεθόδους .....   | 216 |
| 9.4.2 Εμβάπτιση σε διαλύματα σάλιου .....  | 222 |
| 9.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....  | 222 |
| 10. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ.....  | 225 |
| 10.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ.....  | 227 |
| 10.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ.....   | 230 |
| 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ.....  | 233 |
| 11.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   | 235 |
| 11.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ.....  | 241 |
| 12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....  | 243 |



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 2. 1. Κατηγορίες πόρων (πηγή: (Αναστασοπούλου et al., 2006), ίδια επεξεργασία). .....  | 21  |
| Σχήμα 2. 2. (α) Ανομοιογενές και (β) ομοιογενές υλικό (πηγή: (Dullien, 1979), ίδια επεξεργασία). ..  | 22  |
| Σχήμα 2. 3. Τυπική καμπύλη είσδυσης υδραργύρου (πηγή: (Μοροπούλου, 2007), ίδια επεξεργασία).<br>.....  | 25  |
| Σχήμα 2. 4. Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης α) αφυδατωμένα προϊόντα, β) προϊόντα εκβολής.<br>.....   | 29  |
| Σχήμα 2. 5. Το μοντέλο Maxwell (πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία). .....   | 32  |
| Σχήμα 2. 6. Το μοντέλο Voight (Kelvin) (πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία). .....   | 33  |
| Σχήμα 2. 7. Διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης(πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία).....   | 34  |
| Σχήμα 2. 8. Σύνθετο μέτρο (πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία). .....  | 34  |
| Σχήμα 2. 9. Τύποι ισόθερμων ρόφησης (πηγή: (Lewicki, 2008), ίδια επεξεργασία).....   | 37  |
| Σχήμα 2. 10. Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης-εκρόφησης (πηγή: (Jangam & Mujumdar, 2010), ίδια επεξεργασία).....   | 38  |
| Σχήμα 2. 11. Τυπική καμπύλη που λαμβάνεται με χρήση της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (πηγή: (Roos, 1995), ίδια επεξεργασία). .....                              | 46  |
| Σχήμα 2. 12. Σχηματική παρουσίαση της οργανοληπτικής ποιότητας των τροφίμων (πηγή: (Kramer, 1973), ίδια επεξεργασία). .....  | 48  |
| Σχήμα 3. 1. Διάγραμμα ρυθμού ξήρανσης (πηγή: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ίδια επεξεργασία).....  | 57  |
| Σχήμα 3. 2. Διάγραμμα φάσεων του νερού (πηγή: (Roos, 1995), ίδια επεξεργασία).....   | 61  |
| Σχήμα 3. 3. Στάδια της διεργασίας ξήρανσης υπό κατάψυξη (πηγή: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ίδια επεξεργασία). .....                                      | 62  |
| Σχήμα 3. 4. Συσσκευή ξήρανσης υπό κατάψυξη (πηγή: (Κροκίδα, 1999), ίδια επεξεργασία).....  | 63  |
| Σχήμα 3. 5. Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης (πηγή: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ίδια επεξεργασία). ..... | 65  |
| Σχήμα 3. 6. Πειραματική συσκευή ξήρανσης σε ρεύμα αέρα (πηγή: (Κροκίδα, 1999), ίδια επεξεργασία).....  | 66  |
| Σχήμα 3. 7. Συσσκευή ξήρανσης υπό κενό (πηγή: (Κροκίδα, 1999), ίδια επεξεργασία).....  | 68  |
| Σχήμα 3. 8. Μηχανισμοί μεταφοράς κατά τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης (πηγή: (Lazarides & Mavroudis, 1995), ίδια επεξεργασία). .....                           | 69  |
| Σχήμα 3. 9. Σύστημα εκβολής τροφίμων σε εκβολέα μονού κοχλία (πηγές: (Harper & Tribelhorn, 1988; Huber, 2000; Riaz, 2000), ίδια επεξεργασία). .....                  | 76  |
| Σχήμα 3. 10 Εκβολέας διπλού κοχλία (πηγή: (Huber, 2000), ίδια επεξεργασία).....  | 80  |
| Σχήμα 3. 11. Εκβολείς διπλού κοχλία α) συμπεριστροφής, β) αντίστροφης περιστροφής (πηγή: (Huber, 2000), ίδια επεξεργασία). .....                                     | 81  |
| Σχήμα 3. 12.Τύποι διαμόρφωσης κοχλιών σε εκβολείς διπλού κοχλία (πηγές: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Harper & Tribelhorn, 1988), ίδια επεξεργασία).....    | 82  |
| Σχήμα 5. 1. Επίδραση του χρόνου βρασμού και της πίεσης λυοφιλίωσης στη φαινόμενη πυκνότητα των αφυδατωμένων κόκκων ρυζιού.....                                       | 115 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 5. 2. Επίδραση του χρόνου βρασμού και της πίεσης λυοφιλίωσης στο πορώδες των κόκκων ρυζιού.....   | 116 |
| Σχήμα 5. 3. Εισερχόμενος όγκος υδραργύρου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραργύρου, συναρτήσει της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπευτικών λυοφιλιωμένων δειγμάτων ρυζιού ( $t=12$ min), για διάφορες πιέσεις ξήρανσης. ....  | 117 |
| Σχήμα 5. 4. Εισερχόμενος όγκος υδραργύρου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραργύρου, συναρτήσει της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπευτικών λυοφιλιωμένων δειγμάτων ρυζιού ( $P=0,04$ mbar), για διάφορους χρόνους βρασμού. ....   | 118 |
| Σχήμα 5. 5. Επίδραση του χρόνου βρασμού και της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στο συνολικό όγκο υδραργύρου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραργύρου. ....  | 118 |
| Σχήμα 5. 6. Κατανομή πόρων δειγμάτων βρασμένου ρυζιού τα οποία είχαν βράσει για διάφορους χρόνους, και αφυδατώθηκαν σε δύο διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη α) $P=0,13$ mbar και β) $P=1,25$ mbar.....  | 119 |
| Σχήμα 5. 7. Κατανομή πόρων δειγμάτων βρασμένου ρυζιού ( $t=12$ min) που αφυδατώθηκε σε διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.....  | 120 |
| Σχήμα 5. 8. Απεικόνιση της μικροδομής των λυοφιλιωμένων κόκκων ρυζιού. ....   | 120 |
| Σχήμα 5. 9. Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στη φαινόμενη πυκνότητα, για την πατάτα, το μανιτάρι και τη φράουλα.....  | 122 |
| Σχήμα 5. 10. Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στο πορώδες, για την πατάτα, το μανιτάρι και τη φράουλα.....   | 122 |
| Σχήμα 5. 11. Εισερχόμενος όγκος υδραργύρου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραργύρου, συναρτήσει της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπευτικών λυοφιλιωμένων δειγμάτων πατάτας, για διάφορες πιέσεις ξήρανσης.....   | 124 |
| Σχήμα 5. 12. Κατανομή πόρων δειγμάτων πατάτας που αφυδατώθηκαν σε διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη. ....  | 124 |
| Σχήμα 5. 13. Απεικόνιση της μικροδομής των λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων. ....  | 125 |
| Σχήμα 5. 14. Κατανομή πόρων δειγμάτων που αφυδατώθηκαν με διάφορες μεθόδους (LFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις, VD: ξήρανση υπό κενό, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). ....   | 126 |
| Σχήμα 5. 15. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στη φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής.....  | 128 |
| Σχήμα 5. 16. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στο πορώδες των προϊόντων εκβολής. ....   | 131 |
| Σχήμα 5. 17. Κατανομή πόρων των προϊόντων εκβολής ως συνάρτηση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ).....   | 132 |
| Σχήμα 5. 18. Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη μικροδομή των προϊόντων εκβολής. Α: ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm) α) $X=14\%$ , β) $X=17\%$ , γ) $X=20\%$ , Β: ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm) α) $C=5\%$ , β) $C=7,5\%$ , γ) $C=10\%$ , Γ: ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) α) $T=140^{\circ}\text{C}$ , β) $T=160^{\circ}\text{C}$ , γ) $T=180^{\circ}\text{C}$ , Δ: ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) α) $N=150$ rpm, β) $N=200$ rpm, γ) $N=250$ rpm..... | 133 |



|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 5. 19. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στο συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής. ....   | 135 |
| Σχήμα 5. 20. Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη διόγκωση των προϊόντων εκβολής. Α: ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm) α) $X=14\%$ , β) $X=17\%$ , γ) $X=20\%$ , Β: ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm) α) $C=5\%$ , β) $C=7,5\%$ , γ) $C=10\%$ , Γ: ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) α) $T=140^{\circ}\text{C}$ , β) $T=160^{\circ}\text{C}$ , γ) $T=180^{\circ}\text{C}$ , Δ: ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) α) $N=150$ rpm, β) $N=200$ rpm, γ) $N=250$ rpm..... | 136 |
| Σχήμα 6. 1. Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στις μηχανικές ιδιότητες των γεωργικών προϊόντων, (α) τάση θραύσης, (β) παραμόρφωση θραύσης και (γ) μέτρο ελαστικότητας. ....  | 155 |
| Σχήμα 6. 2. Συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων των λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων με το πορώδες, (α) τάση θραύσης, (β) παραμόρφωση θραύσης και (γ) μέτρο ελαστικότητας. ....   | 156 |
| Σχήμα 6. 3. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην τάση θραύσης των προϊόντων εκβολής. ....   | 158 |
| Σχήμα 6. 4. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (γ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην παραμόρφωση θραύσης των προϊόντων εκβολής.....   | 159 |
| Σχήμα 6. 5. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στο μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής. ....   | 160 |
| Σχήμα 6. 6. Συσχέτιση (α) του μέτρου ελαστικότητας και (β) της τάσης θραύσης με το συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής. ....  | 161 |
| Σχήμα 6. 7. Ισόθερμες ρόφησης των βρασμένων ( $t=4$ min) κόκκων ρυζιού, που αφυδατώθηκαν σε διάφορες πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.....  | 163 |
| Σχήμα 6. 8. Ισόθερμες ρόφησης των γεωργικών προϊόντων (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα) που αφυδατώθηκαν σε διάφορες πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη, (α) $P=0,06$ mbar και (β) $P=0,60$ mbar. ....  | 163 |
| Σχήμα 6. 9. Ισόθερμες ρόφησης των προϊόντων εκβολής. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ).....   | 166 |
| Σχήμα 6. 10. Επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των βρασμένων ( $t=4$ min) κόκκων ρυζιού, που αφυδατώθηκαν σε διάφορες πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.....  | 167 |
| Σχήμα 6. 11. (α) Επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των γεωργικών προϊόντων ( $P=0,06$ mbar), (β) Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των γεωργικών προϊόντων, $\Delta$ , $\circ$ , $\square$ $\alpha_w=0,33$ , $\blacktriangle$ , $\bullet$ , $\blacksquare$ $\alpha_w=0,75$ . ....   | 167 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 6. 12. Συσχέτιση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης με το πορώδες των αφυδατωμένων βρασμένων ( $t=4$ min) κόκκων ρυζιού, για δύο διαφορετικές ενεργότητες ύδατος, (α) 0,75 και (β) 0,94.<br>.....   | 169 |
| Σχήμα 6. 13. Εξάρτηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από την περιεχόμενη υγρασία για τις διάφορες παραμέτρους της διεργασίας, (α) αρχική περιεχόμενη υγρασία ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (β) συγκέντρωση του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (γ) θερμοκρασία εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ grm) και (δ) ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ).....  | 170 |
| Σχήμα 6. 14. Εξάρτηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από (α) την αρχική περιεχόμενη υγρασία ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (β) τη συγκέντρωση του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (γ) τη θερμοκρασία εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ grm) και (δ) την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ), για τις διάφορες ενεργότητες ύδατος.....  | 171 |
| Σχήμα 7. 1. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ grm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην εμφάνιση των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).           | 182 |
| Σχήμα 7. 2. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ grm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στη γεύση των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).               | 183 |
| Σχήμα 7. 3. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ grm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην υφή των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).                | 185 |
| Σχήμα 7. 4. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ , $N=200$ grm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $N=200$ grm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ , $C=7,5\%$ , $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στη συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )). | 186 |
| Σχήμα 7. 5. Συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής.  | 187 |
| Σχήμα 7. 6. Επίδραση του πορώδους στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής.<br>.....  | 189 |
| Σχήμα 7. 7. Επίδραση του πορώδους στη συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής.....  | 190 |
| Σχήμα 8. 1. Αύξηση βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων (α) πατάτας και (β) μπανάνας, κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό (LFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις, HFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε υψηλές πιέσεις, VD: ξήρανση υπό κενό, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα).....   | 204 |
| Σχήμα 8. 2. Αποδέσμευση άλατος των αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας, κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). (α) Αναλυτική μέθοδος και (β) Μέτρηση αγωγιμότητας διαλύματος.....   | 206 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 8. 3. Αποδέσμευση άλατος των αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας, κατά την εμφάνισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο σάλιο (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). (α) Αναλυτική μέθοδος και (β) Μέτρηση αγωγιμότητας διαλύματος. ....   | 206 |
| Σχήμα 8. 4. Τυπικές καμπύλες σύνθετης αντίστασης του συστήματος, όπως μετρείται μέσω ηλεκτροχημικής εμπέδησης, συναρτήσει της συχνότητας σάρωσης, για διάφορους χρόνους εμφάνισης. ....   | 208 |
| Σχήμα 8. 5. Σύνθετη αντίσταση του συστήματος, όπως μετρείται μέσω ηλεκτροχημικής εμπέδησης, κατά την εμφάνιση δειγμάτων πατάτας σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο (α) γαστρικό υγρό και (β) σάλιο (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). ....  | 208 |
| Σχήμα 8. 6. Αποδέσμευση σακχάρων κατά την εμφάνιση αφυδατωμένων δειγμάτων μπανάνας σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). Μεταβολή των βαθμών Brix. ....   | 209 |
| Σχήμα 9. 1. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας, (α) παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) και (β) μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) και μέτρο απωλειών ( $G''$ ) (OD: ωσμωτική αφυδάτωση, control: φρέσκο δείγμα).....  | 217 |
| Σχήμα 9. 2. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης (OD) στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τρεις μεθόδους (Α. Ξήρανση υπό κενό (VD), Β. Ξήρανση σε ρεύμα αέρα (AD), Γ. Ξήρανση υπό κατάψυξη (FD)), (α) παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) και (β) μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) και μέτρο απωλειών ( $G''$ ). .... | 219 |
| Σχήμα 9. 3. Επίδραση της διεργασίας ξήρανσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό, control: φρέσκο δείγμα), (α) παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) και (β) μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) και μέτρο απωλειών ( $G''$ ). ....                                       | 220 |
| Σχήμα 9. 4. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας (OD: ωσμωτική αφυδάτωση, control: φρέσκο δείγμα). ....   | 220 |
| Σχήμα 9. 5. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης (OD) στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τρεις μεθόδους (Α. Ξήρανση υπό κενό (VD), Β. Ξήρανση σε ρεύμα αέρα (AD), Γ. Ξήρανση υπό κατάψυξη (FD)) συναρτήσει της θερμοκρασίας. ....   | 221 |
| Σχήμα 9. 6. Επίδραση της διεργασίας ξήρανσης στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό, control: φρέσκο δείγμα).....  | 222 |
| Σχήμα 9. 7. Μεταβολή του ιξώδους αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας, μετά από την εμφάνισή τους σε διάλυμα σάλιου για 30 min (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό). ....  | 222 |



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 2. 1. Εξισώσεις ισόθερμων ρόφησης (Albena & Nikolay, 2004; Jangam & Mujumdar, 2010; Sahin & Sumnu, 2006; Wang & Brennan, 1991; Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006)..... | 39  |
| Πίνακας 4. 1. Περιεχόμενη υγρασία των φρέσκων προϊόντων.....   | 90  |
| Πίνακας 4. 2. Κατανομή θερμοκρασιών (°C) κατά μήκος του εκβολέα. ....  | 95  |
| Πίνακας 4. 3. Συνθήκες εκβολής και χαρακτηριστικά των πρώτων υλών.....   | 96  |
| Πίνακας 4. 4. Πειραματικός σχεδιασμός. ....  | 97  |
| Πίνακας 4. 5. Συνολικός αριθμός πειραματικών μετρήσεων για τα αφυδατωμένα προϊόντα. ....   | 99  |
| Πίνακας 4. 6. Συνολικός αριθμός πειραματικών μετρήσεων για τα προϊόντα εκβολής.....  | 100 |
| Πίνακας 5. 1. Σχέσεις υπολογισμού του φαινόμενου όγκου των υλικών.....   | 110 |
| Πίνακας 5. 2. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για το πορώδες και τη φαινόμενη πυκνότητα λυοφιλιωμένων κόκκων ρυζιού.....  | 116 |
| Πίνακας 5. 3. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για το συνολικό όγκο υδραργύρου, όπως μετريέται με ποροσιμετρία υδραργύρου, λυοφιλιωμένων κόκκων ρυζιού. ....         | 119 |
| Πίνακας 5. 4. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για το πορώδες και τη φαινόμενη πυκνότητα λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων.....                                      | 123 |
| Πίνακας 5. 5. Τιμές του πορώδους ωσμωτικά προ-επεξεργασμένων δειγμάτων πατάτας και μπανάνας, τα οποία αφυδατώθηκαν με διάφορες μεθόδους ξήρανσης.....                    | 125 |
| Πίνακας 5. 6. Τιμές της πραγματικής πυκνότητας των προϊόντων εκβολής.....  | 127 |
| Πίνακας 5. 7. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για τις δομικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής.....  | 129 |
| Πίνακας 6. 1. Ενεργότητα ύδατος των χρησιμοποιούμενων κορεσμένων αλάτων.....   | 150 |
| Πίνακας 6. 2. Πειραματικός σχεδιασμός για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης.....   | 152 |
| Πίνακας 6. 3. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για τις μηχανικές ιδιότητες των αφυδατωμένων γεωργικών προϊόντων.....   | 154 |
| Πίνακας 6. 4. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για τις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής.....  | 161 |
| Πίνακας 6. 5. Εκτιμώμενες παράμετροι του προτύπου συσχέτισης των μηχανικών και δομικών ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής.....  | 162 |
| Πίνακας 6. 6. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης GAB για τα λυοφιλιωμένα προϊόντα.....  | 164 |
| Πίνακας 6. 7. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης GAB για τα προϊόντα εκβολής.....   | 165 |
| Πίνακας 6. 8. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα λυοφιλιωμένα προϊόντα ρυζιού ( $t=4$ min).....  | 168 |
| Πίνακας 6. 9. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα λυοφιλιωμένα γεωργικά προϊόντα ( $P=0,06$ mbar).....                                      | 168 |
| Πίνακας 6. 10. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα προϊόντα εκβολής.....  | 169 |
| Πίνακας 7. 1. Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ορισμοί και όρια αξιολόγησης για τα προϊόντα εκβολής.....  | 180 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 7. 2. Παράμετροι συσχέτισης των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών με το πορώδες των προϊόντων. ....   | 189 |
| Πίνακας 8. 1. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για την αύξηση βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα γαστρικού υγρού. ....                         | 205 |
| Πίνακας 8. 2. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για την αποδέσμευση του άλατος αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα γαστρικού υγρού και σάλιου. .... | 207 |
| Πίνακας 8. 3. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για την αποδέσμευση σακχάρων αφυδατωμένων δειγμάτων μπανάνας κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα γαστρικού υγρού. ...              | 210 |
| Πίνακας 9. 1. Εκτίμηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, με χρήση Δυναμικής Μηχανικής Θερμικής Ανάλυσης. ....  | 217 |
| Πίνακας 10. 1. Καθορισμός ορίων για τις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής. ....  | 227 |
| Πίνακας 10. 2. Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων επιλεγμένων προϊόντων εκβολής. ....  | 228 |
| Πίνακας 10. 3. Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων αφυδατωμένων προϊόντων. ....   | 230 |
| Πίνακας 11. 1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα λυοφιλωμένα προϊόντα. ....  | 239 |
| Πίνακας 11. 2. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα προϊόντα που αφυδατώθηκαν με διάφορες μεθόδους. ....  | 239 |
| Πίνακας 11. 3. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα προϊόντα εκβολής. ....  | 240 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 4. 1. Συσκευή ξήρανσης υπό κατάψυξη (Leybold-Heraeus GT 2A). .....  | 91  |
| Εικόνα 4. 2. Συσκευή ξήρανσης σε ρεύμα αέρα.....   | 92  |
| Εικόνα 4. 3. Φούρνος κενού (Sanyo Gallenkamp PLC). .....   | 92  |
| Εικόνα 4. 4. Λυοφιλωμένα δείγματα καρότου.....   | 93  |
| Εικόνα 4. 5. Εκβολέας διπλού κοχλίου (Prism Eurolab, model KX-16HC). .....   | 94  |
| Εικόνα 4. 6. Θάλαμος εκβολέα διπλού κοχλίου, ο οποίος περιέχει τους κοχλίες (Prism Eurolab, model KX-16HC). .....                    | 95  |
| Εικόνα 4. 7. Μήτρα εκβολέα.....  | 95  |
| <br>   |     |
| Εικόνα 5. 1. Στερεοπυκνόμετρο ηλίου (Quantacrome multipycnometer MVP-1). .....   | 109 |
| Εικόνα 5. 2. Ψηφιακό παχύμετρο.....  | 110 |
| Εικόνα 5. 3. Συσκευή μέτρησης του φαινόμενου όγκου. ....   | 111 |
| Εικόνα 5. 4. Ποροσίμετρο υδραργύρου (MIP, Fisons, Porosimeter 2000, Milano, Italy).....  | 112 |
| Εικόνα 5. 5. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Quanta 200 FEI (2004), OR, USA). .....   | 113 |
| Εικόνα 5. 6. Στερεομικροσκόπιο (Olympus, SZ).....  | 113 |
| <br>   |     |
| Εικόνα 6. 1. Συσκευή μηχανικών δοκιμών (Zwick, model Z2.5/TN1S). .....   | 149 |
| Εικόνα 6. 2. Συσκευή Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (Perkin Elmer DSC 6). .....   | 151 |
| <br>   |     |
| Εικόνα 8. 1. Αγωγιμόμετρο (Thermoscientific, USA). .....   | 202 |
| Εικόνα 8. 2. Ηλεκτροχημικό κελί.....   | 203 |
| Εικόνα 8. 3. Ποτενσιοστάτης (Princeton Potentiostat, model 263A) και αναλυτής συχνοτήτων (Solartron 1260 Gain-Phase Analyzer). ..... | 203 |
| <br>   |     |
| Εικόνα 9. 1. Συσκευή Δυναμικής Μηχανικής Θερμικής Ανάλυσης (Physica MCR 301, Anton Paar). .....                                      | 216 |
| <br>   |     |
| Εικόνα 10. 1. Περιβάλλον προσομοιωτή για τη διεργασία της εκβολής. ....  | 231 |





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής των ανθρώπων έχει καταστήσει απαραίτητη την κατανάλωση τυποποιημένων τροφίμων, τα οποία είναι εύκολα στη χρήση και απαιτούν μικρό χρόνο προετοιμασίας. Η ποιότητα των τυποποιημένων τροφίμων είναι ζήτημα μεγάλου πρακτικού ενδιαφέροντος, τόσο για τις βιομηχανίες τροφίμων όσο και για τους καταναλωτές, και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα αποδοχής ή απόρριψής τους. Τα τελευταία χρόνια, οι καταναλωτές απαιτούν την ανάπτυξη και παραγωγή προϊόντων τα οποία είναι γευστικά, ευχάριστα κατά τη μάσηση και χαρακτηρίζονται από υψηλή διατροφική αξία και για το λόγο αυτό, οι βιομηχανίες τροφίμων στρέφονται στην ανάπτυξη νέων προϊόντων. Η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση νέων, καινοτόμων επεξεργασμένων προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά βασίζεται στη μελέτη της επίδρασης των μεθόδων και συνθηκών παραγωγής και επεξεργασίας στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των προϊόντων.

Μεταξύ των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν την ποιότητα των επεξεργασμένων προϊόντων, η δομή και τα δομικά χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Η δομή των τροφίμων χαρακτηρίζει τη γεωμετρία και την τοπολογία των πόρων στο εσωτερικό του υλικού και καθορίζεται από ποικίλα μεγέθη (πορώδες, πυκνότητα, κατανομή πόρων, μέγεθος πόρων, κτλ.). Η διαμόρφωση της δομής των προϊόντων επηρεάζει πλήθος άλλων ιδιοτήτων, οι οποίες είναι καθοριστικές για την ποιότητα των προϊόντων, όπως είναι οι μηχανικές ιδιότητες, η εμφάνιση, η γεύση, η διάχυση μάζας, κτλ.

Δύο από τις βασικότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή επεξεργασμένων προϊόντων με καθορισμένες ιδιότητες δομής είναι η ξήρανση και η εκβολή. Η ξήρανση χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων και εφαρμόζεται σε μεγάλο αριθμό προϊόντων, όπως είναι τα φρούτα, τα λαχανικά, το κρέας, τα ψάρια, τα δημητριακά, κτλ. οδηγώντας στην παραγωγή σταθερών προϊόντων ή προϊόντων που προορίζονται για σνακ, δημητριακά, σουπες, κτλ. Οι επιμέρους μέθοδοι ξήρανσης και οι συνθήκες επεξεργασίας επηρεάζουν την ποιότητα και τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Οι διάφορες μέθοδοι είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό διαφορετικών πορωδών δομών, εξαιτίας των διαφορετικών μηχανισμών απομάκρυνσης του νερού από το εσωτερικό του τροφίμου προς το περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα αυτού, η ίδια πρώτη ύλη μπορεί να έχει τελείως διαφορετική δομή, ανάλογα με τη μέθοδο ξήρανσης και τις συνθήκες που εφαρμόζονται.

Η εκβολή τροφίμων αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο για την παραγωγή «έτοιμων» διογκωμένων προϊόντων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μιας ευρείας ποικιλίας τροφίμων, όπως σνακ, ζυμαρικά, δημητριακά, βρεφικές τροφές, μπισκότα, κράκερ, κρουτόν, κτλ., και είναι ευέλικτη στην ανάπτυξη νέων προϊόντων. Η απαίτηση των καταναλωτών για «λειτουργικά» τρόφιμα υψηλής ποιότητας, έχει στρέψει τις βιομηχανίες τροφίμων εκβολής στην παραγωγή προϊόντων υψηλής διατροφικής αξίας τα οποία περιέχουν υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών και φυτικών ινών. Η ποιότητα και οι ιδιότητες των τελικών διογκωμένων προϊόντων καθορίζονται από ποικίλες παραμέτρους, όπως είναι τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (παροχή και σύσταση τροφοδοσίας) και οι συνθήκες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της εκβολής (τύπος του εκβολέα, θερμοκρασιακό προφίλ, χρόνος παραμονής, ταχύτητα και γεωμετρία των κοχλιών). Η αποδοχή των επεξεργασμένων προϊόντων από τους καταναλωτές βασίζεται σε πλήθος χαρακτηριστικών που καθορίζουν την ποιότητά τους, όπως είναι η δομή, η υφή, η γεύση, η διατηρησιμότητα και τα διατροφικά χαρακτηριστικά.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ποικίλων προϊόντων καθορισμένης δομής με την εφαρμογή των δύο αναφερθέντων διεργασιών και μελετήθηκε η επίδραση της δομής στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Όσον αφορά στη διεργασία της ξήρανσης, μελετήθηκαν τρεις βασικές διεργασίες, η ξήρανση υπό κατάψυξη, η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση σε ρεύμα αέρα, οι οποίες κατέχουν ιδιαίτερη θέση στη σύγχρονη βιομηχανία τροφίμων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ως προκατεργασία η ωσμωτική αφυδάτωση. Τα υλικά που επιλέχθηκαν αποτελούν ελληνικά προϊόντα, αντιπροσωπευτικά των τριών κυριότερων κατηγοριών τροφίμων - φρούτα, λαχανικά και δημητριακά. Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση της πίεσης που εφαρμόζεται κατά την ξήρανση υπό κατάψυξη στα χαρακτηριστικά αφυδατωμένων προϊόντων ρυζιού, πατάτας, μανιταριού και φράουλας. Τα προϊόντα ρυζιού υπέστησαν βρασμό σε ποικίλους χρόνους πριν την αφυδάτωσή τους. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν κατά την ξήρανση υπό κατάψυξη κυμάνθηκαν μεταξύ 0,04 και 1,50 mbar. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση των τριών διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης, στα χαρακτηριστικά αφυδατωμένων προϊόντων πατάτας και μπανάνας, τα οποία υπέστησαν προκατεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης.

Όσον αφορά στη διεργασία της εκβολής, η παραγωγή των προϊόντων πραγματοποιήθηκε σε εκβολέα διπλού κοχλία με βάση το σχεδιασμό κεντρικού σημείου. Ως πρώτες ύλες επιλέχθηκαν το άλευρο ρυζιού, το οποίο αποτέλεσε τη βάση του μίγματος, και η ξηρή σκόνη καρότου, η οποία προστέθηκε σε συγκεκριμένες αναλογίες. Μελετήθηκε η επίδραση τεσσάρων ανεξάρτητων παραμέτρων, θερμοκρασία εκβολής ( $T=140-180^{\circ}\text{C}$ ), ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα ( $N=150-250$  rpm), αρχική περιεχόμενη υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας ( $X=14-20\%$ ) και αναλογία σκόνης καρότου/ρυζάλευρου ( $C=5-10\%$ ) στα χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής.

Στα τελικά προϊόντα εξετάστηκαν ποικίλες ιδιότητες, όπως δομικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες υφής, θερμικές ιδιότητες, ιδιότητες προσρόφησης, ρεολογικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ενώ μελετήθηκε η αποδέσμευση συστατικών σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Μελετήθηκε η επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη (0,04-1,50 mbar) και του χρόνου βρασμού (4-24 min) στα δομικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες προσρόφησης και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης προϊόντων ρυζιού. Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στα δομικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες υφής, τις ιδιότητες προσρόφησης και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των υπόλοιπων γεωργικών προϊόντων. Εξετάστηκε ακόμα, η επίδραση των μεθόδων ξήρανσης (ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση σε ρεύμα αέρα, ξήρανση υπό κενό) στα δομικά χαρακτηριστικά, τις ρεολογικές ιδιότητες και την αποδέσμευση ορισμένων συστατικών στον ανθρώπινο οργανισμό, σε αφυδατωμένα προϊόντα τα οποία είχαν υποστεί προ-επεξεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης. Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στις δομικές, μηχανικές, θερμικές ιδιότητες, τις ιδιότητες προσρόφησης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων.

Πιο συγκεκριμένα, οι δομικές ιδιότητες που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν το πορώδες, την πραγματική και φαινόμενη πυκνότητα και την κατανομή πόρων των παραχθέντων προϊόντων. Στα προϊόντα εκβολής μετρήθηκε, επίσης, ο συντελεστής διόγκωσης, ο οποίος είναι ιδιαίτερα καθοριστικός για τις ιδιότητες και την αποδοχή των προϊόντων. Όσον αφορά στα αφυδατωμένα προϊόντα, τα δομικά χαρακτηριστικά επηρεάστηκαν σημαντικά από τη μέθοδο ξήρανσης, αλλά και από τις επιμέρους συνθήκες επεξεργασίας της εκάστοτε μεθόδου. Η ξήρανση υπό κατάψυξη που πραγματοποιήθηκε σε χαμηλές πιέσεις ( $P=0,04$  mbar) οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων ρυζιού με υψηλότερο πορώδες σε σχέση με την ξήρανση σε υψηλότερες πιέσεις ( $P=1,25$  mbar). Παραδείγματος χάριν, για τα προϊόντα ρυζιού που έβρασαν για χρόνο 20 min, η αύξηση της πίεσης ξήρανσης από

0,04 mbar σε 1,25 mbar οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,65 σε 0,60. Όσον αφορά στα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα), η μείωση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη από 1,50 mbar σε 0,06 mbar οδήγησε σε αύξηση του πορώδους κατά 5 με 10%. Επιπλέον, για τα ωσμωτικά αφυδατωμένα προϊόντα πατάτας και μπανάνας, η ξήρανση υπό κατάψυξη οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων με ιδιαίτερα υψηλό πορώδες σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους ξήρανσης (υπό κενό και σε ρεύμα αέρα).

Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, οι επιμέρους συνθήκες (θερμοκρασία και ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών) και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (υγρασία τροφοδοσίας και συγκέντρωση καρότου) παρουσίασαν σημαντική επίδραση στη δομή των εκβαλλόμενων προϊόντων. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 140 σε 180°C ( $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,78 σε 0,86 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,10. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,80 σε 0,83 και αύξηση του συντελεστή διόγκωσης από 2,15 σε 2,35. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας από 14 σε 20% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,88 σε 0,75 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,20, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου από 5 σε 10% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,85 σε 0,80 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,05. Τα προϊόντα εκβολής που εμφάνισαν το υψηλότερο πορώδες και βαθμό διόγκωσης παρήχθησαν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής των κοχλιών ( $N=250$  rpm), ενώ το μίγμα τροφοδοσίας περιείχε χαμηλή υγρασία ( $X=14\%$ ) και χαμηλή συγκέντρωση καρότου ( $C=5\%$ ).

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση των διεργασιών στις ιδιότητες ποιότητας (μηχανικές (υφή), ρεολογικές, θερμικές, οργανοληπτικές, προσρόφηση υγρασίας) των παραχθέντων προϊόντων, καθώς επίσης, μελετήθηκε και η επίδραση των δομικών χαρακτηριστικών σε αυτές. Οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάστηκαν σημαντικά από τις συνθήκες επεξεργασίας και τη δομή των προϊόντων. Η μείωση της πίεσης από 1,50 mbar σε 0,06 mbar κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη, οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας των γεωργικών προϊόντων (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα) κατά 20-50%, ανάλογα με το προϊόν. Παράλληλα, η αύξηση του πορώδους οδήγησε στην παραγωγή πιο μαλακών προϊόντων, όπου μία αύξηση του πορώδους κατά 10% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 30% περίπου. Στα προϊόντα εκβολής, η τάση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκαν με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, της συγκέντρωσης καρότου και της θερμοκρασίας εκβολής, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών είχε την αντίθετη επίδραση. Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου από 5 σε 10% οδήγησε σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας από 585 σε 795 kPa, ενώ η αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας από 14 σε 20% οδήγησε σε αύξηση της τάσης θραύσης από 155 σε 245 kPa. Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής από 140 σε 180°C οδήγησε σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας από 665 σε 865 kPa, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm οδήγησε σε μείωση της τάσης θραύσης από 235 σε 180 kPa. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής κατά 70% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 1100 σε 400 kPa και μείωση της τάσης θραύσης από 420 σε 100 kPa.

Στα αφυδατωμένα προϊόντα και τα προϊόντα εκβολής εξετάστηκε, επίσης, η προσρόφηση υγρασίας σε περιβάλλοντα διαφορετικών ενεργοτήτων ύδατος. Το πρότυπο GAB προσαρμόστηκε ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα, ενώ οι ισόθερμες ακολούθησαν ισόθερμες τύπου II, εκτός από τα προϊόντα φράουλας τα οποία ακολούθησαν ισόθερμες τύπου III. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τόσο των αφυδατωμένων προϊόντων όσο και των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε από

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

τις συνθήκες επεξεργασίας. Για τα προϊόντα ρυζιού, η αύξηση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη από 0,04 σε 1,25 mbar οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από 22 σε 25°C, για ενεργότητα ύδατος ίση με 0,94. Για τα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα, η εφαρμοζόμενη πίεση δεν επηρέασε σημαντικά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων εκβολής κυμάνθηκαν μεταξύ των 130 και 18°C, για ενεργότητες ύδατος από 0,11 έως 0,94, αντίστοιχα. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αυξήθηκε καθώς αυξήθηκε η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, ενώ μειώθηκε καθώς αυξήθηκε η αρχική υγρασία της τροφοδοσίας και η συγκέντρωση του καρότου στο αρχικό μίγμα και μειώθηκε η θερμοκρασία εκβολής. Η μεταβολή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης παρουσιάστηκε πιο έντονη στη χαμηλή ενεργότητα νερού ( $a_w=0,11$ ). Στην ενεργότητα αυτή, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής από τους 140 στους 180°C ( $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120 στους 130°C, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120 στους 124°C. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας από 14 σε 20% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 130 στους 90°C, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου από 5 σε 10% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 125 στους 98°C.

Οι διάφορες συνθήκες επεξεργασίας επηρέασαν, επίσης, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των παραχθέντων προϊόντων. Μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων της εκβολής στην εμφάνιση, τη γεύση και την υφή των προϊόντων. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε κλίμακα βαθμολόγησης 1-9. Η εμφάνιση, η γεύση και η υφή των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε σημαντικά από τις παραμέτρους της διεργασίας. Η αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας (από 14 σε 20%,  $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε στη μείωση της ομοιομορφίας (Βαθμολογία: από 8,0 στο 4,8), της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 6,0 στο 3,5), της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 6,5 στο 2,0) και της συνοχής (Βαθμολογία: από 6,2 στο 2,8) και στην αύξηση της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 2,3 στο 7,0). Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου (από 5 σε 10%,  $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) οδήγησε στη μείωση της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 7,6 στο 3,4), της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 5,5 στο 3,3) και της συγκολλητικότητας (Βαθμολογία: από 4,6 στο 2,8) και στην αύξηση της ομοιομορφίας (Βαθμολογία: από 5,3 στο 6,5) και της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 3,2 στο 4,3). Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής (από 140 σε 180°C,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε στη μείωση της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 7,0 στο 4,4) και της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 7,4 στο 3,6) και στην αύξηση της ομοιομορφίας (Βαθμολογία: από 3,5 στο 6,0), της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 3,2 στο 6,4) και της συγκολλητικότητας (Βαθμολογία: από 4,4 στο 5,0). Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (από 150 σε 250 rpm,  $T=160^\circ\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε στη μείωση της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 5,7 στο 4,7) και στην αύξηση της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 3,9 στο 7,5), της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 3,3 στο 4,3) και της συνοχής (Βαθμολογία: από 2,5 στο 4,4). Επιπλέον, τα προϊόντα τα οποία χαρακτηρίστηκαν από υψηλό πορώδες και συντελεστή διόγκωσης εμφάνισαν αυξημένη τραγανότητα, συνοχή και ενυδάτωση και μειωμένη σκληρότητα κατά τη μάσηση. Τα προϊόντα με υψηλό πορώδες ( $>0,80$ ) συγκέντρωσαν την υψηλότερη συνολική βαθμολογία από τους δοκιμαστές. Τα πιο επιθυμητά προϊόντα, τα οποία χαρακτηρίστηκαν από υψηλή διόγκωση και χαμηλή οργανοληπτική σκληρότητα, παρήχθησαν σε υψηλές θερμοκρασίες (180°C), υψηλές ταχύτητες περιστροφής κοχλιών (250 rpm) και χαμηλή αρχική περιεχόμενη υγρασία (14%).

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η επίδραση των συνθηκών και μεθόδων επεξεργασίας (ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση υπό κενό, ξήρανση σε ρεύμα αέρα, ωσμωτική αφυδάτωση) στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας. Το μέτρο αποθήκευσης και το μέτρο απωλειών μειώθηκαν με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 4 τάξεις μεγέθους. Η ξήρανση υπό κατάψυξη οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων χαμηλότερου ιξώδους ( $1,85 \times 10^5$  Pa·s στους  $20^\circ\text{C}$ ), σε σχέση με τα αφυδατωμένα υπό κενό και σε ρεύμα αέρα δείγματα ( $2,63 \times 10^5$  Pa·s και  $2,42 \times 10^5$  Pa·s στους  $20^\circ\text{C}$ , αντίστοιχα). Η ωσμωτική αφυδάτωση είχε ιδιαίτερη επίδραση στο ιξώδες, το μέτρο ελαστικότητας και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων. Οι ωσμωτικά αφυδατωμένες πατάτες παρουσίασαν χαμηλότερες θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης, σε σχέση με τα φρέσκα δείγματα. Αντίθετα, η διεργασία ξήρανσης δεν επηρέασε σημαντικά τα μέτρα αποθήκευσης και απωλειών δειγμάτων που είχαν υποστεί προκατεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης.

Σημαντικό κομμάτι της διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της αποδέσμευσης άλατος και σακχάρων αφυδατωμένων προϊόντων πατάτας και μπανάνας, σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Όπως παρατηρήθηκε, τα αφυδατωμένα υπό κατάψυξη δείγματα πατάτας εμφάνισαν πιο έντονη αποδέσμευση άλατος σε διάλυμα γαστρικού υγρού σε σχέση με τα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα. Αντίθετη τάση παρατηρήθηκε κατά την εμβάπτιση σε διάλυμα σάλιου.

Τέλος, αναπτύχθηκαν ή εφαρμόστηκαν απλά μαθηματικά πρότυπα, με στόχο την πρόβλεψη των ιδιοτήτων από τις συνθήκες επεξεργασίας, καθώς και τη συσχέτιση των ιδιοτήτων με τα δομικά χαρακτηριστικά των προϊόντων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές που αφορούν σε προϊόντα ξήρανσης και εκβολής. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής έγκειται καταρχάς στην πρακτική εφαρμογή των αποτελεσμάτων της. Τα αποτελέσματα της έρευνας της παρούσας διατριβής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βιομηχανική παραγωγή καινοτόμων προϊόντων τα οποία χαρακτηρίζονται από επιθυμητές ιδιότητες και καθορισμένα, βελτιωμένα οργανοληπτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά, με υψηλή ασφάλεια και σταθερότητα. Πραγματοποιήθηκε η μελέτη της δομής των προϊόντων και η σύνδεσή της με τα χαρακτηριστικά ποιότητάς τους. Η έρευνα της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να διευρυνθεί στη μελέτη άλλων τροφίμων καθορισμένης δομής, πέραν των τροφίμων εκβολής και των αφυδατωμένων προϊόντων, όπως είναι τα παγωτά, τα gels, κτλ., με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους.



# **ABSTRACT**

## **DEVELOPMENT OF FOODS WITH POROUS STRUCTURE**

The modern way of life has turned consumers to the consumption of processed foods that are easy to be used and require little preparation time. The quality of processed foods is of great practical interest both for the food industries and for consumers and is a key factor for their acceptance or rejection. Consumers require the development and production of food products that are tasty, have pleasant texture during chewing and are characterized by advanced nutritional characteristics. The optimization and development of new, innovative products with desirable characteristics, is based on the examination and understanding of the effect of production methods and process conditions on the quality characteristics of final products.

Structure formation during production and processing is playing a predominant role in the quality characteristics of processed foods. Food structure characterizes the geometry and topology of pores in the inner part of the material and is defined by a variety of properties (porosity, density, pore distribution, pore size, etc.). Structure formation also determines many other properties, such as mechanical properties, appearance, taste, etc., that are crucial for the acceptance of food products by consumers.

Drying and extrusion are two of the basic methods that are used in the food industry for the production of processed foods with defined structural characteristics. Drying is widely used in the food industry and is applied to a variety of food products, such as fruits, vegetables, meat, fish, cereals, etc., leading to the production of stable products or products that can be used as snacks, cereals, soups, etc. The different applied drying methods and conditions affect the quality and properties of final products. Different methods are responsible for the formation of different porous structures, due to the different mechanisms of water removal from the interior of the food to the environment. As a result, the same raw material may have a completely different structure, depending on the drying method and conditions applied.

Food extrusion is a modern method for the production of ready-to-eat products with foamed structure. Extrusion is used for the production of a wide variety of foods, such as snacks, pasta, cereals, baby foods, cookies, crackers, etc. and is flexible in developing new products. The consumers' demand for "functional" foods with high quality, has turned food industries to the production of foods of high nutritional value, which contain high levels of proteins and fibers. Raw materials' characteristics and extrusion conditions (extruder type, temperature profile, time, speed and geometry of the screws, feed supply, feed composition) determine the properties and the quality of the final foamed products.

The acceptance of processed foods by consumers depends on numerous characteristics that determine their quality, such as structure, texture, taste, stability and nutritional characteristics.

In the context of this thesis, drying and extrusion were used for the production of foods with defined structure. The effect of structure on quality characteristics was examined. Three drying methods, freeze drying, vacuum drying and air drying, that are widely used in the modern food industry were selected to be studied. In some cases, osmotic dehydration was used as a pretreatment method. The materials that were selected to be studied are Greek products, representative of the three main food categories - fruits, vegetables and cereals. The effect of freeze drying pressure on properties of dried rice, potatoes, mushrooms and strawberries was studied. Rice products were boiled at various times

## ABSTRACT

(4 to 24 min) prior to drying. Freeze drying pressure ranged from 0.04 to 1.50 mbar. In addition, the influence of different drying methods (freeze, air and vacuum drying) on the properties and characteristics of dried potatoes and bananas that were osmotically pre-dehydrated was examined.

For the production of the extrudates, rice flour was mixed with dehydrated carrot powder and extrudates were produced in a twin screw extruder. A central composite design was used for the production of the extrudates, regulating four independent parameters, the extrusion temperature (140-180°C), the screw speed (150-250 rpm), the feed moisture content (14-20%) and the ratio of the dehydrated carrot powder to the rice flour (5-10%).

Various properties were determined in the final products that include structural characteristics, mechanical properties, thermal properties, rheological properties and sensory characteristics, as well as the disintegration kinetics of components in simulated gastric fluid and saliva. The effect of freeze drying pressure and boiling time on structural properties, water adsorption and glass transition temperature of rice products was studied. In addition, the effect of freeze drying pressure on structural properties, mechanical properties, water adsorption and glass transition temperature of the other agricultural products was examined. The influence of drying methods (freeze, air, vacuum) on rheological properties and diffusion of specific components in the human body was also studied for osmotically pretreated dried potatoes and bananas. For the extruded products, the effect of process conditions on structural properties, mechanical properties, water adsorption, glass transition temperature and sensory characteristics was tested.

The examined structural properties include porosity, true and bulk density and pore distribution. Expansion ratio of extrudates, which is of particular importance for their acceptability, was also measured. Structural characteristics of dehydrated products were significantly affected by the drying method, as well as the various processing conditions of each method. Freeze drying that was performed at the lowest pressure ( $P=0.04$  mbar) resulted in the production of rice products with high porosity in comparison with drying at the highest pressure ( $P=1.25$  mbar). For example, for rice kernels that were boiled for 20 min the increment of freeze drying pressure from 0.04 mbar to 1.25 mbar led to the decrement of porosity from 0.65 to 0.60. For the other dried products (potato, mushroom, strawberry) the decrement of freeze drying pressure from 1.50 mbar to 0.06 mbar led to the increment of porosity up to 10%. For osmotically pretreated potatoes and bananas freeze drying led to the production of high porous products in comparison with the air and vacuum drying process.

In addition, extrusion conditions and raw materials characteristics had significant effect on the structure of extruded products. The increase of extrusion temperature from 140 to 180°C ( $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7.5\%$ ) led to the increase of porosity from 0.78 to 0.86 and the decrease of expansion ratio from 2.40 to 2.10. The increase of screw speed from 150 to 250 rpm ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7.5\%$ ) led to the increase of porosity from 0.80 to 0.83 and the increase of expansion ratio from 2.15 to 2.35. On the other hand, the increase of moisture content from 14 to 20% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7.5\%$ ) led to the decrease of porosity from 0.88 to 0.75 and the decrease of expansion ratio from 2.40 to 2.20, while the increase of carrot concentration from 5 to 10% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) led to the decrease of porosity from 0.85 to 0.80 and the decrease of expansion ratio from 2.40 to 2.05. Extrudates presenting the highest porosity and expansion ratio were produced at high screw speed ( $N=250$  rpm), while the feed mixture contained low moisture content ( $X=14\%$ ) and low carrot concentration ( $C=5\%$ ).



The effect of process conditions on other quality properties (mechanical (texture), rheological, thermal, sensory, moisture adsorption) of produced products, as well as the effect of structural characteristics on them were also studied. Mechanical properties were significantly affected by process conditions and structure of food products. The decrease of freeze drying pressure from 1.50 to 0.06 mbar led to the decrease of elasticity modulus of agricultural products (potato, mushroom, strawberry) up to 50%, depending on the material. Products with increased porosity were characterized by soft texture. Concerning the extruded products, stress and elasticity modulus were increased with increasing moisture content, carrot concentration and extrusion temperature, while the increase of screw speed had the opposite effect. The increase of carrot concentration from 5 to 10% led to the increment of elasticity modulus from 585 to 795 kPa, while the rise of moisture content from 14 to 20% resulted in the increment of stress from 155 to 245 kPa. The increase of extrusion temperature from 140 to 180°C led to the increment of elasticity modulus from 665 to 865 kPa, while the increase of screw speed from 150 to 250 rpm led to the decrease of stress from 235 to 180 kPa. In addition, a 70% increase in the expansion ratio resulted in the decrease of elasticity modulus from 1100 to 400 kPa and the decrease of stress from 420 to 100 kPa.

In addition, water adsorption in various water activities was studied for dried and extruded products. GAB model was fitted well to the experimental data, while adsorption isotherms followed type II, with the exception of strawberries that followed type III. Glass transition temperature of dried and extruded products was also affected by process conditions. For rice products, the increase of freeze drying pressure from 0.04 mbar to 1.25 mbar led to the increase of glass transition temperature from 22 to 25°C, for water activity equal to 0.94. Regarding the other agricultural products, freeze drying pressure did not significantly affect glass transition temperature. Glass transition temperatures of extruded products ranged from 130 to 18°C, for water activities from 0.11 to 0.94, respectively. Glass transition temperature increased with the increase of screw speed, while it decreased with the increase of moisture content and carrot concentration and the decrease of extrusion temperature. In 0.11 water activity, the increase of extrusion temperature from 140 to 180°C led to the increase of glass transition temperature from 120 to 130°C, while the increase of screw speed from 150 to 250 rpm led to the increase of glass transition temperature from 120 to 124°C. On the other hand, the rise of moisture content from 14 to 20% resulted in the decrease of glass transition temperature from 130 to 90°C, while the increase of carrot concentration from 5 to 10% led to the decrease of glass transition temperature from 125 to 98°C.

Extrusion conditions also affected the sensory characteristics of the produced products. The effect of extrusion parameters on appearance, taste and texture of extrudates was studied. For the evaluation of sensory characteristics a nine point scale (1-9) was used. Appearance, taste and texture was significantly affected by process conditions. The rise of moisture content from 14 to 20% resulted in the decrease of uniformity (Score from 8.0 to 4.8), expansion (Score from 6.0 to 3.5), rehydration (Score from 6.5 to 2.0) and cohesiveness (Score from 6.2 to 2.8) and the increase of hardness (Score from 2.3 to 7.0). The increase of carrot concentration from 5 to 10% led to the decrease of expansion (Score from 7.6 to 3.4), hardness (Score from 5.5 to 3.3) and adhesiveness (Score from 4.6 to 2.8) and the increase of uniformity (Score from 5.3 to 6.5) and rehydration (Score from 3.2 to 4.3). The increase of extrusion temperature from 140 to 180°C led to the decrease of expansion (Score from 7.0 to 4.4) and hardness (Score from 7.4 to 3.6) and the increase of uniformity (Score from 3.5 to 6.0), rehydration (Score from 3.2 to 6.4) and adhesiveness (Score from 4.4 to 5.0). The increase of screw speed from 150 to 250 rpm led to the decrease of hardness (Score from 5.7 to 4.7) and the increase of expansion

## ABSTRACT

(Score from 3.9 to 7.5), rehydration (Score from 3.3 to 4.3) and cohesiveness (Score from 2.5 to 4.4). Products that were characterized by high porosity and expansion ratio presented increased crunchiness, cohesiveness and rehydration and decreased hardness. Products that gained the highest scores were characterized by increased expansion and decreased sensory hardness and were produced in high temperatures (180°C), high screw speeds (250 rpm) and low moisture contents (14%).

Rheological properties of potatoes were influenced by the drying method (freeze, air, vacuum drying, osmotic dehydration) and the process conditions. Storage and loss modulus decreased with the increase of temperature. Freeze drying led to the production of low viscosity products ( $1.85 \times 10^5$  Pa·s at 20°C), compared to vacuum and air drying ( $2.63 \times 10^5$  Pa·s and  $2.42 \times 10^5$  Pa·s at 20°C, respectively). Osmotic dehydration had a significant influence on the viscosity, the modulus of elasticity and the glass transition temperature of the products. Osmotically dehydrated potatoes presented lower glass transition temperatures compared to the raw materials. On the other hand, the drying method did not affect storage and loss modulus of osmotically pretreated products.

The study of salt and sugar release from dried potatoes and bananas in solutions simulating human gastric fluid and saliva was also performed. The degradation of sugars from freeze dried bananas was more intense in comparison with air dried samples. Concerning potatoes, salt release in gastric fluid was more intense for freeze dried products, whereas in saliva the opposite trend was observed.

Simple mathematical models were applied or developed for the correlation of properties with process conditions, as well as the correlation of properties with structure.

In literature, there are numerous references concerning drying and extrusion processes. The innovation of this thesis lies firstly in the practical application of its results. The research results can be used for the production of innovative products that are characterized by desirable properties and defined, improved sensory and nutritional characteristics, with high safety and stability. Moreover, food structure was studied and associated with the quality characteristics of the products. The field of research could be extended to the examination and production of foods with defined structure from other food categories, such as ice creams, gels, etc., with the aim to improve their properties and their acceptance by consumers.

**1.**

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**



## 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ

Η εντατικοποίηση του τρόπου ζωής στα αστικά κέντρα τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στη σταδιακή μείωση της κατανάλωσης σπιτικού φαγητού και στην αυξημένη κατανάλωση τυποποιημένων τροφίμων, τα οποία όμως ταυτόχρονα πρέπει να χαρακτηρίζονται από επιθυμητή εμφάνιση, αυξημένη διατηρησιμότητα, χαμηλό κόστος και υψηλή διατροφική αξία. Τα αφυδατωμένα φρούτα και λαχανικά, τα οποία είναι πλούσια σε αντιοξειδωτικά, βιταμίνες, κτλ., καθώς και τα σνακς που περιέχουν συστατικά υψηλής διατροφικής αξίας αποτελούν παραδείγματα τέτοιων κατηγοριών τροφίμων. Η αποδοχή των συγκεκριμένων προϊόντων από τους καταναλωτές εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι η γεύση, η εμφάνιση, οι ιδιότητες, η διατηρησιμότητα, το κόστος και η διατροφική τους αξία.

Οι ιδιότητες που αφορούν στην ποιότητα των επεξεργασμένων τροφίμων είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την αποδοχή των προϊόντων από τους καταναλωτές και η γνώση της εξάρτησής τους από τις συνθήκες και μεθόδους επεξεργασίας είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη νέων προϊόντων και τη βελτίωση των υφιστάμενων. Μεταξύ των ιδιοτήτων αυτών, τα δομικά χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για το χαρακτηρισμό των υλικών, καθώς καθορίζουν την ποιότητα, τη γεύση και την εμφάνιση των προϊόντων και επηρεάζουν σημαντικά πλήθος άλλων ιδιοτήτων, όπως είναι οι θερμικές ιδιότητες, οι ιδιότητες υφής, η διάχυση μάζας, κτλ. Η παραγωγή τροφίμων με προκαθορισμένες ιδιότητες δομής αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας, εξαιτίας της σημασίας που παρουσιάζουν οι ιδιότητες αυτές, τόσο κατά την αποθήκευση και τελική επεξεργασία των τροφίμων πριν την κατανάλωση (ψήσιμο, τηγάνισμα, κτλ.), όσο και για την ικανοποίηση βασικών απαιτήσεων των καταναλωτών (διατήρηση θρεπτικών συστατικών, μεγάλο χρόνο συντήρησης, εμφανισιακά χαρακτηριστικά, τραγανότητα, κτλ.). Έχει διαπιστωθεί ότι η τελική δομή ενός τροφίμου και η ανάπτυξη του πορώδους του καθορίζεται από μία σειρά παραμέτρων, όπως είναι η επιφανειακή τάση, η εξωτερική πίεση, ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς μάζας, η χημική σύσταση, η αρχική δομή του υλικού πριν την επεξεργασία, κτλ.

Οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επεξεργασμένων τροφίμων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες αυτές. Μεταξύ των διεργασιών αυτών, η ξήρανση και η εκβολή είναι ιδιαίτερα σημαντικές και εφαρμόζονται ευρέως στη βιομηχανία. Η ξήρανση χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων. Οι διάφορες μέθοδοι ξήρανσης εφαρμόζονται είτε αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους και συντελούν στην αύξηση του χρόνου συντήρησης των προϊόντων και στην επίτευξη χαρακτηριστικών που τους προσδίδουν ιδιότητες διαφοροποιημένες από εκείνες του αρχικού νωπού τροφίμου. Η εκβολή αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο παραγωγής τροφίμων, η οποία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων που είναι διαθέσιμα για άμεση κατανάλωση, ο μικρός χρόνος παραγωγής που οδηγεί σε διατήρηση των θρεπτικών συστατικών (π.χ. βιταμινών) που συχνά καταστρέφονται σε σημαντικό ποσοστό με την εφαρμογή άλλων μεθόδων θερμικής επεξεργασίας, καθώς και η δυνατότητα επεξεργασίας μιγμάτων που αποτελούνται από διαφορετικά τρόφιμα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές που αφορούν σε προϊόντα ξήρανσης και εκβολής. Η επίδραση, όμως, των δομικών χαρακτηριστικών των προϊόντων σε ποικίλες ιδιότητες (φυσικοχημικές ιδιότητες, οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, αποικοδόμηση συστατικών στον ανθρώπινο οργανισμό, κτλ.) χρήζει περαιτέρω μελέτης. Παράλληλα, η παρασκευή προϊόντων εκβολής τα οποία περιέχουν συστατικά υψηλής διατροφικής αξίας αποτελεί ένα ακόμη πεδίο

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

έρευνας το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα προϊόντα αυτά χρήζουν μελέτης έτσι ώστε να αναλυθούν τα στάδια παραγωγής τους και να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά τους, για να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη νέων καινοτόμων προϊόντων, να διατηρηθούν ή/και να βελτιωθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους και να αυξηθεί η ασφάλεια και η σταθερότητά τους. Σημειώνεται επίσης, ότι η μελέτη της μικροσκοπικής δομής των τροφίμων αποτελεί ένα πεδίο που παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες για έρευνα.

Αντικείμενο, επομένως, της συγκεκριμένης διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη τροφίμων καθορισμένης πορώδους δομής και η συσχέτιση των δομικών χαρακτηριστικών με τις ιδιότητες ποιότητας των προϊόντων. Οι διαφορετικές δομές των προϊόντων αναπτύχθηκαν με την εφαρμογή των διεργασιών της ξήρανσης και της εκβολής. Τα προϊόντα που υπέστησαν ξήρανση περιλαμβάνουν φρούτα, λαχανικά και δημητριακά (ρύζι, πατάτα, μανιτάρι, φράουλα, μπανάνα), τα οποία αποτελούν βασικά συστατικά της σύγχρονης διατροφής, ενώ τα προϊόντα εκβολής προέκυψαν από την επεξεργασία μίγματος ρυζάλευρου/αφυδατωμένου καρότου, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή διατροφική αξία. Μελετήθηκε η επίδραση της πίεσης λειτουργίας κατά τη διάρκεια της διεργασίας της ξήρανσης υπό κατάψυξη στα χαρακτηριστικά προϊόντων ρυζιού, πατάτας, μανιταριού και φράουλας, ενώ επίσης, εξετάστηκε η επίδραση τριών μεθόδων ξήρανσης (ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση σε ρεύμα αέρα και ξήρανση υπό κενό) στα χαρακτηριστικά προϊόντων πατάτας και μπανάνας, τα οποία είχαν υποστεί ωσμωτική αφυδάτωση ως μέθοδο προεπεξεργασίας. Για τη διεργασία της εκβολής χρησιμοποιήθηκε εκβολέας διπλού κοχλία, ενώ μελετήθηκε η επίδραση τεσσάρων παραμέτρων (θερμοκρασία εκβολής, ρυθμός περιστροφής των κοχλιών, αναλογία των πρώτων υλών και υγρασία της τροφοδοσίας) στα χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων. Οι παράμετροι αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία για τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων, καθώς επιδρούν στη διόγκωση του υλικού κατά την εκτόνωσή του από την οπή εξόδου του εκβολέα, την επιφανειακή σκληρότητά του, την τάση του για συρρίκνωση κατά τη διάρκεια ψύξης του και την τραγανότητά του.

Στα παραχθέντα προϊόντα μελετήθηκαν, αρχικά, οι δομικές ιδιότητες (πραγματική και φαινόμενη πυκνότητα, πορώδες, κατανομή πόρων, συντελεστής διόγκωσης προϊόντων εκβολής). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μελέτη της μικροσκοπικής δομής των τροφίμων με τη χρήση εξειδικευμένων τεχνικών, όπως είναι η ποροσιμετρία υδραργύρου και η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη δε περιορίζεται στον υπολογισμό μέσω ιδιοτήτων, όπως είναι το συνολικό πορώδες ενός υλικού, αλλά δίνεται η δυνατότητα εξέτασης του μεγέθους των πόρων, της ομοιομορφίας ή μη που παρουσιάζουν εντός του υλικού, της μορφής των τοιχωμάτων, κτλ. Πέραν των δομικών ιδιοτήτων επιλέχθηκαν να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες (τάση θραύσης και παραμόρφωση θραύσης, μέτρο ελαστικότητας), οι θερμικές (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης), οι ρεολογικές (ιξώδες, μέτρο αποθήκευσης, μέτρο απωλειών, παράγοντας απωλειών), η προσρόφηση υγρασίας και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (γεύση, εμφάνιση, υφή). Εξετάστηκε επίσης, η αποδέσμευση ορισμένων συστατικών σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν ή εφαρμόστηκαν μαθηματικά πρότυπα βάσει των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη των ιδιοτήτων από τις συνθήκες παραγωγής των προϊόντων, καθώς και συσχέτιση των ιδιοτήτων μεταξύ τους.

Η συγκεκριμένη έρευνα έχει ως στόχο:

- ✚ Την ανάπτυξη νέων, πρωτοποριακών προϊόντων πορώδους δομής με έμφαση στην παραγωγή λειτουργικών προϊόντων, τα οποία θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά για την ελληνική βιομηχανία
- ✚ Τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών παραγωγής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη δομή και την ποιότητα των τελικών προϊόντων
- ✚ Τη συσχέτιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων με τα δομικά τους χαρακτηριστικά
- ✚ Τη μελέτη της αποδέσμευσης συστατικών των τροφίμων στον ανθρώπινο οργανισμό
- ✚ Την ανάπτυξη απλών μαθηματικών προτύπων περιγραφής των ιδιοτήτων συναρτήσει των συνθηκών επεξεργασίας

Η καινοτομία της παρούσας διατριβής έγκειται στα παρακάτω:

- ✚ Δίνεται η δυνατότητα μετάβασης από τη βασική έρευνα στη βιομηχανική εφαρμογή, καθώς η μελέτη της δομής πραγματοποιείται εις βάθος με ποικίλες μεθόδους
- ✚ Μελετάται αναλυτικά η σύνδεση των δομικών χαρακτηριστικών με τις ποικίλες ιδιότητες ποιότητας των παραχθέντων προϊόντων
- ✚ Μελετάται η επίδραση των δομικών χαρακτηριστικών στην απελευθέρωση άλατος και σακχάρων στον ανθρώπινο οργανισμό
- ✚ Δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού και αριστοποίησης των διεργασιών για την παραγωγή προϊόντων με καθορισμένα και επιθυμητά χαρακτηριστικά





# 2.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Εισαγωγή

Δομικές ιδιότητες

Μηχανικές ιδιότητες

Ρεολογικές ιδιότητες

Ιδιότητες προσρόφησης – Ενεργότητα ύδατος

Μεταπτώσεις φάσεων

Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά



## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τρόφιμα χαρακτηρίζονται από ποικίλες ιδιότητες οι οποίες αποτελούν μέτρο της συμπεριφοράς τους και καθορίζουν την ποιότητά τους, τη λειτουργικότητά τους, την αλληλεπίδρασή τους με τις ανθρώπινες αισθήσεις, καθώς και την αποδοχή τους από τους καταναλωτές (Karel, 1999; Rahman, 2008a).

Οι ιδιότητες των τροφίμων είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό των διεργασιών και διακρίνονται περαιτέρω σε δομικές (πυκνότητα, πορώδες, μέγεθος πόρων, κατανομή πόρων), μηχανικές (ιδιότητες υφής) (αντοχή σε συμπίεση, εφελκυσμό και στρέψη), θερμικές, θερμοδυναμικές, ρεολογικές και οπτικές (χρώμα) ιδιότητες, οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (άρωμα/γεύση, εμφάνιση, υφή), ενυδάτωση, περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά (βιταμίνες, πρωτεΐνες, ιχνοστοιχεία), θερμική αγωγιμότητα, συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας, υγρασία ισορροπίας, κτλ. Μεταξύ αυτών, οι δομικές ιδιότητες χαρακτηρίζουν την εσωτερική διαμόρφωση των τροφίμων, τη διάταξη των διαφόρων στοιχείων του και την κατανομή των πόρων του. Οι μηχανικές ιδιότητες συνδέονται με την απόκριση των τροφίμων στην εφαρμογή κάποιας φυσικής δύναμης και προσομοιάζουν τη συμπεριφορά των τροφίμων κατά τη μάσηση ή την αφή τους κατά την επαφή τους με τα δάχτυλα. Οι θερμικές ιδιότητες σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας στα τρόφιμα, οι θερμοδυναμικές με τις αλλαγές των φάσεων ή της κατάστασης των τροφίμων, ενώ οι ρεολογικές σχετίζονται με την παραμόρφωση και τα χαρακτηριστικά ροής των στερεών ή ρευστών προϊόντων. Η ενυδάτωση των τροφίμων σχετίζεται με την αποκατάσταση των ιδιοτήτων αφυδατωμένων προϊόντων, όταν έρχονται σε επαφή με το νερό. Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά μπορούν να οριστούν ως η ανθρώπινη φυσιολογική-ψυχολογική αντίληψη ενός αριθμού ιδιοτήτων και των αλληλεπιδράσεών τους. Αξιολογούνται χρησιμοποιώντας εκπαιδευμένους ή μη δοκιμαστές καθώς και απλούς καταναλωτές. Πολλά από τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά μπορούν να συσχετιστούν με ιδιότητες που μετριοούνται με τη χρήση αντικειμενικών μεθόδων (π.χ. μηχανικές ιδιότητες) (Rahman & McCarthy, 1999). Η γνώση της υγρασίας ισορροπίας μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη προϊόντων και την επιλογή των συνθηκών επεξεργασίας και συσκευασίας τους.

Οι παραπάνω ιδιότητες και ο συνδυασμός των ιδιοτήτων αυτών αποτελεί βασικό κριτήριο για την αποδοχή των τροφίμων από τους καταναλωτές. Ανάμεσά τους, οι δομικές ιδιότητες είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για το χαρακτηρισμό των τροφίμων, καθώς καθορίζουν την ποιότητα των προϊόντων και επηρεάζουν πλήθος άλλων χαρακτηριστικών, όπως είναι οι ιδιότητες υφής, η διάχυση μάζας, η γεύση, η εμφάνιση, κτλ. Πέραν των δομικών χαρακτηριστικών, οι ιδιότητες που καθορίζουν την ποιότητα των τροφίμων είναι η υφή, η ενυδάτωση, οι θερμικές ιδιότητες, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, κτλ. (Karathanos et al., 1996c). Οι ιδιότητες αυτές περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

## 2.2 ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

### 2.2.1 Γενικά

Η δομή των τροφίμων επηρεάζει ποικίλες ιδιότητες, όπως είναι οι μηχανικές και οργανοληπτικές ιδιότητες, η μεταφορά θερμότητας και μάζας, η χημική τους σταθερότητα, κτλ. (Mayor et al., 2011;

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Rahman, 2001; White & Bell, 1999). Επομένως, η γνώση της δομής των τροφίμων, σε μοριακό, μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο, είναι απαραίτητη παράμετρος για τον καθορισμό της ποιότητάς τους, καθώς επίσης, για την αποθήκευση, τη μεταφορά και τη συσκευασία τους. Σε μοριακό επίπεδο, οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και τα λιπίδια που περιέχονται στα τρόφιμα είναι ιδιαίτερα σημαντικά στις ιδιότητες μεταφοράς (Aguilera & Stanley, 1999). Η μικροδομή αναφέρεται στα κύτταρα των τροφίμων και μπορεί να διατηρείται ή να καταστρέφεται κατά την επεξεργασία τους. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, οι δομικές ιδιότητες, όπως είναι η πυκνότητα, το πορώδες, η συρρίκνωση, το μέγεθος των σωματιδίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το χαρακτηρισμό των δομικών αλλαγών κατά την επεξεργασία και την αποθήκευση των τροφίμων (Michailidis et al., 2008b). Η ανάλυση των δομικών ιδιοτήτων των τροφίμων είναι υψίστης σημασίας για την ανάπτυξη προϊόντων, καθώς και τη βελτίωση της ποιότητάς τους.

### 2.2.2 Ορισμοί

Για το χαρακτηρισμό της δομής ενός στερεού υλικού χρησιμοποιούνται διάφορες επιμέρους ιδιότητες, όπως είναι το πορώδες, η πυκνότητα, η συρρίκνωση, η ενεργή επιφάνεια, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων. Οι ορισμοί που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία για το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων αυτών δίνονται στη συνέχεια (Boukouvalas et al., 2006; Dullien, 1979; Krokida & Maroulis, 2000; Michailidis et al., 2008a; Μοροπούλου, 2007):

#### 2.2.2.1 Πραγματική πυκνότητα ( $\rho_{\pi\rho}$ )

Πραγματική πυκνότητα είναι η πυκνότητα ενός στερεού εξαιρουμένων των πόρων του αέρα και ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του υλικού προς τον πραγματικό του όγκο,

$$\rho_{\pi\rho} = \frac{m_{ολ}}{V_{\pi\rho}} \quad 2.1$$

όπου  $\rho_{\pi\rho}$  (kg/m<sup>3</sup>) είναι η πραγματική πυκνότητα,  $m_{ολ}$  (kg) είναι η μάζα του υλικού και  $V_{\pi\rho}$  (m<sup>3</sup>) είναι ο πραγματικός όγκος του υλικού, δηλαδή ο ολικός όγκος εξαιρουμένων των πόρων του αέρα ( $V_{\pi\rho} = V_s + V_w$ , όπου  $V_s$  (m<sup>3</sup>) είναι ο όγκος των ξηρών στερεών και  $V_w$  (m<sup>3</sup>) είναι ο όγκος του νερού).

#### 2.2.2.2 Φαινόμενη πυκνότητα ( $\rho_{\varphi}$ )

Η φαινόμενη πυκνότητα αφορά σε πορώδη υλικά ή σε υλικά σε μορφή σκόνης και ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του υλικού προς τον ολικό του όγκο, συμπεριλαμβανομένων και των πόρων του αέρα,

$$\rho_{\varphi} = \frac{m_{ολ}}{V_{ολ}} \quad 2.2$$

όπου  $\rho_{\varphi}$  (kg/m<sup>3</sup>) είναι η φαινόμενη πυκνότητα,  $m_{ολ}$  (kg) είναι η μάζα του υλικού και  $V_{ολ}$  (m<sup>3</sup>) είναι ο ολικός όγκος του υλικού ( $V_{ολ} = V_s + V_w + V_a$ , όπου  $V_s$  (m<sup>3</sup>) είναι ο όγκος των ξηρών στερεών,  $V_w$  (m<sup>3</sup>) είναι ο όγκος του νερού και  $V_a$  (m<sup>3</sup>) είναι ο όγκος του αέρα).

#### 2.2.2.3 Πορώδες ( $\varepsilon$ )

Τα υλικά ανάλογα με τη δομή τους διακρίνονται σε κρυσταλλικά, άμορφα, πορώδη κτλ. Τα πορώδη υλικά είναι ετερογενή, πολυφασικά συστήματα, τα οποία επιτρέπουν τη ροή, τη μεταφορά μάζας,

την αλλαγή φάσης και την προσρόφηση ρευστών μέσα στη δομή τους. Ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως πορώδες όταν πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις (Adler, 1992; Dullien, 1979):

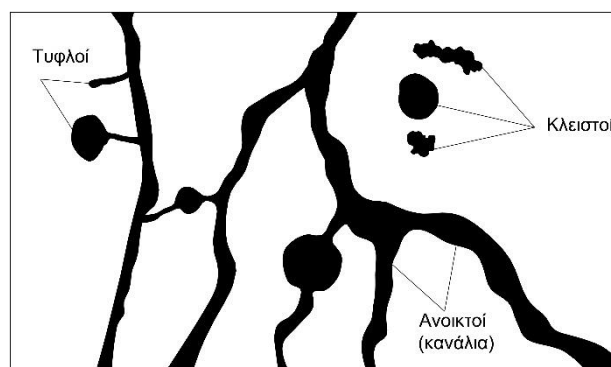
- Αποτελείται από μία τουλάχιστον στερεή και μία τουλάχιστον ρευστή φάση.
- Περιέχει διάκενα, τα οποία έχουν διαστάσεις της τάξης των μμ ή και μικρότερες και ονομάζονται πόροι. Οι πόροι συνήθως περιέχουν κάποιο ρευστό, όπως αέρας, νερό, λάδι, κτλ. ή μίγματα διαφορετικών ρευστών.
- Είναι διαπερατό σε διάφορα ρευστά. Περιέχει όμως και πόρους που είναι απομονωμένοι (τυφλοί πόροι).

Οι ιδιότητες δομής των πορωδών τροφίμων επηρεάζονται από τον αριθμό, το μέγεθος και το σχήμα των πόρων, την κατανομή μεγέθους τους, καθώς επίσης, από το βαθμό που οι πόροι αυτοί συνδέονται μεταξύ τους, και δεν εξαρτώνται από καμία άλλη ιδιότητα του υλικού, όπως είναι η χημική σύσταση (Adler, 1992; Αναστασοπούλου et al., 2006). Ανάλογα με το μέγεθός τους, οι πόροι χαρακτηρίζονται ως μικροπόροι (<0,002 μm), μεσοπόροι (0,005 μm – 0,05 μm) και μακροπόροι (>0,05 μm) (διαχωρισμός κατά IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)). Κάθε κατηγορία μεγέθους πόρων παρουσιάζει διαφορετική φυσικοχημική συμπεριφορά. Οι διαχωριστικές γραμμές μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών δεν είναι απόλυτες και εξαρτώνται από το σχήμα των πόρων και τη φύση του υλικού (Gregg & Sing, 1991).

Οι πόροι των τροφίμων διακρίνονται, επίσης, σε τρεις κατηγορίες (Μοροπούλου, 2007):

- κλειστοί πόροι, όταν δεν έχουν καμία σύνδεση μεταξύ τους και δεν είναι διαπερατοί από κάποιο ρευστό
- ανοιχτοί πόροι (κανάλια), οι οποίοι είναι διαπερατοί από τα ρευστά
- τυφλοί πόροι, οι οποίοι έχουν μία είσοδο αλλά δεν είναι διαπερατοί από τα ρευστά

Οι πόροι που συνδέονται μεταξύ τους (κανάλια) επιτρέπουν στα ρευστά να διέλθουν μέσα τους. Αντίθετα, οι κλειστοί πόροι δε συνεισφέρουν στη διαπερατότητα των ρευστών, ενώ η συμμετοχή των τυφλών πόρων είναι αμελητέα (Dullien, 1979).



Σχήμα 2. 1. Κατηγορίες πόρων (πηγή: (Αναστασοπούλου et al., 2006), ίδια επεξεργασία).

Ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του υλικού (όγκος στερεού, υγρού και αέρα) ονομάζεται πορώδες ( $\epsilon$ ) και δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon = \frac{V_{\alpha}}{V_{ολ}}$$

2. 3

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.1), (2.2) και (2.3) προκύπτει ότι το πορώδες ισούται με:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\phi}}{\rho_{\pi\rho}}$$

2. 4

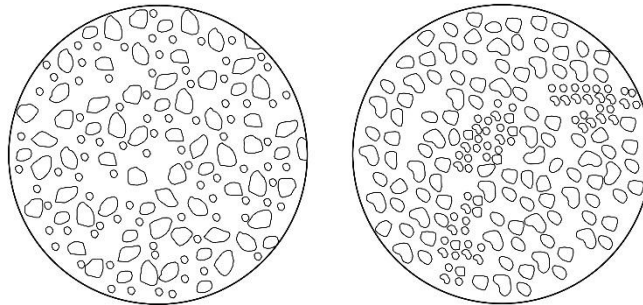
Το πορώδες που αναφέρεται στους ανοικτούς πόρους ονομάζεται ανοιχτό, και αντίστοιχα, το πορώδες που αναφέρεται στους κλειστούς πόρους, ονομάζεται κλειστό. Το σύνολο του κλειστού και ανοιχτού πορώδους ονομάζεται ολικό πορώδες. Ανάλογα με τον τύπο του πορώδους μέσου, το πορώδες μπορεί να κυμαίνεται από τιμή κοντά στο μηδέν μέχρι τιμή σχεδόν κοντά στη μονάδα (Μοροπούλου, 2007).

Μικροσκοπική περιγραφή πορώδους (Adler, 1992; Dullien, 1979)

Η μικροσκοπική περιγραφή της πορώδους δομής των υλικών είναι αρκετά περίπλοκη εξαιτίας της ανισοτροπίας και ανομοιογένειας της πορώδους γεωμετρίας των υλικών. Όπως αναφέρθηκε, κάθε πορώδες υλικό χαρακτηρίζεται από τους πόρους. Οι πόροι συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν δίκτυα πόρων. Η πορώδης δομή χαρακτηρίζεται από παραμέτρους, όπως είναι η διαστατικότητα του δικτύου των πόρων, η συνεκτικότητα των πόρων, το μέγεθος και η κατανομή μεγέθους των πόρων, καθώς και η ομοιογένεια ή ανομοιογένεια του δικτύου των πόρων. Πιο συγκεκριμένα:

Κατανομή μεγέθους των πόρων: Η κατανομή του μεγέθους των πόρων δείχνει το ποσοστό των πόρων σε κάθε εύρος διαμέτρων. Κάθε μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής των πόρων ορίζει το μέγεθος των πόρων σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο πόρων, το οποίο εξαρτάται από το κάθε υλικό.

Ομοιογένεια και ανομοιογένεια της πορώδους δομής (Σχήμα 2. 2): Ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως ομοιογενές όταν περιέχει διακριτούς πόρους, οι οποίοι κατανέμονται ομοιόμορφα στο όγκο του. Τα πραγματικά πορώδη υλικά, συνήθως, δε χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια και είναι κυρίως ανομοιογενή.



Σχήμα 2. 2. (α) Ανομοιογενές και (β) ομοιογενές υλικό (πηγή: (Dullien, 1979), ίδια επεξεργασία).

Συνεκτικότητα: Η συνεκτικότητα δείχνει το βαθμό στον οποίο ένας πόρος συνδέεται με άλλους πόρους. Σε ένα ομοιογενές υλικό, η συνεκτικότητα είναι ανάλογη του μεγέθους του υλικού. Η ειδική συνεκτικότητα, η οποία είναι η απόλυτη τιμή της συνεκτικότητας που αναφέρεται ανά μονάδα όγκου του υλικού είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του υλικού. Δύο διαφορετικά υλικά μπορεί να έχουν την ίδια τιμή ειδικής συνεκτικότητας, αλλά μπορεί να χαρακτηρίζονται από τελείως διαφορετική τοπολογία πόρων.

Τα πορώδη υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές βιομηχανικές και τεχνολογικές διεργασίες, όπως στη χημική μηχανική (ετερογενής κατάλυση, χρωματογραφικές μέθοδοι, μέθοδοι διαχωρισμού χρησιμοποιώντας πορώδεις πολυμερείς μεμβράνες), στην ιατρική και βιοχημική μηχανική (βιολογικές μεμβράνες και φίλτρα), στην ηλεκτροχημική μηχανική (πορώδη ηλεκτρόδια, περατά και ημιπερατά διαφράγματα σε ηλεκτρολυτικά κελιά), κτλ. (Dullien, 1979). Μία ιδιαίτερα σημαντική εφαρμογή των πορωδών υλικών είναι η ανάπτυξη καινοτόμων τροφίμων καθορισμένης δομής. Η δομή και οι ιδιότητες των επεξεργασμένων τροφίμων είναι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την αποδοχή τους από τους καταναλωτές και οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες αυτές. Πληροφορίες σχετικά με την πορώδη δομή των τροφίμων είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό και την αριστοποίηση πολλών διεργασιών, όπως είναι η ξήρανση, η εκβολή, το ψήσιμο, κτλ.

#### 2.2.2.4 Συρρίκνωση ( $S$ )

Η συρρίκνωση χαρακτηρίζει την αλλαγή του όγκου ενός τροφίμου, το οποίο υφίσταται διάφορες διεργασίες, όπως απομάκρυνση υγρασίας κατά την εφαρμογή διεργασίας ξήρανσης, σχηματισμό κρυστάλλων πάγου κατά τη διάρκεια κατάψυξης ή σχηματισμό πόρων κατά την ξήρανση, τη διόγκωση, την εκβολή ή το τηγάνισμα (Barbosa-Cánovas et al., 2005), και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του υλικού με συγκεκριμένη περιεχόμενη υγρασία προς τον αρχικό του όγκο (Michailidis et al., 2008a),

$$S = \frac{V_{\varphi}}{V_{\varphi i}} \quad 2.5$$

όπου  $S$  είναι η συρρίκνωση,  $V_{\varphi}$  ( $m^3$ ) είναι ο φαινόμενος όγκος του υλικού με συγκεκριμένη περιεχόμενη υγρασία και  $V_{\varphi i}$  ( $m^3$ ) είναι ο αρχικός φαινόμενος όγκος του υλικού.

Κατά τη διάρκεια διεργασιών όπως είναι η ξήρανση, παρατηρείται διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού του τροφίμου και του περιβάλλοντος, η οποία δημιουργεί τάσεις, με αποτέλεσμα την κατάρρευση της δομής. Στα τρόφιμα παρατηρούνται δύο μορφές συρρίκνωσης: η ισότροπη, η οποία είναι ομοιόμορφη σε όλες τις διαστάσεις του υλικού και η ανισότροπη, η οποία είναι ανομοιόμορφη στις διαφορετικές διαστάσεις. Η ισότροπη συρρίκνωση είναι κοινή σε φρούτα και λαχανικά, ενώ η ανισότροπη αναπτύσσεται σε ζωικούς ιστούς, όπως ψάρια (Barbosa-Cánovas et al., 2005).

#### 2.2.2.5 Ειδική επιφάνεια

Η ειδική επιφάνεια ορίζεται ως το εμβαδόν της επιφάνειας των τοιχωμάτων των πόρων ανά μονάδα μάζας ή όγκου του υλικού.

#### 2.2.2.6 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα ορίζεται ως η αγωγιμότητα ενός πορώδους υλικού σε κάποιο ρευστό και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις ιδιότητες του ρευστού και το μηχανισμό μεταφοράς του.

### 2.2.3 Μέθοδοι προσδιορισμού δομικών ιδιοτήτων

Η πλήρης και λεπτομερής περιγραφή της πορώδους δομής ενός υλικού περιλαμβάνει τόσο την απλή μέτρηση του πορώδους, όσο και την προσπάθεια μαθηματικής περιγραφής των φαινομένων που πραγματοποιούνται στους πόρους (ροή, διάχυση, κτλ.). Η αναπαράσταση της πορώδους δομής με

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ένα μαθηματικό πρότυπο βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές, όπως το ότι οι πόροι έχουν συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα, με καθορισμένη διάταξη και τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους. Πιο ακριβή μαθηματικά πρότυπα λαμβάνουν υπόψη και τη συνεκτικότητα των πόρων, θεωρώντας το υλικό σαν ένα δίκτυο πόρων που συνδέονται και είναι τοποθετημένοι με ορισμένη διάταξη στο χώρο (Dullien, 1979; Αναστασοπούλου et al., 2006).

Η ανάλυση της πορώδους δομής ενός υλικού περιλαμβάνει:

- Πειραματικές τεχνικές μέτρησης
- Εφαρμογή ή ανάπτυξη ενός μαθηματικού προτύπου που προσεγγίζει την πορώδη δομή και περιλαμβάνει παραμέτρους με φυσική σημασία
- Προσδιορισμό των παραμέτρων του μαθηματικού προτύπου με κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων

Για τον πειραματικό προσδιορισμό των δομικών ιδιοτήτων των τροφίμων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Ο πραγματικός όγκος των υλικών μετρείται συνήθως με πυκνόμετρο αερίων, ενώ ο φαινόμενος όγκος προσδιορίζεται με μέτρηση των διαστάσεων των υλικών, με τη μέθοδο εκτόπισης όγκου ή με πυκνόμετρο αερίων. Το πορώδες συνήθως υπολογίζεται με βάση την πραγματική και φαινόμενη πυκνότητα. Εναλλακτικά, το πορώδες και η κατανομή πόρων μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση ποροσιμετρίας, με απορρόφηση αερίου ή οπτικές μεθόδους (Michailidis et al., 2008a). Η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων των υλικών και από τα ίδια τα υλικά (Αναστασοπούλου et al., 2006). Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες και απλές μέθοδοι μέτρησης των δομικών ιδιοτήτων αναλύονται στη συνέχεια.

### 2.2.3.1 Μέτρηση διαστάσεων

Σε δείγματα γνωστού σχήματος, ο προσδιορισμός του φαινόμενου όγκου πραγματοποιείται με μέτρηση των διαστάσεων (μήκος, πλάτος, πάχος, διάμετρος). Οι διαστάσεις μετριοούνται με παχύμετρο ή μικρόμετρο και ο όγκος υπολογίζεται με βάση το σχήμα του δείγματος.

### 2.2.3.2 Πυκνομετρία αερίων

Ο προσδιορισμός του πραγματικού όγκου των υλικών με τη χρήση της πυκνομετρίας αερίων βασίζεται στην αρχή του Αρχιμήδη για την εκτόπιση των ρευστών. Το ρευστό που εκτοπίζεται είναι συνήθως αέρας, άζωτο ή ήλιο, ώστε να μπορεί να διεισδύσει στους μικρότερους πόρους του υλικού. Το ήλιο (He) χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της μικρής του ατομικής διάστασης που του επιτρέπει να διεισδύει σε πόρους και ρωγμές της τάξεως των  $10^{-10}$  m. Το πυκνόμετρο προσδιορίζει τον πραγματικό όγκο των υλικών μέσω της διαφοράς πίεσης που καταγράφεται όταν γνωστή ποσότητα ηλίου διέρχεται από γνωστό όγκο αναφοράς  $V_R$  (πίεση  $P_1$ ), μέσα στην κυψελίδα η οποία περιέχει το δείγμα (πίεση  $P_2$ ) (Michailidis et al., 2008a). Ο πραγματικός όγκος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{\pi\rho} = V_C - V_R \cdot \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right) - 1 \right] \quad 2.6$$

όπου,  $V_C$  και  $V_R$  είναι σταθερές οι οποίες υπολογίζονται με βαθμονόμηση της συσκευής χρησιμοποιώντας συμπαγή σφαιρίδια διαμέτρου 7 mm με μηδενικό πορώδες.



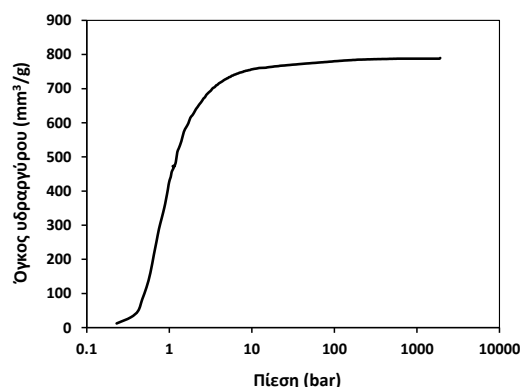
### 2.2.3.3 Μέθοδος εκτόπισης όγκου

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο όγκος μετριέται με τη χρήση πυκνόμετρων ή βαθμονομημένων κυλίνδρων. Ο βαθμονομημένος κύλινδρος γεμίζεται με υγρό μέχρι ενός ορισμένου σημείου και στη συνέχεια, το υλικό εμβαπτίζεται σε αυτόν. Η διαφορά μεταξύ του αρχικού όγκου του υγρού και του όγκου αφού έχει εμβαπτιστεί το δείγμα, ισούται με το όγκο του δείγματος. Κατά τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιούνται υγρά με χαμηλή επιφανειακή τάση, όπως νερό, τολουόλιο, κανονικό επτάνιο, κτλ., ενώ κάποιες φορές το δείγμα μπορεί να επικαλυφθεί με κάποιο φιλμ για την αποφυγή της προσρόφησης του χρησιμοποιούμενου υγρού (Michailidis et al., 2008a).

### 2.2.3.4 Ποροσιμετρία υδραργύρου

Η ποροσιμετρία υδραργύρου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθόδους προσδιορισμού των δομικών χαρακτηριστικών των υλικών. Είναι κατάλληλη όχι μόνο για τη μέτρηση του πορώδους, αλλά και για τον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των πόρων. Βασίζεται στην αρχή είτε της είσδυσης ενός ρευστού στους πόρους ή της απομάκρυνσής του από αυτούς. Η μέθοδος απομάκρυνσης υδραργύρου διακρίνεται στην τριχοειδή ποροσιμετρία ροής και την ποροσιμετρία απομάκρυνσης ρευστού. Στην ποροσιμετρία είσδυσης, χρησιμοποιείται ως ρευστό, υδράργυρος, λάδι ή νερό, το οποίο υφίσταται εφαρμογή πίεσης για να εισαχθεί στους πόρους του υλικού. Η πίεση και ο όγκος του ρευστού καταγράφονται (Σχήμα 2. 3), παρέχοντας πληροφορίες για τον όγκο των πόρων, τη διάμετρό τους και την ειδική επιφάνεια (Sahin & Sumnu, 2006). Με τη μέθοδο αυτή μετριέται το ανοιχτό πορώδες των υλικών το οποίο προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το ολικό πορώδες.

Πιο αναλυτικά, στην ποροσιμετρία υδραργύρου, εφαρμόζεται πίεση η οποία προκαλεί την είσδυση του υδραργύρου μέσα στους πόρους. Η εφαρμογή πίεσης είναι απαραίτητη για την είσδυση του υδραργύρου, εφόσον ο υδράργυρος αποτελεί μη διαβρέχον υγρό. Όσο μικρότεροι είναι οι πόροι τόσο μεγαλύτερη πίεση απαιτείται για την είσδυση του υδραργύρου, έως ότου το υλικό κορεσθεί. Στη συνέχεια, καθώς η πίεση ελαττώνεται, ο υδράργυρος απομακρύνεται από τους πόρους του υλικού. Στην περίπτωση αυτή, ένα ποσοστό υδραργύρου παραμένει μέσα στο υλικό. Μεταξύ των καμπυλών είσδυσης και απομάκρυνσης του υδραργύρου μπορεί να υπάρχει μία διαφορά, η οποία δίνει σημαντικές πληροφορίες για το σχήμα των πόρων (Michailidis et al., 2008a; Αναστασοπούλου et al., 2006).



Σχήμα 2. 3. Τυπική καμπύλη είσδυσης υδραργύρου (πηγή: (Μοροπούλου, 2007), ίδια επεξεργασία).

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Από τις καμπύλες εισόδου-απομάκρυνσης του όγκου του υδραργύρου λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το συνολικό πορώδες και την κατανομή των πόρων. Συνήθως θεωρείται ότι οι πόροι έχουν συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα, με καθορισμένη διάταξη και τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους. Η σχέση της πίεσης που εφαρμόζεται για να εισδύσει ο υδράργυρος στο δείγμα, με τη διάμετρο των πόρων δίνεται από την εξίσωση:

$$P = - \frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{d} \quad 2.7$$

όπου,  $P$  (Pa) είναι η εξωτερική πίεση,  $\gamma$  (N/m) είναι η επιφανειακή τάση του υδραργύρου,  $\theta$  είναι η γωνία επαφής του υδραργύρου με τα τοιχώματα του σωλήνα (περίπου  $140^\circ$ ) και  $d$  (m) είναι η διάμετρος των πόρων.

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση Washburn, η οποία θεωρεί κυλινδρικό μοντέλο πόρων (ευθείς κυλινδρικοί σωλήνες ίσου μήκους χωρίς σύνδεση μεταξύ τους, με διαμέτρους που ακολουθούν τυχαία κατανομή) (Michailidis et al., 2008a). Πιο ακριβή μαθηματικά μοντέλα λαμβάνουν επίσης, υπόψη τη συνεκτικότητα των πόρων, θεωρώντας το υλικό σαν ένα δίκτυο πόρων που συνδέονται μεταξύ τους και είναι τοποθετημένοι με καθορισμένη διάταξη στο χώρο (Αναστασοπούλου et al., 2006).

Η ποροσιμετρία υδραργύρου μετρά πόρους σε συγκεκριμένο εύρος που κυμαίνεται μεταξύ 2 nm και 100  $\mu\text{m}$ . Ο υδράργυρος διέρχεται εύκολα σε πόρους μεγαλύτερους από 100  $\mu\text{m}$  χωρίς την εφαρμογή πίεσης, ενώ δεν μπορεί να διεισδύσει σε πόρους μικρότερους από 2 nm. Η κατανομή των πόρων των υλικών ως προς την ακτίνα τους υπολογίζεται με απλή διαφόριση της καμπύλης διείδυσης.

### 2.2.3.5 Ποροσιμετρία με προσρόφηση αζώτου (BET)

Η θεωρία της προσρόφησης αζώτου αναπτύχθηκε από τους Brunauer, Emmett, και Teller (BET). Ο προσδιορισμός της ειδικής επιφάνειας με βάση τη θεωρία αυτή, βασίζεται στη φυσική προσρόφηση αδρανών αερίων στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια πορωδών υλικών. Το αδρανές αέριο που χρησιμοποιείται είναι, συνήθως, άζωτο. Ένα υλικό το οποίο περιβάλλεται και βρίσκεται σε ισορροπία με ένα αέριο συγκεκριμένης θερμοκρασίας και τάσης ατμών απορροφά φυσικά ορισμένη ποσότητα αερίου. Η ποσότητα του προσροφούμενου αερίου εξαρτάται από την τάση ατμών του και είναι ανάλογη της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του υλικού (Fagerlund, 1973).

### 2.2.3.6 Οπτικές μέθοδοι - Μικροσκοπία

Οι οπτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των δομικών χαρακτηριστικών πορωδών υλικών. Επίσης, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, πραγματοποιείται επεξεργασία εικόνας και γίνεται επιλογή των πόρων και του υλικού, δίνοντας τη δυνατότητα προσδιορισμού του πορώδους, της επιφάνειας, της περιμέτρου των πόρων, του μεγέθους και της κατανομής των πόρων, της κυκλικότητας των πόρων, κτλ. Για ένα ομοιογενές υλικό, το πορώδες που προσδιορίζεται με τον τρόπο αυτό ισούται με το λόγο της επιφάνειας των πόρων προς την ολική επιφάνεια, σε μία επίπεδη διατομή του δείγματος. Το πορώδες που υπολογίζεται με οπτικές μεθόδους μπορεί να διαφέρει από το πορώδες το οποίο υπολογίζεται μέσω άλλων μεθόδων, εξαιτίας της αδυναμίας μέτρησης των πολύ μικρών πόρων (Du & Sun, 2006; Dullien, 1979; Yan et al., 2008).

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy - SEM) είναι ιδιαίτερα σημαντική τεχνική μικροσκοπίας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μικροδομής μεγάλης

ποικιλίας στερεών υλικών. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ μίας προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων και του προς εξέταση δείγματος. Το μικροσκόπιο SEM χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ανάλυση που φτάνει μέχρι και 1-5 nm καθώς και μεγάλο εύρος μεγέθυνσης από 25x έως 250000x (Μοροπούλου, 2007). Είναι ένα είδος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου που απεικονίζει την επιφάνεια του δείγματος σαρώνοντάς τη με μία υψηλής ενέργειας δέσμη ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αλληλοεπιδρούν με τα άτομα του δείγματος παράγοντας σήματα που περιέχουν πληροφορίες για την τοπογραφία της επιφάνειάς του, τη σύστασή του και άλλες ιδιότητες, όπως είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

## 2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΦΗΣ)

Οι ιδιότητες ποιότητας είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό και την αριστοποίηση των διεργασιών και το σχεδιασμό προϊόντων με ανώτερα χαρακτηριστικά τα οποία είναι αποδεκτά από τους καταναλωτές. Πέραν των δομικών χαρακτηριστικών, οι ιδιότητες που καθορίζουν την ποιότητα των τροφίμων είναι η υφή, η ενυδάτωση, οι θερμικές ιδιότητες, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, κτλ. (Karathanos et al., 1996c). Οι ιδιότητες αυτές περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

### 2.3.1 Γενικά

Οι μηχανικές ιδιότητες αναφέρονται στη συμπεριφορά ενός υλικού όταν αυτό βρίσκεται υπό την επίδραση κάποιας δύναμης που προκαλεί παραμόρφωση, και καθορίζουν την υφή του υλικού. Όταν λαμβάνεται υπόψη και ο χρόνος επίδρασης της δύναμης, οι ιδιότητες αυτές ονομάζονται ρεολογικές (Κουστούδα & Τσιλίκης, 2011). Η υφή είναι μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες ποιότητας των τροφίμων και μπορεί να αξιολογηθεί είτε οργανοληπτικά είτε με αντικειμενικές μεθόδους. Υπό την επίδραση μηχανικής φόρτισης τα διάφορα τρόφιμα εμφανίζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της δύναμης που ασκείται αλλά και το ρυθμό φόρτισης. Η μέτρηση των ελαστικών ιδιοτήτων λαμβάνει υπόψη μόνο τη δύναμη και την παραμόρφωση, ενώ η μέτρηση της ιξώδους συμπεριφοράς λαμβάνει υπόψη τη δύναμη, την παραμόρφωση και το χρόνο (Abbott, 1999).

### 2.3.2 Ορισμοί

#### 2.3.2.1 Τάση

Η τάση (stress) ορίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης δύναμης σε ένα υλικό προς την επιφάνεια του υλικού (Rao, 1992),

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 2.8$$

όπου  $\sigma$  (Pa) είναι η τάση,  $A$  (m<sup>2</sup>) είναι η εγκάρσια διατομή και  $F$  (N) είναι η δύναμη που εφαρμόζεται.

#### 2.3.2.2 Παραμόρφωση

Η παραμόρφωση (strain) ορίζεται ως η αλλαγή των διαστάσεων ή του σχήματος ενός υλικού εξαιτίας της εφαρμοζόμενης δύναμης (Mohsenin, 1986),

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta L}{L_o}$$

2. 9

όπου  $\varepsilon_n$  (mm/mm) είναι η ανηγμένη παραμόρφωση,  $L_o$  (m) είναι το αρχικό πάχος του δείγματος και  $\Delta L$  (m) είναι η παραμόρφωση.

### **2.3.2.3 Ελαστικότητα**

Ένα υλικό θεωρείται ελαστικό όταν παραμορφώνεται εξαιτίας της εφαρμοζόμενης δύναμης και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση μετά την απομάκρυνση αυτής. Ο λόγος της τάσης προς την ανηγμένη παραμόρφωση ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας,  $E$  (Mezger, 2006),

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_n}$$

2. 10

## **2.3.3 Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων**

Οι ιδιότητες υφής μπορούν να προσδιοριστούν αντικειμενικά ή να αξιολογηθούν οργανοληπτικά. Οι αντικειμενικές μέθοδοι προσδιορίζουν την υφή των προϊόντων έμμεσα, αλλά ταυτόχρονα αντικειμενικά σε σχέση με την οργανοληπτική αξιολόγηση (Kramer, 1973). Οι αντικειμενικές μέθοδοι μετρούν τις μηχανικές ιδιότητες οι οποίες σχετίζονται με την αντίδραση των τροφίμων στην εφαρμογή κάποιας τάσης. Οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της υφής των τροφίμων είναι η χρήση αναλυτή υφής, η δοκιμή διάτρησης (είσδυσης) ή η συσκευή μηχανικών δοκιμών (Chen, 2009; Hutchinson et al., 1987; Mazumder et al., 2007; Sahin & Sumnu, 2006; Vincent, 1998).

### **2.3.3.1 Αναλυτής υφής**

Ο αναλυτής υφής συμπιέζει ένα μικρό κομμάτι τροφίμου δύο φορές για να προσομοιώσει τη διαδικασία της μάσησης. Το δείγμα υφίσταται συμπίεση περίπου έως το 80% του αρχικού του μήκους. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να προσδιοριστούν, αντικειμενικά, πολλές οργανοληπτικές ιδιότητες, όπως είναι το κολλώδες, η συνεκτικότητα, η σκληρότητα, η συνοχή, η ελαστικότητα, κτλ. (Sahin & Sumnu, 2006).

### **2.3.3.2 Δοκιμή διάτρησης**

Η αρχή λειτουργίας της δοκιμής διάτρησης βασίζεται στη διείδυση ενός αισθητήρα μέσα στο υλικό και τη μέτρηση της δύναμης που απαιτείται για να εισέλθει ο αισθητήρας σε ένα συγκεκριμένο βάθος είσδυσης, ή τη μέτρηση του ολικού βάθους είσδυσης. Εκφράζει τη σταθερότητα ή τη σκληρότητα των προϊόντων. Η δύναμη που εφαρμόζεται είναι ανάλογη του μεγέθους και της περιμέτρου του αισθητήρα αλλά και των ιδιοτήτων των τροφίμων. Στα τρόφιμα χρησιμοποιείται κυρίως σε φρούτα, λαχανικά, γαλακτοκομικά προϊόντα ή κρέας.

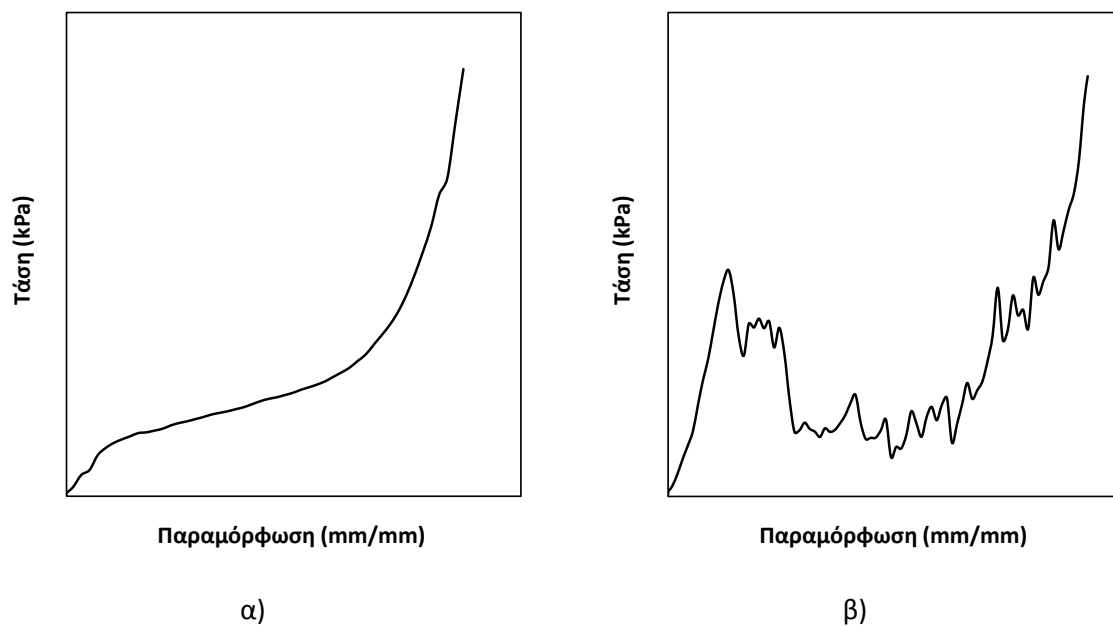
### **2.3.3.3 Δοκιμή συμπίεσης**

Η δοκιμή συμπίεσης χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση των ιδιοτήτων υφής των τροφίμων, καθώς η διατμητική συμπίεση είναι η βασική διαδικασία που πραγματοποιείται κατά τη μάσηση. Κατά τις δοκιμές συμπίεσης, μετρίεται η δύναμη που απαιτείται για να υποστεί το τρόφιμο μία συγκεκριμένη παραμόρφωση, ή αντίστοιχα η παραμόρφωση που υφίσταται το τρόφιμο εξαιτίας της εφαρμογής συγκεκριμένης δύναμης. Το υλικό συμπιέζεται μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, όπου η

μία είναι ακίνητη και η άλλη μπορεί να κινηθεί με σταθερή δύναμη και ταχύτητα συμπίεσης. Η ταχύτητα συμπίεσης σε δοκιμές τροφίμων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 και 200 mm/min και επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητές τους (Ormerod et al., 2004). Τα τρόφιμα είναι ανισότροπα υλικά και οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι δυνατό να ποικίλουν κατά την κατεύθυνση της εφαρμογής της δύναμης (Barbosa-Cánovas et al., 2005).

Οι τιμές της δύναμης και της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό καταγράφονται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Από τα δεδομένα δύναμης-παραμόρφωσης και τις διαστάσεις των υλικών κατασκευάζονται οι καμπύλες τάσης-έντασης, σύμφωνα με τις εξισώσεις 2. 8 και 2. 9.

Το Σχήμα 2. 4 παρουσιάζει τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για αφυδατωμένα τρόφιμα και προϊόντα εκβολής.



Σχήμα 2. 4. Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης α) αφυδατωμένα προϊόντα, β) προϊόντα εκβολής.

Η μέγιστη τάση ή παραμόρφωση που μπορεί να υποστεί το υλικό πριν την έναρξη της κατάρρευσης αντιστοιχούν στο σημείο θραύσης του υλικού. Η κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης τάσης/παραμόρφωσης πριν το σημείο θραύσης είναι συνήθως γραμμική (Ormerod et al., 2004) και προσδιορίζει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Μετά από το τμήμα αυτό, τα κυτταρικά τοιχώματα των υλικών υπόκεινται ρήξη. Η μέγιστη τάση που παρατηρείται είναι ενδεικτική του σημείου θραύσης του υλικού, ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι ενδεικτικό της σκληρότητας του υλικού. Σε κάποια υλικά, πριν το σημείο θραύσης, παρατηρείται μία μεταβολή στην κλίση κατά την οποία λαμβάνει χώρα σημαντική βλάβη των ιστών, ενώ σε μερικά μπορεί να μην παρατηρηθεί η τάση αυτή. Μετά το σημείο θραύσης, η δύναμη μπορεί να αυξηθεί και πάλι, να σταθεροποιηθεί ή να μειωθεί καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση (Abbott, 1999). Σε προϊόντα εκβολής, η τάση αυξάνει γραμμικά με την παραμόρφωση μέχρι το πρώτο σπάσιμο. Μετά από αυτό, παρατηρούνται πολλές κορυφές. Κατά τη συμπίεση τα δείγματα καταρρέουν και σπάζουν σε πολλά κομμάτια. Κάθε κορυφή αντιπροσωπεύει ένα σπάσιμο. Μερικές φορές μπορεί να προσδιορίζει μια ομάδα θραυσμάτων που πραγματοποιούνται την ίδια στιγμή ή/ και σπάσιμο του δείγματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια (Cheng et al., 2007).

## 2.4 ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

### 2.4.1 Γενικά

Η ρεολογία ορίζεται ως η επιστήμη που μελετά την παραμόρφωση και τα χαρακτηριστικά ροής των στερεών ή ρευστών υλικών (Barbosa-Cánovas et al., 2005). Οι ρεολογικές δοκιμές εκφράζουν σχέσεις μεταξύ τάσης – παραμόρφωσης και μελετούν την εξάρτηση της παραμόρφωσης από το ρυθμό. Από ρεολογικής πλευράς, τα υλικά διακρίνονται σε ελαστικά, πλαστικά και ιξώδη (Guyton & Hall, 2005). Τα ιδανικά στερεά παραμορφώνονται με ελαστικό κατά Hook τρόπο, ενώ τα ιδανικά ρευστά ρέουν κατά Νευτώνειο τρόπο. Η συμπεριφορά όλων των πραγματικών υλικών, όπως και των τροφίμων, βασίζεται στο συνδυασμό της ιξώδους και ελαστικής συμπεριφοράς, η οποία ονομάζεται ιξωδοελαστικότητα. Η ρεολογική συμπεριφορά των υλικών εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το είδος της φόρτισης (ρυθμός διάτμησης, διατμητική τάση), το μέγεθος της φόρτισης, η διάρκεια της φόρτισης, και η θερμοκρασία (Mezger, 2006). Στη βιομηχανία τροφίμων, ο προσδιορισμός των ρεολογικών χαρακτηριστικών είναι σημαντικός τόσο σε διεργασίες που περιλαμβάνουν επεξεργασία και μεταφορά τροφίμων, αλλά και στον προσδιορισμό πολλών χαρακτηριστικών ποιότητας.

### 2.4.2 Ορισμοί

#### 2.4.2.1 Ελαστική συμπεριφορά

Όπως αναφέρθηκε, ένα υλικό θεωρείται πλήρως ελαστικό όταν η παραμόρφωση προκαλείται στιγμιαία με την εφαρμογή κάποιας δύναμης και εξαφανίζεται πλήρως με την απομάκρυνση της δύναμης. Για μικρές παραμορφώσεις σε μονοαξονική εφαρμογή δύναμης, η τάση είναι ευθέως ανάλογη της παραμόρφωσης (Νόμος του Hook) και η κλίση της ευθείας καλείται μέτρο ελαστικότητας (Mezger, 2006),

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_n \quad 2.11$$

όπου  $\sigma$  (Pa) είναι η τάση,  $\varepsilon_n$  (mm/mm) είναι η παραμόρφωση και  $E$  (Pa) είναι το μέτρο ελαστικότητας, αντίστοιχα.

Ανάλογες εξισώσεις ισχύουν και για δοκιμές στρέψης (διατμητική τάση συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης), κατά τις οποίες το υλικό υφίσταται μεταβολή του σχήματος, αλλά όχι του όγκου του. Ο λόγος της τάσης που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την διατμητική παραμόρφωση αναφέρεται ως μέτρο διάτμησης  $G$  (Mezger, 2006),

$$\tau = G \cdot \gamma \quad 2.12$$

όπου  $\tau$  (Pa) είναι η τάση,  $\gamma$  είναι η παραμόρφωση και  $G$  (Pa) είναι το μέτρο διάτμησης, αντίστοιχα.

Για ομοιογενή και ισότροπα υλικά, ισχύει η σχέση:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad 2.13$$

όπου  $\mu$  είναι ο λόγος του Poisson.

### 2.4.2.2 Ιξώδης και πλαστική συμπεριφορά

Το ιξώδες περιγράφει το μέγεθος της αντίστασης ενός ρευστού στη ροή, κατά την εφαρμογή δυνάμεων διάτμησης που ενεργούν παράλληλα προς την κατεύθυνση ροής του ρευστού, και εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Η διαφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας επί του ιξώδους των υγρών και των αερίων εξαρτάται από τη διαφορά στη μοριακή τους δομή. Το ιξώδες των περισσότερων υγρών μειώνεται με αυξανόμενη τη θερμοκρασία, εξαιτίας της μείωσης των συνεκτικών δυνάμεων μεταξύ των μορίων, η οποία προκαλεί πιο ελεύθερη ροή. Στα περισσότερα αέρια, το ιξώδες αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με την κινητική θεωρία, η ανταλλαγή ορμής των μορίων του αερίου ανάμεσα στα γειτονικά στρώματα προκαλεί αντίσταση στη σχετική κίνηση. Ακόμα, τα υγρά που όταν υποβάλλονται σε ένα σταθερό ρυθμό διάτμησης, παρουσιάζουν μείωση του ιξώδους με το χρόνο ονομάζονται θιξοτροπικά υγρά. Αυτό το φαινόμενο πιθανόν να οφείλεται στη διάσπαση της δομής των υλικών, καθώς συνεχίζεται η διάτμηση (Sahin & Sumnu, 2006).

Σε ένα ιδανικά ιξώδες υλικό, η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι ανάλογη της τάσης, ενώ η παραμόρφωση είναι μη ανακτήσιμη μετά την απομάκρυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης. Θεωρώντας στρωτή ροή ενός ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, όπου η μία είναι ακίνητη και η άλλη κινείται με σταθερή ταχύτητα, το ιξώδες του υλικού προκύπτει από το Νόμο του Newton:

$$\tau = \eta \cdot \left(-\frac{dV}{dy}\right) \quad 2.14$$

όπου  $\tau$  είναι η διατμητική τάση,  $\eta$  είναι ο συντελεστής ιξώδους και  $dV/dy$  είναι η βαθμίδα ταχύτητας.

Τα ρευστά που ακολουθούν τη σχέση αυτή ονομάζονται νευτωνικά ρευστά και το ιξώδες δεν εξαρτάται από την ταχύτητα διάτμησης. Το ιξώδες των νευτωνικών ρευστών ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Εάν η σχέση της διατμητικής τάσης και της παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική, τότε το ρευστό δεν υπακούει στο Νόμο του Newton και ονομάζεται μη-νευτωνικό ρευστό (Sahin & Sumnu, 2006).

Κάποια υλικά υφίστανται αντιστρέψιμη παραμόρφωση μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή πάνω από την οποία η παραμόρφωση είναι μη ανακτήσιμη. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει από την ιξώδη ροή, καθώς η μόνιμη παραμόρφωση συμβαίνει μόνο όταν η τάση ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή, και ονομάζεται πλαστική παραμόρφωση. Τα περισσότερα υλικά δεν υπακούουν στην ιδανική πλαστική συμπεριφορά, και το σημείο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά μπορεί να μην είναι πλήρως ορισμένο (Sahin & Sumnu, 2006).

### 2.4.2.3 Ιξωδοελαστική συμπεριφορά

Σε ποικίλες περιπτώσεις, τα τρόφιμα συμπεριφέρονται τόσο ως ελαστικά στερεά όσο και ως ιξώδη υγρά και χαρακτηρίζονται ως ιξωδοελαστικά υλικά. Στα ιξωδοελαστικά υλικά η παραμόρφωση δεν είναι πλήρως αναστρέψιμη και τα υλικά δεν επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση (Sahin & Sumnu, 2006).

Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των ιξωδοελαστικών υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορα πρότυπα, όπως το γενικευμένο πρότυπο Voight (Kelvin), το γενικευμένο πρότυπο Maxwell, την καμπύλη ερπυσμού, την καμπύλη χαλάρωσης, κτλ. Η περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των υλικών πραγματοποιείται με μηχανικά μοντέλα, τα οποία

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

αποτελούνται είτε από ελαστικά στοιχεία (ελατήριο), είτε από ιξώδη στοιχεία (πιστόνι) ή και από τον συνδυασμό τους (Mezger, 2006; Sahin & Sumnu, 2006; Κροκίδα, 1999).

Για ένα ελαστικό στοιχείο ισχύει ο Νόμος του Hook:

$$F = E \cdot x \quad 2.15$$

όπου  $F$  (N) είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη,  $x$  (m) είναι η μετατόπιση και  $E$  (N/m) είναι η σταθερά του ελατηρίου.

Για ένα ιξώδες στοιχείο ισχύει:

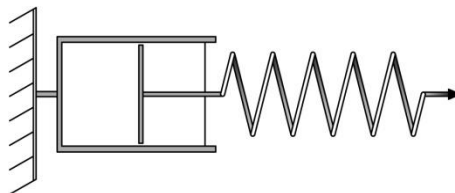
$$F = \eta \cdot \dot{x} \quad 2.16$$

όπου  $\dot{x}$  είναι η διαφόριση της μετατόπισης ως προς το χρόνο και  $\eta$  (Pa·s) το ιξώδες.

Το μοντέλο Maxwell προκύπτει από τη σύνδεση σε σειρά του ελαστικού και του ιξώδους στοιχείου,

$$\dot{x} = \frac{1}{E} \cdot \dot{F} + \frac{1}{\eta} \cdot F \quad 2.17$$

Στο μοντέλο Maxwell, η τάση που εφαρμόζεται αρχικά χρησιμοποιείται για την επιμήκυνση του ελατηρίου, με αποτέλεσμα αυτό να υπακούει στο νόμο του Hook. Καθώς το ελατήριο μεταβάλλεται, το πιστόνι αποκτά όλο και μεγαλύτερη τάση μέχρι το ελατήριο να φτάσει στο μέγιστο της επιμήκυνσής του. Στο σημείο αυτό, η τάση χρησιμοποιείται για ροή μέσα στο πιστόνι (Mezger, 2006; Κροκίδα, 1999).



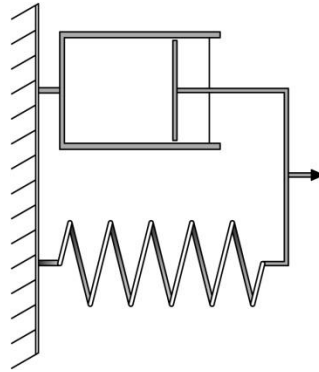
Σχήμα 2. 5. Το μοντέλο Maxwell (πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία).

Η παράλληλη σύνδεση των δύο παραπάνω στοιχείων οδηγεί στο μοντέλο Voight (Kelvin):

$$F = E \cdot x + \eta \cdot \dot{x} \quad 2.18$$

Στο μοντέλο αυτό, το ελατήριο και το πιστόνι κινούνται και τα δύο μαζί με σταθερή ταχύτητα. Η δύναμη εξαιτίας του πιστονιού αποκτά μία σταθερή τιμή, ενώ η δύναμη του ελατηρίου ξεκινά από μηδενική τιμή και βαθμιαία αυξάνει (Mezger, 2006; Κροκίδα, 1999).





Σχήμα 2. 6. Το μοντέλο Voight (Kelvin) (πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία).

### 2.4.3 Μέθοδοι προσδιορισμού ρεολογικών ιδιοτήτων

Για τη μελέτη της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των υλικών χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως είναι η Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση ή η Μηχανική Φασματοσκοπία. Μεταξύ τους η Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση χρησιμοποιείται ευρέως στη μελέτη προϊόντων τροφίμων.

#### 2.4.3.1 Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)

Στις δυναμικές μηχανικές δοκιμές, τα υλικά υποβάλλονται σε περιοδικά μεταβαλλόμενη μηχανική φόρτιση και μετριέται η τάση ή/ και η παραμόρφωση. Όταν ταυτόχρονα μεταβάλλεται και η θερμοκρασία, η τεχνική χαρακτηρίζεται ως Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για σχετικά γρήγορες δυναμικές σαρώσεις των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, με σκοπό να καθορίσει τις φυσικές καταστάσεις στις οποίες αλλάζουν οι μηχανικές ιδιότητες. Για τον προσδιορισμό των ρεολογικών ιδιοτήτων των υλικών, πραγματοποιούνται τρία κύρια είδη δοκιμών, περιστροφικές δοκιμές (rotational tests), δοκιμές ταλάντωσης (oscillation tests) και δοκιμές σάρωσης (creep tests). Οι δειγματοφορείς που χρησιμοποιούνται είναι κυλίνδρου, κώνου ή πλάκας (Mezger, 2006; Κωστάκης, 2009).

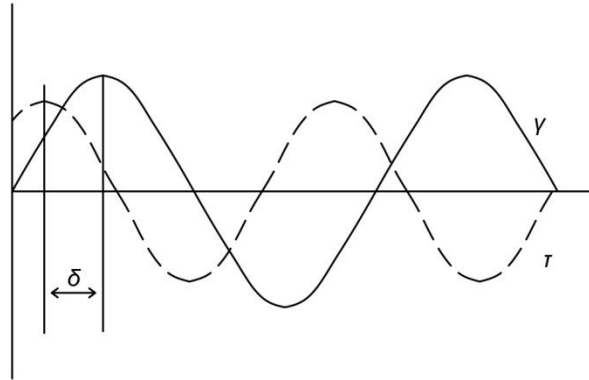
Η τάση που εφαρμόζεται στο δείγμα είναι συνήθως ημιτονοειδής. Το μέγεθος και η χρονική υστέρηση της μετάδοσης εξαρτώνται από τη φύση του υλικού. Στα ελαστικά υλικά μεταδίδεται μεγάλο μέρος της τάσης, ενώ στα ιξώδη υλικά διασκορπίζεται σε απώλειες τριβής (Sahin & Sumnu, 2006). Στα ελαστικά υλικά, η παραμόρφωση είναι σε φάση με την τάση, ενώ στα ιξωδοελαστικά υλικά, η τάση είναι ανάλογη του ρυθμού της παραμόρφωσης ως προς το χρόνο και η παραμόρφωση εμφανίζει μια υστέρηση σε σχέση με την τάση (διαφορά φάσης κατά μια γωνία  $0 \leq \delta \leq 90^\circ$ ) (Σχήμα 2. 7) (Mezger, 2006),

$$\sigma(t) = \sigma_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad 2. 19$$

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon_{n,A} \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \quad 2. 20$$

όπου,  $\sigma_A$  (Pa) είναι η μέγιστη τάση,  $\varepsilon_{n,A}$  είναι η μέγιστη παραμόρφωση,  $\omega$  (rad/s) είναι η κυκλική συχνότητα και  $t$  (s) είναι ο χρόνος, αντίστοιχα.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



Σχήμα 2. 7. Διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης(πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία).

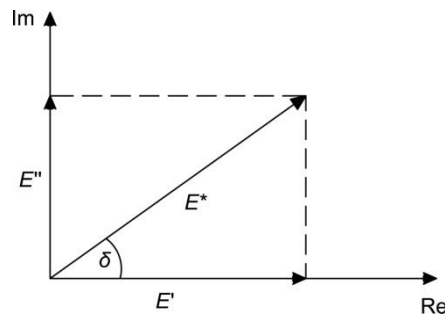
Η τάση και η παραμόρφωση συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma(t) = E^* \cdot \varepsilon_n(t) \quad 2. 21$$

όπου  $E^*$  είναι το σύνθετο μέτρο και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$|E^*| = ((E')^2 + (E'')^2)^{1/2} \quad 2. 22$$

όπου,  $E'$  είναι το δυναμικό μέτρο αποθήκευσης (storage modulus) και  $E''$  είναι το δυναμικό μέτρο απωλειών (loss modulus).



Σχήμα 2. 8. Σύνθετο μέτρο (πηγή: (Mezger, 2006), ίδια επεξεργασία).

Το δυναμικό μέτρο αποθήκευσης ( $E'$ ) είναι το μέτρο της ενέργειας που αποθηκεύεται από το δείγμα κατά τη διάρκεια της μέτρησης και προσδιορίζει την ελαστική συμπεριφορά του δείγματος. Το δυναμικό μέτρο απωλειών ( $E''$ ) συνδέεται με την ενέργεια που απορροφά το δείγμα και τη διασκορπίζει σε θερμότητα κατά τη διάρκεια της δοκιμής και προσδιορίζει την ιξώδη συμπεριφορά του δείγματος. Ο λόγος του μέτρου απωλειών προς το μέτρο αποθήκευσης, δηλαδή το ημίγειο της ενέργειας που καταναλώνεται ανά περίοδο προς την ενέργεια που αποθηκεύεται ονομάζεται παράγοντας απωλειών (loss factor,  $\tan\delta$ ) (Meyers & Chawla, 1999; Mezger, 2006),

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'} \quad 2. 23$$

Εάν  $\delta=0^\circ$ , αναπτύσσεται τέλεια ελαστική συμπεριφορά, ενώ εάν  $\delta=90^\circ$ , αναπτύσσεται ροή ρευστού. Σε ενδιάμεσες τιμές παρατηρείται ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν για το μέτρο διάτμησης  $G$ , δηλαδή,

$$\tau(t) = \eta^* \cdot \dot{\gamma}(t) \quad 2. 24$$

όπου,  $\eta^*$  είναι το σύνθετο ιξώδες:

$$|\eta^*| = |G^*|/\omega \quad 2. 25$$

και  $G^*$  είναι το σύνθετο μέτρο διάτμησης,

$$|G^*| = ((G')^2 + (G'')^2)^{1/2} \quad 2. 26$$

όπου,  $G'$  είναι το μέτρο αποθήκευσης (storage modulus) και  $G''$  είναι το μέτρο απωλειών (loss modulus).

## 2.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ - ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΟΣ

### 2.5.1 Γενικά

Τα τρόφιμα είναι πολυσυστατικά και πολυφασικά συστήματα τα οποία συνήθως δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής τους σε περιβάλλοντα συγκεκριμένης υγρασίας και θερμοκρασίας, πραγματοποιούνται χημικές και φυσικές μεταβολές, οι οποίες επηρεάζουν την υφή, τη δομή, τη ρεολογία και άλλες ιδιότητές τους. Οι αλλαγές αυτές σχετίζονται με τη θερμοδυναμική κατάσταση του νερού στα τρόφιμα. Οι περισσότερες από τις βιοχημικές, μικροβιολογικές, ενζυμικές και μη-ενζυμικές αντιδράσεις ελέγχονται από την ενεργότητα ύδατος, η οποία είναι ως εκ τούτου μία χρήσιμη παράμετρος για την πρόβλεψη της σταθερότητας και της διάρκειας ζωής των τροφίμων. Αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα ελέγχου της μικροβιακής αλλοίωσης και προβλέπει τη σταθερότητα των προϊόντων, ως προς τις φυσικές τους ιδιότητες, την ταχύτητα των αντιδράσεων υποβάθμισης και τη μικροβιακή ανάπτυξη (Jangam & Mujumdar, 2010). Η ενεργότητα ύδατος επηρεάζει το χρόνο ζωής, την ασφάλεια, την υφή, τη γεύση και το άρωμα των τροφίμων. Συνδέεται επίσης, με πολλές ιδιότητες των τροφίμων, όπως είναι η τραγανότητα των τροφίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, η κρυστάλλωση των συστατικών των τροφίμων, η κατάρρευση της δομής των αφυδατωμένων προϊόντων και η συσσωμάτωση της σκόνης. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον προσδιορισμό της σταθερότητας πολλών φαρμακευτικών και καλλυντικών προϊόντων (Jangam & Mujumdar, 2010).

Η ενεργότητα ύδατος ( $a_w$ ) ορίζεται ως ο λόγος της μερικής πίεσης των ατμών του περιβάλλοντος σε ισορροπία με το τρόφιμο ( $P_w$ ) προς την τάση ατμών του καθαρού νερού ( $P_w^o$ ) (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006):

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^o} \quad 2. 27$$

Σε συνθήκες ισορροπίας, η σχετική τάση ατμών του νερού στο τρόφιμο και στο περιβάλλον είναι περίπου ίσες και για το λόγο αυτό η ενεργότητα ύδατος σχετίζεται με τη σχετική υγρασία του αέρα (Roos, 1995). Η ενεργότητα ύδατος των τροφίμων προσδιορίζεται με διάφορες μεθόδους, όπως είναι η μέτρηση της τάσης ατμών, η μέτρηση της ωσμωτικής πίεσης, η ανύψωση του σημείου ζέσεως, η πτώση του σημείου πήξης, η χρήση της ισοπνευστικής μεθόδου, κτλ. (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).

### 2.5.2 Μέθοδοι προσδιορισμού ισόθερμων ρόφησης

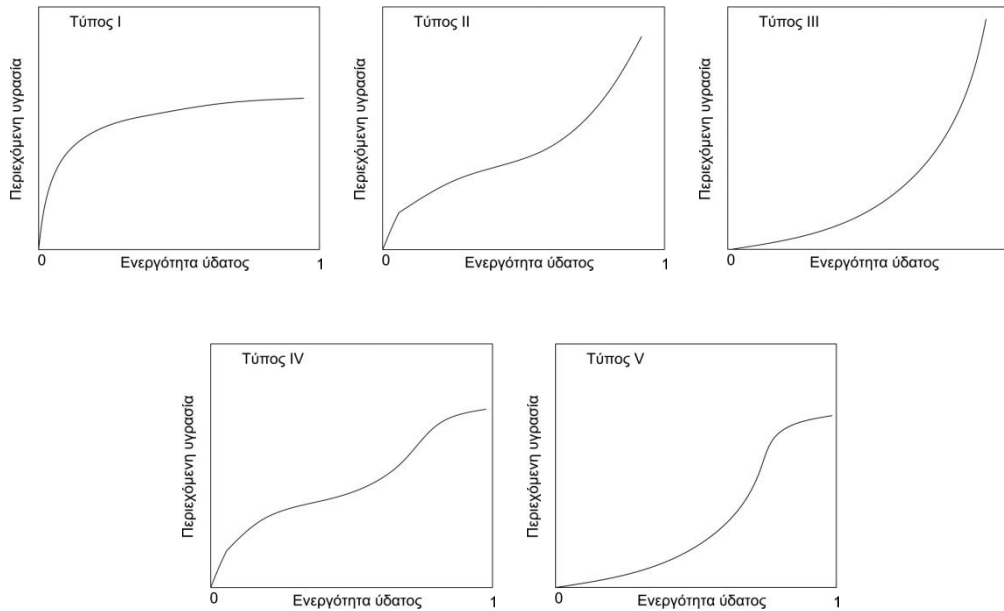
Όταν τα τρόφιμα αποθηκεύονται σε συνθήκες όπου η τάση ατμών του νερού στο περιβάλλον είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού μέσα στο τρόφιμο, πραγματοποιείται ρόφηση υγρασίας. Η γνώση του ρυθμού μεταφοράς υγρασίας μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη προϊόντων αλλά και την επιλογή των συνθηκών επεξεργασίας και συσκευασίας. Η σχέση ισορροπίας του νερού μεταξύ του τροφίμου και της αέριας φάσης σε σταθερή θερμοκρασία αποδίδεται από τις ισόθερμες ρόφησης. Για τον προσδιορισμό των ισόθερμων ρόφησης στα τρόφιμα, συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις βασικές μέθοδοι, η σταθμική, η μανομετρική και η υγρομετρική (Jangam & Mujumdar, 2010; Ταουκίης & Ωραιοπούλου, 2006).

- ✚ Η σταθμική μέθοδος (gravimetric method) είναι ευρέως διαδεδομένη για την ευκολία της, το χαμηλό κόστος και τη δυνατότητα χειρισμού πολλών δειγμάτων ταυτόχρονα. Κατά τη μέθοδο αυτή, συγκεκριμένες ποσότητες υλικού τοποθετούνται σε περιβάλλοντα συγκεκριμένης ενεργότητας ύδατος, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση κορεσμένων διαλυμάτων αλάτων, και αφήνονται να ισορροπήσουν (Rahman & Sablani, 2008). Το ποσοστό νερού που θα απορροφήσει ή θα χάσει το υλικό εξαρτάται από την ενεργότητα ύδατος του κάθε άλατος. Στην ισορροπία θεωρητικά, η ενεργότητα ύδατος του δείγματος εξισώνεται με την ενεργότητα του περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα αυτό απαιτεί απείρως μεγάλο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, τα δείγματα ζυγίζονται σε τακτά διαστήματα και η ισορροπία θεωρείται όταν η διαφορά μεταξύ συνεχόμενων μετρήσεων είναι μικρότερη από την ευαισθησία του οργάνου μέτρησης.
- ✚ Στη μανομετρική μέθοδο (manometric method) μετριέται η τάση ατμών του νερού σε ισορροπία με το τρόφιμο με τη χρήση ευαίσθητων μανομέτρων.
- ✚ Κατά την υγρομετρική μέθοδο (hygrometric method) μετριέται η σχετική υγρασία του αέρα ο οποίος περιβάλλει το τρόφιμο συγκεκριμένης υγρασίας (Basu et al., 2006).

Στα στερεά σώματα, τα επιφανειακά μόρια υποβάλλονται σε δυνάμεις έλξης, οι οποίες είναι κάθετες προς την επιφάνεια. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια του σώματος τείνει να συνδέει τα μόρια από το περιβάλλον για να μειώσει την επιφανειακή ενέργεια και να φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Οι επιφανειακές δυνάμεις μπορεί να είναι είτε φυσικές ή χημικές και προκαλούν την προσρόφηση του περιβάλλοντος ρευστού στην επιφάνεια του τροφίμου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ρόφηση.

Αρχικά, το νερό που ροφάται δημιουργεί ένα μονομοριακό στρώμα στην επιφάνεια του προϊόντος μέχρι αυτή να καλυφθεί πλήρως. Στη συνέχεια, το ποσό του νερού που ροφάται αυξάνεται και δημιουργεί πολλαπλές στοιβάδες (πολυστρωματική ρόφηση). Ανάλογα με το βαθμό δέσμευσης του νερού, παρατηρούνται πέντε τύποι ισόθερμων ρόφησης (τύπος I, τύπος II, τύπος III, τύπος IV, τύπος V) (Jangam & Mujumdar, 2010; Λαζαρίδης, 2000). Ο τύπος I αφορά στην ισόθερμο ρόφησης Langmuir, η οποία προκύπτει θεωρώντας μονομοριακή προσρόφηση από πορώδη υλικά με πεπερασμένο όγκο κενών. Ο τύπος II έχει σιγμοειδή μορφή και χρησιμοποιείται κυρίως για διαλυτά προϊόντα και μη

πορώδη υλικά ή σκόνες με διαμέτρους πόρων της τάξης των μακροπόρων. Το σημείο καμπής παρουσιάζει το σημείο όπου έχει ολοκληρωθεί η μονοστρωματική ρόφηση και ξεκινά η πολυστρωματική. Ο τύπος III είναι γνωστός ως ισόθερμος ρόφησης Flory-Huggins και χρησιμοποιείται όταν οι αλληλεπιδράσεις αερίου-στερεού είναι ασθενείς, ενώ ο τύπος IV αφορά στη ρόφηση σε διογκούμενα στερεά. Ο τύπος V αφορά στην πολυστρωματική ισόθερμο προσρόφησης BET η οποία παρατηρείται κυρίως σε μεσοπορώδη υλικά (Jangam & Mujumdar, 2010).



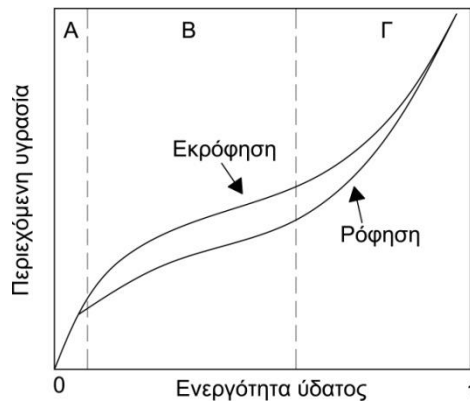
Σχήμα 2. 9. Τύποι ισόθερμων ρόφησης (πηγή: (Lewicki, 2008), ίδια επεξεργασία).

Οι ισόθερμες ρόφησης των τροφίμων είναι συνήθως σιγμοειδείς καμπύλες (τύπος II). Το μεγαλύτερο μέρος του νερού στα νωπά τρόφιμα ασκεί τάση ατμών πολύ κοντά σε εκείνη του καθαρού νερού, δηλαδή τη μονάδα. Η τάση ατμών διατηρείται μέχρις ότου η υγρασία των τροφίμων μειωθεί περίπου στο 22%. Το επίπεδο υγρασίας δεν είναι πλέον σε θέση να διατηρήσει την τάση ατμών του τροφίμου στη μονάδα, και ως εκ τούτου, αρχίζει να εμφανίζει μια μειωμένη τάση ατμών. Οι αλλαγές με την ατμοσφαιρική υγρασία του τελευταίου αυτού κλάσματος του νερού σε αφυδατωμένα τρόφιμα οδηγούν στο χαρακτηριστικό σιγμοειδές σχήμα των ισόθερμων ρόφησης του νερού (Caurie, 1970). Παράλληλα, τροφές πλούσιες σε διαλυτά συστατικά, όπως είναι τα σάκχαρα, έχουν βρεθεί να παρουσιάζουν συμπεριφορά τύπου III, η οποία οφείλεται στη διαλυτότητα των σακχάρων στο νερό (Rao & Rizvi, 1995).

Οι ισόθερμες ρόφησης προκύπτουν είτε από μία διεργασία προσρόφησης (ξεκινώντας από ένα ξηρό υλικό το οποίο έχει μηδενική ενεργότητα νερού), ή μία διεργασία εκρόφησης (ξεκινώντας από ένα υγρό υλικό το οποίο έχει ενεργότητα νερού ίση με τη μονάδα). Οι ισόθερμες ρόφησης και εκρόφησης παρουσιάζουν μία διαφορά η οποία ονομάζεται υστέρηση (Σχήμα 2. 10). Το φαινόμενο της υστέρησης ερμηνεύεται από τη δημιουργία μη αντιστρεπτών μεταβολών κατά τη ρόφηση υγρασίας από το τρόφιμο και εξαρτάται από τη σύσταση του προϊόντος, τη δομή του, τη θερμοκρασία, το χρόνο αποθήκευσης, κτλ. (Lewicki, 2008; Sahin & Sumnu, 2006; Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006). Διάφορες θεωρίες έχουν διατυπωθεί για να εξηγήσουν το φαινόμενο της υστέρησης. Οι ερμηνείες που προτείνονται είναι (Al-Muhtaseb et al., 2002):

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

- υστέρηση σε πορώδη στερεά: η υστέρηση αυτή παρατηρείται σε υλικά όπως φρούτα, όπου η θεωρία στηρίζεται στην τριχοειδή συμπύκνωση
- υστέρηση σε μη πορώδη στερεά: η υστέρηση αυτή παρατηρείται σε υλικά όπως πρωτεΐνες, όπου η θεωρία στηρίζεται σε μερική χημική ρόφηση (χημορρόφηση), προσμείξεις στην επιφάνεια ή αλλαγές φάσης
- υστέρηση σε μη άκαμπτα στερεά: η υστέρηση αυτή παρατηρείται σε υλικά όπως τα αμυλούχα τρόφιμα, όπου η θεωρία στηρίζεται σε δομικές αλλαγές, οι οποίες εμποδίζουν τη διείσδυση της προσροφούμενης ουσίας



Σχήμα 2. 10. Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης-εκρόφησης (πηγή: (Jangam & Mujumdar, 2010), ίδια επεξεργασία).

Μια ισόθερμος ρόφησης διακρίνεται σε τρεις περιοχές. Η περιοχή Α της ισόθερμης, αφορά σε τιμές ενεργότητας ύδατος μέχρι την τιμή 0,25. Στην περιοχή αυτή, το νερό είναι ισχυρά δεσμευμένο ως μονομοριακό στρώμα, σε ειδικές θέσεις που περιλαμβάνουν ομάδες υδροξυλίων των πολυσακχαριτών, καρβονυλομάδες και αμινομάδες των πρωτεϊνών κ.ά. Συγκρατείται από ισχυρούς δεσμούς και επομένως, η συμμετοχή του σε αντιδράσεις υποβάθμισης είναι περιορισμένη, ενώ δεν απομακρύνεται κατά την αφυδάτωση των τροφίμων. Οι τιμές της υγρασίας στην περιοχή αυτή, αποτελούν ένα μέτρο της δυνατότητας ρόφησης του τροφίμου. Για το λόγο αυτό, η πρόβλεψη της υγρασίας στην περιοχή αυτή είναι πολύ σημαντική (Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004). Η περιοχή Β, αφορά σε τιμές ενεργότητας ύδατος μέχρι την τιμή 0,75. Στην περιοχή αυτή, η σχέση μεταξύ της υγρασίας και της ενεργότητας ύδατος είναι σχεδόν γραμμική, γεγονός που αντιστοιχεί στην πολυστρωματική προσρόφηση και την πλήρωση των μικροπόρων με μόρια νερού. Το νερό είναι λιγότερο ισχυρά δεσμευμένο. Συνήθως ένα μέρος του νερού είναι παγιδευμένο σε μικρούς τριχοειδείς πόρους και παρουσιάζει μειωμένη τάση ατμών. Η περιοχή Γ αντιπροσωπεύει το ελεύθερο νερό το οποίο συγκρατείται χαλαρά σε μεγάλους τριχοειδείς πόρους ή μέσα στα κύτταρα των τροφίμων και εμφανίζει μειωμένη τάση ατμών λόγω των διαφόρων συστατικών που είναι διαλυμένα σε αυτό. Το ελεύθερο νερό απομακρύνεται εύκολα κατά την αφυδάτωση και είναι διαθέσιμο για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και τη δράση των ενζύμων. Η απομάκρυνση του νερού αυτού αντιστοιχεί στην άριστη σταθερότητα αφυδατωμένων τροφίμων (Ertugay & Certel, 2000; Λαζαρίδης, 2000). Ως αποτέλεσμα αυτού, οι ισόθερμες ρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των αφυδατωμένων τροφίμων. Η ενεργότητα ύδατος και οι ισόθερμες ρόφησης επηρεάζονται από τη σύσταση των τροφίμων και τη θερμοκρασία του συστήματος.

Για την περιγραφή των ισόθερμων ρόφησης των τροφίμων προτείνονται ποικίλες εμπειρικές και θεωρητικές εξισώσεις στη βιβλιογραφία. Οι πιο σημαντικές παρατίθενται στον Πίνακα 2. 1.

**Πίνακας 2. 1. Εξισώσεις ισόθερμων ρόφησης (Albena & Nikolay, 2004; Jangam & Mujumdar, 2010; Sahin & Sumnu, 2006; Wang & Brennan, 1991; Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006).**

| Μαθηματική εξίσωση           |   |
|------------------------------|---|
| Langmuir                     | $a_w \cdot \left( \frac{1}{X} - \frac{1}{X_m} \right) = \frac{1}{A \cdot X_m}$                              |
| GAB                          | $X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$ |
| BET                          | $X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 - a_w + C \cdot a_w)}$                                 |
| Henderson                    | $X = \left( -\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$  |
| Τροποποιημένη<br>Henderson   | $a_w = 1 - \exp(-A \cdot (T + D) \cdot X^B)$  |
| Oswin                        | $X = A \cdot \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$  |
| Τροποποιημένη<br>Oswin       | $a_w = \left( \left( \frac{A + D \cdot T}{X} \right)^C + 1 \right)^{-1}$                                    |
| Halsey                       | $a_w = \exp\left( -\frac{A \cdot X^{-B}}{R \cdot T} \right)$  |
| Τροποποιημένη<br>Halsey      | $a_w = \exp\left( -\frac{\exp(A + D \cdot T)}{X^C} \right)$   |
| Chung-Pfost                  | $a_w = \exp\left( \frac{-F}{T} \cdot \exp(-A \cdot X) \right)$  |
| Τροποποιημένη<br>Chung-Pfost | $a_w = \exp\left( \frac{-F}{T + D} \cdot \exp(-A \cdot X) \right)$  |
| Peleg                        | $X = m_1 \cdot a_w^{n_1} + m_2 \cdot a_w^{n_2}$   |
| Smith                        | $X = c_1 - c_2 \cdot \ln(1 - a_w)$  |
| Iglesias-Chirife             | $\ln(X + (X^2 + X_{0.5})^{\frac{1}{2}}) = c_1 \cdot a_w + c_2$  |

όπου,  $X$  (kg H<sub>2</sub>O/kg ξηρών στερεών) είναι η περιεχόμενη υγρασία των υλικών επί ξηρής βάσης (ξ.β.),  $a_w$  είναι η ενεργότητα ύδατος,  $X_m$  είναι η περιεχόμενη υγρασία που αντιστοιχεί στο μονομοριακό στρώμα,  $X_{0.5}$  είναι η περιεχόμενη υγρασία που αντιστοιχεί σε  $a_w=0,5$ ,  $T$  (K) είναι η θερμοκρασία,  $C, K, A, B, D, F, m_1, m_2, c_1, c_2, n_1, n_2$  είναι σταθερές.

Από τις εξισώσεις αυτές, οι εξισώσεις BET και GAB χρησιμοποιούνται ευρέως σε προϊόντα τροφίμων.

Εξισώσεις BET και GAB (Roos, 1995; Sahin & Sumnu, 2006; Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006)

Η **εξίσωση BET** είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση που περιγράφει τις ισόθερμες ρόφησης για συστήματα τροφίμων και προτάθηκε από τους Brunauer, Emmett, και Teller το 1938 (Roos, 1995). Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε κάποιες υποθέσεις, όπως (α) η ολική θερμότητα προσρόφησης που αντιστοιχεί στη μονοστοιβάδα είναι ίση με το άθροισμα της θερμότητας εξατμίσου και μιας σταθεράς αλληλεπίδρασης-προσρόφησης, (β) η ολική θερμότητα προσρόφησης

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

για την πολυστρωματική περιοχή είναι ίση με τη θερμότητα εξάτμισης, ( $\gamma$ ) η προσρόφηση πραγματοποιείται μόνο σε ειδικά σημεία και δ) δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προσροφημένων μορίων (Lewicki, 2008; Λαζαρίδης, 2000). Καθώς οι υποθέσεις αυτές δεν ισχύουν σε όλα τα τρόφιμα, η εξίσωση BET εφαρμόζεται ικανοποιητικά σε εύρος ενεργοτήτων ύδατος από 0,05 έως 0,50. Οι ισόθερμες που περιγράφονται από την εξίσωση BET είναι σιγμοειδείς και το σημείο καμπής τους περιγράφει τη χωρητικότητα της μονοστοιβάδας. Μέσω της εξίσωσης αυτής υπολογίζεται η υγρασία του μονομοριακού στρώματος, η οποία συσχετίζεται με τη φυσική και χημική σταθερότητα των τροφίμων και όπως αναφέρθηκε, είναι ιδιαίτερης σημασίας για την επεξεργασία και συντήρηση των τροφίμων (Risvi, 1995; Λαζαρίδης, 2000). Όταν η ενεργότητα ύδατος αυξηθεί πάνω από την τιμή που αντιστοιχεί στο μονομοριακό στρώμα παρουσιάζεται εκθετική αύξηση του ρυθμού πολλών αντιδράσεων που επιδρούν στη διατηρησιμότητα των τροφίμων.

Η εξίσωση BET δίνει αρκετά δεδομένα για τον υπολογισμό της θερμότητας προσρόφησης. Η σταθερά  $C$  της εξίσωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση:

$$C = K \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad 2. 28$$

όπου,  $Q$  είναι η θερμότητα προσρόφησης,  $T$  (K) είναι η θερμοκρασία,  $K$  είναι σταθερά και  $R$  (8,314 kJ/(mol K)) είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων. Οι τιμές της σταθεράς  $C$  δείχνουν το βαθμό αλληλεπίδρασης του τροφίμου με το νερό. Όσο μεγαλύτερο είναι το  $C$ , τόσο ισχυρότερα δεσμευμένο είναι το νερό στη μονοστοιβάδα. Εάν ισχύει  $50 < C < 200$ , τότε η αλληλεπίδραση του τροφίμου με το νερό είναι μεγάλη και η ισόθερμος ρόφησης είναι τύπου I. Εάν ισχύει  $2 < C < 50$ , τότε η αλληλεπίδραση του τροφίμου με το νερό είναι μέτρια και η ισόθερμος ρόφησης είναι σιγμοειδής. Για τα περισσότερα τρόφιμα η τιμή της σταθεράς  $C$  κυμαίνεται μεταξύ 16 και 20, επομένως ακολουθούν ισόθερμες τύπου II. Για τιμές  $C < 2$  η αλληλεπίδραση του τροφίμου με το νερό είναι μικρή και η ισόθερμος ρόφησης είναι τύπου III. Η σταθερά  $K$  υποδηλώνει τη σχέση των μορίων στην πολυστοιβάδα και στο νερό. Όταν το  $K$  πλησιάζει τη μονάδα δεν υπάρχει καμία διάκριση μεταξύ των μορίων στην πολυστοιβάδα και στο νερό. Σε χαμηλότερες τιμές του  $K$ , τα μόρια δομούνται περισσότερο στην πολυστοιβάδα (Lazou & Krokida, 2011).

Η **εξίσωση GAB** δίνει μία πιο ικανοποιητική προσέγγιση των ισόθερμων ρόφησης για τα περισσότερα τρόφιμα και εφαρμόζεται για ενεργότητες ύδατος μέχρι 0,90 ή 0,95 (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006). Αποτελεί γενικευμένη έκφραση της εξίσωσης BET, η οποία λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές ιδιότητες του νερού στην πολυστρωματική στοιβάδα. Η εξίσωση αυτή προτάθηκε από τους Guggenheim, Anderson και de Boer και έχει πολλά πλεονεκτήματα, καθώς βασίζεται σε βασικό θεωρητικό υπόβαθρο, προσαρμόζεται καλά στα περισσότερα τρόφιμα, είναι απλή, περιέχει παραμέτρους με φυσική σημασία και μπορεί να περιγράψει την επίδραση της θερμοκρασίας στις ισόθερμες ρόφησης. Οι σταθερές  $C$  και  $K$  σχετίζονται με τις ενέργειες αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρώτων και των περισσότερο προσροφημένων μορίων και τη θερμότητα συμπύκνωσης του νερού και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία,

$$C = c \cdot \exp\left(\frac{H_m - H_n}{R \cdot T}\right) \quad 2. 29$$

$$K = k \cdot \exp\left(\frac{H_p - H_n}{R \cdot T}\right) \quad 2. 30$$



όπου,  $c$  και  $k$  είναι σταθερές,  $H_m$  (kJ/mol) είναι η μοριακή ενθαλπία ρόφησης του μονομοριακού στρώματος,  $H_n$  (kJ/mol) είναι η μοριακή ενθαλπία ρόφησης της πολυστοιβάδας και  $H_p$  (kJ/mol) είναι η μοριακή ενθαλπία εξάτμισης του νερού. Όταν η τιμή της σταθεράς  $K$  είναι μονάδα, η εξίσωση GAB μετατρέπεται στην εξίσωση BET. Για τη μέτρηση της διαφορικής θερμότητας ρόφησης χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Η πρώτη αφορά στην άμεση θερμοδομετρική μέτρηση της θερμότητας και η δεύτερη αφορά στην εφαρμογή της εξίσωσης Clausius-Clayperon στις ισοστερικές πιέσεις ισορροπίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Al-Muhtaseb et al., 2002; Sahin & Sumnu, 2006).

Η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που αντιστοιχεί στο μονομοριακό στρώμα η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση GAB είναι συνήθως υψηλότερη από αυτή που υπολογίζεται από την εξίσωση BET. Η επιλογή του κατάλληλου προτύπου για την περιγραφή των ισόθερμων ρόφησης εξαρτάται από την ακρίβεια του προτύπου και τη φυσική σημασία των παραμέτρων του (Sahin & Sumnu, 2006).

## 2.6 ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΦΑΣΕΩΝ

### 2.6.1 Γενικά

Η κατανόηση των θερμικών και θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των τροφίμων είναι υψίστης σημασίας, καθώς πολλά στάδια των διεργασιών επεξεργασίας και αποθήκευσης περιλαμβάνουν μεταφορά θερμότητας. Η συμπεριφορά των τροφίμων κατά τις μεταπτώσεις φάσεων είναι σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό διεργασιών, με στόχο την παραγωγή προϊόντων με επιθυμητή λειτουργικότητα και σταθερότητα κατά την αποθήκευση, τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Τα τρόφιμα είναι ετερογενή και πολύπλοκα συστήματα στα οποία πραγματοποιούνται πολλές αντιδράσεις και είναι ασταθή εξαιτίας πολλών χημικών, φυσικών και βιολογικών μεταβολών. Το νερό και άλλα υγρά υφίστανται μεταπτώσεις φάσεων στα τρόφιμα λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Επίσης, τα στερεά συστατικά μπορεί να υποστούν μεταπτώσεις φάσεων (ζελατινοποίηση αμύλου, μετουσίωση πρωτεϊνών, κτλ.) οι οποίες οδηγούν σε δομικές μεταβολές (LeBail et al., 2003).

### 2.6.2 Ορισμοί

Η φυσική κατάσταση και η σταθερότητα των τροφίμων εξαρτάται από μεταπτώσεις φάσεις πρώτης (κρυστάλλωση και τήξη, ζελατινοποίηση) και δεύτερης τάξης (υαλώδης μετάπτωση των άμορφων υλικών), καθώς και από την κινητικότητα των μοριακών αλυσίδων στις διάφορες φάσεις.

#### 2.6.2.1 Κρυστάλλωση και τήξη

Η κρυστάλλωση και η τήξη είναι μεταπτώσεις φάσεων οι οποίες πραγματοποιούνται μεταξύ των στερεών και υγρών φάσεων. Η λανθάνουσα θερμότητα η οποία ελευθερώνεται κατά την κρυστάλλωση είναι ίση με το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την τήξη, στην ίδια θερμοκρασία. Η κρυστάλλωση ενός τήγματος πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία τήξης και είναι μια σημαντική μετάπτωση φάσης που πραγματοποιείται σε διάφορα τρόφιμα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους ή της αποθήκευσής τους. Η κρυστάλλωση μπορεί να είναι είτε επιθυμητή ή ανεπιθύμητη, ανάλογα με το προϊόν και τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά (Roos, 1995). Στη διαδικασία της κρυστάλλωσης βασίζονται πολλές βιομηχανίες τροφίμων, όπως είναι οι

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

βιομηχανίες αλάτων και σακχάρων, οι βιομηχανίες λιπών και ελαίων, οι βιομηχανίες ζαχαροπλαστικής, καθώς και οι βιομηχανίες κατεψυγμένων προϊόντων (Jouppila & Roos, 2008).

Η περιεχόμενη υγρασία και η θερμοκρασία επηρεάζουν την κινητικότητα των μορίων, την κρυσταλλική τους συμπεριφορά και την κινητική της κρυστάλλωσης των άμορφων συστατικών σε αφυδατωμένα τρόφιμα. Η ταχύτητα κρυστάλλωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η διαφορά της θερμοκρασίας αποθήκευσης από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Jouppila & Roos, 2008).

Η κρυστάλλωση πραγματοποιείται σε τρία στάδια που περιλαμβάνουν την πυρήνωση (nucleation), την ανάπτυξη των κρυστάλλων (propagation) και την ωρίμανση (maturation) (Roos, 1995).

### Πυρήνωση

Η πυρήνωση περιλαμβάνει τη διάταξη ακαθόριστων μορίων σε μία ορισμένη κρυσταλλική φάση, ως αποτέλεσμα της μετασταθούς κατάστασης που προκαλείται μετά τον υπερκορεσμό λόγω απομάκρυνσης του διαλύτη ή μείωση της θερμοκρασίας του διαλύματος ή του τήγματος (Van Hook, 1961). Η πυρήνωση οδηγεί στη δημιουργία σταθερών πυρήνων, οι οποίοι στη συνέχεια θα αναπτυχθούν σε κρυστάλλους μέσω της διαδικασίας ανάπτυξης και ωρίμανσης (Jouppila & Roos, 2008). Η πυρήνωση μπορεί να είναι είτε ομοιογενής ή ετερογενής. Η ομοιογενής πυρήνωση πραγματοποιείται αυθόρμητα όταν τα μόρια ενός υλικού σχηματίζουν συστάδες λόγω μοριακών συγκρούσεων. Για να σχηματιστούν οι πυρήνες, το μέγεθος των συστάδων πρέπει να γίνει αρκετά μεγάλο και να υπερβεί το ενεργειακό φράγμα για πυρήνωση (Hartel & Shastry, 1991). Ο ρυθμός σχηματισμού πυρήνων αυξάνει με την αύξηση του υπερκορεσμού. Η ετερογενής πυρήνωση περιλαμβάνει την παρουσία ξένων σωμάτων ή ακαθαρσιών που μπορούν να δράσουν ως θέσεις πυρήνων. Τα ξένα σώματα μειώνουν την ενέργεια που απαιτείται για το σχηματισμό των πυρήνων και, ως εκ τούτου, διευκολύνουν την κρυστάλλωση (Van Hook, 1961). Η ετερογενής πυρήνωση είναι πιο πιθανή να συμβεί σε τρόφιμα από ότι η ομοιογενής πυρήνωση, λόγω της παρουσίας ακαθαρσιών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δημιουργία πυρήνων μπορεί να μειωθεί με την παρουσία άλλων ενώσεων, π.χ. σε τρόφιμα που αποτελούνται από μίγματα διαφόρων διαλυμένων ουσιών. Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί δευτερογενής πυρήνωση εξαιτίας της παρουσίας υφιστάμενων πυρήνων, η οποία απαιτεί την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, όπως π.χ. ανάδευση των κορεσμένων διαλυμάτων (Hartel & Shastry, 1991). Η δευτερογενής πυρήνωση μπορεί να προκύψει ακόμα, από τη μηχανική μείωση του μεγέθους των υπάρχοντων κρυστάλλων, η οποία μπορεί να συμβεί λόγω δυνάμεων διατμήσεως. Στη συνέχεια, οι κρύσταλλοι μπορεί να αυξηθούν και να ξεπεράσουν το κρίσιμο μέγεθος των σταθερών πυρήνων (Roos, 1995).

### Ανάπτυξη κρυστάλλων

Το στάδιο σχηματισμού των πυρήνων ακολουθείται από την ανάπτυξη των κρυστάλλων. Για να πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των κρυστάλλων τα μόρια θα πρέπει να μπορούν να διαχέονται στην επιφάνεια των αυξανόμενων πυρήνων. Ο ρυθμός ανάπτυξης εξαρτάται από το βαθμό υπερκορεσμού ή υπέρψυξης, τη θερμοκρασία και την παρουσία ακαθαρσιών και καθυστερεί σε υψηλά επίπεδα υπερκορεσμού και παρουσία ακαθαρσιών (Roos, 1995). Ανάλογα με το υλικό, η ανάπτυξη των κρυστάλλων μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: α) πολυστροφισμός, β) διάχυση των μορίων που κρυσταλλώνονται στη διεπιφάνεια των κρυστάλλων, γ) απομάκρυνση του νερού, δ) διάχυση των μορίων του νερού από την επιφάνεια των κρυστάλλων, ε) προσανατολισμό των μορίων στη διεπιφάνεια του υγρού και των κρυστάλλων, στ) ενσωμάτωση μορίων στο κρυσταλλικό πλέγμα

και ζ) απομάκρυνση της λανθάνουσας θερμότητας (Hartel & Shastry, 1991; Jouppila & Roos, 2008; Roos, 1995).

#### Ωρίμανση

Η ωρίμανση περιλαμβάνει ανακρυστάλλωση, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό κρυστάλλων με χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση και κρυσταλλική τελειότητα (Jouppila & Roos, 2008).

#### Τήξη

Η θερμοκρασία τήξεως ορίζεται ως η θερμοκρασία κατά την οποία ένα υλικό μεταβαίνει από τη στερεή στην υγρή κατάσταση. Τα περισσότερα τρόφιμα βρίσκονται στην άμορφη κατάσταση, η οποία είναι μια κατάσταση μη ισορροπίας, σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία τήξης τους. Οι φυσικές ιδιότητες της άμορφης κατάστασης σχετίζονται με τη μηχανική συμπεριφορά και τη σταθερότητα των διαφόρων τροφίμων. Η τήξη των κρυσταλλικών πολυμερών οδηγεί στο σχηματισμό ενός άμορφου τήγματος, το οποίο μπορεί να υπερψυχθεί σε μία ιζωδοελαστική κατάσταση ή σε μία στερεή, υαλώδη κατάσταση. Οι θερμοκρασίες τήξεως των συνθετικών πολυμερών μειώνονται παρουσία διαλυτών, όπως του νερού, εξαιτίας της πλαστικοποιητικής ικανότητάς τους (Roos, 1995).

#### **2.6.2.2 Ζελατινοποίηση**

Η ζελατινοποίηση αποτελεί μία μετάπτωση φάσης η οποία παρατηρείται σε αμυλώδη υλικά, κατά τη διάρκεια πολλών διεργασιών, όπως είναι το ψήσιμο ψωμιού και κέικ, η εκβολή προϊόντων, κτλ. (Biliaderis et al., 1980). Το άμυλο είναι ένας υδατάνθρακας που αποτελείται από μονάδες άνυδρης γλυκόζης που συνδέονται κυρίως με α-D (1->4) γλυκοσιδικούς δεσμούς. Αποτελείται κυρίως από δύο συστατικά, την αμυλόζη και την αμυλοπηκτίνη. Η αμυλόζη είναι ένα γραμμικό πολυμερές στο οποίο οι μονάδες άνυδρης γλυκόζης συνδέονται μέσω α-D (1->4) γλυκοσιδικών δεσμών, ενώ η αμυλοπηκτίνη είναι ένα διακλαδισμένο πολυμερές με α-D (1->4) γλυκοσιδικούς δεσμούς, με περιοδικές διακλαδώσεις στη θέση O-6. Οι κόκκοι του αμύλου είναι ημικρυσταλλικοί, που αποτελούνται από εναλλασσόμενες κρυσταλλικές και άμορφες φάσεις (Sablaní, 2008).

Το άμυλο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τροποποίηση της υφής των τροφίμων κατά τη θέρμανση παρουσίας νερού. Οι κόκκοι του αμύλου είναι δύσπεπτοι και αδιάλυτοι σε κρύο νερό, εξαιτίας της πυκνότερης διάταξης των μορίων του αμύλου στην επιφάνεια του κόκκου από το ότι στο εσωτερικό του. Αν ένα αιώρημα αμύλου θερμανθεί σε περίσσεια νερού, η διάχυση του νερού μέσα στους κόκκους προκαλεί διόγκωση και διαταράσσει τους δεσμούς υδρογόνου. Τα μόρια του νερού τότε προσκολλώνται σε ομάδες υδροξυλίου του αμύλου. Αυτή η μετάπτωση φάσης ονομάζεται ζελατινοποίηση. Το ζελατινοποιημένο άμυλο είναι εύπεπτο. Η θερμοκρασία ζελατινοποίησης εξαρτάται κυρίως από την υγρασία, τις διαλυμένες ουσίες, την παρουσία άλλων βιοϋλικών, και τις συνθήκες επεξεργασίας και προ-επεξεργασίας. Η ζελατινοποίηση περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: α) οι κόκκοι ενυδατώνονται και διογκώνονται αρκετές φορές το αρχικό τους μέγεθος, β) οι κόκκοι χάνουν τη διπλοθλαστικότητα τους (birefringence), γ) αυξάνει η συνοχή του μίγματος, δ) πραγματοποιείται ταχεία αύξηση στη συνοχή η οποία φθάνει σε ένα μέγιστο, ε) τα γραμμικά μόρια διαλύονται και διαχέονται από τους κόκκους και (τ) η διεσπαρμένη μήτρα σχηματίζει ένα gel (Oikku & Rha, 1978; Sablaní, 2008). Η ζελατινοποίηση μπορεί να διερευνηθεί χρησιμοποιώντας ποικίλες μεθόδους, όπως είναι η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC), η περίθλαση ακτίνων X, η φασματομετρία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR), η υπέρυθη φασματομετρία μετασχηματισμού Fourier (FTIR), η οπτική μικροσκοπία, η ηλεκτρονική μικροσκοπία και η ρεολογία (Liu et al., 2002; Sablaní, 2008).

### 2.6.2.3 Υαλώδης μετάπτωση ( $T_g$ )

Η θεωρία της υαλώδους μετάπτωσης είναι καθοριστική για την επιστήμη των τροφίμων. Πολλές ιδιότητες που σχετίζονται με τη μοριακή κινητικότητα, όπως είναι οι ιδιότητες υφής, η ανάπτυξη μικροοργανισμών, οι χημικές αντιδράσεις και η διάρκεια ζωής εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Η θεωρία της υαλώδους μετάπτωσης είναι απαραίτητο εργαλείο για την πρόβλεψη φυσικών, χημικών και βιολογικών μεταβολών στα τρόφιμα (Sablan et al., 2009). Πολλές διεργασίες ή ιδιότητες επηρεάζονται ή προκαλούνται από την υαλώδη μετάπτωση, όπως είναι η ξήρανση υπό κατάψυξη, η κατάρρευση κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη, η υφή των τροφίμων, η σταθερότητα κατά την αποθήκευση υπό κατάψυξη, οι ιδιότητες της σκόνης (κολλώδεις, συσσωμάτωση, κτλ.), η κρυστάλλωση και η ανακρυστάλλωση, και η υποβάθμιση και ζελατινοποίηση του αμύλου (Schenz, 1995).

Η υαλώδης μετάπτωση είναι μία μετάπτωση δεύτερης τάξης, η οποία εξαρτάται από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης παρατηρείται μία ογκομετρική ή θερμοδυναμική μεταβολή (Roos, 1995). Κατά τη μετάπτωση αυτή, ένα άμορφο υλικό (ή μία άμορφη περιοχή εντός ενός ημικρυσταλλικού υλικού) μετατρέπεται από μία σκληρή και εύθραυστη φάση σε μία τετηγμένη, ελαστική κατάσταση, εξαιτίας της έναρξης της κινητικότητας των μοριακών αλυσίδων. Τα περισσότερα πολυμερή αλλά και πολλά τρόφιμα συναντώνται σε άμορφη κατάσταση, η οποία είναι μία θερμοδυναμικά ασταθής κατάσταση σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Κατά τη μετάπτωση αυτή πραγματοποιείται μια ασυνέχεια στη θερμοχωρητικότητα, τη θερμική διαστολή και τη διηλεκτρική σταθερά, οι οποίες προσδιορίζονται ως μεταβολές βήματος κατά τη διάρκεια των πειραματικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται (Huber, 2000; Icoz & Kokini, 2008). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης θεωρείται ως μία από τις πιο σημαντικές φυσικές παραμέτρους που καθορίζουν τη φυσική κατάσταση των υλικών, στην οποία το υλικό υποβάλλεται σε αλλαγή κατάστασης, αλλά όχι φάσης.

Τα άμορφα υλικά στην υαλώδη κατάσταση έχουν υψηλό ιξώδες και είναι ιδιαίτερα εύθραυστα. Οι μοριακές κινήσεις τους περιορίζονται σε μικρές δονήσεις και περιστροφικές κινήσεις μικρής εμβέλειας. Τα τρόφιμα που βρίσκονται στην υαλώδη κατάσταση είναι ιδιαίτερα σταθερά και δεν υπόκεινται σε χημικές ή ενζυμικές μεταβολές που υποβαθμίζουν την ποιότητά τους (Liu-ring et al., 2007). Πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης πραγματοποιείται μία δραματική αύξηση της κινητικότητας των μοριακών αλυσίδων και μία σημαντική μείωση του μέτρου ελαστικότητας και του ιξώδους, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ακαμψία και η σταθερότητα των υλικών.

Μετά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ακολουθεί μία ελαστική περιοχή. Η περιοχή αυτή δεν παρατηρείται για ανόργανα άμορφα υλικά ή άμορφα συστατικά χαμηλού μοριακού βάρους, όπως είναι τα σάκχαρα και το νερό. Στη συνέχεια, τα πολυμερή ευθείας αλυσίδας διέρχονται από μία περιοχή «ελαστικής ροής», στην οποία μπορεί να παρουσιάζουν τόσο ελαστικότητα όσο και ροή. Τα διασταυρούμενα πολυμερή δε διέρχονται από αυτή την περιοχή. Τέλος, όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, τα πολυμερή αρχίζουν και ρέουν εύκολα. Οι κρυσταλλικές όμως περιοχές παραμένουν σκληρές σε θερμοκρασίες μεταξύ της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και της θερμοκρασίας τήξης. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται σε πολυμερή συστατικά τροφίμων όπως είναι το άμυλο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μερικώς κρυσταλλικά πολυμερή υδατανθράκων. Η θερμοκρασία τήξης των περισσότερων πολυμερών αλλά και συστατικών τροφίμων είναι περίπου 100°C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Roos, 1995).

Η θερμοκρασία και το εύρος της υαλώδους μετάπτωσης των τροφίμων εξαρτώνται από το μοριακό μέγεθος, τη σύσταση και την περιεκτικότητα σε νερό. Ο ρυθμός θέρμανσης επηρεάζει επίσης, τις τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώνεται με τη μείωση του μοριακού μεγέθους των ομοπολυμερών και την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό (Jourrila & Roos, 2008). Η προσθήκη συστατικών χαμηλού μοριακού βάρους σε κάποιο πολυμερές υλικό ή η μείωση του μεγέθους των μορίων του πολυμερούς οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό μειώνει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην πλαστικοποιητική ικανότητα του νερού να αυξάνει τον ελεύθερο όγκο. Στα τρόφιμα, ο ελεύθερος όγκος του νερού είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτόν των άμορφων στερεών, με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικότητας των πολυμερικών αλυσίδων. Η εξάρτηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τη σύσταση των υλικών δίνεται από τη σχέση Gordon-Taylor (Rahman, 2008b):

$$T_g = \frac{X_s \cdot T_{gs} + k \cdot X_w \cdot T_{gw}}{X_s + k \cdot X_w} \quad 2.31$$

όπου,  $T_g$  (°C) είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού,  $T_{gs}$  και  $T_{gw}$  (°C) είναι οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης των άνυδρων στερεών και του νερού αντίστοιχα,  $X_w$  και  $X_s$  είναι τα ποσοστά νερού και στερεών, αντίστοιχα και  $k$  είναι μία εμπειρική παράμετρος.

Οι Couchman και Kárász (1978) πρότειναν μία θερμοδυναμική προσέγγιση για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας υαλώδους μεταπτώσεως σε μείγματα.

$$\ln T_g = \frac{X_1 \cdot \Delta C_{p1} \cdot \ln T_{g1} + X_2 \cdot \Delta C_{p2} \cdot \ln T_{g2}}{X_1 \cdot \Delta C_{p1} + X_2 \cdot \Delta C_{p2}} \quad 2.32$$

όπου  $X_i$  είναι η γραμμομοριακή συγκέντρωση του κάθε συστατικού,  $\Delta C_{pi}$  είναι η διαφορά στη θερμοχωρητικότητα της υγρής και υαλώδους φάσης του κάθε συστατικού και  $T_{gi}$  (°C) είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του κάθε συστατικού.

### 2.6.3 Μέθοδοι προσδιορισμού των μεταπτώσεων φάσης

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μπορεί να προσδιοριστεί με ποικίλους τρόπους, όπως είναι η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC), η Φασματοσκοπία Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού (NMR), η Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση (DMTA), φασματοσκοπικές τεχνικές, όπως είναι ο συντονισμός spin ηλεκτρονίου και διηλεκτρικές φασματοσκοπίες (Sandoval et al., 2009). Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μεταπτώσεως των τροφίμων χρησιμοποιούνται συνήθως οι τεχνικές DMTA και DSC.

#### 2.6.3.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

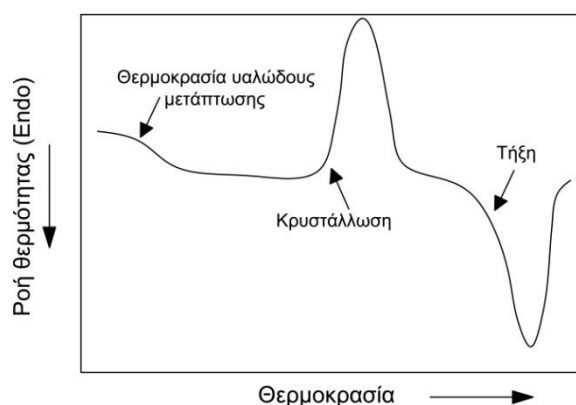
Η βασικότερη μέθοδος προσδιορισμού της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης είναι η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης. Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης είναι γρήγορη μέθοδος για την ανάλυση των θερμικών ιδιοτήτων διαφόρων προϊόντων, μπορεί να εφαρμοστεί σε προϊόντα τα οποία περιέχουν είτε μικρή ή μεγάλη υγρασία και απαιτεί μικρή ποσότητα δείγματος (5-10 mg).

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στη μέτρηση της θερμοκρασίας μεταξύ του δείγματος και μίας αναφοράς. Όταν το δείγμα υφίσταται κάποια αλλαγή φάσης, απαιτείται ροή περισσότερης ή λιγότερης θερμότητας, ανάλογα αν η διεργασία είναι εξώθερμη ή ενδόθερμη, προς το δείγμα από

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ότι στο δείγμα αναφοράς για να διατηρείται η θερμοκρασία των δύο δειγμάτων στην ίδια τιμή. Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης προσδιορίζει την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται από αυτούς τους μετασχηματισμούς. Αλλαγές που σχετίζονται με την απορρόφηση ή απελευθέρωση θερμότητας προκαλούν αλλαγές στη διαφορική ροή θερμότητας που καταγράφεται ως μια κορυφή στο διάγραμμα θερμοκρασίας - ροής θερμότητας. Οι μεταπτώσεις πρώτης τάξης παράγουν κορυφές, ενώ οι μεταπτώσεις δεύτερης τάξης παράγουν μία βηματική μεταβολή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. 11 (Roos, 1995). Το σχήμα, το μέγεθος, και η θέση των κορυφών μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η μετάπτωση, το ποσό της ενέργειας που απαιτείται ανά γραμμάριο για να επηρεάσει τη μετάβαση και την αναμιξιμότητα των συστατικών με βάση την παρουσία ή απουσία επικαλυπτόμενων κορυφών. Η κατεύθυνση της κορυφής υποδηλώνει εάν το θερμικό γεγονός είναι ενδόθερμο ή εξώθερμο, και η περιοχή κάτω από την κορυφή είναι ένα μέτρο της μεταβολής της ενθαλπίας κατά τη διάρκεια της μετάβασης (Zhong & Sun, 2005). Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης μπορεί, επίσης, να μετρά απευθείας το ποσό της ενέργειας που παρέχεται στο δείγμα και την αναφορά. Τα θερμογραφήματα τα οποία λαμβάνονται δείχνουν τη ροή θερμότητας προς το δείγμα και τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μεταβολών ενθαλπίας και θερμοχωρητικότητας (Roos, 1995).

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα. Κάποιοι ερευνητές θεωρούν ως  $T_g$  τόσο την αρχική (onset) όσο και τη μέση (midpoint) θερμοκρασία (Roos, 1995; Sahin & Sumnu, 2006). Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ομοφωνία ως προς τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από την αρχική ή τη μέση τιμή. Πολλοί ερευνητές αναφέρουν ως  $T_g$  τη μέση θερμοκρασία, καθώς η πρώτη παράγωγος της καμπύλης παρουσιάζει μία κορυφή στο σημείο αυτό. Για τη μελέτη των μεταπτώσεων συνήθως χρησιμοποιείται η καμπύλη θέρμανσης αντί της καμπύλης ψύξης. Ο ρυθμός θέρμανσης επηρεάζει την τιμή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και κυμαίνεται συνήθως από 5°C/min έως 20°C/min. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός ψύξης, το μέγεθος του δείγματος και οι συνθήκες ανόπτησης θα πρέπει να αναφέρονται με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Rahman, 2008b). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι ένα κινητικό ελεγχόμενο φαινόμενο, της οποίας η θέση (και το σχήμα) αντανακλά τις ιδιότητες του υλικού σε απόκριση προς τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες της μέτρησης (Abiad et al., 2010).



**Σχήμα 2. 11. Τυπική καμπύλη που λαμβάνεται με χρήση της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (πηγή: (Roos, 1995), ίδια επεξεργασία).**

Η βαθμονόμηση του θερμιδόμετρου πραγματοποιείται με ένα υλικό υψηλής καθαρότητας με γνωστή ενθαλπία και σημείο τήξης. Ανάλογα με την επιθυμητή περιοχή θερμοκρασιών, χρησιμοποιούνται

κυρίως απεσταγμένο νερό ( $\Delta H_f=334 \text{ J/g}$ ,  $T_m=0^\circ\text{C}$ ), ίνδιο ( $\Delta H_f=28,45 \text{ J/g}$ ,  $T_m=156,60^\circ\text{C}$ ) και ψευδάργυρος ( $\Delta H_f=108,37 \text{ J/g}$ ,  $T_m=419,47^\circ\text{C}$ ).

### 2.6.3.2 Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση (Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA))

Η Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση χρησιμοποιείται, επίσης, για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης. Για τον προσδιορισμού του  $T_g$ , χρησιμοποιείται κυρίως η καμπύλη του μέτρου απωλειών και του παράγοντα απωλειών. Το μέτρο απωλειών και ο παράγοντας απωλειών ( $\tan\delta$ ) εμφανίζουν μία έντονη κορυφή στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης προσδιορίζεται συνήθως από το μέγιστο του παράγοντα απωλειών, ενώ το μέγιστο του μέτρου απωλειών μπορεί να αποδώσει καλύτερα τη φυσική ερμηνεία της μετάπτωσης (Champion et al., 2000). Επιπλέον, σε συστήματα μικρού μοριακού βάρους δεν αναμένεται κορυφή στο  $\tan\delta$ . Παράλληλα, μετά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, το μέτρο αποθήκευσης μειώνεται δραματικά.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης που προσδιορίζεται με χρήση των μεθόδων DSC και DMTA δεν είναι πλήρως ταυτόσημη. Στην περίπτωση της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης, η μετρούμενη θερμοκρασία στη μετάπτωση από την υαλώδη στην ελαστική κατάσταση συνήθως καθορίζεται από το μέσο στη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας και αναφέρεται ως θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ). Στη Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση, η μεταβολή από την υαλώδη στην ελαστική κατάσταση, η οποία καθορίζεται από τη μείωση του μέτρου αποθήκευσης ( $E'$  ή  $G'$ ), ή την κορυφή του μέτρου απωλειών ( $E''$  ή  $G''$ ) και του παράγοντα απωλειών ( $\tan\delta$ ), συνήθως ερμηνεύεται ως η θερμοκρασία που συνδέεται με την υαλώδη μετάπτωση ( $T_a$ ), όπου λαμβάνει χώρα μακράς εμβέλειας χαλάρωση των αλυσίδων του άμορφου υλικού (Sandoval et al., 2009). Στις δύο μεθόδους τα υλικά υπόκεινται σε δυνάμεις διαφορετικής φύσεως (μεταβολή θερμοκρασίας στο DSC, διάτμηση ή συμπίεση στο DMTA). Οι μεταβάσεις της θερμοκρασίας είναι περισσότερο ανιχνεύσιμες με την τεχνική DMTA από ό,τι με την τεχνική DSC, καθώς οι μηχανικές αλλαγές είναι πιο δραματικές από τις αλλαγές στη θερμοχωρητικότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή η τεχνική DMTA μπορεί να ανιχνεύσει ένα μικρό εύρος κίνησης, πριν επιτευχθεί η υαλώδης μετάπτωση, και έτσι να προσδιορίσει την έναρξη της κίνησης των αλυσίδων (Kalichevsky et al., 1992). Συνήθως, η θερμοκρασία που υπολογίζεται με DMTA είναι λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία που υπολογίζεται με DSC εξαιτίας της ικανότητας των υλικών να διατηρούν το σχήμα τους.

## 2.7 ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

### 2.7.1 Γενικά

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προτίμησή τους και την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Η οργανοληπτική ποιότητα των τροφίμων χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο ιδιοτήτων, οι οποίες γίνονται μεμονωμένα αντιληπτές από τις ανθρώπινες αισθήσεις και ενσωματώνονται από τον ανθρώπινο εγκέφαλο σε μία συνολική εντύπωση της ποιότητας. Οι οργανοληπτικές ιδιότητες περιλαμβάνουν ιδιότητες των τροφίμων που μπορούν να αξιολογηθούν επαρκώς από τους καταναλωτές. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν στο χρώμα, στο μέγεθος, στο σχήμα, στη γεύση, στην οσμή και στη δομή. Αυτές οι ιδιότητες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των προϊόντων, επηρεάζοντας σημαντικά την αποδοχή τους. Η αξιολόγηση των

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

οργανοληπτικών χαρακτηριστικών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, και μερικά από τα χαρακτηριστικά είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν (Brncic et al., 2006). Κάθε ιδιότητα ποιότητας δεν είναι ανεξάρτητη, αλλά επικαλύπτεται και επηρεάζεται από τις υπόλοιπες, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 2. 12). Όπως παρατηρείται, το ιξώδες και η συνοχή βρίσκονται σε μία ενδιάμεση ζώνη μεταξύ της εμφάνισης και της υφής, ενώ παράλληλα, η αίσθηση στο στόμα (mouthfeel) χαρακτηρίζει τη γεύση/οσμή και την υφή των προϊόντων.



**Σχήμα 2. 12. Σχηματική παρουσίαση της οργανοληπτικής ποιότητας των τροφίμων (πηγή: (Kramer, 1973), ίδια επεξεργασία).**

### 2.7.2 Ορισμοί

Οι κύριες οργανοληπτικές ιδιότητες αφορούν στην εμφάνιση (appearance), στη γεύση/οσμή (flavor) και στην υφή (texture) των προϊόντων και αξιολογούνται από τους καταναλωτές με τη βοήθεια των πέντε αισθήσεων, όραση, οσμή, γεύση, αφή και ακοή.

#### 2.7.2.1 Εμφάνιση

Οι ιδιότητες που αφορούν στην εμφάνιση περιλαμβάνουν το χρώμα, τη μορφή και το σχήμα των τροφίμων. Σε ένα ευρύ φάσμα προϊόντων, οι ιδιότητες εμφάνισης μπορεί να δημιουργήσουν θετική εντύπωση, οδηγώντας σε επιλογή του προϊόντος, ή αρνητική, οδηγώντας σε απόρριψη του προϊόντος (Jaros et al., 2000).

Α) Χρώμα: Ο καταναλωτής αξιολογεί συχνά την αρχική ποιότητα των τροφίμων από το χρώμα και την εμφάνισή τους. Το χρώμα των τροφίμων μπορεί να επηρεάσει την αντίληψη και ως προς άλλα χαρακτηριστικά, όπως είναι το άρωμα και η γεύση. Το χρώμα είναι το αποτέλεσμα που λαμβάνει ο εγκέφαλος από την αλληλεπίδραση του φωτός με ένα αντικείμενο. Το φως που προσπίπτει σε ένα αντικείμενο μπορεί να διαθλάται, να αντανακλάται, να μεταδίδεται ή να απορροφάται από αυτό. Η αντίληψη του χρώματος εξαρτάται από το μήκος κύματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Το χρώμα ενός αντικειμένου καθορίζεται από την απόχρωση, τη φωτεινότητα του αντικειμένου και τον κορεσμό ή καθαρότητα του χρώματος (Lawless & Heymann, 2010).

Β) Μέγεθος – Σχήμα: Το μέγεθος και το σχήμα καθορίζονται από το μήκος, το πάχος, το πλάτος, το μέγεθος των σωματιδίων, κτλ. Συνδυάζεται πολλές φορές με το βαθμό ωριμότητας ή την ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης, η ομοιομορφία, η συμμετρία και η καμπυλότητα (Meilgaard et al., 1999; Τζιά et al., 2007).

Γ) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αποδίδονται στον τρόπο με τον οποίο ένα σώμα κατανέμει το φως που ανακλάται ή διέρχεται από αυτό. Τα σημαντικότερα γεωμετρικά



χαρακτηριστικά είναι η στιλπνότητα, η κηλίδωση, η διαφάνεια, η θολότητα, κτλ. και εξαρτώνται από την επιφανειακή και εσωτερική δομή των τροφίμων (Τζιά et al., 2007).

Δ) Ελαττώματα: Τα ελαττώματα αποτελούν σημαντικό δείκτη ποιότητας. Γενικά υποβαθμίζουν την ποιότητα των τροφίμων. Τα ελαττώματα αποδίδονται είτε σε έλλειψη κάποιου στοιχείου που θεωρείται απαραίτητο ή στην παρουσία κάποιου συστατικού και οφείλονται στις πρώτες ύλες, στην ανεπάρκεια των διαδικασιών παραγωγής ή στις συνθήκες αποθήκευσης (Τζιά, 1999).

### 2.7.2.2 Γεύση/Οσμή

Το σύνθετο αποτέλεσμα των αισθήσεων της οσμής και της γεύσης καλείται flavor.

A) Γεύση: Γεύση είναι η αίσθηση που δημιουργείται στο στόμα όταν μια ουσία αντιδρά με τους υποδοχείς της γλώσσας. Η γλώσσα μπορεί να ανιχνεύσει τέσσερις βασικές γεύσεις: γλυκό, ξινό, αλμυρό και πικρό. Οι υποδοχείς της γλώσσας είναι οργανωμένες ομάδες κυττάρων, γνωστές σαν γευστικοί κάλυκες, που αποτελούνται από 20-30 αισθητικά κύτταρα ο καθένας και βρίσκονται κυρίως στην άκρη, στις πλευρές και στην πίσω άνω επιφάνεια της γλώσσας. Κάθε υποδοχέας έχει έναν πόρο που ανοίγει στην επιφάνεια της γλώσσας και επιτρέπει στα μόρια και τα ιόντα να φθάσουν στα εσωτερικά κύτταρα. Το γλυκό ανιχνεύεται κυρίως στην άκρη της γλώσσας, το αλμυρό και το ξινό στις πλευρές της γλώσσας και το πικρό στο πίσω μέρος της γλώσσας (Jaros et al., 2000; Τζιά et al., 2007).

B) Οσμή: Η οσμή ενός προϊόντος εντοπίζεται όταν τα πτητικά του συστατικά εισέλθουν στο ρινικό πέρασμα και γίνουν αντιληπτά από το οσφρητικό σύστημα. Το ποσό των πτητικών που φεύγουν από ένα προϊόν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τη φύση των συστατικών (Meilgaard et al., 1999). Το αισθητήριο της οσμής είναι ο οσφρητικός βλεννογόνο που φέρει επιθήλιο το οποίο αποτελείται από υψηλά ερειστικά κύτταρα μεταξύ των οποίων υπάρχουν μερικά εκατομμύρια οσφρητικών κυττάρων. Κάθε κύτταρο έχει δύο αποφυάδες, η μία από τις οποίες απολήγει στην επιφάνεια του βλεννογόνου 6-8 τριχίδια τα οποία είναι οι οσφρητικοί υποδοχείς. Εκεί υπάρχουν και αδένες που εκκρίνουν υγρό, το οποίο χρησιμεύει για τη διάλυση των οσμηρών ουσιών και τη διέγερση των τριχιδίων. Η διαδικασία για τη διαπίστωση της οσμής περιλαμβάνει τη διακόμιση της οσμής και την αλληλεπίδρασή της με τους υποδοχείς. Το οσφρητικό αποτέλεσμα οφείλεται σε κάποιες δραστικές ομάδες των ουσιών και στη στερεοχημική τους δομή (Τζιά, 1999).

### 2.7.2.3 Υφή

Η οργανοληπτική αξιολόγηση της υφής εξαρτάται κυρίως από την παραμόρφωση που υφίστανται τα τρόφιμα κατά την εφαρμογή πίεσης, αλλά και από τις επιφανειακές ιδιότητες, όπως είναι η τραχύτητα, το κολλώδες, κτλ. Η μάσηση χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές λειτουργίες, όπως είναι το «σπάσιμο» των τροφίμων ώστε να μπορούν να καταποθούν εύκολα, η ανάμιξη με ένζυμα που περιέχονται στο σάλιο και η αύξηση της ενεργής επιφάνειας ώστε το τρόφιμο να μπορεί να αναμιχθεί εύκολα με τις γαστρικές εκκρίσεις (Kramer, 1973).

Σύμφωνα με την Szczesniak (2002), με τον όρο υφή εννοείται η αισθητήρια περιγραφή των δομικών, μηχανικών και επιφανειακών ιδιοτήτων των τροφίμων, οι οποίες ανιχνεύονται μέσα από τις αισθήσεις της όρασης (οπτική υφή), της ακοής (ακουστική υφή), της αφής (ψηλαφιστή υφή) και της ψυχοκίνησης (Lawless & Heymann, 2010). Σε ορισμένα προϊόντα χρησιμοποιείται μόνο μία από αυτές τις αισθήσεις για την αντίληψη της υφής τους, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η υφή γίνεται αντιληπτή από ένα συνδυασμό αυτών των αισθήσεων. Με τη μάσηση είναι δυνατό να εκτιμηθούν διάφορα χαρακτηριστικά των τροφίμων. Στο στόμα δημιουργείται ένα σύνθετο αίσθημα που αποτελείται από

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

την αφή, τη γεύση και την οσμή και καλείται στοματικό αίσθημα (mouthfeel). Η υφή είναι σπουδαία παράμετρος αποδεκτότητας από τον καταναλωτή και για ορισμένα τρόφιμα παίζει πιο σημαντικό ρόλο από την οσμή και τη γεύση. Σε αντίθεση με το χρώμα και τη γεύση, η υφή δε χρησιμοποιείται ως ένας δείκτης της ασφάλειας των τροφίμων, αλλά ως ένας δείκτης της ποιότητάς τους. Τα χαρακτηριστικά της υφής που είναι επιθυμητά είναι: τρυφερότητα (tenderness), μαλακότητα (softness), συνεκτικότητα (firmness), τραγανότητα (crunchiness) και ευθραυστότητα (crispness) (Lawless & Heymann, 2010; Τζιά et al., 2007).

### 2.7.3 Μέθοδοι οργανοληπτικών δοκιμών

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των τροφίμων είναι ο επιστημονικός έλεγχος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό, τη μέτρηση, την ανάλυση και την παρουσίαση των αντιδράσεων των χαρακτηριστικών εκείνων των τροφίμων όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από τις αισθήσεις της όρασης, οσμής, γεύσης, αφής και ακοής (Τζιά, 1999). Η οργανοληπτική αξιολόγηση των τροφίμων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση της επίδρασης των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων στις προτιμήσεις των καταναλωτών, την αξιολόγηση ή τη βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων, την ανάπτυξη νέων προϊόντων, τον προσδιορισμό της αξίας τους, καθώς και τον προσδιορισμό των συνθηκών αποθήκευσης και διάρκειας ζωής τους.

Για την οργανοληπτική αξιολόγηση των τροφίμων χρησιμοποιούνται ομάδες δοκιμαστών, οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με τα τρόφιμα και τις ερωτήσεις τις οποίες καλούνται να απαντήσουν (Kramer, 1973). Οι δοκιμαστές θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από αντικειμενικότητα, ακρίβεια και αναπαραγωγισιμότητα. Ο αριθμός των δοκιμαστών που χρησιμοποιείται επηρεάζει τη στατιστική σημαντικότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Η χρησιμοποίηση εκπαιδευμένων δοκιμαστών βελτιώνει την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των οργανοληπτικών δοκιμών. Η ομάδα των δοκιμαστών χρησιμοποιείται για να διαπιστωθεί η προτίμηση των καταναλωτών, για τον προσδιορισμό της ποιοτικής διαφοράς μεταξύ των προϊόντων, για την επιλογή του καλύτερου δείγματος ή της καλύτερης τεχνολογίας, για τον προσδιορισμό της ποιότητας ή για την ποιοτική διαβάθμιση των προϊόντων. Οι δοκιμαστές συγκροτούνται, επιλέγονται και εκπαιδεύονται ώστε να αντιπροσωπεύουν τον καταναλωτή. Γίνεται στατιστική αξιολόγηση των ικανοτήτων τους και ερευνάται η ικανότητά τους να διαπιστώνουν διαφορές ή να βαθμολογούν ομοιόμορφα (Τζιά, 1999). Στην οργανοληπτική εκτίμηση, είναι απαραίτητη η χρήση πρότυπων μεθόδων δοκιμών και δόκιμων στατιστικών μεθόδων επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Οι δοκιμές της οργανοληπτικής αξιολόγησης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Kemp et al., 2009; Kramer, 1973; Watts et al., 1989; Τζιά et al., 2007):

- ✚ Δοκιμές αρεσκείας ή υποκειμενικές, οι οποίες αφορούν στην προτίμηση ή/ και στην αποδοχή των προϊόντων και πραγματοποιούνται από μη εκπαιδευμένους δοκιμαστές.

Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούν τόσο ποιοτικές (Qualitative methods) όσο και ποσοτικές (Quantitative methods) μεθοδολογίες. Για κάθε τύπο δοκιμής θα πρέπει να καθοριστεί ο αριθμός των δοκιμαστών. Για τις ποσοτικές δοκιμές απαιτείται μεγάλος αριθμός δοκιμαστών (τουλάχιστον 100). Οι ποσοτικές μέθοδοι διακρίνονται περαιτέρω σε:

- 1) Δοκιμές προτίμησης (preference tests), όπου οι δοκιμαστές αναφέρουν το πιο επιθυμητό προϊόν.

2) Δοκιμές αποδοχής (acceptance tests), όπου οι δοκιμαστές αναφέρουν εάν το προϊόν είναι πιθανό να λάβει ευρεία αποδοχή από τους καταναλωτές.

✚ Αναλυτικές ή αντικειμενικές δοκιμές, οι οποίες αφορούν στην εκτίμηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των προϊόντων. Οι αναλυτικές δοκιμές είτε εκτιμούν διαφορές ή ομοιότητες στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων ή βαθμολογούν ως προς ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά ή συνολικά την οργανοληπτική ποιότητα των προϊόντων. Διακρίνονται σε δοκιμές διακρίσεων (discrimination tests) και περιγραφικές δοκιμές (descriptive tests)

Οι **δοκιμές διακρίσεων** είναι από τις πιο κοινές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την οργανοληπτική αξιολόγηση. Στις δοκιμές αυτές οι δοκιμαστές αναφέρουν εάν υπάρχουν ανιχνεύσιμες διαφορές μεταξύ των δειγμάτων, χωρίς να προσδιορίζουν το είδος και το επίπεδο των διαφορών. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται από εκπαιδευμένους ή μη δοκιμαστές, αλλά ένα πάνελ δεν πρέπει να είναι συνδυασμός και των δύο. Διακρίνονται περαιτέρω σε:

- 1) Δοκιμή DUO/TRIO (ISO 10399: 2004), όπου δίδονται στο δοκιμαστή τρία δείγματα, το ένα είναι γνωστό (αναφορά R) και τα δύο άγνωστα από τα οποία το ένα είναι ίδιο με το γνωστό. Ο δοκιμαστής καλείται να αναγνωρίσει το διαφορετικό δείγμα.
- 2) Τριγωνική δοκιμή (triangle method) (ISO 4120: 2004), όπου δίδονται στο δοκιμαστή τρία άγνωστα δείγματα από τα οποία δύο είναι όμοια. Ο δοκιμαστής καλείται να αναγνωρίσει το διαφορετικό δείγμα.
- 3) Δοκιμή διαφοράς από το δείγμα ελέγχου (difference from control test), όπου εξετάζεται εάν υπάρχει διαφορά μεταξύ ενός ή περισσότερων δειγμάτων και ενός δείγματος ελέγχου και καθορίζεται το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ του δείγματος και του δείγματος ελέγχου.
- 4) Δοκιμή ίδιου-διαφορετικού (same-different test), όπου εξετάζεται εάν υπάρχει διαφορά μεταξύ δύο δειγμάτων.
- 5) Δοκιμή «Α» όχι «Α», για να προσδιοριστεί εάν υπάρχει διαφορά μεταξύ δύο δειγμάτων.
- 6) Δοκιμή σύγκρισης-ζεύγους (ISO 5495: 2005), όπου δίδεται στο δοκιμαστή ένα ζεύγος κωδικοποιημένων δειγμάτων για σύγκριση με βάση μερικά χαρακτηριστικά.
- 7) Δοκιμή πολλαπλής σύγκρισης (multiple comparison), όπου βρίσκονται οι διαφορές μεταξύ δειγμάτων και το μέγεθος των διαφορών.
- 8) Δοκιμή κατάταξης (ranking test), όπου δίδονται στο δοκιμαστή τρία ή περισσότερα δείγματα και ζητείται η κατάταξη ως προς μερικά χαρακτηριστικά.

Μερικές από τις μεθοδολογίες που περιεγράφηκαν μπορεί να χρησιμοποιηθούν επίσης, για τον προσδιορισμό του βαθμού ομοιότητας μεταξύ των προϊόντων. Πολλοί από τους στόχους για την εκτέλεση μιας δοκιμής διάκρισης αφορούν στις ομοιότητες και όχι στις διαφορές.

Στις **περιγραφικές δοκιμές** οι δοκιμαστές αναφέρουν τα είδη και το επίπεδο των διαφορών μεταξύ των δειγμάτων. Σημαντικές διαφορές μεταξύ των προϊόντων είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθούν. Κατά τη διεξαγωγή μίας περιγραφικής δοκιμής, πρέπει να ληφθούν υπόψη η εφαρμογή (ανάπτυξη και βελτιστοποίηση προϊόντων, εκτίμηση της αγοράς, ανταγωνιστική αξιολόγηση, κτλ.), το είδος των προϊόντων, η στατιστική ανάλυση και η διάρκεια, καθώς επίσης, η επιλογή και η εκπαίδευση των δοκιμαστών (6-18 δοκιμαστές). Διακρίνονται περαιτέρω σε:

- 1) Δοκιμή κατανομής συναίνεσης (consensus profiling), όπου οι αξιολογητές λειτουργούν ως ομάδα για να συμφωνήσουν σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις βαθμολογίες.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

- 2) Δοκιμή κατανομής αρώματος (flavor profiling), όπου τα χαρακτηριστικά αρώματος, γεύσης και αίσθησης στο στόμα αξιολογούνται όσον αφορά στην ποιότητα, στην ένταση, στη σειρά εμφάνισης, στη μετάγευση και στη γενική εντύπωση. Μια ομάδα από 4-6 αξιολογητές αξιολογούν μεμονωμένα τα δείγματα και στη συνέχεια συζητούν τις αξιολογήσεις τους για να καθορίσουν μια συναινετική βαθμολόγηση.
- 3) Δοκιμή κατανομής υφής (texture profiling), όπου τα χαρακτηριστικά υφής και αίσθησης στο στόμα αξιολογούνται όσον αφορά στην ποιότητα, στην ένταση και στη σειρά εμφάνισης από το πρώτο μάσημα μέχρι να ολοκληρωθεί η μάσηση.
- 4) Ποσοτική περιγραφική ανάλυση (quantitative descriptive analysis), όπου οι δοκιμαστές (8-15) συμφωνούν σε μια λίστα ποιοτικών χαρακτηριστικών και στη συνέχεια λειτουργούν ατομικά για να βαθμολογήσουν τα χαρακτηριστικά. Η μέθοδος αυτή μπορεί να παράγει μια πλήρη ποιοτική και ποσοτική οργανοληπτική περιγραφή.

# 3.

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

Εισαγωγή

Ξήρανση τροφίμων

Εκβολή τροφίμων



### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αλλαγές στις διατροφικές συνήθειες των ανθρώπων και ο σύγχρονος τρόπος ζωής που χαρακτηρίζεται από περιορισμένο ελεύθερο χρόνο και έντονους ρυθμούς, έχουν στρέψει τους καταναλωτές προς την κατανάλωση τροφίμων που απαιτούν ελάχιστο χρόνο προετοιμασίας (π.χ. σνακς (snacks)), αλλά ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από υψηλή θρεπτική αξία. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι η κατανάλωση τροφίμων υψηλής διατροφικής αξίας, όπως είναι τα φρούτα και τα λαχανικά, αυξάνεται εάν αυτά μεταποιηθούν και μετατραπούν σε σνακς. Ως αποτέλεσμα αυτού, η βιομηχανία τροφίμων στρέφεται στην παραγωγή επεξεργασμένων ή μερικώς επεξεργασμένων τροφίμων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή ποιότητα και προορίζονται για κατανάλωση χωρίς καθόλου ή έπειτα από μικρή επεξεργασία (D'Acunzo et al., 2012). Η αποδοχή των τροφίμων αυτών από τους καταναλωτές βασίζεται σε ποικίλες παραμέτρους, όπως είναι η γεύση, το χρώμα, η υφή, η δομή και η λειτουργικότητά τους (Jangam & Mujumdar, 2010).

Οι επιμέρους μέθοδοι και συνθήκες επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επεξεργασμένων προϊόντων έχουν σημαντική επίδραση στα δομικά χαρακτηριστικά τους και κατ'επέκταση επηρεάζουν την ποιότητα και τις ιδιότητές τους. Το ολικό πορώδες και η κατανομή των πόρων εξαρτώνται τόσο από το υλικό όσο και από τη μέθοδο και τις συνθήκες επεξεργασίας. Η δημιουργία πορώδους δομής επηρεάζει την υφή των προϊόντων και την αίσθηση στο στόμα κατά τη διάρκεια της μάσησης, η οποία είναι το κλειδί για την τελική ποιότητα του προϊόντος και την αποδοχή του από τους καταναλωτές. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί, η δομή των τροφίμων επηρεάζει πλήθος άλλων φυσικοχημικών ιδιοτήτων, όπως είναι οι ιδιότητες μεταφοράς μάζας και ενέργειας (διάχυση μάζας, θερμική αγωγιμότητα, κτλ.), το ιξώδες, κτλ. (Koc et al., 2008; Oikonomopoulou & Krokida, 2012; Rahman, 2001). Επομένως, η γνώση της διαμόρφωσης της δομής των τροφίμων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και της αποθήκευσής τους είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό διεργασιών καθώς και την ανάπτυξη νέων, βιομηχανικών προϊόντων με επιθυμητές ιδιότητες.

Οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πορωδών δομών είναι η ξήρανση (drying), η εκβολή (extrusion), η κρυστάλλωση (crystallization), το ψήσιμο (baking), η δημιουργία γαλακτώματος (emulsification), κτλ. Ανάμεσά τους, η **ξήρανση** και η **εκβολή** είναι ιδιαίτερα σημαντικές και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή επεξεργασμένων «έτοιμων» προϊόντων καθορισμένης δομής.

## 3.2 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

### 3.2.1 Γενικά

Ξήρανση είναι η φυσική διεργασία απομάκρυνσης του νερού από τα διάφορα υλικά. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη βιομηχανία τροφίμων και αποτελεί μία σημαντική διεργασία για την ανάπτυξη και παραγωγή επεξεργασμένων προϊόντων. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τον 18<sup>ο</sup> αιώνα για την αφυδάτωση λαχανικών (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ενώ σήμερα εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων, όπως είναι τα φρούτα, τα λαχανικά, το κρέας, τα ψάρια, τα δημητριακά, τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων, κτλ. και οδηγεί στην παραγωγή σταθερών προϊόντων (σκόνες) ή προϊόντων που προορίζονται για σνακς, δημητριακά, σούπες, κτλ. (Bonazzi & Dumoulin, 2011; Huang & Zhang, 2012).

Η διεργασία της ξήρανσης βοηθά στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των τροφίμων, καθώς η μείωση της ενεργότητας ύδατος κάτω από την τιμή 0,5 αναστέλλει την ανάπτυξη των παθογόνων και αλλοιογόνων μικροοργανισμών, μειώνει την ενζυμική δραστηριότητα και ελαχιστοποιεί την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του τροφίμου. Πέραν της διατήρησης των τροφίμων, η ξήρανση χρησιμοποιείται επίσης για την αξιοποίηση των αγροτικών παραπροϊόντων (Magoulis & Saravacos, 2003) και τη μείωση του βάρους και του όγκου των τροφίμων, διευκολύνοντας τη συσκευασία και τη μεταφορά τους και μειώνοντας το αντίστοιχο κόστος. Τα αφυδατωμένα τρόφιμα παράγονται εύκολα, διατηρώντας καλύτερα τα χαρακτηριστικά των νωπών τροφίμων σε σχέση με άλλες διεργασίες συντήρησης (Marques et al., 2006). Επίσης, είναι σταθερά λόγω της χαμηλής τους περιεκτικότητας σε νερό και μπορούν να ενυδατωθούν εύκολα όταν χρησιμοποιούνται ως συστατικά τροφίμων. Επομένως, η αριστοποίηση των διεργασιών ξήρανσης είναι ένα αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας, με ζωτική σημασία για τους ερευνητές που δραστηριοποιούνται στο χώρο αυτό, αλλά και τις βιομηχανίες τροφίμων.

### Ελεύθερο και δεσμευμένο νερό

Το νερό στα τρόφιμα βρίσκεται υπό τη μορφή δεσμευμένου (bound) ή ελεύθερου (free) νερού. Το ελεύθερο νερό μπορεί να δρα ως διαλύτης και παγώνει σε θερμοκρασία μικρότερη των 0°C, ανάλογα με τη συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών. Το ελεύθερο νερό εμφανίζει μακροσκοπική ροή, εκτός από αυτό που βρίσκεται παγιδευμένο σε τριχοειδείς πόρους. Το δεσμευμένο νερό βρίσκεται κοντά στα μη υδατικά συστατικά του τροφίμου και χαρακτηρίζεται από διάφορους βαθμούς δέσμευσης (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006):

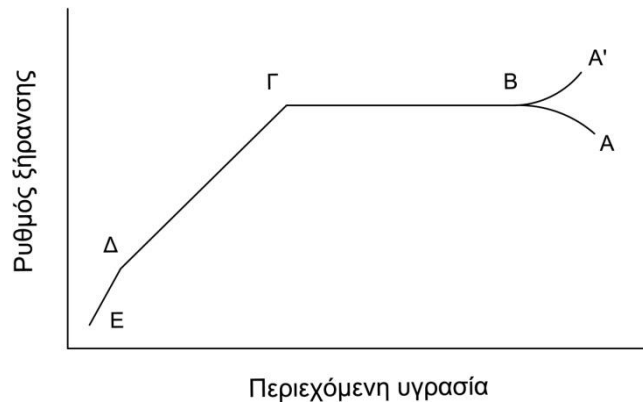
- Ισχυρά δεσμευμένο νερό, το οποίο αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των μη υδατικών συστατικών.
- Γειτνιάζον νερό, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τα μη υδατικά συστατικά και συνδέεται κυρίως με τις ιοντικές τους ομάδες.
- Πολυστρωματικό νερό, το οποίο βρίσκεται μετά το γειτνιάζον νερό, συνδέεται κυρίως με δεσμούς υδρογόνου και παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του ελεύθερου νερού. Το πολυστρωματικό νερό αποτελεί περίπου το 1-5% του ολικού νερού του τροφίμου.

Το ισχυρά δεσμευμένο και το γειτνιάζον νερό δεν είναι διαθέσιμα για μικροβιακές δράσεις. Από το πολυστρωματικό νερό μικρό μόνο μέρος είναι διαθέσιμο, ενώ το ελεύθερο νερό είναι πλήρως διαθέσιμο. Η αποτελεσματικότητα της εκάστοτε μεθόδου ξήρανσης εξαρτάται από την έκταση στην οποία επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του νερού από το τρόφιμο. Η απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού πραγματοποιείται με ποικίλους μηχανισμούς, όπως διάχυση λόγω δυναμικού συγκέντρωσης, διάχυση υγρής φάσης στους πόρους των στερεών, διάχυση από την επιφάνεια, μεταφορά λόγω τριχοειδών δυνάμεων, ροή Knudsen, μεταφορά λόγω δυναμικού πίεσης και ροή εξαιτίας διαδοχικών εξατμίσεων-συμπυκνώσεων. Η θερμότητα που απαιτείται για την απομάκρυνση της υγρασίας μεταφέρεται με αγωγή, συναγωγή ή ακτινοβολία (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται είναι τόσο ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση του ελεύθερου νερού μέσω εξάχνωσης ή εξάτμισης, αλλά και η απομάκρυνση του δεσμευμένου νερού στη μήτρα του τροφίμου. Η απομάκρυνση του νερού από τα τρόφιμα είναι τόσο δυσκολότερη όσο ισχυρότερα είναι αυτό δεσμευμένο (Κροκίδα, 1999; Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006).



Καμπύλες ρυθμού ξήρανσης

Οι καμπύλες ρυθμού ξήρανσης προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα που λαμβάνονται συνήθως κατά την ξήρανση σε ρεύμα αέρα. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας ξήρανσης διακρίνονται τα εξής στάδια (Σχήμα 3. 1) (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Van Brakel, 1979; Κροκίδα, 1999; Λαζαρίδης, 2000):



**Σχήμα 3. 1. Διάγραμμα ρυθμού ξήρανσης (πηγή: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ίδια επεξεργασία).**

- ✚ Στάδιο προσαρμογής (AB, A'B), κατά το οποίο η επιφάνεια των προϊόντων εξισορροπεί προς τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα.
- ✚ Στάδιο σταθερού ρυθμού (BΓ), κατά το οποίο απομακρύνεται το μη δεσμευμένο νερό. Η επιφάνεια των προϊόντων παραμένει κορεσμένη με νερό, καθώς η διάχυση του νερού από το εσωτερικό προς την επιφάνεια πραγματοποιείται με ρυθμό ίσο ή μεγαλύτερο από το ρυθμό εξάτμισης από την επιφάνεια. Η ροή υγρασίας επηρεάζεται μόνο από τις εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας του αέρα, προκαλώντας ένα σταθερό ρυθμό απομάκρυνσης της υγρασίας (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Van Brakel, 1979; Κροκίδα, 1999).
- ✚ Στάδιο ελαττούμενου ρυθμού (ΓΕ), κατά το οποίο η ταχύτητα μεταφοράς της υγρασίας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια των προϊόντων είναι μικρότερη από την ταχύτητα εξάτμισης από την επιφάνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στην επιφάνεια ξηρές περιοχές. Στο στάδιο αυτό, δεν υπάρχει αρκετό νερό στην επιφάνεια και η ενεργότητα ύδατος γίνεται μικρότερη από τη μονάδα. Η ροή υγρασίας επηρεάζεται μόνο από τον εσωτερικό μηχανισμό μετακίνησης, με αποτέλεσμα τον συνεχώς ελαττούμενο ρυθμό μεταφοράς, μέχρις ότου η πίεση των υδρατμών του αέρα να εξισωθεί με την πίεση των υδρατμών στην επιφάνεια των προϊόντων. Το στάδιο αυτό χωρίζεται περαιτέρω σε δύο φάσεις: στην πρώτη (ΓΔ) η ξήρανση πραγματοποιείται μέχρι να εξαφανιστούν όλες οι υγρές περιοχές από την επιφάνεια, ενώ η δεύτερη (ΔΕ) ξεκινά όταν η επιφάνεια είναι τελείως ξηρή. Κατά την πρώτη φάση του ελαττούμενου ρυθμού, η διάχυση πραγματοποιείται με υψηλότερο ρυθμό, ενώ στη δεύτερη φάση οι συντελεστές διάχυσης είναι αρκετά χαμηλότεροι. Το στάδιο του ελαττούμενου ρυθμού απαιτεί υψηλούς χρόνους, παρόλο που το ποσοστό υγρασίας που απομακρύνεται είναι μικρό. Η ροή της υγρασίας εξαρτάται τόσο από τη δομή των προϊόντων όσο και από τις αλληλεπιδράσεις της υγρασίας με τη μήτρα του τροφίμου (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Κατά τη φάση του ελαττούμενου ρυθμού, η υγρασία μεταφέρεται είτε με διάχυση ή με τριχοειδή κίνηση. Κατά τη διάχυση, το νερό κινείται προς την εξωτερική επιφάνεια εξαιτίας της διαφοράς υγρασίας μεταξύ του εσωτερικού και της

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

επιφάνειας του τροφίμου. Στα πορώδη όμως υλικά, το νερό κινείται συνήθως με τριχοειδή κίνηση μέσω των τριχοειδών αγγείων και των πόρων του υλικού και όχι με διάχυση (Λαζαρίδης, 2000).

Η τιμή της υγρασίας κατά την οποία πραγματοποιείται η μετάβαση από το σταθερό στον ελαττούμενο ρυθμό ξήρανσης ονομάζεται κρίσιμη υγρασία. Κατά την ξήρανση των τροφίμων, το αρχικό στάδιο του σταθερού ρυθμού παρατηρείται σπάνια, ενώ το στάδιο του ελαττούμενου ρυθμού είναι αυτό που ελέγχει τη συνολική διεργασία (Bruin & Luyben, 1980; Fortes & Okos, 1980). Η ξήρανση σταματά όταν η τάση ατμών του τροφίμου εξισώνεται με τη μερική πίεση του αέρα. Η ελάχιστη υγρασία στην οποία μπορεί να ξηραθεί ένα υλικό ονομάζεται υγρασία ισορροπίας και εξαρτάται από το υλικό και τις συνθήκες επεξεργασίας (Risvi, 1995).

### Δημιουργία πορώδους δομής - Συρρίκνωση

Η ξήρανση χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Ανάλογα με τους μηχανισμούς μεταφοράς και την εξωτερική πίεση, προκαλούνται σημαντικές αλλαγές στη φυσική και χημική σύσταση των τροφίμων, στην υφή, στο χρώμα, στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, καθώς και στη δομή τους. Ως αποτέλεσμα αυτού, η ίδια πρώτη ύλη μπορεί να έχει τελείως διαφορετική δομή, ανάλογα με τη μέθοδο ξήρανσης και τις συνθήκες που εφαρμόζονται (Κροκίδα, 1999). Η απομάκρυνση της υγρασίας προκαλεί ακαμψία στην εξωτερική επιφάνεια, ενώ δημιουργεί δυναμικό υγρασίας το οποίο οδηγεί στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων που προκαλούν αλλαγή της μικροδομής (π.χ. σχηματισμός πόρων) και συρρίκνωση. Η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και η έκταση της συρρίκνωσης εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη μέθοδο και τις συνθήκες (Lewicki & Pawlak, 2003). Αποτέλεσμα της συρρίκνωσης είναι η καταστροφή ή η αλλαγή (κατάψυξη, κρυστάλλωση, άλεση και γαλακτωματοποίηση) της μικροδομής.

Η συρρίκνωση των υλικών επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα των τελικών προϊόντων, δεδομένου ότι τα συρρικνωμένα προϊόντα χαρακτηρίζονται από αυξημένη σκληρότητα, μειωμένη ικανότητα ενυδάτωσης και κακή εμφάνιση και ποιότητα που τα διαφοροποιεί από το αρχικό φρέσκο υλικό (Roos, 1995). Η συρρίκνωση λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με τη διάχυση της υγρασίας, επηρεάζοντας το ρυθμό απομάκρυνσης της υγρασίας. Τόσο η ογκομετρική (Lozano et al., 1983) όσο και η διαστασιακή συρρίκνωση (Rahman & Potluri, 1990) εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε υγρασία. Στα αρχικά στάδια της ξήρανσης, η δομή των κυττάρων είναι άθικτη και το σχήμα των δειγμάτων διατηρείται. Στα επόμενα στάδια, η συρρίκνωση συνοδεύεται από παραμόρφωση των σωματιδίων (Khraishheh et al., 2004). Η πρόοδος των φαινομένων συρρίκνωσης μπορεί να αποδοθεί σε εσωτερικούς παράγοντες (χημική σύσταση, αρχική δομή, πορώδες, ποσοστό πτητικών συστατικών) αλλά και εξωτερικούς παράγοντες (θερμοκρασία, πίεση, σχετική υγρασία, χαρακτηριστικά του αέρα, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, κτλ.) που χρησιμοποιούνται κατά την ξήρανση. Επιπλέον, ο σχηματισμός του πορώδους και η συρρίκνωση ελέγχονται από πλήθος μηχανισμών, όπως είναι η επιφανειακή τάση και οι τριχοειδείς δυνάμεις, οι επιδράσεις πλαστικοποίησης των διαλυτών, οι βαρυτικές επιδράσεις και η μεταφορά υγρασίας (Rahman & Perera, 1999).

Επίσης, όταν η συρρίκνωση δεν είναι ομοιόμορφη μπορεί να επιφέρει τη δημιουργία ρωγμών στην επιφάνεια του τροφίμου κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Κατά την εξάτμιση του νερού, δημιουργείται ένα δυναμικό υγρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού μέρους του υλικού, οδηγώντας στο σχηματισμό ασύμμετρων τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία ρωγμών στην επιφάνεια του προϊόντος. Εάν οι τάσεις τοπικά υπερβαίνουν την αντοχή του υλικού, τότε το προϊόν θα καταρρεύσει και θα εμφανιστούν ρωγμές (Kamst et al., 2002).

Η τελική χρήση των προϊόντων θα καθορίσει την επιθυμητή πορώδη δομή. Παραδείγματος χάριν, τα δημητριακά πρέπει να έχουν την κατάλληλη δομή ώστε να διατηρούν την τραγανότητά τους για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την προσθήκη γάλακτος, ενώ μίγματα σε σκόνη για σουπές πρέπει να διαλύονται στιγμιαία σε ζεστό νερό. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης των τροφίμων είναι δυνατό να λάβει χώρα προσρόφηση υγρασίας από την επιφάνεια, η οποία εξαρτάται από τη δομή των προϊόντων. Το προσροφημένο νερό διαχέεται στο εσωτερικό του προϊόντος και αυξάνει την κυκλοφορία του νερού και των διαλυμένων ουσιών, επιταχύνοντας τις αντιδράσεις υποβάθμισης και την αλλαγή των ιδιοτήτων του. Ως αποτέλεσμα αυτού, ο έλεγχος της δομής και η διατήρηση της δομικής λειτουργικότητας των τροφίμων είναι μεγάλης σημασίας για τις βιομηχανίες τροφίμων (Rahman, 2005).

Η μικροδομή και η μορφολογία των τροφίμων και, ως αποτέλεσμα, η ποιότητα των τελικών προϊόντων, σχετίζονται με τη μέθοδο ξήρανσης και τις συνθήκες που εφαρμόζονται (Koc et al., 2008; Rewthong et al., 2011). Οι διάφορες μέθοδοι ξήρανσης επηρεάζουν, εκτός από τα δομικά χαρακτηριστικά, και άλλες φυσικές, βιολογικές ή χημικές ιδιότητες, όπως είναι η δράση των ενζύμων, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών, η τραγανότητα, η σκληρότητα, το ιξώδες, η γεύση, κτλ. οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα, τις ιδιότητες και τη σταθερότητα των τροφίμων (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Οι διάφορες παράμετροι της κάθε μεθόδου ξήρανσης επηρεάζουν το μηχανισμό μεταφοράς υγρασίας και το ρυθμό ξήρανσης και, κατά συνέπεια, τις τελικές ιδιότητες των προϊόντων.

Στη βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιούνται πολλές διεργασίες ξήρανσης, όπως ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση σε ρεύμα αέρα, ξήρανση υπό κενό, ωσμωτική αφυδάτωση, ξήρανση με υπερήχους, ξήρανση με τη βοήθεια μικροκυμάτων, ξήρανση σε υπερκρίσιμες συνθήκες, τηγάνισμα, ξήρανση με ψεκασμό, ξήρανση χαμηλής πίεσης υπέρθερμου ατμού, κτλ. ή και συνδυασμός τους (Alemrajabi et al., 2012; Chakraborty et al., 2011; Dev & Raghavan, 2012; Ferrari et al., 2012; Huang & Zhang, 2012; Huang et al., 2009; Jangam, 2011; Mounir et al., 2012; 1967; Zhang et al., 2010), με στόχο την παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων υψηλής διατροφικής αξίας και λειτουργικότητας (Saravacos, 1967). Η ξήρανση των τροφίμων θα πρέπει να πληροί ορισμένες βασικές απαιτήσεις, όπως είναι τα υψηλά διατροφικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, η ασφάλεια των τροφίμων, η μείωση της ενέργειας και του νερού κτλ. Η επιλογή της μεθόδου ή ο συνδυασμός αυτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι:

- τα χαρακτηριστικά των φρέσκων προϊόντων
- το επιθυμητό τελικό επίπεδο υγρασίας
- η ποιότητα και οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων
- η τελική χρήση των προϊόντων
- το κόστος και
- η ενεργειακή κατανάλωση

Μεταξύ των μεθόδων που αναφέρθηκαν, η ξήρανση υπό κατάψυξη, η ξήρανση σε ρεύμα αέρα, η ξήρανση υπό κενό και η ωσμωτική αφυδάτωση έχουν πολύ σημαντική βιομηχανική χρήση και οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

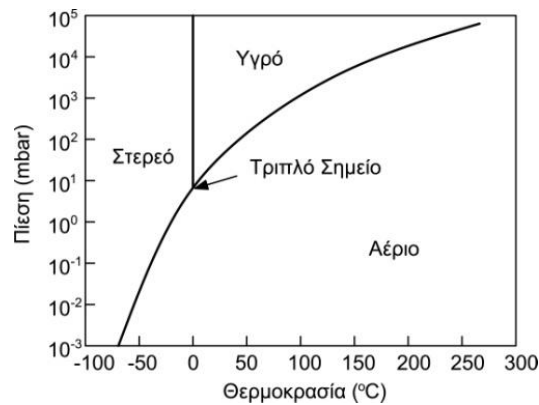
### **3.2.2 Ξήρανση υπό κατάψυξη (Λυοφιλίωση)**

#### **3.2.2.1 Γενικά**

Η ξήρανση υπό κατάψυξη χρησιμοποιήθηκε αρχικά στα 1940 για την παραγωγή ξηρού πλάσματος και αργότερα για την ξήρανση αντιβιοτικών και βιολογικών υλικών (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Σήμερα, εφαρμόζεται σε ποικίλα προϊόντα υψηλής αξίας, όπως τρόφιμα που περιέχουν υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών και πτητικών ουσιών και είναι επιρρεπή σε αντιδράσεις αμαύρωσης (εκχυλίσματα καφέ ή τσαγιού, φρούτα, λαχανικά, κρέας ή ψάρι) ή φαρμακευτικά προϊόντα (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Marques & Freire, 2005), καθώς αποτελεί μία ήπια διεργασία για την παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας.

Η ξήρανση υπό κατάψυξη πραγματοποιείται συνηθέστερα υπό την επίδραση υψηλού κενού (Wang et al., 2011). Η εφαρμογή μικροκυμάτων ή η λειτουργία σε ατμοσφαιρική πίεση μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Πραγματοποιείται σε δύο στάδια: αρχικά το υλικό καταψύχεται και στη συνέχεια ο πάχος απομακρύνεται με εξάχνωση, απευθείας από τη στερεή στην αέρια φάση (Krokida et al., 1998a), ενώ ταυτόχρονα το υλικό ψύχεται, καθώς για την εξάχνωση του νερού απαιτείται η αντίστοιχη λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης. Κατά την κατάψυξη, αρχικά το νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του τροφίμου, ελεύθερο ή σε μορφή κολλοειδούς διαλύματος, μετατρέπεται σε πάγο. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία ψύξης μειώνεται έως ότου κρυσταλλωθούν και τα ευτηκτικά διαλύματα. Τα άμορφα (υαλώδη) υλικά δεν έχουν ευτηκτικό σημείο, αλλά χαρακτηρίζονται από ένα κρίσιμο σημείο, κάτω από το οποίο πρέπει να διατηρούνται ώστε να αποφευχθεί η τήξη ή η κατάρρευση κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Η κατάψυξη διαχωρίζει τα υδατικά διαλύματα των τροφίμων σε δύο φάσεις: τον πάγο και τη συμπυκνωμένη φάση των διαλυτών στερεών. Κατά την ξήρανση, η πίεση που εφαρμόζεται είναι τόση ώστε να διατηρείται η πίεση του πάγου κάτω από το τριπλό του σημείο (χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία η στερεά και υγρή φάση του υλικού μπορούν να συνυπάρξουν) (Σχήμα 3. 2). Η κατάσταση αυτή είναι απαραίτητη για να είναι δυνατή η εξάχνωση και όχι η εξάτμιση του νερού (Roos, 1995). Η εξάχνωση βασίζεται στη δημιουργία διαφοράς τάσης ατμών μεταξύ του πάγου στο εσωτερικό του υλικού και του ξηρού περιβάλλοντος. Αρχικά, ο ρυθμός ξήρανσης είναι υψηλός, καθώς υπάρχει μικρή αντίσταση στη ροή θερμότητας και μάζας. Στη συνέχεια, ο ρυθμός μειώνεται, καθώς το ξηρό στρώμα που δημιουργείται γύρω από το υλικό εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας στους κρυστάλλους πάγου. Επίσης, η μεταφορά μάζας μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του ξηρού στρώματος, εξαιτίας της μείωσης της διάχυσης υγρασίας από τη διεπιφάνεια εξάχνωσης στην επιφάνεια του υλικού (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).

Σε μικρές ποσότητες υλικών, η απαιτούμενη ενέργεια εξάχνωσης παραλαμβάνεται είτε από το ίδιο το υλικό, είτε από το περιβάλλον μέσα στη συσκευή. Σε μεγαλύτερες ποσότητες υλικού, η απαιτούμενη ενέργεια εξασφαλίζεται με θέρμανση του χώρου με ηλεκτρικές αντιστάσεις. Για την αύξηση του ρυθμού εξάχνωσης χρησιμοποιείται κάποιο αδρανές αέριο μέσα στο θάλαμο ξήρανσης, όπως άζωτο, το οποίο αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας (Ζουμπούλης et al., 2009).



Σχήμα 3. 2. Διάγραμμα φάσεων του νερού (πηγή: (Roos, 1995), ίδια επεξεργασία).

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης η απομάκρυνση της υγρασίας πραγματοποιείται σε δύο στάδια (Σχήμα 3. 3).

#### Αρχική ξήρανση

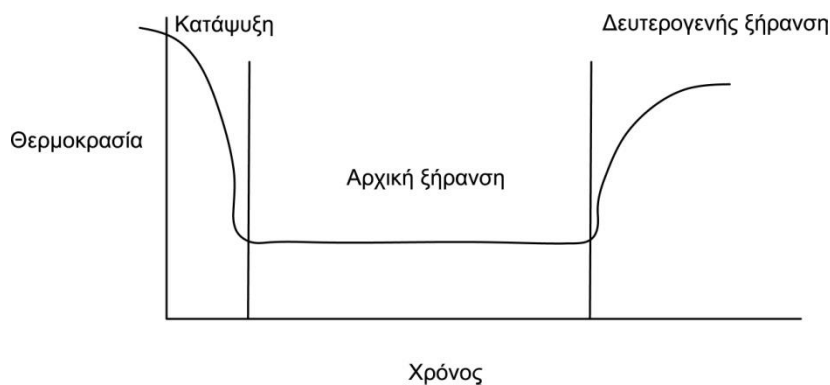
Κατά το στάδιο της αρχικής ξήρανσης, η πίεση μειώνεται (σε μερικά mbar) και ο πάγος εξαχνώνεται από την επιφάνεια του υλικού με εφαρμογή θερμότητας. Το στάδιο αυτό είναι αργό και χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση περίπου του 85-95% του περιεχόμενου νερού. Ο πάγος αρχίζει να εξαχνώνεται όταν παρέχεται η απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα. Ο ατμός που προκύπτει από την εξάχνωση απομακρύνεται από την επιφάνεια του υλικού χωρίς ο πάγος στο εσωτερικό να λιώνει, εξαιτίας της χαμηλής πίεσης. Η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια εξάχνωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του πάγου ώστε να παρέχεται η θερμότητα εξάχνωσης αλλά όχι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλείται τήξη σε κάποιο σημείο του υλικού. Για να πραγματοποιηθεί η εξάχνωση, θα πρέπει η πίεση των υδρατμών στη διεπιφάνεια κατάψυξης που σχηματίζουν οι κρύσταλλοι πάγου στο καταψυγμένο προϊόν να είναι μεγαλύτερη από την πίεση των υδρατμών στον υπόλοιπο χώρο ώστε να προάγεται η ροή ατμών από το εσωτερικό στην επιφάνεια του υλικού. Τα κυριότερα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη είναι η ακτινοβολία και αγωγή θερμότητας από τη θερμαινόμενη πλάκα και η διάχυση των υδρατμών από τη διεπιφάνεια εξάχνωσης, ενώ η συναγωγή είναι αμελητέα εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας του αέρα. Η ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η εξάχνωση θεωρείται ότι είναι ίση με τη ροή θερμότητας, η οποία παρέχεται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του παγωμένου προϊόντος και της πηγής θερμότητας μέσα στο θάλαμο. Η διεπιφάνεια εξάχνωσης δημιουργείται ακριβώς πάνω από το μέτωπο πάγου και η απομάκρυνση του νερού πραγματοποιείται από τη διεπιφάνεια ή πολύ κοντά σε αυτή (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Κροκίδα, 1999). Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη, σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια μερικών υλικών, το οποίο επιβραδύνει το ρυθμό εξάχνωσης. Η δημιουργία αυτού του στρώματος μπορεί να αποφευχθεί, χρησιμοποιώντας περιστρεφόμενους θαλάμους. Στο πέρας του αρχικού σταδίου της ξήρανσης, το μέγεθος των πόρων και το πορώδες καθορίζονται από το μέγεθος των κρυστάλλων του πάγου, εάν δεν πραγματοποιηθεί κατάρρευση των τοιχωμάτων της μήτρας που περιβάλλει τους κρυστάλλους πάγου (Michailidis et al., 2008b).

#### Δευτερογενής ξήρανση

Το δεύτερο στάδιο ξεκινά όταν έχει απομακρυνθεί όλος ο πάγος από το υλικό και η υγρασία οφείλεται στο δεσμευμένο νερό. Στοχεύει στην εκρόφηση του εναπομείναντος νερού στο εσωτερικό

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

του προϊόντος, η οποία επιτυγχάνεται με ελεγχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας και με μείωση της μερικής πίεσης των υδρατμών. Η θερμοκρασία αυξάνεται κατά τρόπο ώστε να διατηρείται κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και μπορεί να ανέρχεται και πάνω από τους 0°C, με στόχο την κατάρρευση των φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων που δημιουργούνται μεταξύ των μορίων του νερού και του παγωμένου υλικού. Στο τέλος της ξήρανσης, το τελικό περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας στο προϊόν είναι εξαιρετικά χαμηλό (1-4%) (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).



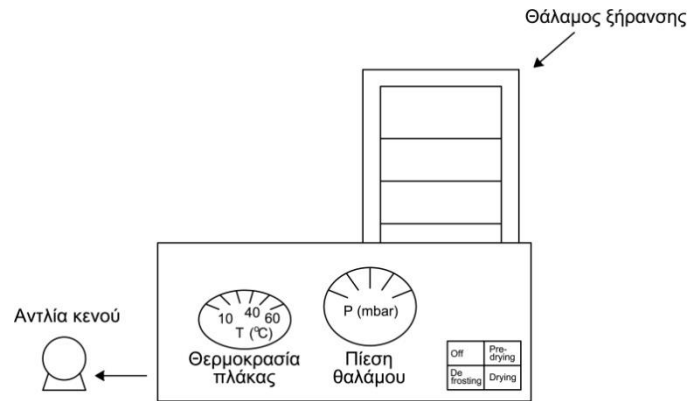
**Σχήμα 3. 3. Στάδια της διεργασίας ξήρανσης υπό κατάψυξη (πηγή: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ίδια επεξεργασία).**

Βασικό στοιχείο της ξήρανσης υπό κατάψυξη αποτελεί το σύστημα συμπύκνωσης, το οποίο συμπυκνώνει τους υδρατμούς που προκύπτουν από την εξάχνωση του πάγου. Ο συμπυκνωτής θα πρέπει να λειτουργεί αποτελεσματικά ώστε να μην επιστρέφουν οι υδρατμοί στο προϊόν αλλά και να μη φτάνουν στην αντλία κενού, καθώς θα προκαλέσουν διάβρωση της αντλίας αλλά και επιβράδυνση του ρυθμού εξάχνωσης λόγω μείωσης του κενού (Huber, 2000; Κροκίδα, 1999). Επίσης, μετά το πέρας της ξήρανσης, ο πάγος που έχει συγκεντρωθεί στο συμπυκνωτή, ξεπαγώνει με τη βοήθεια είτε θερμού αέρα, θερμού νερού ή θερμαντικών στοιχείων και απομακρύνεται.

Στη σύγχρονη βιομηχανία χρησιμοποιούνται συνεχείς ή ασυνεχείς ξηραντήρες υπό κατάψυξη. Οι συνεχείς ξηραντήρες διακρίνονται σε (Λάζος, 2002):

- ξηραντήρες με δίσκους (tray dryers), όπου τα προϊόντα είναι τοποθετημένα σε στάσιμους δίσκους και οι δίσκοι κινούνται συνεχώς μέσα στον ξηραντήρα
- δυναμικούς ξηραντήρες (dynamic dryers), όπου τα σωματίδια των προϊόντων κινούνται μέσω του ξηραντήρα

Οι βασικότεροι ασυνεχείς ξηραντήρες είναι οι ξηραντήρες με ράφια, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για πληθώρα υλικών. Κατά την ξήρανση αυτή πραγματοποιείται τόσο η πρωτογενής όσο και η δευτερογενής ξήρανση, οδηγώντας σε όσο το δυνατό χαμηλότερα επίπεδα υγρασίας. Οι ξηραντήρες με ράφια αποτελούνται από το θάλαμο κενού ο οποίος είναι εφοδιασμένος με ράφια, το σύστημα δημιουργίας κενού, το σύστημα θέρμανσης και το σύστημα συμπύκνωσης των υδρατμών (Σχήμα 3. 4).



Σχήμα 3. 4. Συσκευή ξήρανσης υπό κατάψυξη (πηγή: (Κροκίδα, 1999), ίδια επεξεργασία).

Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το υψηλό κόστος εξαιτίας των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων και το υψηλό κόστος του εξοπλισμού. Η ενέργεια που απαιτείται για την απομάκρυνση 1 kg νερού είναι σχεδόν διπλάσια στην ξήρανση υπό κατάψυξη σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο ξήρανσης (Flink, 1977). Επίσης, το κόστος της ξήρανσης υπό κατάψυξη είναι 4 με 8 φορές υψηλότερο σε σχέση με την ξήρανση σε ρεύμα αέρα. Η διεργασία της εξάχνωσης καταναλώνει περίπου το 45% της συνολικής ενέργειας σε έναν κύκλο ξήρανσης, ενώ η ενεργειακή κατανάλωση της κατάψυξης είναι περίπου 4% επί του συνόλου (Ratti, 2001). Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας κατά την ξήρανση υπό κατάψυξη μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας κάποια προεπεξεργασία, συνδυάζοντας την με άλλες μεθόδους ξήρανσης ή με τη χρήση μικροκυμάτων (Huang et al., 2011).

### 3.2.2.2 Παράμετροι διεργασίας

Οι χρησιμοποιούμενες κάθε φορά συνθήκες επεξεργασίας επηρεάζουν την εσωτερική δομή των παραχθέντων προϊόντων. Οι βασικότεροι παράγοντες που επιδρούν στη διεργασία της ξήρανσης υπό κατάψυξη είναι η ταχύτητα κατάψυξης (που συνδέεται με τη θερμοκρασία κατάψυξης) και η πίεση λειτουργίας η οποία αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία στην οποία εξαχνώνεται ο πάγος. Πιο αναλυτικά:

**Ταχύτητα κατάψυξης:** Η δομή των λυοφιλιωμένων προϊόντων καθορίζεται από το μέγεθος των κρυστάλλων πάγου οι οποίοι διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της κατάψυξης. Το μέγεθος των κρυστάλλων πάγου επηρεάζεται από τη θερμοκρασία κατάψυξης (Rhim et al., 2011). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κατάψυξης, η ταχύτητα πυρήνωσης είναι υψηλή και η ανάπτυξη των κρυστάλλων πραγματοποιείται αργά, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλοί μικροί κρύσταλλοι πάγου. Η εξάχνωση των κρυστάλλων αυτών οδηγεί στη δημιουργία μικρών πόρων στο τελικό προϊόν. Η εφαρμογή υψηλότερων θερμοκρασιών ευνοεί τη δημιουργία μεγαλύτερων κρυστάλλων, οδηγώντας τελικά στη δημιουργία προϊόντων με μεγαλύτερους πόρους. Επομένως, ο έλεγχος του μεγέθους των κρυστάλλων πάγου είναι μεγάλης σημασίας για τη διαμόρφωση προϊόντων με επιθυμητή δομή.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές για τον έλεγχο του μεγέθους των κρυστάλλων πάγου, όπως μηχανική ανάδευση, έλεγχος με την εφαρμογή υπερήχων, εφαρμογή ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων, κ.ά. (Woo & Mujumdar, 2010; Xu et al., 2009).

**Πίεση λειτουργίας:** Η δεύτερη παράμετρος που επηρεάζει τη διαμόρφωση της δομής των λυοφιλιωμένων προϊόντων είναι η πίεση που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της λυοφιλίωσης.

Ανάλογα με την πίεση λειτουργίας, οι κρύσταλλοι του πάγου που εξαχνώνονται δημιουργούν πόρους ή κενά με ποικίλα χαρακτηριστικά (Krokida et al., 1998a).

Τα τρόφιμα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα συστήματα τα οποία αποτελούνται από πολλές φάσεις. Ο μηχανισμός που καθορίζει την κατάρρευση της δομής κατά τη διάρκεια της ξήρανσης είναι η κατάσταση και το ιξώδες των στερεών. Η κατάρρευση της δομής πραγματοποιείται όταν αυξάνεται η κινητικότητα των μοριακών αλυσίδων της συμπυκνωμένης φάσης. Εάν η θερμοκρασία ξήρανσης είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των στερεών, τα άμορφα τμήματα μαλακώνουν και η μοριακή κίνηση στο εσωτερικό των υλικών αυξάνεται κατά δύο τάξεις μεγέθους. Ως αποτέλεσμα αυτού, το λιώσιμο του πάγου είναι πιο έντονο και οδηγεί σε πλαστικοποίηση της μήτρας και μείωση του ιξώδους του υλικού. Το μειωμένο ιξώδες δεν μπορεί να υποστηρίξει τη δομή, έχοντας ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση των φαινομένων συρρίκνωσης. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας λειτουργίας και της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, τόσο εντονότερη είναι η κατάρρευση της δομής. Αντίθετα, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, το νερό ακινητοποιείται, με αποτέλεσμα το υψηλό ιξώδες των άμορφων περιοχών που δημιουργούνται γύρω από τους κρυστάλλους πάγου να αποτρέπει την κατάρρευση του υλικού. Στη διεργασία της ξήρανσης υπό κατάψυξη, η θερμοκρασία διατηρείται κάτω ή κοντά στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού, με αποτέλεσμα το υλικό να υφίσταται αμελητέα συρρίκνωση και να χαρακτηρίζεται από υψηλό πορώδες (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Κροκίδα, 1999).

### **3.2.2.3 Εφαρμογές**

Η εφαρμογή της ξήρανσης υπό κατάψυξη στη διατήρηση διαφόρων τροφίμων είναι ευρέως διαδεδομένη σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους. Η ξήρανση υπό κατάψυξη είναι μία διεργασία που πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και για το λόγο αυτό, τα αφυδατωμένα προϊόντα θεωρούνται ανώτερα εκείνων που αφυδατώνονται με τη χρήση συμβατικών μεθόδων (Ratti, 2001). Η απουσία νερού και η μείωση της ενεργότητας ύδατος σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα περιορίζει τις αντιδράσεις υποβάθμισης των τροφίμων, όπως τη μη-ενζυμική αμαύρωση, τη μετουσίωση των πρωτεϊνών και τις ενζυμικές αντιδράσεις που προκαλούν τη χημική υποβάθμιση του προϊόντος. Επιπλέον, βοηθά στη διατήρηση των θρεπτικών, του χρώματος, του αρώματος και της γεύσης (Duan et al., 2010; Krokida et al., 1998a; Οικονομοπούλου et al., 2011) λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας. Η απουσία αέρα στο θάλαμο σε συνδυασμό με τη χαμηλή θερμοκρασία ελαχιστοποιεί την υποβάθμιση των τροφίμων που οφείλεται στην οξείδωση ή τη χημική τροποποίησή τους. Ακόμα, οι επιφανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται δεν προκαλούν συρρίκνωση και η χαμηλή κινητικότητα της συμπυκνωμένης φάσης οδηγεί στη δημιουργία πορώδους δομής που μοιάζει με «σφουγγάρι». Η πορώδης δομή που αναπτύσσεται επιτρέπει τη γρήγορη ενυδάτωση των τροφίμων, η οποία παράγει προϊόντα όμοια με το νωπό τρόφιμο (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).

Τα λυοφιλωμένα προϊόντα χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλό όγκο και βάρος, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ευρέως ως τροφές για τους αστροναύτες και τους πεζοπόρους. Ευρεία εφαρμογή βρίσκει, επίσης, η παραγωγή στιγμιαίου καφέ, η παραγωγή αφυδατωμένων φρούτων και λαχανικών τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή δημητριακών, διαφόρων σνακ, παγωτών και κρεμών ζαχαροπλαστικής (Hammami & Reni, 1997) και προσδίδουν ανώτερα διατροφικά χαρακτηριστικά, και η ξήρανση μερικών αρωματικών βοτάνων.

Η ξήρανση υπό κατάψυξη βρίσκει επίσης, εφαρμογή για τη συντήρηση θερμο-ευαίσθητων υλικών, όπως είναι διάφορες πρωτεΐνες, ένζυμα, μικροοργανισμοί και το πλάσμα αίματος, αλλά και την



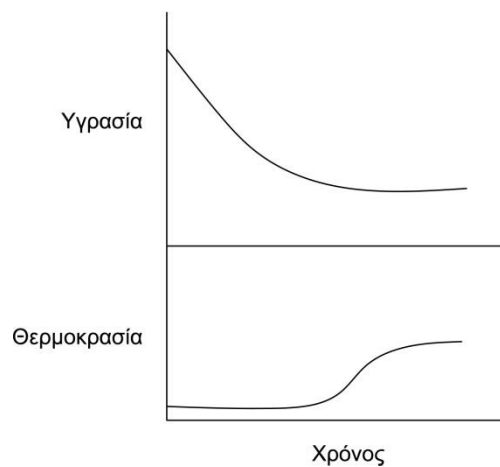
παραγωγή ποικίλων φαρμακευτικών παρασκευασμάτων. Εφαρμόζεται, επίσης, στη διάσωση και συντήρηση ξύλινων αντικειμένων και άλλων υλικών οργανικής προέλευσης (υφάσματα), που βρίσκονται μέσα σε υδάτινους χώρους. Χρησιμοποιείται ακόμα, σε ορισμένες περιπτώσεις, για την ανάκτηση βιβλίων και αρχείων τα οποία έχουν καταστραφεί από πλημμύρες, αλλά και στην παραγωγή πορωδών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως καταλύτες ή προσροφητικά υλικά (Ζουμπούλης et al., 2009).

### 3.2.3 Ξήρανση σε ρεύμα αέρα

#### 3.2.3.1 Γενικά

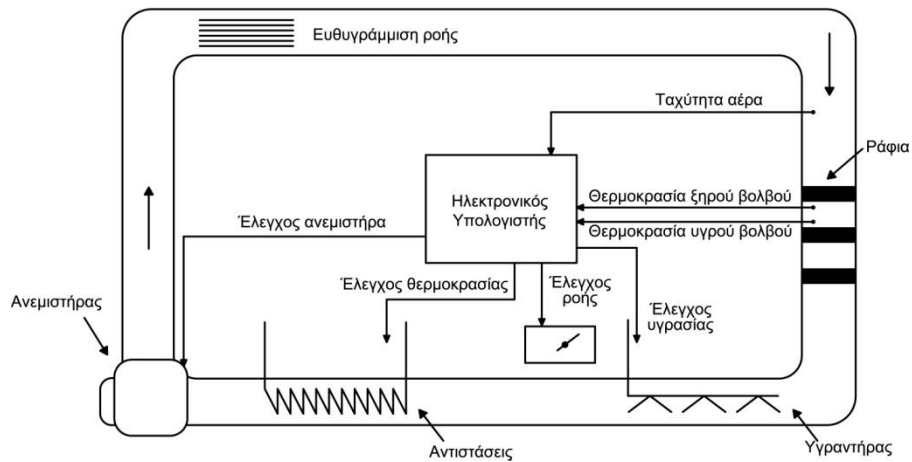
Η ξήρανση σε ρεύμα αέρα είναι μία από τις οικονομικότερες μεθόδους για την αφυδάτωση τροφίμων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανική κλίμακα και απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλους χρόνους λειτουργίας. Είναι μία διεργασία ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας, μάζας και ορμής. Η μείωση της υγρασίας επιτυγχάνεται με την εφαρμογή θερμότητας με ταυτόχρονη ροή αέρα, η οποία παρέχει την απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για την εξάτμιση του νερού και απομακρύνει τον παραγόμενο ατμό.

Η αφυδάτωση των τροφίμων με ξήρανση σε ρεύμα αέρα πραγματοποιείται σε ξηραντήρες που λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση. Στην ξήρανση σε ρεύμα αέρα επικρατούν δύο φαινόμενα, η θέρμανση του προϊόντος και η μείωση της υγρασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. 5 συναρτήσεως του χρόνου (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).



**Σχήμα 3. 5. Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης (πηγή: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996), ίδια επεξεργασία).**

Ένας ξηραντήρας ρεύματος αέρα με ράφια απεικονίζεται στο Σχήμα 3. 6. Ο αέρας θερμαίνεται μέσω αντιστάσεων και ανακυκλοφορεί με τη βοήθεια ανεμιστήρα. Ο θερμός αέρας μεταδίδει στο προϊόν θερμότητα με συναγωγή.



Σχήμα 3. 6. Πειραματική συσκευή ξήρανσης σε ρεύμα αέρα (πηγή: (Κροκίδα, 1999), ίδια επεξεργασία).

Τα τρόφιμα τα οποία αφυδατώνονται με ξήρανση σε ρεύμα αέρα χαρακτηρίζονται από μεγάλη συρρίκνωση και χαμηλό πορώδες, εξαιτίας της διάχυσης του νερού από το κέντρο προς την επιφάνεια του υλικού, την κατάρρευση των κυτταρικών τοιχωμάτων, κτλ., που συμβαίνουν εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών. Η κατάρρευση της δομής κατά τη διάρκεια της ξήρανσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς μειώνει την ταχύτητα ξήρανσης και την ποιότητα των τροφίμων. Επίσης, καθώς οι δομικές μεταβολές είναι μη αναστρέψιμες, τα αφυδατωμένα προϊόντα έχουν περιορισμένη ικανότητα για ενυδάτωση (Krokida et al., 2003).

Η θεωρία της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης μπορεί να εξηγήσει τα φαινόμενα συρρίκνωσης και κατάρρευσης κατά την ξήρανση σε ρεύμα αέρα. Η θερμοκρασία διατηρείται σε τιμές πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, με αποτέλεσμα την κατάρρευση του υλικού και τη δημιουργία προϊόντων με χαμηλό πορώδες. Ωστόσο, η έννοια της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης δεν είναι μοναδική, δεδομένου ότι υπάρχουν περιπτώσεις που αποδεικνύουν την αντίθετη τάση (case hardening effect) (del Valle et al., 1998; Ratti, 1994). Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο ρυθμός διάχυσης του νερού από το εσωτερικό προς την επιφάνεια του υλικού είναι ίσος με το ρυθμό εξάτμισης από την επιφάνεια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε πολύ μικρό δυναμικό υγρασίας εντός του προϊόντος και μικρές εσωτερικές τάσεις. Ως αποτέλεσμα αυτού, λαμβάνει χώρα κατάρρευση της δομής μέχρι τα τελευταία στάδια της ξήρανσης, που οδηγεί σε προϊόντα με χαμηλότερο πορώδες. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η υγρασία από την επιφάνεια εξατμίζεται πολύ γρήγορα οδηγώντας στην ανάπτυξη μιας άκαμπτης και σκληρής επιφάνειας. Ως αποτέλεσμα αυτού, η πορώδης δομή δημιουργείται σε προγενέστερο στάδιο δημιουργώντας προϊόντα με υψηλότερο πορώδες. Επίσης, ο Rahman (2001) υπέθεσε ότι καθώς η τριχοειδής δύναμη είναι η κύρια δύναμη που είναι υπεύθυνη για την κατάρρευση, εξισορροπώντας τη δύναμη αυτή, προκαλείται σχηματισμός πόρων και μικρότερη συρρίκνωση. Οι δυνάμεις εξισορρόπησης οφείλονται στην ανάπτυξη εσωτερικής πίεσης λόγω της εξάτμισης του νερού ή άλλων διαλυτών, στις διακυμάνσεις στο μηχανισμό μεταφοράς υγρασίας και στην πίεση στο εξωτερικό του υλικού.

### 3.2.3.2 Παράμετροι διεργασίας

Η κινητική της ξήρανσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δείγματος αλλά και τις συνθήκες που χρησιμοποιούνται. Οι βασικότερες παράμετροι που επιδρούν στη διεργασία της ξήρανσης σε ρεύμα αέρα είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του αέρα, η υγρασία του αέρα, το μέγεθος του δείγματος, ή ο συνδυασμός τους. Πιο αναλυτικά:

**Θερμοκρασία αέρα:** Η θερμοκρασία του αέρα αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για τη μεταφορά θερμότητας στο προς ξήρανση υλικό. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο τρόφιμο και τον περιβάλλοντα αέρα αποτελεί το δυναμικό μεταφοράς θερμότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας και επομένως σε μείωση του χρόνου ξήρανσης (Krokida et al., 2004). Παράλληλα, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ποιοτικών και διατροφικών χαρακτηριστικών των τροφίμων (Praveen Kumar et al., 2005). Για το λόγο αυτό, η τελική ποιότητα του προϊόντος καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας.

**Ταχύτητα αέρα:** Κατά το πρώτο στάδιο της ξήρανσης, η ταχύτητα του αέρα επιδρά σημαντικά στη διεργασία, καθώς εντείνει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας (Piotrowski & Lenart, 1998). Αυξημένη ταχύτητα αέρα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης οδηγεί σε μείωση του χρόνου ξήρανσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αύξηση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας και μάζας μεταξύ του υλικού και του θερμού ρεύματος αέρα (Kaya et al., 2007). Όμως, πολύ υψηλές ταχύτητες αέρα μπορεί να οδηγήσουν σε αρνητικά αποτελέσματα, εξαιτίας της ψύξης της επιφάνειας των τροφίμων λόγω της εξάτμισης (Praveen Kumar et al., 2005).

**Υγρασία αέρα:** Ο χρόνος ξήρανσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά, ειδικότερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες ξήρανσης, με μείωση της υγρασίας του αέρα. Ωστόσο, η επίδραση της υγρασίας του αέρα είναι λιγότερο σημαντική από την επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα (Sturm et al., 2012).

**Μέγεθος δείγματος:** Η υγρασία μεταφέρεται από το εσωτερικό προς την εξωτερική επιφάνεια του υλικού. Το μέγεθος του υλικού (πάχος) επιδρά αρνητικά στη διάχυση της υγρασίας, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο πάχος υλικού να απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο ξήρανσης (Krokida et al., 2004).

### **3.2.3.3 Εφαρμογές**

Η ξήρανση σε ρεύμα αέρα είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αφυδάτωσης στη βιομηχανία τροφίμων. Οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων με αυξημένη διάρκεια ζωής, αλλά η ποιότητά τους είναι χαμηλή σε σύγκριση με το αρχικό τρόφιμο. Τα προϊόντα υφίστανται συρρίκνωση, μεταβολή χρώματος, μειωμένη ικανότητα ενυδάτωσης, αλλά και χημικές μεταβολές.

## **3.2.4 Ξήρανση υπό κενό**

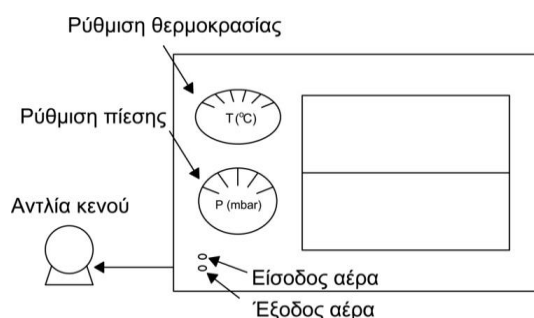
### **3.2.4.1 Γενικά**

Η ξήρανση υπό κενό πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη συμβατική ξήρανση, όπως είναι ο υψηλότερος ρυθμός απομάκρυνσης της υγρασίας, η αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών αλλά και αντιδράσεων οξειδωσης εξαιτίας της απουσίας οξυγόνου, ενώ επιβραδύνεται σημαντικά η μεταφορά θερμότητας στο υλικό εξαιτίας της απουσίας της συναγωγής. Τα χαρακτηριστικά αυτά βοηθούν στη βελτίωση της ποιότητας και της θρεπτικής αξίας των αφυδατωμένων προϊόντων (Wu et al., 2007). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας των ξηραντήρων υπό κενό είναι χαμηλότερη από τους συμβατικούς ξηραντήρες, καθώς οι χαμηλότεροι χρόνοι ξήρανσης και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ελαχιστοποιούν τις απώλειες ενέργειας, ενώ παράλληλα δεν απαιτείται η εισαγωγή και θέρμανση φρέσκου αέρα. Το σημείο βρασμού του νερού μειώνεται κάτω των 100°C λόγω της μειωμένης πίεσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα εξάτμισης και να αποφεύγεται η θερμική καταπόνηση του υλικού και η καταστροφή βιταμινών και θρεπτικών συστατικών (Dev & Raghavan, 2012). Η θερμοκρασία

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

μεταφέρεται κυρίως με αγωγή ή ακτινοβολία και η θερμοκρασία των προϊόντων μπορεί να ελεγχθεί εύκολα (Lewicki, 2006). Η ταχύτητα απομάκρυνσης της υγρασίας εξαρτάται από την αρχική και επιθυμητή τελική υγρασία του προϊόντος, τα χαρακτηριστικά του και την τελική του ποιότητα.

Στο Σχήμα 3. 7 παρουσιάζεται μία συσκευή ξήρανσης υπό κενό.



**Σχήμα 3. 7. Συσκευή ξήρανσης υπό κενό (πηγή: (Κροκίδα, 1999), ίδια επεξεργασία).**

Στην ξήρανση υπό κενό υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας και της πίεσης. Σημαντικό τμήμα του συστήματος αποτελεί ο συμπυκνωτής, ο οποίος βρίσκεται μεταξύ του ξηραντήρα και της αντλίας κενού και συλλέγει την υγρασία και τα πτητικά.

Η χρήση μικροκυμάτων ενδείκνυται κατά την ξήρανση υπό κενό για την αύξηση της ταχύτητας ξήρανσης, αλλά και τη μείωση της συρρίκνωσης. Η πορώδης δομή των προϊόντων αυτών οδηγεί σε βραχύτερο χρόνο ενυδάτωσης και πιο πλήρη ενυδάτωση (Huang et al., 2011).

### 3.2.4.2 Παράμετροι διεργασίας

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διεργασία της ξήρανσης υπό κενό είναι η πίεση και η θερμοκρασία του αέρα.

**Πίεση:** Η πίεση που εφαρμόζεται κατά την ξήρανση υπό κενό επηρεάζει τη διεργασία. Στην αρχή της διεργασίας η πίεση ελαττώνεται γρήγορα με αποτέλεσμα το υλικό να διαστέλλεται δημιουργώντας πόρους στο εσωτερικό του (Saduikov et al., 1985). Συγκεκριμένα, η μείωση της πίεσης (αύξηση του κενού) προκαλεί μείωση του χρόνου ξήρανσης (Wu et al., 2007) και αύξηση της διάχυσης μάζας λόγω διαστολής του αέρα και των υδρατμών που προκαλείται από το κενό, δημιουργώντας τρόφιμα με διογκωμένη δομή. Το γεγονός αυτό διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας και αυξάνει το ρυθμό ξήρανσης (Arévalo-Pinedo & Murr, 2006; Drouzas et al., 1999). Επίσης, η μείωση της πίεσης οδηγεί σε μείωση του σημείου βρασμού του νερού, με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητήριας δύναμης για τη διάχυση υγρασίας (Methakhup et al., 2005).

**Θερμοκρασία:** Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά το χρόνο ξήρανσης, εξαιτίας της αύξησης του δυναμικού μεταφοράς θερμότητας και μάζας (Arévalo-Pinedo & Murr, 2006; Jaya & Das, 2003).

### 3.2.4.3 Εφαρμογές

Η ξήρανση υπό κενό εφαρμόζεται συνήθως για την αφυδάτωση θερμο-ευαίσθητων προϊόντων, όπως λαχανικά, φρούτα, προϊόντα γάλακτος, κτλ. καθώς πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα αφυδατωμένα υπό κενό προϊόντα χαρακτηρίζονται από υψηλότερο πορώδες σε σχέση με τα προϊόντα που ξηραίνονται σε ρεύμα αέρα και μεγάλη ταχύτητα και βαθμό ενυδάτωσης. Επιπλέον, η

ξηρανση υπό κενό παράγει προϊόντα με χαμηλή υγρασία (1-3%) τα οποία διατηρούν το χρώμα τους και τα αρωματικά τους συστατικά (Krokida et al., 2001).

### 3.2.5 Ωσμωτική αφυδάτωση

#### 3.2.5.1 Γενικά

Η ωσμωτική αφυδάτωση οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων με μειωμένη υγρασία, η οποία όμως παραμένει σε υψηλά επίπεδα (20-50%) (Raoult-Wack et al., 1991), με αποτέλεσμα την παραγωγή τροφίμων με ενδιάμεση υγρασία ή μερικώς επεξεργασμένων τροφίμων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μικροβιακή σταθερότητα (Panagiotou et al., 1998).

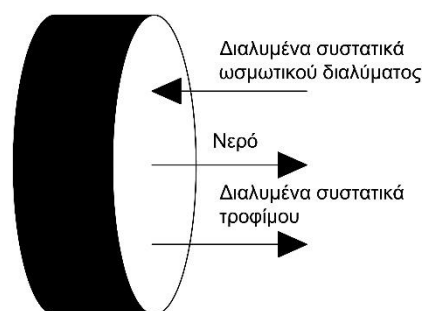
Τα προϊόντα που αφυδατώνονται ωσμωτικά είναι διάφορα φρούτα και λαχανικά, προϊόντα κρέατος, κτλ. (Lewicki & Lenart, 1995). Τα ωσμωτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται για την ωσμωτική αφυδάτωση των φρούτων είναι, συνήθως, πυκνά διαλύματα σακχάρων χαμηλού μοριακού βάρους (σουκρόζη, γλυκόζη, φρουκτόζη, μαλτόζη, λακτόζη ή μίγματα αυτών) ή αμυλώδη διαλύματα (Agnieszka & Andrzej, 2010; Chafer et al., 2008; Moreno et al., 2012; Tabtiang et al., 2012). Για τα λαχανικά χρησιμοποιείται κυρίως το χλωριούχο νάτριο (NaCl) (Khin et al., 2006; Singh et al., 2008), ενώ υπάρχουν αναφορές που αποδεικνύουν ότι ο συνδυασμός αλάτων και σακχάρων μπορεί να είναι ικανοποιητικός για την ωσμωτική αφυδάτωση λαχανικών (Islam & Flink, 1982; Shi & Maguer, 2002). Η επιλογή του ωσμωτικού μέσου βασίζεται στην αποτελεσματικότητά του όσον αφορά στην ικανότητα αφυδάτωσης, στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, αλλά και στις ιδιότητες που προσδίδει στα τρόφιμα.

Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση, τα τρόφιμα εμβαπτίζονται σε πυκνά ωσμωτικά διαλύματα. Τα διαλύματα αυτά έχουν ενεργότητα ύδατος μικρότερη από την ενεργότητα ύδατος των προϊόντων, ή αντίστοιχα μεγαλύτερη ωσμωτική πίεση από την ωσμωτική πίεση των προϊόντων. Εξαιτίας της διαφοράς της ωσμωτικής πίεσης εκατέρωθεν της κυτταρικής μεμβράνης των τροφίμων, κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω διαδικασίες μεταφοράς μάζας (Cao et al., 2006):

α) διάχυση του ύδατος από τα τρόφιμα στο διάλυμα

β) μεταφορά διαλυμένων στερεών από το διάλυμα στα τρόφιμα

γ) διάχυση διαλυμένων ουσιών (σάκχαρα, βιταμίνες, άλατα, κτλ.) από τα τρόφιμα στο διάλυμα. Παρόλο που η διεργασία αυτή είναι αμελητέα σε σύγκριση με τις παραπάνω διεργασίες, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τελική θρεπτική αξία και τις οργανοληπτικές ιδιότητες των τροφίμων (Lenart & Dbrowska, 1999; Panagiotou et al., 1998)



Σχήμα 3. 8. Μηχανισμοί μεταφοράς κατά τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης (πηγή: (Lazarides & Mavroudis, 1995), ίδια επεξεργασία).

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

Το νερό διέρχεται μέσω των κυτταρικών τοιχωμάτων, εξαιτίας της διαφοράς του δυναμικού συγκέντρωσης που δημιουργείται μεταξύ του προϊόντος και του ωσμωτικού διαλύματος, μέχρις ότου η συγκέντρωση των μορίων του νερού να είναι η ίδια και στις δύο πλευρές. Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση, η απομάκρυνση του νερού χωρίζεται σε δύο περιόδους. Η πρώτη διαρκεί περίπου 2 ώρες και η υγρασία απομακρύνεται με υψηλούς ρυθμούς. Η δεύτερη διαρκεί συνήθως 2-6 ώρες και η απομάκρυνση του νερού πραγματοποιείται με μικρότερο ρυθμό (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Η διαπερατότητα των φυτικών ιστών σε σάκχαρα και υψηλού μοριακού βάρους ενώσεις είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα η διείσδυση των διαλυμένων στερεών να γίνεται στα επιφανειακά στρώματα του υλικού (Lenart & Dbrowska, 1999). Τα διαλυμένα στερεά διεισδύουν σε βάθος 2-3 mm, ενώ μεταβολές στην περιεχόμενη υγρασία παρατηρούνται μέχρι βάθους 5 mm περίπου (Lewicki & Lukaszuk, 2000). Οι μηχανισμοί δράσης των σακχάρων και του άλατος διαφέρουν κατά τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης. Τα σάκχαρα δημιουργούν ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα, ενώ το αλάτι εξαιτίας του μικρότερου μοριακού βάρους διεισδύει σε μεγαλύτερο βάθος (Monsalve-Gonzalez et al., 1993).

Κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης, η απομάκρυνση του νερού και των διαλυμένων ουσιών, καθώς και η πρόσληψη των διαλυμένων ουσιών από τα τρόφιμα πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, χωρίς καμία αλλαγή φάσης, αλλά συνοδεύονται από δομικές αλλαγές, όπως συρρίκνωση ή διόγκωση. Η μεταφορά μάζας στο εσωτερικό του υλικού εξαρτάται ταυτόχρονα και από τις συνθήκες επεξεργασίας, αλλά και τις ιδιότητες της μικροδομής των υλικών (Shi & Maguer, 2002). Η διεργασία της ώσμωσης πραγματοποιείται κυρίως σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης, σε συνθήκες κενού, ενισχύοντας το ρυθμό απομάκρυνσης του νερού (Panagiotou et al., 1998).

Η μεταφορά μάζας κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής διεργασίας περιγράφεται από τα παρακάτω μεγέθη (Panagiotou et al., 1998):

Απώλεια νερού ( $WL$ , kg νερού/kg αρχικού ξηρού βάρους), που περιγράφει την ποσότητα νερού που διαχέεται από το τρόφιμο στο διάλυμα

$$WL = \frac{(M_o - m_o) - (M - m)}{M_o} \quad 3.1$$

Πρόσληψη στερεών ( $SG$ , kg ολικών στερεών/kg αρχικού ξηρού βάρους), που περιγράφει την ποσότητα των στερεών που διαχέεται από το διάλυμα στο τρόφιμο μειωμένη κατά την ποσότητα των στερεών που μεταφέρονται από το τρόφιμο στο διάλυμα

$$SG = \frac{(m - m_o)}{M_o} \quad 3.2$$

όπου,  $M_o$  (kg) είναι το αρχικό βάρος του τροφίμου πριν την ωσμωτική αφυδάτωση,  $M$  (kg) είναι το βάρος του τροφίμου μετά από χρόνο  $t$  ωσμωτικής επεξεργασίας,  $m_o$  (kg) είναι το αρχικό ξηρό βάρος του τροφίμου,  $m$  (kg) είναι το ξηρό βάρος του τροφίμου μετά από χρόνο  $t$  ωσμωτικής επεξεργασίας.

Η μεταφορά του νερού και των διαλυτών στερεών από και προς το υλικό σε τρόφιμα εμβαπτισμένα σε ωσμωτικά διαλύματα μπορεί να περιγραφεί από διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς, ανάλογα με τη φύση του υλικού, την περιεκτικότητα σε υγρασία, τη θερμοκρασία και την πίεση στους τριχοειδείς πόρους, το πορώδες και τη γεωμετρία των υλικών. Σε μη πορώδη στερεά πραγματοποιείται υγρή διάχυση, ενώ σε πορώδη στερεά πραγματοποιείται τριχοειδής κίνηση.

Εξαιτίας της κυτταρικής δομής των περισσότερων βιοϋλικών, όπως είναι τα τρόφιμα, η μεταφορά μάζας λαμβάνει χώρα μέσω των κυτταρικών μεμβρανών, ως αποτέλεσμα της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης εκατέρωθεν της κυτταρικής μεμβράνης και για το λόγο αυτό, η διαδικασία ονομάζεται ωσμωτική αφυδάτωση (osmotic dehydration). Εκτός όμως από τη μεταφορά μάζας μέσω των μεμβρανών, είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν και άλλα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, όπως είναι διάχυση ουσιών στο ωσμωτικό διάλυμα και στα μεσοκυττάρια διαστήματα, υγρή διάχυση, διάχυση αερίου, υδροδυναμική ροή, τριχοειδής μεταφορά και επιφανειακή διάχυση. Για το λόγο αυτό, κάποιιοι συγγραφείς αναφέρουν τη διεργασία ως αφυδάτωση και εμποτισμό (dewatering and impregnation soaking process). Στα περισσότερα τρόφιμα λαμβάνει χώρα ένας συνδυασμός αυτών των μηχανισμών λόγω των πολύπλοκων δομών (Mayor et al., 2006; Shi & Maguer, 2002).

Τα κυριότερα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή των μηχανισμών μεταφοράς στη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης είναι τα παρακάτω (Azarprazhooh & Ramaswamy, 2010; Panagiotou et al., 1998):

Μικροσκοπική προσέγγιση: Τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ώσμωσης σε φυτικούς ιστούς, περιλαμβάνουν σύνθετους μηχανισμούς που ελέγχονται από την κυτταρική δομή. Οι μηχανισμοί που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης προκαλούν μεταβολές στη δομή και τις ιδιότητες μεταφοράς, οι οποίες επηρεάζουν τη διεργασία της ώσμωσης. Οι περισσότερες από αυτές τις μεταβολές παρόλο που πραγματοποιούνται σε μακροσκοπικό επίπεδο, οφείλονται σε μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε μικροσκοπικό επίπεδο, επηρεάζοντας τις φυσικές ιδιότητες των τροφίμων.

Μακροσκοπική προσέγγιση: Η μεταβολή των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ώσμωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς μάζας, ειδικότερα αν τα δεδομένα σχετίζονται με χαρακτηριστικά της μικροδομής (αλλαγές στο σχήμα, το μέγεθος και τη γεωμετρία των κυττάρων και των μεσοκυττάρων χώρων, κτλ.). Ποικίλα μαθηματικά πρότυπα έχουν προταθεί για την κατανόηση του μηχανισμού μεταφοράς, τα οποία βασίζονται είτε στην προσέγγιση της κυτταρικής δομής θεωρώντας τη μετακίνηση του νερού σαν μία κίνηση εκατέρωθεν των μεμβρανών ή στο δεύτερο νόμο διάχυσης του Fick.

### 3.2.5.2 Παράμετροι διεργασίας

Οι κύριες παράμετροι που μελετώνται στη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης είναι τα χαρακτηριστικά και η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, η θερμοκρασία, η πίεση, τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος του δείγματος, η ταχύτητα ανάδευσης, η αναλογία βάρους προϊόντος/διαλύματος, ο χρόνος εμβάπτισης, καθώς και η εφαρμογή τεχνολογιών όπως υπέρηχοι, υπερυψηλή πίεση, κενό, μικροκύματα, κτλ. (Azarprazhooh & Ramaswamy, 2010; Shi & Maguer, 2002; Κουσουδά & Τσιλίκης, 2011).

Χαρακτηριστικά δείγματος: Η πυκνότητα των ιστών, το αρχικό περιεχόμενο σε διαλυτά και αδιάλυτα στερεά, τα ενδοκυτταρικά κενά, η παρουσία αερίου, η ενζυμική δραστηριότητα κτλ. επηρεάζουν τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης (Torreggiani, 1993). Επιπλέον, το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος και ο λόγος της ειδικής επιφάνειας προς τον όγκο του δείγματος επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα της ώσμωσης. Δείγματα με μεγάλη ειδική επιφάνεια αφυδατώνονται με ταχύτερο ρυθμό, ενώ το πάχος των δειγμάτων επηρεάζει αρνητικά την απώλεια νερού (Azarprazhooh & Ramaswamy, 2010; ĩspir & Tođrul, 2009).

Χρόνος εμβάπτισης: Η αύξηση του χρόνου εμβάπτισης προκαλεί αύξηση της απώλειας νερού και της πρόσληψης στερεών από το προϊόν (Alam et al., 2013). Η απομάκρυνση του νερού πραγματοποιείται με ταχύτερο ρυθμό στα αρχικά στάδια της ώσμωσης, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς ωσμωτικής πίεσης μεταξύ του τροφίμου και του περιβάλλοντος διαλύματος. Στη συνέχεια, η μείωση της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης εξαιτίας της πρόσληψης διαλυμένων στερεών από το τρόφιμο προκαλεί μείωση της ταχύτητας απομάκρυνσης του νερού. Η πρόσληψη στερεών οδηγεί στο σχηματισμό ενός στρώματος στερεών κάτω από την επιφάνεια του υλικού, το οποίο ενεργεί ως εμπόδιο στην περαιτέρω απομάκρυνση του νερού και την πρόσληψη στερεών (Lazarides et al., 1995). Επιπλέον, η ταχεία απώλεια του νερού και η πρόσληψη στερεών κοντά στην επιφάνεια στην αρχή της ώσμωσης προκαλεί δομικές αλλαγές (συρρίκνωση και κατάρρευση των επιφανειακών κυττάρων) οδηγώντας σε συμπίεση των επιφανειακών στρωμάτων και αυξημένη αντίσταση μεταφοράς μάζας για το νερό και τα διαλυμένα στερεά (Lenart & Flink, 1984). Ταυτόχρονα, η μείωση του διαθέσιμου ελεύθερου ή χαλαρά δεσμευμένου νερού οδηγεί σε πιο αργή απομάκρυνση της υγρασίας (Lazarides et al., 1995). Ο χρόνος εμβάπτισης μπορεί να μειωθεί με αύξηση της ταχύτητας ανάδευσης ή της συγκέντρωσης του ωσμωτικού διαλύματος.

Διαλυμένη ουσία: Το είδος, η συγκέντρωση, το μοριακό βάρος και η ιοντική συμπεριφορά της διαλυμένης ουσίας επηρεάζουν σημαντικά την ωσμωτική διεργασία (Azarrazhooh & Ramaswamy, 2010; Panagiotou et al., 1999). Η αύξηση της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας προκαλεί αύξηση στην ωσμωτική πίεση, με αποτέλεσμα την αύξηση της απώλειας νερού και της πρόσληψης στερεών από το τρόφιμο, κατά τη διάρκεια της ώσμωσης (İspir & Toğrul, 2009). Η χρησιμοποίηση αραιών ωσμωτικών διαλυμάτων επιδρά αρνητικά στο φαινόμενο της ώσμωσης (Karathanos et al., 1995). Η αύξηση του μοριακού βάρους του ωσμωτικού μέσου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απώλειας νερού και τη μείωση της πρόσληψης των στερεών (Raoult-Wack et al., 1991). Αντίθετα, η χρήση ωσμωτικών μέσων χαμηλού μοριακού βάρους ευνοεί την πρόσληψη των στερεών, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός που επικρατεί να είναι ο εμπλουτισμός του τροφίμου με διαλυμένα στερεά (Torreggiani, 1993).

Αναλογία βάρους προϊόντος/διαλύματος: Η απώλεια νερού και η πρόσληψη στερεών αυξάνονται με τη μείωση της αναλογίας του βάρους του υλικού προς το βάρος του διαλύματος. Η μείωση της αναλογίας του βάρους του υλικού προς το βάρος του διαλύματος αποτρέπει φαινόμενα αραίωσης του ωσμωτικού διαλύματος από την απομάκρυνση του νερού από το τρόφιμο, όπως επίσης, βοηθά στην αποφυγή της μείωσης της ωσμωτικής κινητήριας δύναμης κατά τη διάρκεια της ώσμωσης (İspir & Toğrul, 2009). Η αναλογία βάρους προϊόντος προς το βάρος του διαλύματος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1:4 έως 1:20 (Azarrazhooh & Ramaswamy, 2010).

Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία επηρεάζει θετικά την απώλεια νερού και την πρόσληψη των στερεών κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής διεργασίας. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλείται διόγκωση και πλαστικοποίηση των κυτταρικών μεμβρανών, ταχύτερη διάχυση νερού μέσα στο προϊόν και καλύτερη μεταφορά μάζας στην επιφάνεια του τροφίμου εξαιτίας του χαμηλότερου ιξώδους του ωσμωτικού μέσου (Lazarides et al., 1995). Παρόλο όμως που η θερμοκρασία ευνοεί την ταχύτητα της ωσμωτικής αφυδάτωσης, σε υψηλές θερμοκρασίες πραγματοποιούνται φαινόμενα υποβάθμισης των τροφίμων, όπως είναι η ενζυμική αμαύρωση και η απώλεια πτητικών (Alam et al., 2013; Azarrazhooh & Ramaswamy, 2010). Η βέλτιστη θερμοκρασία ώσμωσης εξαρτάται από το υλικό.

Ταχύτητα ανάδευσης: Η ταχύτητα ανάδευσης επηρεάζει θετικά την απώλεια νερού κατά τη διάρκεια της ώσμωσης. Η ανάδευση επιτυγχάνει τη συνεχή επαφή της επιφάνειας του δείγματος με το



ωσμωτικό διάλυμα, μειώνει την αντίσταση μεταφοράς μάζας στην επιφάνεια των στερεών και παρέχει μια ομοιόμορφη κατανομή του ωσμωτικού διαλύματος γύρω από το τρόφιμο (Tortoe et al., 2009). Επίσης, εμποδίζει τη δημιουργία στρώματος στερεών στην επιφάνεια του δείγματος, διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά του νερού.

### 3.2.5.3 Εφαρμογές

Η ωσμωτική αφυδάτωση χρησιμοποιείται για τη μερική αφυδάτωση πολλών κατηγοριών τροφίμων, όπως είναι τα φρούτα, τα λαχανικά, το κρέας, τα ψάρια, κτλ. και οδηγεί σε διατήρηση του σχήματος, του χρώματος και του αρώματος των προϊόντων. Τα ωσμωτικά αφυδατωμένα προϊόντα χαρακτηρίζονται από υψηλή ποιότητα, καθώς και μικροβιακή σταθερότητα εξαιτίας της μειωμένης ενεργότητας του νερού, η οποία όμως δεν είναι επαρκής για τη διατήρησή τους για μακρό χρονικό διάστημα (Panagiotou et al., 1998). Για το λόγο αυτό, η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται ως μέθοδος προκατεργασίας, πριν από περαιτέρω αφυδάτωση ή κατάψυξη και οδηγεί στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων, τη μείωση του χρόνου μετέπειτα ξήρανσης, την ελάττωση της υποβάθμισης του χρώματος και των τροφίμων, τη βελτίωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών τους, την ελάττωση της ενζυμικής αμαύρωσης (Krokida et al., 2000d; Lemus-Mondaca et al., 2009) και τον περιορισμό της κατάρρευσης της δομής των τροφίμων (Aktas et al., 2007; Riva et al., 2005).

## 3.3 ΕΚΒΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

### 3.3.1 Γενικά

Η διεργασία της εκβολής χρησιμοποιείται για την παραγωγή «έτοιμων» διογκωμένων προϊόντων δεύτερης και τρίτης γενιάς (Ding et al., 2006). Σύμφωνα με τους Rossen & Miller (1973) η εκβολή είναι μία διεργασία όπου τα συστατικά των τροφίμων αναγκάζονται να ρέουν κάτω από συνθήκες ανάμιξης, θέρμανσης και διάτμησης, μέσω μίας μήτρας η οποία μορφοποιεί και προκαλεί τη διόγκωση των συστατικών. Η εκβολή τροφίμων αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο παραγωγής, η οποία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα (Chaughule & Thorat, 2011):

- υψηλή παραγωγικότητα εξαιτίας της συνεχούς παραγωγής προϊόντων σε ένα μόνο στάδιο επεξεργασίας
- δυνατότητα παραγωγής μεγάλης ποικιλίας προϊόντων που είναι διαθέσιμα για άμεση κατανάλωση, μεταβάλλοντας τα συστατικά των πρώτων υλών και τις συνθήκες λειτουργίας του εκβολέα
- δυνατότητα παραγωγής τροφίμων με μεγάλη ποικιλία σχημάτων, υφής, χρώματος και εμφάνισης
- μικρός χρόνος παραγωγής προϊόντων, που μεταξύ άλλων οδηγεί στη διατήρηση θρεπτικών συστατικών (π.χ. βιταμινών) και τη βελτίωση της πεπτικότητας των πρωτεϊνών και του αμύλου
- δυνατότητα επεξεργασίας μιγμάτων (σε μορφή σκόνης) που αποτελούνται από διαφορετικά τρόφιμα, δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής τελικών προϊόντων με σύνθεση εντελώς διαφορετική από εκείνη των μεμονωμένων αρχικών πρώτων υλών
- χαμηλό κόστος

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

- είναι διεργασία φιλική προς το περιβάλλον με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με άλλες μεθόδους θερμικής κατεργασίας των πρώτων υλών, ενώ δημιουργεί λίγα ή αμελητέα απόβλητα κατά τη λειτουργία της
- δυνατότητα κλιμάκωσης της διεργασίας (scale-up), καθώς τα δεδομένα από την πιλοτική εφαρμογή μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανική κλίμακα για παραγωγή προϊόντων

Η εκβολή παράγει οικονομικά ένα ευρύ φάσμα προϊόντων υψηλής ποιότητας. Διάφορες πρώτες ύλες με χαμηλή υγρασία αναμιγνύονται σε μορφή σκόνης και υφίστανται επεξεργασία υπό υψηλές θερμοκρασίες και σύντομους χρόνους (HTST – High Temperature – Short Time process) και κάτω από πολύ ισχυρές μηχανικές τάσεις. Κατά τη διάρκεια της εκβολής πραγματοποιούνται μία σειρά από βασικές διεργασίες, όπως ανάμιξη, ομογενοποίηση, ζύμωση, θέρμανση, ζελατινοποίηση αμύλου, μετουσίωση πρωτεϊνών, παστερίωση και αποστείρωση, πλαστικοποίηση, σχηματοποίηση, μορφοποίηση, διόγκωση και ξήρανση (Anton et al., 2009; Ding et al., 2006; Riaz, 2000). Οι διεργασίες αυτές πραγματοποιούνται είτε ταυτόχρονα ή διαδοχικά και οδηγούν στην παραγωγή τελικών ή ενδιάμεσων προϊόντων (Gray & Chinnaswamy, 1995). Η αποδοχή των προϊόντων εκβολής από τους καταναλωτές βασίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών που καθορίζουν την ποιότητά τους, όπως είναι η τελική τους υγρασία, η δομή, η ικανότητα απορρόφησης νερού και ελαίων, η ικανότητα διαλυτότητας σε νερό, η υφή, το χρώμα και η γεύση. Η ποιότητα και οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων εκβολής εξαρτώνται από ποικίλες παραμέτρους, όπως είναι ο τύπος του εκβολέα, η υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας, η σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας, το θερμοκρασιακό προφίλ, η μηχανική και θερμική ενέργεια, ο χρόνος παραμονής, η ταχύτητα και η γεωμετρία των κοχλιών και η παροχή της τροφοδοσίας (Anton & Luciano, 2007; Thymi et al., 2005).

Κατά τη διάρκεια της εκβολής, το μίγμα μετατρέπεται σε ένα ιξώδες τήγμα το οποίο εξωθείται βίαια μέσω μιας μήτρας. Στην έξοδο, η ταχεία πτώση της πίεσης ατμοποιεί το υπέρθερμο νερό το οποίο περιέχεται στο μίγμα, οδηγώντας σε δημιουργία φυσαλίδων, διόγκωση των προϊόντων και δημιουργία πορώδους δομής (Hutchinson et al., 1987). Η εκβολή διακρίνεται σε δύο κατηγορίες (Chaughule & Thorat, 2011):

Θερμή εκβολή (hot extrusion), όπου το προϊόν θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της παραγωγής του. Τα μίγματα εκβολής πλαστικοποιούνται και μαγειρεύονται υπό την επίδραση πίεσης, θερμοκρασίας και μηχανικής τάσης, με αποτέλεσμα το μοριακό τους μετασχηματισμό και ποικίλες χημικές αντιδράσεις (Castells et al., 2005). Η μηχανική τάση που εφαρμόζεται οδηγεί στο σπάσιμο των ομοιοπολικών δεσμών των βιοπολυμερών, ενώ η δομική κατάρρευση και η ανάμιξη ευνοεί την τροποποίηση των λειτουργικών ιδιοτήτων των διαφόρων συστατικών (Carvalho & Mitchell, 2000; Singh et al., 2007b). Επιπλέον, η διεργασία της εκβολής οδηγεί στη μετουσίωση ανεπιθύμητων ενζύμων, αδρανοποιεί κάποια ανεπιθύμητα συστατικά, όπως ταννίνες, σταθεροποιεί τα τελικά προϊόντα και διατηρεί τα φυσικά χρώματα και αρώματα των τροφίμων. Η θέρμανση προσφέρεται στη ζύμη μέσω ενός ή συνδυασμού των παρακάτω μηχανισμών: α) διάχυση της μηχανικής ενέργειας που προσδίδεται στον άξονα του κοχλία, β) μεταφορά θερμότητας από ατμό ή ηλεκτρικές αντιστάσεις που περιβάλλουν το θάλαμο του εκβολέα, γ) άμεση πρόσδοση ατμού, ο οποίος αναμιγνύεται με τη ζύμη στον εκβολέα.

Ψυχρή εκβολή (cold extrusion), όπου το προϊόν διατηρεί τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε όλη τη διάρκεια της παραγωγής του. Τα προϊόντα εκβολής εξέρχονται μέσω της μήτρας χωρίς την επιβολή εξωτερικής θερμικής ενέργειας. Η ψυχρή εκβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή

συνεκβαλλόμενων προϊόντων, όπου το ένα συστατικό του τελικού προϊόντος εκτονώνεται μέσω μίας μήτρας γνωστού σχήματος δημιουργώντας ένα συνεχή σωλήνα. Ταυτόχρονα, το δεύτερο συστατικό εισάγεται λίγο πριν τη μήτρα και γεμίζει το εσωτερικό του σωλήνα. Η ψυχρή εκβολή χρησιμοποιείται για την παραγωγή τροφίμων με υψηλή διατροφική αξία, ζυμαρικών, μεμονωμένων κομματιών γλυκισμάτων, ζωοτροφών, κτλ.

Η παραγωγή σνακ και «έτοιμων» προς κατανάλωση προϊόντων βασίζεται κύρια στη θερμή εκβολή.

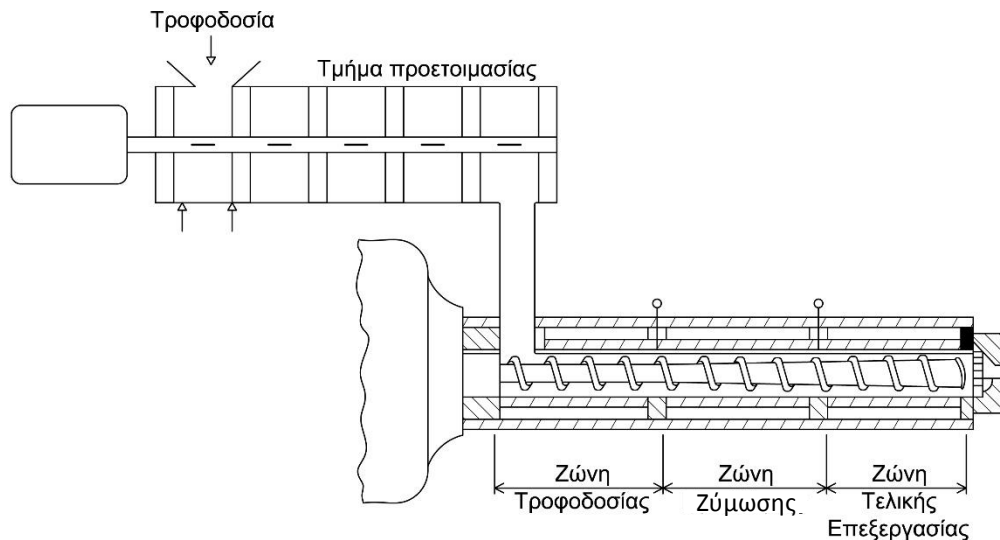
### 3.3.2 Εκβολείς

Η διεργασία της εκβολής έγινε γνωστή πρώτη φορά το 1797 από τον Joseph Braham στην Αγγλία, ενώ οι εκβολείς διπλού κοχλία αναπτύχθηκαν το 1869 από τους Fellows και Bates. Στα τέλη της δεκαετίας του '40, παρήχθησαν τα πρώτα εμπορικά τρόφιμα εκβολής χρησιμοποιώντας εκβολείς μονού κοχλία. Την πενταετία 1955-1960, η εκβολή χρησιμοποιήθηκε σε βιομηχανική κλίμακα για την παραγωγή ζωοτροφών. Από τότε έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και την παραγωγή εκβαλλόμενων προϊόντων ανώτερης ποιότητας. Στη δεκαετία του '70, αναπτύχθηκε η συνεκβολή μιγμάτων τροφίμων, όπως επίσης, και η χρήση δύο εκβολέων, όπου ο πρώτος χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα και ο δεύτερος για τη μορφοποίηση. Στις αρχές της δεκαετίας του '80 αναπτύχθηκε ραγδαία η βιομηχανική χρήση εκβολέων διπλού κοχλία, εξαιτίας της ευελιξίας και της υψηλής τους παραγωγικότητας. Στις αρχές της δεκαετίας του '90, οι πρώτοι εκβολείς για την παραγωγή προϊόντων τρίτης γενιάς εισήχθησαν στη βιομηχανία τροφίμων (Riaz, 2000).

Η εκβολή είναι μία διεργασία που επεξεργάζεται συνεχώς ένα προϊόν, και περιλαμβάνει περιστρεφόμενους κοχλίες, οι οποίοι συνδέονται σφικτά σε ένα κύλινδρο για να μεταφέρουν τη ζύμη. Οι εκβολείς αποτελούνται από διάφορα τμήματα (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008), τα οποία περιλαμβάνουν (Σχήμα 3. 9):

- (α) Σύστημα τροφοδοσίας, για την ομοιόμορφη και συνεχή παροχή του μίγματος στην επιθυμητή ταχύτητα
- (β) Τμήμα προετοιμασίας, όπου νερό, ατμός ή άλλα αέρια μπορούν να αναμιχθούν με το ξηρό μίγμα
- (γ) Θάλαμο εκβολέα, στον οποίο πραγματοποιούνται οι βασικές διεργασίες που προαναφέρθηκαν, όπως ανάμιξη, ζύμωση, ομογενοποίηση, μαγείρεμα, σχηματοποίηση, κτλ. των υλικών τροφοδοσίας
- (δ) Μήτρα, για την διαμόρφωση των τελικών προϊόντων
- (ε) Συσκευή κοπής, για την κοπή των προϊόντων στο επιθυμητό μέγεθος

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ



**Σχήμα 3. 9. Σύστημα εκβολής τροφίμων σε εκβολέα μονού κοχλία (πηγές: (Harper & Tribelhorn, 1988; Huber, 2000; Riaz, 2000), ίδια επεξεργασία).**

### Σύστημα τροφοδοσίας (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008)

Τα μίγματα προς εκβολή εισέρχονται στο δοχείο τροφοδοσίας το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από τον εκβολέα. Το σύστημα τροφοδοσίας εξασφαλίζει τη σταθερή και ομοιόμορφη παροχή του υλικού η οποία είναι απαραίτητη για την αξιόπιστη και συνεχή λειτουργία του εκβολέα. Η τροφοδοσία στα συστήματα εκβολής επιτυγχάνεται με διατάξεις κοχλίων, η ταχύτητα περιστροφής των οποίων ελέγχει και την ταχύτητα τροφοδοσίας. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων τροφοδοσίας, τα βαρυτικά και τα ογκομετρικά. Τα βαρυτικά συστήματα είναι περισσότερο ακριβά, αλλά προτιμώνται καθώς δεν επηρεάζονται από αλλαγές της φαινόμενης πυκνότητας των πρώτων υλών ή το ύψος των υλικών στο δοχείο τροφοδοσίας. Τα ογκομετρικά συστήματα επιτυγχάνουν υψηλότερες παροχές τροφοδοσίας.

### Τμήμα προετοιμασίας (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008)

Στη συνέχεια, το μίγμα εισέρχεται είτε κατευθείαν στον εκβολέα είτε διέρχεται από το τμήμα προετοιμασίας. Το τμήμα προετοιμασίας είναι ιδιαίτερα απλό και χρησιμοποιείται για την προανάμιξη της ξηρής πρώτης ύλης με ατμό ή νερό, ώστε να αποκτήσουν τα υλικά κατάλληλες ή επιθυμητές ιδιότητες. Το μίγμα διατηρείται σε αυτό το τμήμα για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να επιτευχθεί εξισορρόπηση υγρασίας και θερμοκρασίας. Στο τμήμα προετοιμασίας μπορεί να πραγματοποιηθούν πολλά φαινόμενα, όπως ανάμιξη, ενυδάτωση, ψήσιμο, μεταβολή και ρύθμιση pH και να προστεθούν ατμοί, αρωματικές ενώσεις, λιπίδια, χρώμα έτσι το υλικό να αποκτήσει τις κατάλληλες ιδιότητες. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες ενός συστήματος προετοιμασίας είναι το είδος και τα ποσοστά των υλικών προσθήκης και ο χρόνος παραμονής που επηρεάζει όλες τις χημικές και φυσικές δράσεις.

### Εκβολέας (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008)

Ο εκβολέας αποτελείται από τους περιστρεφόμενους κοχλίες, το θάλαμο ο οποίος περιέχει τους κοχλίες, και ποικίλα στοιχεία μέτρησης και εξαρτήματα. Βασικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη διαμόρφωση των προϊόντων εκβολής αποτελούν ο λόγος μήκος/διαμέτρου ( $L/D$ ) των κοχλίων, το

διάκενο μεταξύ του κοχλία και των τοιχωμάτων του θαλάμου και οι διαστάσεις των επιμέρους εξαρτημάτων.

Ο θάλαμος του εκβολέα χωρίζεται περαιτέρω σε τρεις βασικές ζώνες, τη ζώνη τροφοδοσίας (feeding zone), τη ζώνη ζύμωσης (kneading zone) και τη ζώνη τελικής επεξεργασίας (final cooking zone) (Gray & Chinnaswamy, 1995; Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008).

Στην πρώτη ζώνη, οι πρώτες ύλες εισάγονται μέσα στο θάλαμο. Τα σπειρώματα του κοχλία έχουν μεγάλο βάθος και επιτρέπουν την απλή μεταφορά του υλικού προς τις επόμενες ζώνες. Το υλικό έχει χαμηλή πυκνότητα εξαιτίας του περιεχομένου αέρα ανάμεσα στους κόκκους της πρώτης ύλης και αρχίζει να συμπιέζεται ελαφρά. Στη συνέχεια (ζώνη ζύμωσης), συνεχίζεται η συμπίεση, τα πτερύγια του κοχλία έχουν μικρότερο βάθος και τα κανάλια του εκβολέα γεμίζουν με περισσότερο υλικό. Στη ζώνη αυτή, αρχίζουν και αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες οι οποίες αυξάνουν την πυκνότητα του μίγματος. Οι διατμητικές δυνάμεις αρχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο λόγω του αυξημένου βαθμού πλήρωσης στα κανάλια του κοχλία. Στην αρχική περιοχή, επικρατούν μέτριες πιέσεις επιτρέποντας την εισαγωγή ατμού με πίεση 5-10 bar. Η χρήση ατμού μεταφέρει θερμική ενέργεια και υγρασία στο υλικό. Οι κόκκοι του υλικού αρχίζουν να συσσωματώνονται επειδή στην περιοχή αυτή η θερμοκρασία και η μηχανική ενέργεια που μετατρέπεται σε τριβή, είναι πιο υψηλές. Καθώς το υλικό κινείται στη ζώνη ζύμωσης, αρχίζει να αποκτά τα χαρακτηριστικά ζύμης, η οποία καθώς κινείται υφίσταται έντονο ζύμωμα και συμπίεση με αποτέλεσμα να απομακρύνεται ο εγκλωβισμένος αέρας και να αναπτύσσεται θερμότητα από τις τριβές. Επίσης, στη ζώνη αυτή επέρχονται οι πρώτες μεταβολές στη δομή του προϊόντος (ευθυγράμμιση και διάσπαση των μορίων των πρωτεϊνών και του αμύλου). Στην τελική ζώνη, τα πτερύγια του κοχλία έχουν πολύ μικρό βάθος και η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνονται με ταχείς ρυθμούς, ενώ παρατηρούνται οι μέγιστες διατμητικές τάσεις. Λόγω των συνθηκών αυτών επέρχονται έντονες μεταβολές στη δομή των προϊόντων, όπως πλαστικοποίηση του υλικού πάνω από τη θερμοκρασία τήξης.

Επίσης, για να είναι δυνατή η επιτυχής μεταφορά του υλικού θα πρέπει το υλικό να γλιστράει από τα τοιχώματα του θαλάμου και να μην περιστρέφεται με αυτόν. Για το λόγο αυτό, η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου δεν είναι λεία αλλά περιέχει σπειροειδή ή οριζόντια αυλάκια. Η μειωμένη ολισθηρότητα των τοιχωμάτων του θαλάμου εμποδίζει την περιστροφή της ζύμης μαζί με τον κοχλία, επιτρέποντας, λόγω της προς τα εμπρός φοράς του σπειρώματος, την τελική ώθηση του υλικού κατά μήκος του θαλάμου. Η ροή του υλικού περιγράφεται από τρεις τύπους, τη ροή παράσυρσης (drag flow), τη ροή λόγω πίεσης (pressure-induced flow) και τη ροή λόγω διαρροής (leakage flow). Η ροή παράσυρσης αναφέρεται στην ταχύτητα του κοχλία ως προς το θάλαμο. Η ταχύτητα του υλικού είναι μηδέν στην επιφάνεια του κοχλία και αυξάνεται σταδιακά προς τα τοιχώματα του θαλάμου. Η ροή λόγω πίεσης αναφέρεται στο δυναμικό πίεσης που δημιουργείται μεταξύ της ζώνης τροφοδοσίας και της ζώνης τελικής επεξεργασίας. Ανάλογα με τον τύπο του εκβολέα, επικρατούν όλοι ή κάποιοι μηχανισμοί (Gray & Chinnaswamy, 1995).

Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται διάφορα είδη εκβολέων, όπως εκβολείς μονού κοχλία, εκβολείς διπλού κοχλία, εκβολείς με έμβολο, εκβολείς με κυλίνδρους, κτλ. Ανάμεσα στους εκβολείς, οι εκβολείς μονού και διπλού κοχλία είναι ευρέως διαδεδομένοι στη βιομηχανία τροφίμων και διατίθενται σε ποικίλα μεγέθη και σχήματα, ενώ οι κοχλίες, ο θάλαμος και η μήτρα μπορούν να διαφοροποιούνται ανάλογα με τις προδιαγραφές των προϊόντων (Riaz, 2000). Η περιγραφή των εκβολέων μονού και διπλού κοχλία ακολουθεί στις παραγράφους 3.3.2.1 και 3.3.2.2.

### Μήτρα και σύστημα κοπής (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008)

Στην έξοδο υπάρχει η μήτρα μορφοποίησης, όπου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της προσδίδει στα προϊόντα το αντίστοιχο σχήμα. Η υψηλή πίεση που επικρατεί στην τελική ζώνη εξισώνεται με την ατμοσφαιρική με αποτέλεσμα την έντονη εξάτμιση του νερού και τη διόγκωση του προϊόντος. Παράλληλα, η έντονη εξάτμιση του νερού προκαλεί απότομη μείωση της θερμοκρασίας του προϊόντος με αποτέλεσμα να γίνεται στερεό και συμπαγές. Οι διατμητικές τάσεις και τα χαρακτηριστικά των προϊόντων μπορούν να μεταβληθούν σημαντικά εάν χρησιμοποιηθούν μήτρες με περισσότερα από ένα ανοίγματα. Τέλος, ακολουθεί το σύστημα κοπής, το οποίο διαμορφώνει τα τελικά προϊόντα στο επιθυμητό σχήμα και μήκος.

#### **3.3.2.1 Εκβολείς μονού κοχλίου**

Οι μονοκόχλιοι εκβολείς υψηλής διάτμησης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολλών προϊόντων «έτοιμων προς κατανάλωση», όπως σνακς, κριτσίνια, ζωτροφές, κτλ., τα οποία είναι είτε πλήρως μαγειρεμένα ή μερικώς μαγειρεμένα, υψηλής πυκνότητας, χαμηλής πυκνότητας, κτλ. (Riaz, 2000).

Ανάλογα με την πηγή παραγωγής και εναλλαγής θερμότητας και το μέγεθος των διατμητικών τάσεων, οι εκβολείς μονού κοχλίου διακρίνονται σε ποικίλες υποκατηγορίες (Gray & Chinnaswamy, 1995; Huber, 2000; Riaz, 2000):

❖ Ανάλογα με την πηγή παραγωγής και εναλλαγής θερμότητας σε:

- (α) αδιαβατικούς, όπου όλη η ενέργεια αναπτύσσεται από την τριβή του υλικού με το θάλαμο και τους κοχλίες του εκβολέα, ενώ η ποσότητα που απομακρύνεται από το θάλαμο είναι αμελητέα.
- (β) ισοθερμοκρασιακούς, οι οποίοι λειτουργούν σε σταθερή θερμοκρασία σε όλο το μήκος του θαλάμου και χρησιμοποιούνται κυρίως για μορφοποίηση.
- (γ) πολυτροπικούς, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα πρόσδοσης ή απομάκρυνσης θερμότητας ανάλογα με τη διεργασία.

❖ Ανάλογα με το μέγεθος των διατμητικών τάσεων που εφαρμόζονται σε:

- (α) εκβολείς ψυχρής μορφοποίησης, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από χαμηλή διάτμηση, χαμηλές ταχύτητες περιστροφής κοχλίου, λεία τοιχώματα και μεγάλο βάθος σπειρώματος.
- (β) εκβολείς μορφοποίησης σε υψηλή πίεση, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από χαμηλή διάτμηση, τοιχώματα με αυλακώσεις και κοχλίες που επιτυγχάνουν τη συμπίεση του υλικού. Οι εκβολείς αυτοί οδηγούν στην παραγωγή προϊόντων τα οποία χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία, όπως τηγάνισμα, εφαρμογή μικροκυμάτων, κτλ.
- (γ) εκβολείς Collet, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή διάτμηση, τοιχώματα με αυλακώσεις και κοχλίες με πολλαπλά σπειρώματα με μικρό βάθος. Οι εκβολείς αυτοί οδηγούν στην παραγωγή ιδιαίτερα διογκωμένων προϊόντων που δε χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία.
- (δ) εκβολείς ψησίματος χαμηλής διάτμησης, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μέτρια διάτμηση, τοιχώματα με αυλακώσεις και κοχλίες που επιτυγχάνουν υψηλή συμπίεση του υλικού. Οι εκβολείς αυτοί χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία προϊόντων με υψηλή υγρασία, όπου το τελικό προϊόν απαιτεί περαιτέρω μορφοποίηση ή ξήρανση.

(ε) εκβολείς ψησίματος υψηλής διάτμησης, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή διάτμηση και περιλαμβάνουν κοχλίες μεταβαλλόμενου βάθους σπειρώματος και βήματος με δυνατότητα μέγιστης συμπίεσης του υλικού και ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Οι εκβολείς αυτοί μοιάζουν με του εκβολείς Collet, αλλά οδηγούν στην παραγωγή λιγότερο διογκωμένων προϊόντων τα οποία χρειάζονται περαιτέρω ξήρανση.

Ο θάλαμος των μονοκόχλιων εκβολών διαχωρίζεται στις τρεις ζώνες που προαναφέρθηκαν (τροφοδοσίας, ζύμωσης και τελικής επεξεργασίας), ενώ συνήθως χρησιμοποιείται και το τμήμα προετοιμασίας με στόχο την αύξηση του χρόνου παραμονής, τη μείωση της κατανάλωσης μηχανικής ενέργειας, την αύξηση της χωρητικότητας και τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Gray & Chinnaswamy, 1995).

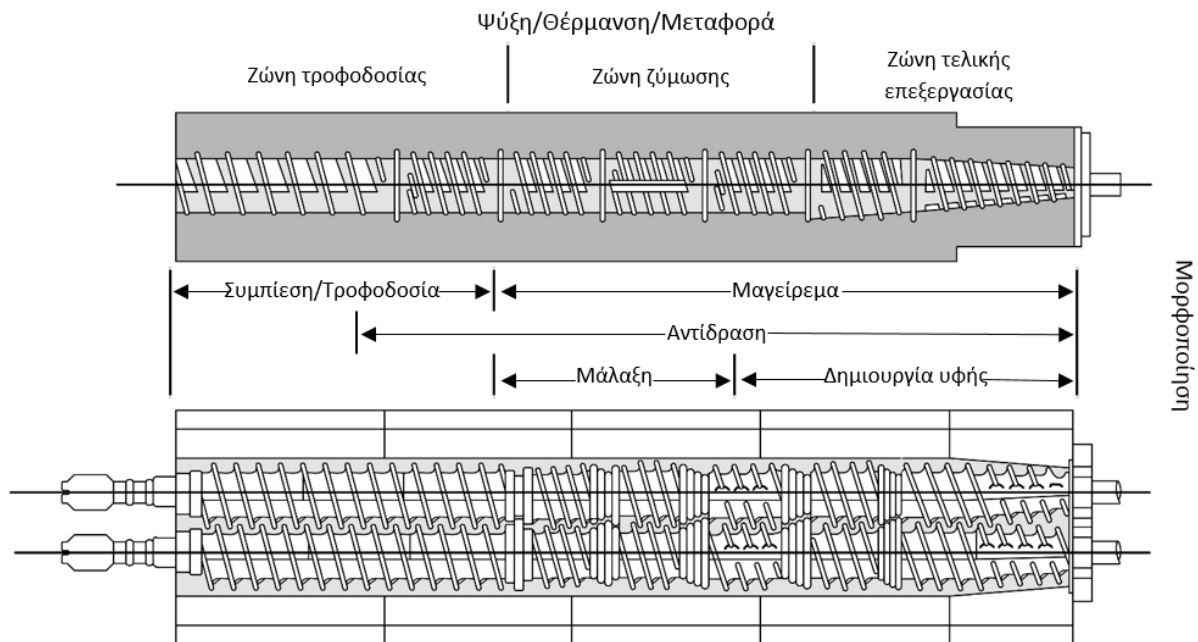
Στους εκβολείς μονού κοχλία, ο θάλαμος είναι διπλότοιχος και χωρισμένος σε τμήματα στα οποία κυκλοφορεί ψυκτικό μέσο, συνήθως νερό, για να ψύξει το σύστημα εκβολής αλλά και να μειώσει την εξάτμιση της περιεχόμενης υγρασίας. Ο θάλαμος φέρει θερμοστοιχεία και μανόμετρα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσης (Huber, 2000). Οι ζώνες ζύμωσης και τελικής επεξεργασίας λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Το πιο σύνηθες θερμαντικό μέσο είναι ατμός υψηλής πίεσης, παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης θερμαντικά στοιχεία ή θερμό νερό. Η μεταφορά θερμότητας στο υλικό είναι σχετικά μικρή συγκρινόμενη με τη συνολική ενέργεια που παρέχεται στον εκβολέα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μικρού χρόνου παραμονής, της μη πλήρωσης του θαλάμου, της μικρής επιφάνειας μεταφοράς και του χαμηλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (Riaz, 2000). Επίσης, θερμότητα αναπτύσσεται και λόγω της τριβής του υλικού με τα τοιχώματα του θαλάμου κατά την περιστροφή του κοχλία ή τη ροή του προϊόντος (Gray & Chinnaswamy, 1995).

Η λειτουργία του εκβολέα μονού κοχλία εξαρτάται από την πτώση πίεσης στην έξοδο του εκβολέα, τη θερμοκρασία, την παροχή της τροφοδοσίας, την ταχύτητα περιστροφής του κοχλία, το ιξώδες του μίγματος και τη συνάφειά του με τα τοιχώματα του θαλάμου. Στους εκβολείς μονού κοχλία, το υλικό «γλιστράει» εύκολα από τα τοιχώματα του θαλάμου και κολλάει στην επιφάνεια του κοχλία εμποδίζοντας τη μεταφορά του. Για το λόγο αυτό, οι μονοκόχλιοι εκβολείς διαθέτουν εσωτερικά τοιχώματα τα οποία περιέχουν σπειροειδή ή οριζόντια αυλάκια, όπως προαναφέρθηκε. Στους εκβολείς αυτούς, η έλικα του κοχλία έχει συγκεκριμένο βήμα και βάθος σπειρώματος, τα οποία μπορεί να μεταβάλλονται κατά μήκος των ζωνών του εκβολέα, με σκοπό την πλήρη πλήρωση του θαλάμου του εκβολέα με το υλικό εκβολής. Κατά μήκος του εκβολέα, η πυκνότητα του υλικού αυξάνει και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η μείωση του όγκου του θαλάμου για να επιτυγχάνεται σταθερή ροή. Επίσης η κλίση του σπειρώματος μεταβάλλεται κατά μήκος του κοχλία. Στη ζώνη τροφοδοσίας, όπου το υλικό έχει χαμηλή πυκνότητα, το σπείρωμα βρίσκεται σε ορθή γωνία σε σχέση με την κεντρική γραμμή του κοχλία. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα του υλικού, η γωνία μειώνεται με στόχο την αύξηση της ανάμιξης (Gray & Chinnaswamy, 1995; Medeni & Aylin, 2012; Riaz, 2000).

Οι εκβολείς μονού κοχλία έχουν κάποιους περιορισμούς στη βιομηχανία τροφίμων, καθώς δε μπορούν να επεξεργαστούν υλικά τα οποία γίνονται ιδιαίτερα κολλώδη με εφαρμογή θέρμανσης και συμπίεσης (Riaz, 2000).

### 3.3.2.2 Εκβολείς διπλού κοχλίου

Τα τελευταία χρόνια, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για παραγωγή νέων προϊόντων υψηλής ποιότητας έχουν επιβάλλει την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί οι εκβολείς διπλού κοχλίου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στη σύγχρονη βιομηχανία τροφίμων.

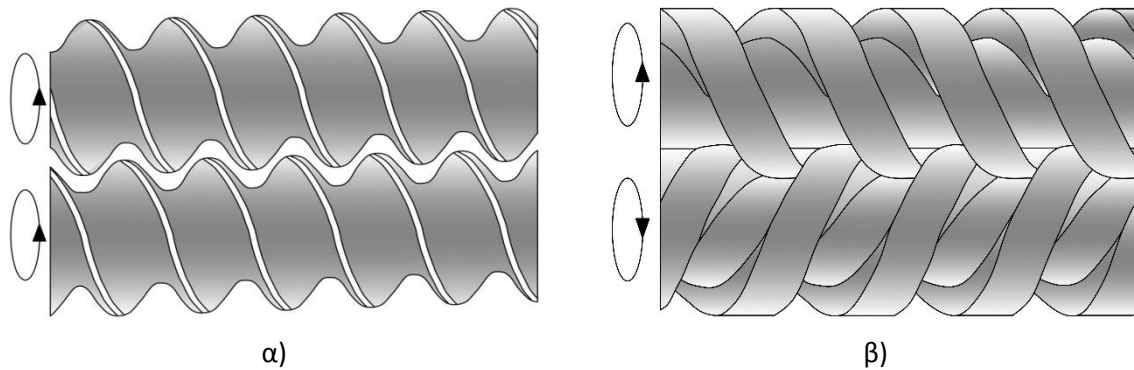


Σχήμα 3. 10 Εκβολέας διπλού κοχλίου (πηγή: (Huber, 2000), ίδια επεξεργασία).

Οι εκβολείς διπλού κοχλίου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατεύθυνση της περιστροφής τους σε (Huber, 2000; Riaz, 2000):

- ❖ Εκβολείς διπλού κοχλίου συμπεριστροφής (co-rotating twin-screw extruders). Οι εκβολείς αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων και πλεονεκτούν εξαιτίας της αποτελεσματικότητας άντλησης, τον έλεγχο της κατανομής του χρόνου παραμονής του υλικού, τον αυτοκαθαρισμό της διάταξης, την υψηλή χωρητικότητα και την ομοιομορφία της επεξεργασίας.
- ❖ Εκβολείς διπλού κοχλίου αντίστροφης περιστροφής (counter-rotating twin-screw extruders). Οι εκβολείς αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε μη ιξώδη υλικά τα οποία απαιτούν χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και υψηλούς χρόνους παραμονής.



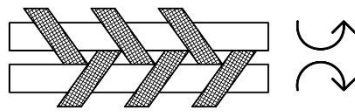


**Σχήμα 3. 11. Εκβολείς διπλού κοχλία α) συμπεριστροφής, β) αντίστροφης περιστροφής (πηγή: (Huber, 2000), ίδια επεξεργασία).**

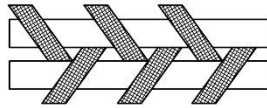
Οι δύο αυτές κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε διαπλεγμένους (intermeshing) και μη διαπλεγμένους (non-intermeshing) κοχλίες. Στους διαπλεγμένους κοχλίες, οι εξοχές του πρώτου κοχλία εισχωρούν στα κανάλια του δεύτερου με αποτέλεσμα να παρέχεται καλή ανάμιξη και υψηλή αποτελεσματικότητα άντλησης (Riaz, 2000). Καθώς το υλικό κινείται στο θάλαμο, διαγράφει μία κίνηση που μοιάζει με οκτώ (8) καθώς μεταφέρεται από κοχλία σε κοχλία. Η κίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του προϊόντος και του θαλάμου, την καλύτερη ανάμιξη και τον έλεγχο της θερμοκρασίας (Gray & Chinnaswamy, 1995). Στους εκβολείς αυτούς δεν απαιτούνται ιδιαίτεροι μηχανισμοί στα τοιχώματα του θαλάμου, καθώς εάν το υλικό κολλήσει στον ένα κοχλία, ο άλλος κοχλίας θα το παρασύρει και θα το μεταφέρει προς την έξοδο. Ο τοίχος του θαλάμου είναι συνήθως λείος, αλλά μπορεί να περιέχει σπειροειδή ή οριζόντια αυλάκια για την πιο εύκολη μεταφορά του υλικού. Στους μη διαπλεγμένους εκβολείς, οι κοχλίες δεν εισχωρούν ο ένας στον άλλο και λειτουργούν ως δύο μονοκόχλιοι εκβολείς, με κοινό ένα πολύ μικρό τμήμα του θαλάμου. Οι εκβολείς αυτοί δεν είναι σχεδιασμένοι για άντληση ή ανάμιξη και συμπεριφέρονται σαν εκβολείς μονού κοχλία, με μεγαλύτερη όμως χωρητικότητα (Riaz, 2000). Οι εκβολείς διπλού κοχλία διακρίνονται επίσης, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής στο θάλαμο (εγκάρσια, κατά μήκος ή και τα δύο ταυτόχρονα).

Στη ζώνη τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται κοχλίες μονού σπειρώματος και μεγάλου βήματος, ώστε να είναι μέγιστος ο ελεύθερος όγκος, ενώ στις άλλες ζώνες χρησιμοποιούνται συνήθως κοχλίες διπλού σπειρώματος με μικρότερο βήμα. Η αύξηση του αριθμού των σπειρωμάτων αυξάνει το λόγο επιφάνειας προς όγκο με αποτέλεσμα την υψηλή μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική εξαιτίας της τριβής (Riaz, 2000). Για την επιτυχή μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική, οι εκβολείς διπλού κοχλία διαθέτουν στοιχεία άλεσης τα οποία επιτρέπουν την ανάμιξη, συμπίεση, θέρμανση και διάτμηση του υλικού εκβολής. Ο αριθμός των στοιχείων άλεσης μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της διεργασίας (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008).

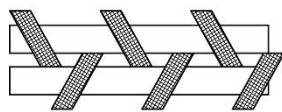
**Εκβολείς διπλού κοχλία αντίστροφης περιστροφής**



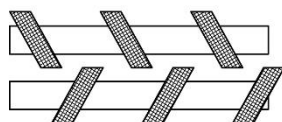
Πλήρως διαπλεγμένοι κοχλίες  
Κλειστό σύστημα κατά μήκος και πλάτος



Μερικώς διαπλεγμένοι κοχλίες  
Ανοιχτό σύστημα κατά μήκος και κλειστό κατά πλάτος

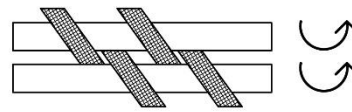


Μερικώς διαπλεγμένοι κοχλίες  
Ανοιχτό σύστημα κατά μήκος και πλάτος

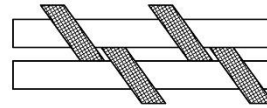


Μη διαπλεγμένοι κοχλίες  
Ανοιχτό σύστημα κατά μήκος και πλάτος

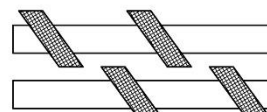
**Εκβολείς διπλού κοχλία συμπεριστροφής**



Πλήρως διαπλεγμένοι κοχλίες  
Ανοιχτό σύστημα κατά μήκος και κλειστό κατά πλάτος



Μερικώς διαπλεγμένοι κοχλίες  
Ανοιχτό σύστημα κατά μήκος και πλάτος



Μη διαπλεγμένοι κοχλίες  
Ανοιχτό σύστημα κατά μήκος και πλάτος

**Σχήμα 3. 12. Τύποι διαμόρφωσης κοχλιών σε εκβολείς διπλού κοχλία (πηγές: (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Harper & Tribelhorn, 1988), ίδια επεξεργασία).**

**3.3.2.3 Σύγκριση εκβολών μονού και διπλού κοχλία**

Συγκρίνοντας τα δύο είδη εκβολών, οι εκβολείς διπλού κοχλία είναι πιο σύνθετοι και πιο ακριβοί από τους εκβολείς μονού κοχλία, αλλά δίνουν τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου των παραμέτρων της διεργασίας, όπως το χρόνο παραμονής και τη διάτμηση (Gray & Chinnaswamy, 1995). Οι εκβολείς διπλού κοχλία παρέχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας διαφορετικών πρώτων υλών σε σχέση με τους εκβολείς μονού κοχλία και δίνουν τη δυνατότητα απομάκρυνσης του εγκλωβισμένου αέρα κατά τη διάρκεια της εκβολής. Οι εκβολείς διπλού κοχλία επιτρέπουν καλύτερη ανάμιξη, περιορίζουν την κατανομή του χρόνου παραμονής των προϊόντων στο θάλαμο και παρέχουν ομοιόμορφη διάτμηση σε όλο το θάλαμο. Η μεταφορά του υλικού βασίζεται όχι μόνο στην τριβή, όπως στους μονοκόχλιους εκβολείς, αλλά επίσης, στην αλληλεπίδραση του ενός κοχλία με τον άλλο. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την ομοιόμορφη ροή του υλικού στο θάλαμο. Οι δικόχλιοι όμως εκβολείς έχουν περιορισμούς ως προς την πίεση και τη ροπή που εφαρμόζεται. Οι εκβολείς διπλού κοχλία διαφέρουν από τους εκβολείς μονού κοχλία ως προς τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, καθώς έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών, πίεσης και υγρασίας (Riaz, 2000). Στους εκβολείς μονού κοχλία η θερμότητα παρέχεται από τη χρήση ατμού και από τη μηχανική ενέργεια, ενώ στους εκβολείς διπλού κοχλία παρέχεται κύρια από τη μηχανική ενέργεια. Παράλληλα, οι μονοκόχλιοι εκβολείς παράγουν προϊόντα υψηλής υγρασίας τα οποία συνήθως χρειάζονται ξήρανση, ενώ οι δικόχλιοι εκβολείς παράγουν χαμηλής υγρασίας προϊόντα. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της διεργασίας

και τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος εκβολέα (Gray & Chinnaswamy, 1995).

#### **3.3.2.4 Χημικές και φυσικοχημικές αλλαγές που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της εκβολής**

Κατά τη διάρκεια της εκβολής πραγματοποιούνται πολλές χημικές και φυσικοχημικές αλλαγές, οι οποίες περιλαμβάνουν κατακερματισμό, απώλεια της φυσικής διαμόρφωσης, θερμική αποικοδόμηση, κτλ. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την έκταση των μεταβολών αυτών και την ποιότητα των τελικών προϊόντων είναι η θερμοκρασία εκβολής, η γεωμετρία της μήτρας, ο τύπος του εκβολέα, η σύσταση της τροφοδοσίας, η υγρασία της τροφοδοσίας, η κοκκομετρία της τροφοδοσίας, η παροχή της τροφοδοσίας, η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών και η διαμόρφωσή τους. Οι παράμετροι αυτές κατ' επέκταση επηρεάζουν τη θερμοκρασία των προϊόντων, την ειδική μηχανική ενέργεια, το χρόνο παραμονής, το ιξώδες της ζύμης αλλά και τη διαμητική τάση που εφαρμόζεται. Η υγρασία της τροφοδοσίας είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος για τη διεργασία της εκβολής, καθώς είναι απαραίτητη για τη ζελατινοποίηση του αμύλου και τη μετουσίωση των πρωτεϊνών. Καθώς αυξάνεται η υγρασία, η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια μειώνεται. Παράλληλα, το περιεχόμενο ποσοστό λιπιδίων επηρεάζει την ποιότητα και τη διαμόρφωση των προϊόντων. Εάν το ποσοστό των λιπιδίων ξεπεράσει κάποια τιμή, δυσκολεύεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική η οποία είναι απαραίτητη για το μαγείρεμα, καθώς τα λιπίδια λειτουργούν ως λιπαντικές ουσίες (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008).

#### **3.3.3 Εφαρμογές**

Η εκβολή τροφίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί, σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, για την παραγωγή μιας ευρείας ποικιλίας τροφίμων, όπως σνακ, ζυμαρικά, δημητριακά έτοιμα προς κατανάλωση, βρεφικές τροφές, προϊόντα αρτοποιίας (μπισκότα, κράκερ, κρουτόν, κτλ.), καθώς και προϊόντα ζωοτροφών, και είναι ευέλικτη στην ανάπτυξη νέων προϊόντων (Anton & Luciano, 2007; Riaz, 2000). Χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία υλικών τα οποία έχουν ως βάση το άμυλο, όπως είναι το ρυζάλευρο, το καλαμποκάλευρο, το αλεύρι σίτου, κτλ. Το είδος του άλευρου που χρησιμοποιείται καθορίζει τις ιδιότητες των τελικών διογκωμένων προϊόντων. Τα άλευρα αυτά είναι βασικά συστατικά της καθημερινής διατροφής· η διατροφική τους αξία όμως, δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή (Rampersad et al., 2003). Ως αποτέλεσμα αυτού, οι βιομηχανίες τροφίμων, για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των σύγχρονων καταναλωτών για «λειτουργικά» τρόφιμα υψηλής ποιότητας, στρέφονται προς την παραγωγή εκβαλλόμενων τροφίμων τα οποία περιέχουν συστατικά υψηλής διατροφικής αξίας. Τα κυριότερα συστατικά είναι φρούτα και λαχανικά, όπως φασόλια, μπιζέλια, πούλπα μήλων, σπόροι και πούλπα σταφυλιών, κτλ. (Anton et al., 2009; Karkle et al., 2012; Sarkar et al., 2011; Singh et al., 2007a), τα οποία περιέχουν υψηλά ποσοστά πρωτεϊνών και φυτικών ινών. Η προσθήκη πρωτεϊνών και φυτικών ινών στο μίγμα εκβολής έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Νέα συστατικά και καινοτόμες τεχνολογίες εκβολής συνδυάζονται για την παραγωγή καινοτόμων προϊόντων σνακ που γίνονται αποδεκτά από τους καταναλωτές, οι οποίοι δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στα διατροφικά χαρακτηριστικά, καθώς επίσης, στην ευκολία και την υφή των προϊόντων κατά τη μάσηση (Anton & Luciano, 2007).

### **3.3.4 Συστατικά υλικών εκβολής**

Η διεργασία της εκβολής επηρεάζει τη σταθερότητα των φυτικών ινών, των βιταμινών, των μεταλλικών στοιχείων, των αρωματικών ουσιών, κτλ. και η επίδραση των εφαρμοζόμενων συνθηκών πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στο σχεδιασμό των βέλτιστων διεργασιών (Huber, 2000; Riaz, 2000; Θύμη, 2008).

#### **3.3.4.1 Υδατάνθρακες**

Οι υδατάνθρακες είναι κύριο συστατικό των τροφίμων. Στα τρόφιμα εκβολής λειτουργούν ως συνδετικοί παράγοντες, γαλακτωματοποιητές, για την αύξηση του ιξώδους, κτλ. Επηρεάζουν την υφή και την εμφάνιση των προϊόντων, καθώς επιδρούν στη διόγκωση, στην πυκνότητα, στη γεύση, κτλ. (Singh et al., 2007b).

#### **3.3.4.2 Άμυλο**

Για την παραγωγή προϊόντων εκβολής χρησιμοποιούνται υλικά όπως καλαμποκάλευρο, σιτάλευρο, πίτουρο σιταριού, ρυζάλευρο, άλευρο βρόμης ή μίγματα αυτών. Λιγότερο διαδεδομένα είναι τα άλευρα κινόας, αμάραντου, κεχριού και kamut. Η δομή των προϊόντων εκβολής διαμορφώνεται από το περιεχόμενο άμυλο ή τις πρωτεΐνες. Η πλειοψηφία των «έτοιμων» προς κατανάλωση προϊόντων περιέχουν ως βασικό συστατικό τους το άμυλο. Το άμυλο υφίσταται ισχυρές χημικές μετατροπές κατά τη διάρκεια της εκβολής που οδηγούν στον αποπολυμερισμό του και τη μείωση του ιξώδους του. Το άμυλο είναι ένας πολυσακχαρίτης που αποτελείται από χιλιάδες μόρια γλυκόζης, τα οποία είναι είτε σε ευθεία διάταξη (αμυλόζη) ή σε διακλαδισμένη διάταξη (αμυλοπηκτίνη). Ανάλογα με την αναλογία της αμυλόζης και της αμυλοπηκτίνης αλλά και τις παραμέτρους της διεργασίας, το άμυλο υφίσταται ποικίλες μεταβολές που καταστρέφουν την κρυσταλλική του δομή (μερικώς ή ολικώς). Η ζελατινοποίηση του αμύλου είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες εκβολής και αρχική περιεχόμενη υγρασία, ενώ μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών και το μέγεθος της μήτρας. Κατά τη διάρκεια της εκβολής, εξαιτίας της υψηλής πίεσης και διάτμησης, η αμυλόζη και η αμυλοπηκτίνη διασπώνται σε μόρια μικρότερου μοριακού βάρους (Gray & Chinnaswamy, 1995). Η αμυλοπηκτίνη, που είναι ογκώδες μόριο, λόγω των υψηλών διατμητικών τάσεων σπάει μηχανικά προς δεξτρίνες. Ανάλογα με τις συνθήκες εκβολής προχωρά σε μεγαλύτερο βαθμό η ζελατινοποίηση ή η δεξτρίνοποίηση του αμύλου (Ταούκης, 1997).

#### **3.3.3.3 Φυτικές ίνες**

Οι φυτικές ίνες περιλαμβάνουν πολυσακχαρίτες ή ολιγοσακχαρίτες που βρίσκονται στα εδώδιμα μέρη των φυτών. Οι φυτικές ίνες παρέχουν τα απαραίτητα διατροφικά συστατικά στα προϊόντα εκβολής, επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες ποιότητάς τους και είναι συνδεδεμένες με πολλαπλά οφέλη για την υγεία. Οι κυριότερες πηγές φυτικών ινών που χρησιμοποιούνται στα τρόφιμα περιλαμβάνουν καλαμπόκι, φρούτα, ρύζι, σιτάρι, βρόμη, μπιζέλια, κτλ. Κατά τη διάρκεια της εκβολής είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις στη διαλυτότητα, το μέγεθος και τη φυσικοχημική δομή των ινών (Singh et al., 2007b), επηρεάζοντας σημαντικά τη διατροφική αξία των προϊόντων εκβολής.

#### **3.3.3.4 Κόμμεα ή υδροκολλοειδή**

Τα κόμμεα ή υδροκολλοειδή αυξάνουν το ιξώδες δημιουργώντας κολλοειδή gels. Ως αποτέλεσμα της υδροφιλικότητάς τους μειώνουν την ταχύτητα εξάτμισης, ενισχύουν τις ιδιότητες υφής και δρουν ως

σταθεροποιητές. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κόμμεα/υδροκολλοειδή είναι το αραβικό κόμμι, οι πηκτίνες, το άγαρ, η καραγενάνη, τα αλγινικά, κτλ. (Singh et al., 2007b).

### **3.3.3.5 Σάκχαρα**

Τα σάκχαρα προσφέρουν γεύση, άρωμα, ενέργεια, ενώ ενισχύουν την υφή, τη σταθερότητα και βοηθούν στον έλεγχο της ενεργότητας ύδατος και του χρώματος κατά τη διεργασία της εκβολής. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα σάκχαρα είναι η σουκρόζη, η δεξτρόζη, η φρουκτόζη, το μέλι, κτλ. (Burtea, 2002). Τα σάκχαρα δεσμεύουν το νερό που απαιτείται για τη ζελατινοποίηση του αμύλου, με αποτέλεσμα να προκαλούν την αύξηση του χρόνου και της θερμοκρασίας που απαιτείται για τη ζελατινοποίηση. Η προσθήκη σακχάρων σε υψηλά επίπεδα απαιτεί την επιβολή μεγαλύτερης πίεσης και τη μετατροπή περισσότερης μηχανικής ενέργειας σε θερμική για το απαιτούμενο μαγείρεμα και τη διόγκωση της ζύμης (Singh et al., 2007b).

### **3.3.3.6 Πρωτεΐνες**

Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από σύνθετα οργανικά συστατικά που προκύπτουν από αλληλουχία αμινοξέων. Η διατροφική αξία των πρωτεϊνών εξαρτάται από την ποσότητα, την ευπεπτότητα και τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων αμινοξέων (ισολευκίνη, λευκίνη, λυσίνη, μεθιονίνη, φενυλαλανίνη, τρυπτοφάνη, βαλίνη και θρεονίνη). Κατά τη διάρκεια της εκβολής, η μετουσίωση των πρωτεϊνών προκαλεί τη ρήξη των δεσμών υδρογόνου και των δισουλφιδικών δεσμών που είναι υπεύθυνοι για τη δευτεροταγή και τριτοταγή διαμόρφωση της δομής τους, βελτιώνοντας την ευπεπτότητά τους (Singh et al., 2007b). Σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή αρχική περιεχόμενη υγρασία μπορεί να πραγματοποιηθούν αντιδράσεις υποβάθμισης (Maillard), καθώς τα ελεύθερα σάκχαρα τα οποία παράγονται κατά την εκβολή μπορεί να αντιδράσουν με τα αμινοξέα (Chaughule & Thorat, 2011), επηρεάζοντας τη θρεπτική αξία και την εμφάνιση των προϊόντων εκβολής. Πρώτες ύλες με μικρές ποσότητες σακχάρων είναι λιγότερο επιρρεπείς στην εμφάνιση του φαινομένου.

### **3.3.3.7 Λίπη**

Υλικά τα οποία περιέχουν υψηλά επίπεδα λιπαρών (πάνω από 5-6%) δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διεργασία της εκβολής. Τα λιπαρά προκαλούν μείωση της ροπής, εξαιτίας της αύξησης της ολίσθησης στο εσωτερικό του εκβολέα, με αποτέλεσμα τη μικρότερη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα και τη χαμηλή διόγκωση των τελικών προϊόντων εξαιτίας της μειωμένης πίεσης που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της εκβολής (Riaz, 2000). Η περιεκτικότητα σε λιπαρά του τελικού προϊόντος είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν του αρχικού μίγματος, διότι ένα μέρος τους διαφεύγει από τη μήτρα του εκβολέα ως ελεύθερα έλαια ή ακόμα τα λίπη δημιουργούν σύμπλοκα με την αμυλόζη ή τις πρωτεΐνες (Θύμη, 2008). Η διατροφική και οργανοληπτική αξία των λιπαρών μπορεί να επηρεαστεί κατά τη διάρκεια της εκβολής ως αποτέλεσμα της οξειδωσης, του ισομερισμού ή του πολυμερισμού (Camire et al., 1990). Παρόλα αυτά, εξαιτίας του μικρού χρόνου παραμονής, οι αντιδράσεις αυτές συνήθως δεν πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της εκβολής, αλλά μπορεί να λάβουν χώρα όταν καθυστερήσει η κατανάλωση του αποθηκευμένου προϊόντος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια που δημιουργείται από τους πόρους κατά τη διόγκωση του υλικού, τόσο περισσότερο ευνοείται η οξείδωση.

### **3.3.3.8 Βιταμίνες**

Ανάλογα με τη χημική τους δομή, οι βιταμίνες παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό ευαισθησίας κατά την εκβολή τους. Η μείωση της θερμοκρασίας και της τάσης διάτμησης μέσα στον εκβολέα

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

προστατεύει τις περισσότερες βιταμίνες. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας και της διαμέτρου της μήτρας ευνοεί την καταστροφή τους (Θύμη, 2008). Οι βιταμίνες D και K (Guzman-Tello & Cheftel, 1987) είναι σχετικά σταθερές κατά τη διάρκεια της εκβολής, ενώ οι βιταμίνες A, C και E, τα καροτενοειδή και οι τοκοφερόλες δεν είναι σταθερές παρουσία οξυγόνου και θέρμανσης. Η διατήρηση των βιταμινών μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής και του χρόνου παραμονής του υλικού στον εκβολέα (Kiileit, 1994).

# 4.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Εισαγωγή

Ξήρανση τροφίμων

Εκβολή τροφίμων

Μετρούμενες ιδιότητες

Στατιστική επεξεργασία





## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικός σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη τροφίμων πορώδους δομής και η μελέτη της επίδρασης των ποικίλων δομικών χαρακτηριστικών στις ιδιότητες ποιότητάς τους. Τα προϊόντα που επιλέχθηκαν ανήκουν σε διάφορες κατηγορίες τροφίμων, όπως φρούτα, λαχανικά και δημητριακά (ρύζι, πατάτες, μανιτάρια, φράουλες, μπανάνες, καρότα) που αποτελούν ελληνικά προϊόντα και χαρακτηρίζονται από ομοιογενή μορφή. Τα φρούτα και τα λαχανικά που επιλέχθηκαν είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την καθημερινή διατροφή και περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιταμινών, μετάλλων, φυτικών ινών, υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων. Το ρύζι καταναλώνεται ευρέως από μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού, οι πατάτες αποτελούν χαρακτηριστικό αμυλούχο υλικό, ενώ οι φράουλες και οι μπανάνες αποτελούν φρούτα ευρείας κατανάλωσης, υψηλής περιεκτικότητας σε σάκχαρα τα οποία υφίστανται ξήρανση. Η παραγωγή τροφίμων διαφορετικών δομών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας δύο βασικές διεργασίες, την ξήρανση και την εκβολή, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή ποικίλων προϊόντων. Ανάλογα με τις συνθήκες και τις μεθόδους παραγωγής, οι ιδιότητες των προϊόντων μεταβάλλονται σημαντικά και μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν. Όσον αφορά στην ξήρανση, μελετήθηκαν τρεις διεργασίες, η ξήρανση υπό κατάψυξη, η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση σε ρεύμα αέρα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ως προκατεργασία η ωσμωτική αφυδάτωση. Όσον αφορά στην εκβολή, μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας εκβολής, του ρυθμού περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα, της αναλογίας των πρώτων υλών και της υγρασίας της τροφοδοσίας στις ιδιότητες προϊόντων εκβολής ρυζάλευρου/καρότου, που παρήχθησαν σε εκβολέα διπλού κοχλία.

Οι ιδιότητες που επιλέχθηκαν να μελετηθούν είναι οι δομικές (πραγματική και φαινόμενη πυκνότητα, πορώδες, κατανομή πόρων), οι μηχανικές (τάση θραύσης και παραμόρφωση θραύσης, μέτρο ελαστικότητας), οι θερμικές (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης), οι ρεολογικές (ιξώδες, μέτρο αποθήκευσης, μέτρο απωλειών, παράγοντας απωλειών) και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Μελετήθηκε, επίσης, η επίδραση της δομής στην αποδέσμευση ορισμένων συστατικών σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο, ενώ αναπτύχθηκαν ή/ και εφαρμόστηκαν μαθηματικά πρότυπα βάσει των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί συσχέτιση των συνθηκών παραγωγής των προϊόντων με τις ιδιοτήτές τους, καθώς και συσχέτιση των ιδιοτήτων μεταξύ τους.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά, οι μέθοδοι, οι συνθήκες επεξεργασίας, καθώς και οι ιδιότητες που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Η επιλογή των υλικών και των συνθηκών επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε με βάση εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και διεξάγοντας αρχικά προκαταρκτικά πειράματα.

## 4.2 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

### 4.2.1 Πρώτες ύλες – Προετοιμασία υλικών

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ξήρανσης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

- Ρύζι (parboiled)

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

- Πατάτες
- Μανιτάρια (Portobello)
- Φράουλες
- Μπανάνες

Το ρύζι αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό δημητριακό και θεωρείται το βασικότερο τρόφιμο για περισσότερο από το μισό του παγκόσμιου πληθυσμού. Περισσότεροι από 550 εκατομμύρια τόνοι ρυζιού παράγονται ετησίως σε όλο τον κόσμο. Το ρύζι χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή επεξεργασμένων τροφίμων, όπως είναι οι πουτίγκες, οι παιδικές τροφές και τα δημητριακά. Για να παραχθεί στιγμιαίο ρύζι, το ακατέργαστο ρύζι μαγειρεύεται ώστε να ζελατινοποιηθεί το άμυλο και στη συνέχεια ξηραίνεται (Rewthong et al., 2011). Το στιγμιαίο ρύζι για να ικανοποιήσει τις προσδοκίες των καταναλωτών θα πρέπει να παρουσιάζει παρόμοια υφή και γεύση με το συμβατικά μαγειρεμένο ρύζι. Το ημιβρασμένο ρύζι (parboiled) είναι ιδιαίτερα δημοφιλές σε ορισμένες χώρες. Η διαδικασία βρασμού είναι μια υδροθερμική επεξεργασία που περιλαμβάνει μούλιασμα, εμβάπτιση σε ατμό και ξήρανση, και οδηγεί στη ζελατινοποίηση του αμύλου (Soroponnonnarit et al., 2006). Η υφή του ρυζιού είναι στενά συνδεδεμένη με τις ιδιότητες ζελατινοποίησης του αμύλου και την περιεκτικότητα σε αμυλόζη (Iturriaga et al., 2004).

Επίσης, η Ελλάδα παράγει ετησίως περίπου 7,5 εκατομμύρια τόνους φρούτων και λαχανικών, όπου τα φρούτα αντιπροσωπεύουν το 9,7% και τα λαχανικά το 6,7% της συνολικής ευρωπαϊκής παραγωγής (Ogeeka, 2000-2006), και έχει σημαντική εξαγωγική δραστηριότητα στην Ευρώπη. Επομένως, η ξήρανσή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διατήρηση και τη μεταφορά τους. Οι πατάτες αποτελούν το αντιπροσωπευτικότερο αμυλούχο λαχανικό, το οποίο χαρακτηρίζεται από ευρεία κατανάλωση και αποτελεί βασικό συστατικό της διατροφής, ενώ οι μπανάνες και οι φράουλες είναι φρούτα υψηλής περιεκτικότητας σε σάκχαρα, τα οποία υφίστανται ξήρανση στη βιομηχανία. Επίσης, τα μανιτάρια συμβάλλουν στην υγεία, καθώς περιέχουν μικρές ποσότητες λίπους και σακχάρων, αλλά σημαντικές ποσότητες φυτικών ινών, μεταλλικών αλάτων, ιχνοστοιχείων και βιταμινών.

### **4.2.1.1 Προετοιμασία ρυζιού**

Ως πρώτη ύλη επιλέχθηκε ημιβρασμένο ρύζι (parboiled) το οποίο διατέθηκε από την Agrino - EV.GE. PISTIOLAS S.A. (Αργίριο, Ελλάδα). Πριν την επεξεργασία το ρύζι φυλάχθηκε σε θερμοκρασία δωματίου και σκοτεινές συνθήκες. Ποσότητα ρυζιού έβρασε σε περίσσεια απιονισμένου νερού στους 100°C για 6 διαφορετικά χρονικά διαστήματα, που κυμαίνονται από 4 έως 24 min (4, 8, 12, 16, 20, 24 min).

### **4.2.1.2 Προετοιμασία γεωργικών προϊόντων**

Τα φρέσκα προϊόντα προμηθεύτηκαν από την τοπική αγορά. Η αρχική περιεχόμενη υγρασία των προϊόντων προσδιορίστηκε σε φούρνο κενού, στους 70°C μέχρι σταθερού βάρους (Πίνακας 4. 1):

**Πίνακας 4. 1. Περιεχόμενη υγρασία των φρέσκων προϊόντων.**

| Υλικό    | Περιεχόμενη υγρασία (% υγρή βάση (υ.β.)) |
|----------|--|
| Πατάτα   | 83-85                                    |
| Μανιτάρι | 93-94                                    |
| Φράουλα  | 92-93                                    |
| Μπανάνα  | 73-76                                    |

Οι πατάτες ξεφλουδίστηκαν, ξεπλύθηκαν και ζεματίστηκαν σε ζεστό νερό για 3 min. Η διαδικασία αυτή προκαλεί την αναστολή των ενζυμικών αντιδράσεων, την απομάκρυνση του αέρα που είναι παγιδευμένος στα κύτταρα, την ελαχιστοποίηση της ανάπτυξης μικροοργανισμών (Krokida et al., 2000d) και την επιβράδυνση διεργασιών όπως καταστροφή του χρώματος, του αρώματος, της γεύσης και της θρεπτικής αξίας των υλικών κατά την ξήρανση. Τα υπόλοιπα υλικά ξεπλύθηκαν, ενώ οι μπανάνες ξεφλουδίστηκαν.

Στη συνέχεια, όλα τα υλικά εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα διθειώδους νατρίου (2% w/w NaHSO<sub>3</sub>) για 5 min. Η εμβάπτιση σε διθειώδες νάτριο επιβραδύνει την αμαύρωση (Van Arsdel & Copley, 1964).

Οι μπανάνες κόπηκαν σε κυλινδρικές φέτες διαμέτρου 15 mm και πάχους 8 mm, ταμανιτάρια και οι φράουλες σε τεμάχια διαστάσεων 20x20x10 mm, ενώ οι πατάτες κόπηκαν είτε σε τεμάχια διαστάσεων 20x20x10 mm, είτε σε κυλινδρικές φέτες διαμέτρου 15 mm και πάχους 5 mm, είτε σε ορθογώνιες λωρίδες διαστάσεων 50x10x2 mm.

#### 4.2.2 Ξήρανση υπό κατάψυξη

Τα δείγματα καταψύχθηκαν στους -30°C για 72 h σε καταψύκτη (SANYO, MDF-236, Osaka, Japan) και στη συνέχεια, εμβαπτίστηκαν σε υγρό άζωτο για 1 h. Έπειτα, τοποθετήθηκαν σε εργαστηριακή συσκευή ξήρανσης υπό κατάψυξη (Leybold-Heraeus GT 2A, Köln, Germany) (Εικόνα 4. 1) για 24 h. Η ξήρανση πραγματοποιήθηκε υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης, που κυμαίνονται από 0,04 έως 1,50 mbar (4 με 150 Pa). Πραγματοποιήθηκαν δύο επαναλήψεις για κάθε συνθήκη ξήρανσης. Τα αφυδατωμένα προϊόντα συσκευάστηκαν και αποθηκεύτηκαν στους -18°C μέχρι την περαιτέρω επεξεργασία τους.



Εικόνα 4. 1. Συσκευή ξήρανσης υπό κατάψυξη (Leybold-Heraeus GT 2A).

#### 4.2.3 Προκατεργασία με ωσμωτική αφυδάτωση

Δείγματα πατάτας και μπανάνας αφυδατώθηκαν σε ωσμωτικά διαλύματα. Ως ωσμωτικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν χλωριούχο νάτριο καθαρότητας 99,5% (Lachner, M=58,44) και D(+)-σουκρόζη καθαρότητας 98% (Fisher Scientific, M=342,3). Οι πατάτες εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου συγκέντρωσης 10% (w/w) και οι μπανάνες σε διάλυμα σουκρόζης συγκέντρωσης 40% (w/w) για 2 h, στους 40°C. Τα ωσμωτικά διαλύματα παρήχθησαν αναμιγνύοντας την κατάλληλη ποσότητα χλωριούχου νατρίου ή σουκρόζης με απιονισμένο νερό. Η αναλογία βάρους των υλικών προς το διάλυμα ήταν 1:5. Μετά το πέρας της ωσμωτικής αφυδάτωσης, τα δείγματα σκουπίστηκαν σε διηθητικό χαρτί για να απομακρυνθεί η περίσσεια διαλύματος και κάποια δείγματα αφυδατώθηκαν με τρεις διαφορετικές μεθόδους ξήρανσης.

### 4.2.3.1 Ξήρανση σε ρεύμα αέρα

Η ξήρανση σε ρεύμα αέρα πραγματοποιήθηκε σε ξηραντήρα ρεύματος αέρα με ράφια, προημιβιομηχανικής κλίμακας, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο «Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών» (Εικόνα 4. 2).



Εικόνα 4. 2. Συσκευή ξήρανσης σε ρεύμα αέρα.

Ο ξηραντήρας αποτελείται από ένα τούνελ αέρα με τετραγωνική διατομή  $25 \times 25 \text{ cm}^2$ , μήκος 4 m και ύψος 2,5 m. Στον ξηραντήρα ρυθμίζεται η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα. Ο έλεγχος της κατάστασης του αέρα ξήρανσης και η καταγραφή των πειραματικών δεδομένων γίνονται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η ξήρανση πραγματοποιήθηκε στους  $70 \pm 2^\circ\text{C}$ , σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, και η ταχύτητα του αέρα ήταν 2 m/s. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στα ράφια κάθετα προς τη ροή του αέρα.

### 4.2.3.2 Ξήρανση υπό κενό

Η ξήρανση υπό κενό πραγματοποιήθηκε σε φούρνο κενού (Sanyo Gallenkamp PLC, Leicester, England), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με αντλία κενού (Εικόνα 4. 3), σε θερμοκρασία  $70 \pm 0,2^\circ\text{C}$  και σε πίεση  $48 \pm 3 \text{ mbar}$ .



Εικόνα 4. 3. Φούρνος κενού (Sanyo Gallenkamp PLC).

### 4.2.3.3 Ξήρανση υπό κατάψυξη

Η ξήρανση υπό κατάψυξη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιεγράφηκε στην παράγραφο 4.2.2. Τα ωσμωτικά αφυδατωμένα δείγματα καταψύχθηκαν για 72 h και αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη για 24 h. Η ξήρανση πραγματοποιήθηκε υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης, που κυμαίνονται από 0,05 έως 1,00 mbar.

Πραγματοποιήθηκαν δύο επαναλήψεις για κάθε συνθήκη ξήρανσης. Τα αφυδατωμένα προϊόντα συσκευάστηκαν και αποθηκεύτηκαν στους  $-18^{\circ}\text{C}$  μέχρι την περαιτέρω επεξεργασία τους.

## 4.3 ΕΚΒΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

### 4.3.1 Πρώτες ύλες

Για την παραγωγή των προϊόντων εκβολής χρησιμοποιήθηκε ως βάση το άλευρο ρυζιού, το οποίο αναμίχθηκε με ξηρή σκόνη καρότου. Το ρυζάλευρο διατέθηκε από την Agrino - EV.GE. PISTIOLAS S.A. (Αργίριο, Ελλάδα) ενώ τα φρέσκα καρότα προμηθεύτηκαν από την τοπική αγορά.

Το ρυζάλευρο χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ποικίλων διογκωμένων προϊόντων. Χαρακτηρίζεται από ένα ελκυστικά άσπρο χρώμα και απαλό άρωμα, είναι υποαλλεργικό και εύπεπτο (Kadan et al., 2003) και αποτελεί τροφή κατάλληλη για μωρά και ηλικιωμένους.

Τα καρότα είναι σημαντικές πηγές υδατανθράκων και μετάλλων (Fe, P, Ca, K, Na, Mg), αντιοξειδωτικών και βιταμινών, σακχάρων και φυτικών ινών, και έχουν σημαντικές αντικαρκινικές και άλλες ιδιότητες. Είναι πλούσια σε καροτενοειδή, τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την ανθρώπινη υγεία (Sharma et al., 2012). Η β-καροτίνη όταν λαμβάνεται από τον ανθρώπινο οργανισμό μετατρέπεται σε βιταμίνη Α. Η προβιταμίνη Α παρουσιάζει ευεργετικές επιδράσεις στην υγεία, όπως αντικαρκινική δράση, δράση κατά του έλκους, αντιγηραντικές και αντιοξειδωτικές ιδιότητες, καθώς και αυξημένη ανοσολογική απόκριση (Sant'Ana et al., 1998).

### 4.3.2 Προετοιμασία δειγμάτων

Τα καρότα ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό, ξεφλουδίστηκαν, τεμαχίστηκαν σε κυλινδρικές φέτες και καταψύχθηκαν στους  $-30^{\circ}\text{C}$  για 72 h. Στη συνέχεια, εμβαπτίστηκαν σε υγρό άζωτο και αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη για 48 h υπό 0,06 mbar απόλυτη πίεση. Τα αφυδατωμένα προϊόντα λειοτριβήθηκαν, συσκευάστηκαν σε αδιαφανείς σακούλες και αποθηκεύτηκαν στους  $-18^{\circ}\text{C}$  μέχρι την περαιτέρω επεξεργασία τους.



Εικόνα 4. 4. Λυοφιλωμένα δείγματα καρότου.

Για την προετοιμασία των μιγμάτων εκβολής, η ξηρή σκόνη καρότου και το ρυζάλευρο ισορρόπησαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η περιεχόμενη υγρασία τους προσδιορίστηκε σε φούρνο κενού στους  $70^{\circ}\text{C}$  μέχρι σταθερού βάρους. Η περιεχόμενη υγρασία του ρυζάλευρου ήταν 11% (υ.β.) και της σκόνης καρότου 3% (υ.β.). Η σκόνη καρότου και το ρυζάλευρο αναμίχθηκαν σε τρεις διαφορετικές προκαθορισμένες αναλογίες (ποσοστό καρότου: 5%, 7,5% και 10%). Συγκεκριμένη ποσότητα νερού προστέθηκε στα μίγματα έτσι ώστε η τελική περιεχόμενη υγρασία τους να είναι ίση με τις επιθυμητές τιμές. Η τελική υγρασία των μιγμάτων κυμάνθηκε σε τρία επίπεδα: 14%, 17% και 20% υ.β. Μετά την

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

προσθήκη της απαιτούμενης ποσότητας νερού, τα συστατικά αναμίχθηκαν με τη βοήθεια εργαστηριακού μίξερ και αποθηκεύτηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες για 24 h τουλάχιστον, έτσι ώστε να εξισορροπήσουν και να επιτευχθεί ομοιομορφή υγρασία σε όλη τη μάζα του μίγματος. Στη συνέχεια, η υγρασία των μιγμάτων προσδιορίστηκε σε φούρνο κενού. Εάν η υγρασία διέφερε από τις καθορισμένες τιμές, προστίθεντο είτε η κατάλληλη ποσότητα νερού είτε η κατάλληλη αναλογία μίγματος για να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή.

### 4.3.3 Εκβολή

#### 4.3.3.1 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του εκβολέα

Η παραγωγή των προϊόντων εκβολής πραγματοποιήθηκε σε εκβολέα διπλού κοχλίου συμπεριστροφής (Prism Eurolab, model KX-16HC, Staffordshire, UK) ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών (Εικόνα 4. 5).



Εικόνα 4. 5. Εκβολέας διπλού κοχλίου (Prism Eurolab, model KX-16HC).

Ο εκβολέας αποτελείται από το θάλαμο που περιέχει τους δύο κοχλίες, από τον κινητήρα και το κιβώτιο ταχυτήτων για τη ρύθμιση των στροφών των κοχλιών, από τις ζώνες ρύθμισης της θερμοκρασίας, την οθόνη αφής για τη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας (θερμοκρασία, ταχύτητα περιστροφής κοχλιών, κτλ.), το στοιχείο μέτρησης της πίεσης στην έξοδό του και κατάλληλη μήτρα για τη διαμόρφωση των τελικών προϊόντων.

Οι κοχλίες του εκβολέα έχουν μήκος 40 cm, εξωτερική διάμετρο 16 mm, εσωτερική διάμετρο 11 mm (Εικόνα 4. 6) και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής τους είναι ίση με 500 στροφές/λεπτό (rpm). Οι κοχλίες φέρουν ελικοειδή στοιχεία για την ώθηση του υλικού προς την έξοδο του εκβολέα και στοιχεία άλεσης τα οποία επιτρέπουν την ανάμιξη, τη συμπίεση, τη θέρμανση και τη διάτμηση του υλικού εκβολής.



Εικόνα 4. 6. Θάλαμος εκβολέα διπλού κοχλίου, ο οποίος περιέχει τους κοχλίες (Prism Eurolab, model KX-16HC).

Ο εκβολέας διαθέτει έξι ανεξάρτητες ζώνες ρύθμισης της θερμοκρασίας, οι οποίες θερμαίνονται μέσω θερμαντικών στοιχείων. Για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ως ψυκτικό νερό βρύσης, παροχής 5 L/min. Η θερμοκρασία σε κάθε ζώνη μπορεί να κυμαίνεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος έως τους 300°C. Η παραγωγή των προϊόντων πραγματοποιείται μέσω κυλινδρικής μήτρας, διαμέτρου 3 mm και μήκους 17,5 mm (Εικόνα 4. 7).



Εικόνα 4. 7. Μήτρα εκβολέα.

#### 4.3.3.2 Συνθήκες λειτουργίας εκβολέα

Αρχικά ο εκβολέας προθερμαίνεται. Η θερμοκρασία της τελευταίας ζώνης επιλέχθηκε σε τρία επίπεδα: 140, 160 και 180°C. Η θερμοκρασία στις επιμέρους ζώνες του εκβολέα ρυθμίστηκε γραμμικά από τους 25°C έως την επιθυμητή τελική θερμοκρασία και δίνεται στον Πίνακα 4. 2.

Πίνακας 4. 2. Κατανομή θερμοκρασιών (°C) κατά μήκος του εκβολέα.

| Ζώνη 6 | Ζώνη 5 | Ζώνη 4 | Ζώνη 3 | Ζώνη 2 | Ζώνη 1 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 140    | 117    | 94     | 71     | 48     | 25     |
| 160    | 133    | 106    | 79     | 52     | 25     |
| 180    | 149    | 118    | 87     | 56     | 25     |

Όταν σταθεροποιηθούν οι θερμοκρασίες στις επιμέρους ζώνες εισάγεται τυφλό δείγμα ρυζάλειου υψηλής υγρασίας μέχρι να επικρατήσουν μόνιμες συνθήκες. Στη συνέχεια, εισάγεται στον εκβολέα το μίγμα ρυζάλειου/καρότου. Μεταξύ των διαδοχικών δειγμάτων, εισάγεται τυφλό δείγμα για την επίτευξη σταθερών συνθηκών. Ο εκβολέας λειτούργησε σε τρία επίπεδα ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (150, 200 και 250 rpm), ενώ κατά τη λειτουργία του εκβολέα καταγράφηκε και η ροπή των κοχλιών. Τα παραχθέντα προϊόντα εκβολής διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι να

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

ψυχθούν και στη συνέχεια, συσκευάστηκαν σε πολυστρωματικές σακούλες μέχρι την περαιτέρω επεξεργασία τους.

### Πειραματικές συνθήκες εκβολής

Οι ανεξάρτητες παράμετροι λειτουργίας που μελετήθηκαν για την παραγωγή των προϊόντων εκβολής περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία εκβολής, την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, την αρχική περιεχόμενη υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας και την αναλογία σκόνης καρότου/ρυζάλευρου στο αρχικό μίγμα. Οι τιμές των συνθηκών εκβολής και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα. Κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή μεταβλήθηκε σε τρία επίπεδα, τα οποία κωδικοποιούνται με τρεις αριθμούς: -1, 0 και 1.

**Πίνακας 4. 3. Συνθήκες εκβολής και χαρακτηριστικά των πρώτων υλών.**

| Παράμετρος                                 | Τιμές/Κωδικοποίηση |     |     | Κεντρικές τιμές |
|--|--------------------|-----|-----|-----------------|
|  | -1                 | 0   | 1   |                 |
| Υγρασία μίγματος τροφοδοσίας, $X$ (% υ.β.) | 14                 | 17  | 20  | 17              |
| Συγκέντρωση καρότου, $C$ (%)               | 5                  | 7,5 | 10  | 7,5             |
| Θερμοκρασία εκβολής, $T$ (°C)              | 140                | 160 | 180 | 160             |
| Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών, $N$ (rpm)    | 150                | 200 | 250 | 200             |

Προς διευκόλυνση, τα δείγματα κωδικοποιήθηκαν ως προς τις τιμές των τεσσάρων παραμέτρων και η κωδικοποίησή τους φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα. Ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στην περιεχόμενη υγρασία, ο δεύτερος στη συγκέντρωση του καρότου, ο τρίτος στη θερμοκρασία εκβολής και ο τελευταίος στην ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών. Για την παραγωγή των προϊόντων εκβολής χρησιμοποιήθηκε ο πειραματικός σχεδιασμός κεντρικού σημείου (Central Composite Design (CCD)) (Πίνακας 4. 4) και πραγματοποιήθηκαν δύο επαναλήψεις για κάθε ανεξάρτητο πείραμα.



Πίνακας 4. 4. Πειραματικός σχεδιασμός.

| Κωδικός  | Υγρασία<br>μίγματος<br>τροφοδοσίας,<br>X (% υ.β.) | Συγκέντρωση<br>καρότου,<br>C (%) | Θερμοκρασία<br>εκβολής,<br>T (°C) | Ταχύτητα<br>περιστροφής<br>κοχλιών, N (rpm) |
|----------|---|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 11-1-1   | 20  | 10                               | 140                               | 150   |
| 11-11    | 20  | 10                               | 140                               | 250   |
| 1-1-11   | 20  | 5                                | 140                               | 250   |
| 1-1-1-1  | 20  | 5                                | 140                               | 150   |
| 00-10    | 17  | 7,5                              | 140                               | 200   |
| -11-1-1  | 14  | 10                               | 140                               | 150   |
| -11-11   | 14  | 10                               | 140                               | 250   |
| -1-1-11  | 14  | 5                                | 140                               | 250   |
| -1-1-1-1 | 14  | 5                                | 140                               | 150   |
| 1000     | 20  | 7,5                              | 160                               | 200   |
| 0100     | 17  | 10                               | 160                               | 200   |
| 0000     | 17  | 7,5                              | 160                               | 200   |
| 0000     | 17  | 7,5                              | 160                               | 200   |
| 0001     | 17  | 7,5                              | 160                               | 250   |
| 000-1    | 17  | 7,5                              | 160                               | 150   |
| 0-100    | 17  | 5                                | 160                               | 200   |
| -1000    | 14  | 7,5                              | 160                               | 200   |
| 1111     | 20  | 10                               | 180                               | 250   |
| 111-1    | 20  | 10                               | 180                               | 150   |
| 1-11-1   | 20  | 5                                | 180                               | 150   |
| 1-111    | 20  | 5                                | 180                               | 250   |
| 0010     | 17  | 7,5                              | 180                               | 200   |
| -1111    | 14  | 10                               | 180                               | 250   |
| -111-1   | 14  | 10                               | 180                               | 150   |
| -1-11-1  | 14  | 5                                | 180                               | 150   |
| -1-111   | 14  | 5                                | 180                               | 250   |

## 4.4 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν στα παραχθέντα προϊόντα εκβολής και στα αφυδατωμένα προϊόντα παρουσιάζονται στη συνέχεια:

### 4.4.1 Αφυδατωμένα προϊόντα

Στα αφυδατωμένα προϊόντα μελετήθηκαν οι παρακάτω ιδιότητες:

- ✚ Δομικές ιδιότητες (πυκνότητα, πορώδες, κατανομή πόρων)
- ✚ Μηχανικές ιδιότητες (τάση θραύσης, παραμόρφωση θραύσης, μέτρο ελαστικότητας)
- ✚ Προσρόφηση ύδατος
- ✚ Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης)

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

- ✚ Ρεολογικές ιδιότητες (ιξώδες, μέτρο αποθήκευσης, μέτρο απωλειών, παράγοντας απωλειών)
- ✚ Αποδέσμευση άλατος και σακχάρων σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο

### 4.4.2 Προϊόντα εκβολής

Στα παραχθέντα προϊόντα εκβολής μελετήθηκαν οι εξής ιδιότητες:

- ✚ Δομικές ιδιότητες (πυκνότητα, πορώδες, συντελεστής διόγκωσης, κατανομή πόρων)
- ✚ Μηχανικές ιδιότητες (τάση θραύσης, παραμόρφωση θραύσης, μέτρο ελαστικότητας)
- ✚ Προσρόφηση ύδατος
- ✚ Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης)
- ✚ Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (γεύση, εμφάνιση, υφή)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα παραχθέντα αφυδατωμένα προϊόντα και στα προϊόντα εκβολής.

Πίνακας 4. 5. Συνολικός αριθμός πειραματικών μετρήσεων για τα αφυδατωμένα προϊόντα.

| Υλικά<br>Μέθοδοι<br>επεξεργασίας | Ρύζι   |  |  | Πατάτα / Μανιτάρι / Φράουλα              |  |  |  | Πατάτα / Μπανάνα                                  |  |   |
|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|---|--|---|
|                                  | Δομικές  | Θερμικές   | Ιδιότητες<br>ρόφησης                             | Δομικές                                  | Θερμικές                                 | Ιδιότητες<br>ρόφησης                     | Ιδιότητες<br>υφής                        | Δομικές   | Αποδέσμευση<br>άλατος και<br>σακχάρων σε<br>γαστρικό υγρό<br>και σάλιο | Ρεολο-<br>γικές                                   |
| <b>Ξήρανση υπό κατάψυξη</b>      | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X   | X  | X   |
| Ωσμωτική αφυδάτωση (t1)          | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | X   | X  | X   |
| Πίεση ξήρανσης (P)               | 3P x 6t x 3<br>εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | 3P x 2t x 3<br>εξαρτ. επαν.<br>x 2 ανεξ.<br>επαν | 3P x 2t x 2<br>εξαρτ. επαν.<br>x 2 ανεξ.<br>επαν | 9P x 3 εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | 3P x 3 εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | 3P x 2 εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | 9P x 7 εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | 2P x 1t1 x 3<br>εξαρτ. επαν.<br>x 2 ανεξ.<br>επαν | 2P x 1t1 x 3<br>εξαρτ. επαν. x 2<br>ανεξ. επαν                         | 1P x 1t1 x<br>2 εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν |
| Χρόνος βρασμού (t)               | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -   | -  | -   |
| <b>Ξήρανση υπό κενό</b>          | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | X   | -  | X   |
| Ωσμωτική αφυδάτωση (t1)          | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | X   | -  | X   |
|                                  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | 1t1 x 3<br>εξαρτ. επαν.<br>x 2 ανεξ.<br>επαν      | -  | 1t1 x 2<br>εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν      |
| <b>Ξήρανση σε ρεύμα αέρα</b>     | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | X   | X  | X   |
| Ωσμωτική αφυδάτωση (t1)          | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | X   | X  | X   |
|                                  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | 1t1 x 3<br>εξαρτ. επαν.<br>x 2 ανεξ.<br>επαν      | 1t1 x 3 εξαρτ.<br>επαν. x 2 ανεξ.<br>επαν.                             | 1t1 x 2<br>εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν      |

\*εξαρτ. επαν.: εξαρτημένες επαναλήψεις, ανεξ. επαν.: ανεξάρτητες επαναλήψεις

Πίνακας 4. 6. Συνολικός αριθμός πειραματικών μετρήσεων για τα προϊόντα εκβολής.

| Μέθοδος                          | Ρυζάλευρο / Καρότο                 |  |                                     |                                |  |
|----------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------|--|
| Εκβολή                           | Δομικές                            | Ιδιότητες υφής                         | Ιδιότητες ρόφησης                   | Θερμικές ιδιότητες             | Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά           |
| Υγρασία τροφοδοσίας (X)          |                                    |  | CCD**                               |                                | CCD**                                  |
| Συγκέντρωση καρότου (C)          | CCD**                              | CCD**                                  | (9                                  | CCD**                          | CCD**                                  |
| Θερμοκρασία εκβολής (T)          | (26 πειράματα)                     | (26 πειράματα)                         | πειράματα) x                        | (9 πειράματα) x 3              | (26 πειράματα)                         |
| Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών (N) | x 3 εξαρτ. επαν.<br>x 2 ανεξ. επαν | x 10 εξαρτ.<br>επαν. x 2 ανεξ.<br>επαν | 2 εξαρτ.<br>επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | εξαρτ. επαν. x 2<br>ανεξ. επαν | x 10 εξαρτ.<br>επαν. x 2 ανεξ.<br>επαν |

\*εξαρτ. επαν.: εξαρτημένες επαναλήψεις, ανεξ. επαν.: ανεξάρτητες επαναλήψεις

\*\*CCD: Central Composite Design (Σχεδιασμός κεντρικού σημείου)

#### 4.5 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στα πειραματικά δεδομένα αναπτύχθηκαν ή εφαρμόστηκαν κατάλληλα μαθηματικά πρότυπα, όπως περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες. Η εκτίμηση των παραμέτρων των προτύπων πραγματοποιήθηκε με μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης (Maroulis et al., 1988). Η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στις ιδιότητες των προϊόντων εξετάστηκε χρησιμοποιώντας επίσης, το λογισμικό Statistica (Statistica Release 7, Statsoft Inc, Tulsa, OK, USA). Οι διαφορές θεωρήθηκαν σημαντικές όταν  $p < 0,05$ . Για την ανάλυση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των υλικών χρησιμοποιήθηκε στατιστική ανάλυση διασποράς (ANOVA) και έλεγχοι με την τεχνική του «Tukey».

# 5.

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Αντικείμενο και στόχοι

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πειραματική διαδικασία

Μαθηματικό πρότυπο

Αποτελέσματα - Συζήτηση αποτελεσμάτων

Συμπεράσματα



## 5.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Πολλά τρόφιμα, όπως είναι τα δημητριακά, το ψωμί, τα μπισκότα, τα αφυδατωμένα φρούτα και λαχανικά και τα προϊόντα εκβολής αποτελούνται από πορώδη δομή. Η δομή, σε μικροσκοπικό ή μακροσκοπικό επίπεδο, αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο ποιότητας των τροφίμων, η οποία επηρεάζει την εμφάνιση και την υφή τους και χαρακτηρίζει πλήθος άλλων ιδιοτήτων. Η γνώση σχετικά με τη διαδικασία σχηματισμού του πορώδους κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τροφίμων είναι απαραίτητη για το βέλτιστο σχεδιασμό των διαφόρων διεργασιών (Koc et al., 2008; Rahman, 2001).

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η δομή των τροφίμων αναφέρεται στα κύτταρα των τροφίμων. Καθώς τα διάφορα τρόφιμα υποβάλλονται σε ποικίλες διεργασίες, η μικροδομή τους μπορεί να διατηρηθεί ή να καταστραφεί. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, η δομή των τροφίμων χαρακτηρίζεται από πολλές ιδιότητες, όπως είναι το πορώδες, η φαινόμενη και η πραγματική πυκνότητα, το μέσο μέγεθος πόρων και η κατανομή μεγέθους πόρων (Michailidis et al., 2008b). Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, επιπλέον παράμετρο αποτελεί και ο συντελεστής διόγκωσης. Η διόγκωση δίνει στα προϊόντα εκβολής τη χαρακτηριστική μορφή των αφράτων σνακ προϊόντων και σχετίζεται με άλλες σημαντικές ιδιότητες όπως είναι η ενυδάτωση, η τραγανότητα, η ευθρυπτότητα, κτλ. (Chen & Yeh, 2001; Jyothi et al., 2009).

Οι διάφορες μέθοδοι, όπως είναι η ξήρανση και η εκβολή, και οι συνθήκες επεξεργασίας επηρεάζουν σημαντικά τη δημιουργία πορώδους δομής ή την κατάρρευση της δομής των προϊόντων. Η κατάρρευση της δομής και ο σχηματισμός πόρων επηρεάζεται από ποικίλους μηχανισμούς, όπως είναι η επιφανειακή τάση, η πλαστικοποίηση, ο μηχανισμός μεταφοράς υγρασίας και οι βαρυτικές επιδράσεις. Ο ρυθμός με τον οποίο καταρρέει ένα τρόφιμο εξαρτάται επίσης, από το ιξώδες του. Όσο υψηλότερο είναι το ιξώδες ενός υλικού τόσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός κατάρρευσης (Michailidis et al., 2008b; Rahman & Perera, 1999).

Στόχο του συγκεκριμένου κεφαλαίου αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των μεθόδων και συνθηκών ξήρανσης και εκβολής στις ιδιότητες δομής των παραχθέντων τελικών προϊόντων. Η προτυποποίηση των πειραματικών δεδομένων με τη χρήση απλών μαθηματικών προτύπων, τα οποία περιέχουν σταθερές με φυσική σημασία, αποτέλεσε έναν επιπλέον στόχο προκειμένου να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη των δομικών ιδιοτήτων των προϊόντων από τις συνθήκες επεξεργασίας.

## 5.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 5.2.1 Ξήρανση τροφίμων

Η μηχανική τροφίμων έχει επιτυχημένα οδηγήσει στην παραγωγή υγιεινών, τυποποιημένων τροφίμων τα οποία μπορούν να καταναλωθούν εύκολα. Η βελτίωση της ποιότητας των υφιστάμενων τροφίμων και η ανάπτυξη νέων προϊόντων με σκοπό την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων των καταναλωτών βασίζεται τα τελευταία χρόνια στη μελέτη σε μικροσκοπικό επίπεδο (Aguilera, 2005). Η παραγωγή αφυδατωμένων τροφίμων (φρούτα, λαχανικά, δημητριακά) βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία τροφίμων. Οι διάφορες μέθοδοι ξήρανσης και οι εφαρμοζόμενες συνθήκες επεξεργασίας επηρεάζουν την ποιότητα των προϊόντων και οδηγούν στην παραγωγή

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

τροφίμων διαφορετικών δομών. Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση διαφόρων παραμέτρων των διεργασιών ξήρανσης στα δομικά χαρακτηριστικά διαφόρων κατηγοριών τροφίμων. Η δομή των προϊόντων απεικονίζεται με μικροσκοπία σε συνδυασμό με ανάλυση εικόνας, ενώ τα χαρακτηριστικά των πόρων μελετώνται με πυκνομετρία, ποροσιμετρία υδραργύρου και προσρόφηση αερίων (Kalab et al., 1995; Karathanos et al., 1996b). Ενδεικτικά παραδείγματα αναφέρονται στη συνέχεια.

Οι Krokida et al. (1998a), Karathanos et al. (1996a) και Rahman & Sablani (2003) μελέτησαν την επίδραση των συνθηκών ξήρανσης υπό κατάψυξη στις δομικές ιδιότητες ορισμένων γεωργικών προϊόντων και ψαριών και αναφέρουν ότι το υψηλότερο πορώδες παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την υπολογιζόμενη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ). Η συρρίκνωση ήταν σημαντικά πιο έντονη όταν η ξήρανση πραγματοποιήθηκε σε μειωμένο κενό. Οι Rahman & Sablani (2003) παρατήρησαν επίσης, ότι το ανοιχτό πορώδες δειγμάτων ψαριών ήταν αρκετά μικρότερο από το συνολικό όταν τα ψάρια αφυδατώθηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ ήταν περίπου ίσο όταν αφυδατώθηκαν σε υψηλές. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στη μεγαλύτερη δημιουργία ρωγμών στην επιφάνεια στην υψηλότερη θερμοκρασία, δημιουργώντας έτσι περισσότερους ανοικτούς πόρους.

Η αφυδάτωση ρυζιού με ξήρανση υπό κατάψυξη έχει μελετηθεί από τους Puspitowati & Driscoll (2007), Rewthong et al. (2011) και Yu et al. (2011). Το λυοφιλιωμένο ρύζι ενδείκνυται για μακροχρόνια αποθήκευση και χαρακτηρίζεται από μειωμένη συρρίκνωση και μεγάλο πορώδες. Η πορώδης δομή παρουσιάζει εξαιρετική δυνατότητα ενυδάτωσης και ως εκ τούτου, το λυοφιλιωμένο ρύζι είναι βολικό για στιγμιαία γεύματα, τα οποία είναι έτοιμα προς κατανάλωση μετά την προσθήκη ζεστού νερού (Yu et al., 2011).

Οι Sablani et al. (2007b) αναφέρουν ότι δείγματα σκόρδου τα οποία αφυδατώθηκαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες ξήρανσης υπό κατάψυξη παρουσίασαν χαμηλότερο ανοικτό πορώδες από αυτά που αφυδατώθηκαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, αν και το ολικό πορώδες δεν επηρεάστηκε σημαντικά. Οι Marques et al. (2006) μελέτησαν την ξήρανση υπό κατάψυξη τροπικών φρούτων (ανανάς, μάνγκο, παπάγια, γκουάβα, κτλ.) και αναφέρουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές πορώδους των αφυδατωμένων προϊόντων (0,84 έως 0,93), εξαιτίας της μειωμένης συρρίκνωσης που υφίστανται τα λυοφιλιωμένα προϊόντα. Οι Barresi et al. (2009) ανέφεραν επίσης την ενίσχυση του ρυθμού ενυδάτωσης όταν φαρμακευτικά έκδοχα αφυδατώθηκαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λυοφιλίωσης σε σύγκριση με εκείνα που αφυδατώθηκαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους. Σύμφωνα με τους Anglea et al. (1993b) η κατάρρευση της δομής κατά την ξήρανση οφείλεται στη δομική κινητικότητα, η οποία είναι συνάρτηση του ιξώδους. Το ιξώδες εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας  $T-T_g$ . Η τήξη του πάγου κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σε υψηλότερη πίεση, μειώνει τη διαφορά αυτή και οδηγεί σε μερική απώλεια της δομής.

Επίσης, κατά την ξήρανση υπό κατάψυξη της ασερόλας (acerola), η ταχεία κατάψυξη του υλικού συνέβαλε στη διατήρηση της αρχικής πορώδους δομής του προϊόντος και είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή υλικού σε σκόνη το οποίο είναι λιγότερο ευαίσθητο σε αντιδράσεις αποικοδόμησης. Η πιο κατάλληλη τεχνική για την κατάψυξη των δειγμάτων θεωρήθηκε η χρήση υγρού αζώτου, όπου τα δείγματα χαρακτηρίστηκαν από ελάχιστη συρρίκνωση και υψηλή ικανότητα ενυδάτωσης (Marques et al., 2007).

Οι Karathanos et al. (1996b) μελέτησαν την ξήρανση υπό κατάψυξη για δείγματα πατάτας, λάχανου, μήλου και καρότου και παρατήρησαν δύο διακριτές κορυφές στην καμπύλη κατανομής μεγέθους



πόρων για τα δείγματα πατάτας, λάχανου και μήλου, και τρεις κορυφές για τα δείγματα καρότου. Οι κορυφές βρέθηκαν σε μέγεθος πόρων 20, 1 και 0,2-0,04  $\mu\text{m}$ , ανάλογα με το υλικό. Το μέγεθος των πόρων σε τρόφιμα που αφυδατώθηκαν στον αέρα ήταν πολύ μικρότερο από τα λυοφιλιωμένα δείγματα. Οι Karathanos & Saravacos (1993) μελέτησαν, επίσης, το πορώδες και την κατανομή πόρων σε αμυλούχα υλικά.

Επίσης, σε παλαιότερη εργασία έχει μελετηθεί η κατανομή πόρων σε κρέας από τόνο που επεξεργάστηκε με ξήρανση σε αέρα, υπό κενό και υπό κατάψυξη (Rahman et al., 2002). Τα υλικά χαρακτηρίστηκαν ως προς τη φαινόμενη και την πραγματική πυκνότητα, το πορώδες και την κατανομή πόρων. Τα προϊόντα που παρήχθησαν με διαφορετικές μεθόδους ξήρανσης παρουσίασαν εντελώς διαφορετικές κατανομές μεγέθους πόρων. Τα τρόφιμα που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη παρουσίασαν υψηλότερο πορώδες σε σχέση με τα αφυδατωμένα σε ρεύμα αέρα και υπό κενό τρόφιμα. Οι Antal et al. (2011) αναφέρουν ακόμα ότι λυοφιλιωμένα φύλλα δυόσμου παρουσίασαν ταχύτερο ρυθμό ενυδάτωσης από τα αφυδατωμένα σε ρεύμα αέρα φύλλα, λόγω της δημιουργίας περισσότερο πορώδους δομής.

Οι Krokida & Maroulis (1997) μελέτησαν την επίδραση της μεθόδου ξήρανσης στη φαινόμενη πυκνότητα, την πραγματική πυκνότητα, τον ειδικό όγκο και το πορώδες δειγμάτων μπανάνας, μήλου, καρότου και πατάτας. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές μέθοδοι ξήρανσης, συμβατική ξήρανση, ξήρανση υπό κενό, ξήρανση με μικροκύματα, ξήρανση υπό κατάψυξη και ωσμωτική αφυδάτωση. Τα λυοφιλιωμένα δείγματα εμφάνισαν μεγαλύτερο πορώδες (80-90%) από τα υπόλοιπα. Ακολούθησε το πορώδες των αφυδατωμένων σε μικροκύματα δειγμάτων πατάτας και καρότου (75%), ενώ τα αφυδατωμένα σε μικροκύματα δείγματα μήλου και μπανάνας δεν εμφάνισαν υψηλό πορώδες (60% και 25%, αντίστοιχα). Τα αφυδατωμένα υπό κενό δείγματα μπανάνας και μήλου εμφάνισαν υψηλό πορώδες (70%), ενώ τα αφυδατωμένα υπό κενό δείγματα καρότου και πατάτας εμφάνισαν χαμηλό πορώδες (50% και 25%, αντίστοιχα).

Οι Jayaraman et al. (1990) παρατήρησαν ότι κατά την ξήρανση σε ρεύμα αέρα, δείγματα κουνουπιδιού υπέστησαν ρήξη των κυτταρικών τοιχωμάτων, με αποτέλεσμα την έντονη συρρίκνωση και το μειωμένο πορώδες. Οι Willis et al. (1999) διαπίστωσαν ότι δείγματα ζυμαρικών που έχουν ξηραθεί στους 100°C, θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, παρουσίασαν μεγαλύτερη συρρίκνωση από τα δείγματα που αφυδατώθηκαν στους 40°C (θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης). Επίσης, οι Karathanos et al. (1993) αναφέρουν ότι δείγματα σέλινου που αφυδατώθηκαν σε αέρα σε χαμηλές θερμοκρασίες, παρουσίασαν μεγαλύτερο πορώδες από αυτά που αφυδατώθηκαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα ίδια αποτελέσματα βρέθηκαν από τους Kerdruboos et al. (2007) για δείγματα πατάτας και καρότου.

Αντίθετα, οι Wang & Brennan (1995) παρατήρησαν ότι κατά τη συμβατική ξήρανση δειγμάτων πατάτας, ο βαθμός συρρίκνωσης κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σε χαμηλή θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερος σε σχέση με την ξήρανση σε υψηλή θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό το αποδίδουν στο ότι η συρρίκνωση λαμβάνει χώρα πρώτα στην επιφάνεια και στη συνέχεια κινείται βαθμιαία προς το εσωτερικό με αύξηση του χρόνου ξήρανσης. Στο αρχικό στάδιο της ξήρανσης, η πυκνότητα αυξήθηκε με τη μείωση της υγρασίας φθάνοντας σε ένα μέγιστο, και στη συνέχεια μειώθηκε με περαιτέρω μείωση της υγρασίας. Η πυκνότητα σε μια δεδομένη περιεκτικότητα υγρασίας μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης. Το συνολικό πορώδες αυξήθηκε, καθώς μειώθηκε η υγρασία στα πρώτα στάδια της ξήρανσης και στη συνέχεια αυξήθηκε απότομα ως το τέλος της ξήρανσης. Ο Rahman (2001) υπέθεσε ότι καθώς η τριχοειδής δύναμη είναι η κύρια συνιστώσα για την

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

κατάρρευση, η εξισορρόπηση της δύναμης αυτής προκαλεί σχηματισμό πόρων και μικρότερη συρρίκνωση.

Επιπρόσθετα, έχει μελετηθεί η χρήση ωσμωτικής αφυδάτωσης, ως μέθοδος προκατεργασίας πριν από μια συμβατική διεργασία ξήρανσης, και εφαρμόζεται ευρέως στον τομέα των τροφίμων. Η εφαρμογή ωσμωτικής αφυδάτωσης πριν από την ξήρανση σε αέρα οδήγησε σε μειωμένη συρρίκνωση των προϊόντων (Aktas et al., 2007; Botha et al., 2012; Riva et al., 2005; Riva & Masi, 1988). Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση, το πορώδες των αφυδατωμένων υλικών μπορεί να μειώνεται στην αρχή της ξήρανσης, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι το τέλος της διεργασίας. Η παρατήρηση αυτή αναφέρεται από κάποιους συγγραφείς για ποικίλα γεωργικά προϊόντα, όπως κολοκύθα και μάνγκο. (Giraldo et al., 2003; Mayor et al., 2011). Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η οργανοληπτική ποιότητα των λυοφιλιωμένων τροφίμων μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση της περιεκτικότητας των στερεών του τροφίμου σε επίπεδα 25-35% (Hawkes & Flink, 1978).

Οι μεταβολές σε πολλά φυσικά χαρακτηριστικά των τροφίμων κατά τη διάρκεια της ξήρανσης οφείλονται σε αλλαγές της μικροδομής των υλικών. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα μοντέλα πρόβλεψης του πορώδους κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Θεωρητικά ή εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των διεργασιών ξήρανσης και την αριστοποίησή τους. Η αξιοπιστία των μοντέλων αυτών εξαρτάται και από τις τιμές των φυσικών παραμέτρων τις οποίες περιέχουν. Η πλειοψηφία των μοντέλων λαμβάνει ως σταθερές τις φυσικές παραμέτρους κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το πορώδες είναι μία φυσική παράμετρος η οποία χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη των μοντέλων αυτών (Lozano et al., 1980). Πολλές εξισώσεις έχουν προταθεί για την πρόβλεψη του πορώδους από την περιεχόμενη υγρασία. Οι εξισώσεις αυτές είναι είτε θεωρητικές, οι οποίες βασίζονται σε θεμελιώδη φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά τη δημιουργία των πόρων, ή εμπειρικές προσαρμόζοντας τις παραμέτρους στα πειραματικά δεδομένα (Khalloufi et al., 2009). Οι Zogzas et al. (1994) ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο εφαρμόζεται σε πολλά αφυδατωμένα προϊόντα τροφίμων. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τέσσερις παραμέτρους και θεωρεί ότι, κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, η συρρίκνωση είναι γραμμική συσχέτιση της υγρασίας. Ο Rahman (2003) επίσης, ανέπτυξε ένα θεωρητικό μοντέλο με δύο παραμέτρους, το συντελεστή συρρίκνωσης/διόγκωσης και την αναλογία της πυκνότητας του νερού και της πυκνότητας του υλικού, για να προβλέψει τη δημιουργία των πόρων κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Ο συντελεστής συρρίκνωσης/διόγκωσης επιτρέπει τη γνώση του κλάσματος του όγκου του νερού που απομακρύνεται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης και αντικαθίσταται από τον αέρα. Συνήθως, θεωρείται ότι ο όγκος του αέρα παραμένει σταθερός. Όμως, καθώς οι αλλαγές του όγκου του αέρα μπορούν να επηρεάσουν το πορώδες, οι Khalloufi et al. (2009) ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για την πρόβλεψη του πορώδους των αφυδατωμένων υλικών λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές αλλαγές στον αρχικό αυτό όγκο του αέρα. Το μοντέλο περιλαμβάνει δύο παραμέτρους με φυσική σημασία (φαινόμενα κατάρρευσης και συρρίκνωσης).

Ο Martynenko (2008) μελέτησε τη συσχέτιση ανάμεσα στην περιεχόμενη υγρασία, τη συρρίκνωση την πυκνότητα και το πορώδες των τροφίμων με σχέσεις που στηρίζονται στις φαινόμενες τιμές των μεγεθών, χωρίς να απαιτείται η γνώση της κινητικής ανάπτυξης του πορώδους ή της κατανομής των μεγεθών μέσα στο τρόφιμο. Οι Yan et al. (2008) χρησιμοποίησαν διάφορες μεθόδους για να περιγράψουν τη μεταβολή του φαινόμενου όγκου, της συρρίκνωσης και του πορώδους σε δείγματα μπανάνας, ανανά και μάνγκο. Οι Mulet et al. (2000) χρησιμοποίησαν την ανάλυση εικόνας για να μελετήσουν τις δομικές αλλαγές που πραγματοποιούνται κατά την ξήρανση δειγμάτων πατάτας και κουνουπιδιού, ενώ οι Ramos et al. (2004) μελέτησαν και ποσοτικοποίησαν τις αλλαγές στη μικροδομή

που πραγματοποιούνται κατά την ξήρανση σε ρεύμα αέρα σε φέτες σταφυλιών, χρησιμοποιώντας ανάλυση εικόνας.

Επίσης, οι Zhu et al. (2004) εφάρμοσαν την κλασματική ανάλυση (fractal analysis) για να παρακολουθήσουν τις ρωγμές σε κόκκους καλαμποκιού, οι οποίες προκαλούνται από την ταχεία ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι Kerdruboos & Devahastin (2007) χρησιμοποίησαν την κλασματική διάσταση (fractal dimension) για να μελετήσουν τη συσχέτιση της μικροδομής και των φυσικών αλλαγών των τροφίμων κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Οι Sansiribhan et al. (2012) ανέπτυξαν δύο γενικευμένους δείκτες (κανονικοποιημένη αλλαγή της κλασματικής διάστασης της μικροδομής του δείγματος, κανονικοποιημένη αλλαγή της μέσης κυτταρικής διαμέτρου του δείγματος) για να παρακολουθήσουν τις αλλαγές στη μικροδομή ενός μοντέλου τροφίμου (δείγματα καρότου) το οποίο υπόκειται σε τρεις διεργασίες ξήρανσης. Παρατηρήθηκε ότι οι δείκτες αυτοί, αυξήθηκαν με τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας, αντιστοιχώντας σε αύξηση της ανωμαλίας της μικροδομής του υλικού και σε μείωση του κυτταρικού όγκου του δείγματος. Ο δείκτης της κανονικοποιημένης αλλαγής της κλασματικής διάστασης της μικροδομής του δείγματος είναι πιο γενικευμένος και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να συσχετίσει τις ποσοτικές αλλαγές της μικροδομής με επιλεγμένες φυσικές αλλαγές (συρρίκνωση και σκληρότητα).

### 5.2.2 Εκβολή τροφίμων

Τα προϊόντα εκβολής χαρακτηρίζονται από αφρώδη δομή και υψηλή διόγκωση. Η πυκνότητα και το πορώδες χαρακτηρίζουν την υφή και την ποιότητα των προϊόντων εκβολής και είναι δείκτες της έκτασης της διόγκωσης (Hagenimana et al., 2006). Το πορώδες των προϊόντων εκβολής είναι συνήθως ιδιαίτερα υψηλό. Τα προϊόντα εκβολής με χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα και υψηλό πορώδες λαμβάνουν την παγκόσμια προτίμηση των καταναλωτών. Επίσης, ιδιαίτερα επιθυμητά είναι τα προϊόντα εκβολής που χαρακτηρίζονται από μεγάλη διόγκωση, εξαιτίας της τραγανότητάς τους, της ευκολίας ενυδάτωσης, κτλ. (Chen & Yeh, 2001; Jyothi et al., 2009). Η διόγκωση αποτελεί τη βασική παράμετρο που δίνει στα προϊόντα εκβολής τη χαρακτηριστική δομή των «σνακ» προϊόντων.

Η δομή των διογκωμένων προϊόντων εξαρτάται από την έκταση της ζελατινοποίησης του αμύλου και τη φυσική κατάσταση του τήγματος στη μήτρα. Η δραματική μείωση της πίεσης κατά την έξοδο του υλικού από τον εκβολέα προκαλεί μια εξαιρετικά ταχεία απώλεια του νερού και διόγκωση της ζύμης. Η πορώδης δομή που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της διόγκωσης διατηρείται λόγω της απώλειας του νερού και της μείωσης της θερμοκρασίας, οι οποίες επιτρέπουν στερεοποίηση του προϊόντος στην υαλώδη κατάσταση. Η τήξη των συστατικών του αμύλου και ο σχηματισμός ενός τήγματος με αρκετά υψηλό ιξώδες και ελαστικότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή άμορφων δομών με αρκετά υψηλό πορώδες. Η ταχεία απομάκρυνση του νερού και η ψύξη οδηγούν στο σχηματισμό ενός υαλώδους προϊόντος με επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η τραγανότητα, κτλ. (Kaletunc & Breslauer, 1993; Launay & Lisch, 1983; Roos, 1995). Οι Colonna et al. (1989) παρατήρησαν επίσης, ότι ο βαθμός διόγκωσης των προϊόντων εκβολής εξαρτάται από το ποσοστό του αμύλου. Εκτός από την περιεκτικότητα σε άμυλο, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η αναλογία αμυλόζης - αμυλοπηκτίνης στο άμυλο. Γενικά, πρώτες ύλες με υψηλή περιεκτικότητα σε αμυλοπηκτίνη παρουσιάζουν μεγαλύτερη διόγκωση (Harper & Tribelhorn, 1988; Θύμη, 2008).

Η ποιότητα και οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων εκβολής εξαρτώνται από ποικίλες παραμέτρους, όπως είναι ο τύπος του εκβολέα, η υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας, η σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας, το θερμοκρασιακό προφίλ, η μηχανική και θερμική ενέργεια, ο χρόνος παραμονής, η

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

ταχύτητα και η γεωμετρία των κοχλιών και η παροχή τροφοδοσίας. Η αριστοποίηση των μεταβλητών αυτών, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων, έχει εξεταστεί από διάφορους συγγραφείς για ποικίλα προϊόντα (Chinnaswamy & Hanna, 1988; Ding et al., 2005; Lazou et al., 2007; Liu et al., 2000; Moraru & Kokini, 2003; Sacchetti et al., 2004; Thymi et al., 2005). Ενδεικτικά, αναφέρεται η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας εκβολής στα δομικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων προϊόντων εκβολής.

Οι Jyothi et al. (2009) παρατήρησαν ότι η φαινόμενη πυκνότητα προϊόντων εκβολής με βάση το αραρούτι (arrowroot) αυξήθηκε σημαντικά με την αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας και τη μείωση της θερμοκρασίας εκβολής. Επίσης, ο συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας εξαιτίας της μειωμένης ζελατινοποίησης του αμύλου. Η μείωση της διόγκωσης με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας παρατηρήθηκε και από άλλους ερευνητές (Ding et al., 2006; Ding et al., 2005; Liu et al., 2000; Moraru & Kokini, 2003). Οι Obatolu et al. (2005) αναφέρουν, επίσης, τη μείωση του συντελεστή διόγκωσης προϊόντων εκβολής με βάση άλευρο καλαμποκιού και παραπροϊόντων επεξεργασίας καβουριών με την αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας αλλά και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα. Οι Ding et al. (2006) αναφέρουν την αύξηση της πυκνότητας των προϊόντων εκβολής με βάση άλευρο σίτου με την αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας και τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα. Αντίθετα, η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να περιορίσει τη ροή στο εσωτερικό του εκβολέα, να αυξήσει την ταχύτητα διάτμησης και το χρόνο παραμονής, οδηγώντας σε αύξηση του βαθμού ζελατινοποίησης του αμύλου και της διόγκωσης (Chinnaswamy & Hanna, 1988).

Οι Ding et al. (2005) μελέτησαν την επίδραση της παροχής της τροφοδοσίας, της υγρασίας του μίγματος τροφοδοσίας, της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών και της θερμοκρασίας εκβολής στην πυκνότητα και τη διόγκωση προϊόντων εκβολής ρυζιού και παρατήρησαν ότι η αύξηση της παροχής και η μείωση της υγρασίας οδήγησαν στην παραγωγή προϊόντων υψηλής διόγκωσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής προκάλεσε την αύξηση της διόγκωσης, ενώ η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών δεν επηρέασε σημαντικά τα δομικά χαρακτηριστικά.

Γενικά, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην αύξηση της διόγκωσης (Bhattacharya, 1997; Ding et al., 2006; Ding et al., 2005; Rocha-Guzman et al., 2004). Η θερμοκρασία εκβολής και η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα επηρεάζουν συνδυαστικά τα δομικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Οι Ali et al. (1996) παρατήρησαν ότι η διόγκωση των προϊόντων εκβολής αυξήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών σε θερμοκρασίες μέχρι 160°C, ενώ σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες η διόγκωση μειώθηκε γραμμικά με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Αντίθετα, σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής μέχρι τους 160°C οδήγησε σε αύξηση της διόγκωσης, ενώ πέραν της θερμοκρασίας αυτής, η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε μείωση της διόγκωσης. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών πέραν των 160 rpm και η αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε σε μείωση της διόγκωσης.

Επίσης, σε κάποιες μελέτες αναφέρεται η προσθήκη οσπρίων, φρούτων και λαχανικών σε προϊόντα εκβολής με στόχο την αύξηση της διατροφικής τους αξίας και τη βελτίωση των οργανοληπτικών τους χαρακτηριστικών. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν φασόλια, πούλπα μήλου, μπιζέλια, βότανα, πούλπα σταφυλιού, κτλ. (Anton et al., 2009; Grochowicz & Sobczak, 2007; Karkle et al., 2012; Khanal et al., 2009; Singh et al., 2007a). Οι Karkle et al. (2012) και οι Singh et al. (2007a) παρατήρησαν τη μείωση του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής με την αύξηση της υγρασίας, αλλά και την αύξηση της περιεκτικότητας σε πούλπα μήλου ή μπιζελιών, αντίστοιχα. Επίσης, η αύξηση της υγρασίας της

τροφοδοσίας και η μείωση της περιεκτικότητας σε πούλπα μήλου, οδήγησε σε αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων των προϊόντων εκβολής. Οι Yagci & Gogus (2009) μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων της εκβολής στο συντελεστή διόγκωσης προϊόντων εκβολής με βάση ρυζάλευρο, σκληρό αλεύρι και αλεύρι φουντουκιών (hazelnut flour), με πρόσθετα παραπροϊόντα φρούτων. Παρατήρησαν ότι το περιεχόμενο αλεύρι φουντουκιών επηρέασε τα δομικά χαρακτηριστικά. Σε υψηλή συγκέντρωση, η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας αυξάνει τη διόγκωση, ενώ σε χαμηλή συγκέντρωση δεν επηρέασε σημαντικά τη διόγκωση. Η θερμοκρασία εκβολής είχε αρνητική επίδραση στο συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων. Οι Pastor-Cavada et al. (2011) μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης οσπρίων στις φυσικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής και παρατήρησαν ότι ο συντελεστής διόγκωσης μειώθηκε με την προσθήκη οσπρίων. Τα υλικά αυτά αυξάνουν το ποσοστό των φυτικών ινών, των πρωτεϊνών και των βιοδραστικών συστατικών, αλλά παράλληλα, επηρεάζουν τη δομή και την υφή των παραχθέντων προϊόντων. Οι ίνες περιορίζουν τη διόγκωση των υλικών καθώς συγκρατούν μέρος της υγρασίας τους (Moraru & Kokini, 2003). Η επίδραση της προσθήκης των συστατικών αυτών στη δομή των προϊόντων εκβολής δεν έχει μελετηθεί επαρκώς (Karkle et al., 2012).

Η προσθήκη λιπών επηρεάζει επίσης, τη διόγκωση των προϊόντων εκβολής. Το υψηλό επίπεδο λιπιδίων μειώνει τη μηχανική ενέργεια και οδηγεί σε λιγότερο μαγειρεμένη ζύμη η οποία προκαλεί τη μείωση του συντελεστή διόγκωσης (Ilo et al., 2000).

## 5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των δομικών χαρακτηριστικών αφυδατωμένων προϊόντων και προϊόντων εκβολής περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

### 5.3.1 Προσδιορισμός της πραγματικής πυκνότητας των προϊόντων

Η πραγματική πυκνότητα των προϊόντων ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υλικών προς τον πραγματικό τους όγκο. Η μάζα των υλικών μετρήθηκε με ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας  $10^{-4}$  g. Ο πραγματικός όγκος των υλικών προσδιορίστηκε, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας στερεοπυκνόμετρο αερίου (Quantacrome multipycnometer MVP-1, Boynton Beach, FL, USA) (Krokida et al., 1998a), ακριβείας  $0,001 \text{ cm}^3$ , το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. 1. Ως αέριο χρησιμοποιήθηκε ήλιο (He). Πριν την κάθε μέτρηση, τα δείγματα λειοτριβήθηκαν με χρήση ηλεκτρικού μύλου κοπής, με στόχο την ελαχιστοποίηση των εσωτερικών πόρων. Πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις για κάθε δείγμα.



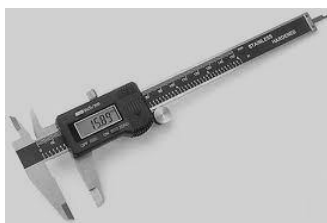
Εικόνα 5. 1. Στερεοπυκνόμετρο ηλίου (Quantacrome multipycnometer MVP-1).

### 5.3.2 Προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας των προϊόντων

Η φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων προσδιορίζεται από το λόγο της μάζας των υλικών προς το φαινόμενο όγκο τους. Ο φαινόμενος όγκος των υλικών υπολογίστηκε είτε μετρώντας τις διαστάσεις των υλικών, είτε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εμβάπτισης σε ειδική προχοϊδα που περιέχει κανονικό επτάνιο. Πιο αναλυτικά:

#### 5.3.2.1 Μέτρηση διαστάσεων

Οι διαστάσεις των υλικών μετρήθηκαν με ψηφιακό παχύμετρο ακριβείας 0,001 cm και υπολογίστηκαν ως ο μέσος όρος τριών ή τεσσάρων μετρήσεων σε διαφορετικά σημεία κάθε δείγματος. Ανάλογα με το προϊόν, πραγματοποιήθηκε διαφορετικός αριθμός επαναλήψεων που αντιστοιχεί σε: (α) 7 επαναλήψεις για τα προϊόντα εκβολής, (β) 15 επαναλήψεις για τους κόκκους ρυζιού και (γ) 5 επαναλήψεις για τα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του φαινόμενου όγκου των προϊόντων εκβολής, επιλέχθηκαν ευθύγραμμα τμήματα όμοιας διαμέτρου από το κάθε δείγμα, τα οποία κόπηκαν σε κυλινδρικά δείγματα μήκους 4 cm περίπου.



Εικόνα 5. 2. Ψηφιακό παχύμετρο.

Ο φαινόμενος όγκος των υλικών υπολογίστηκε από τις σχέσεις που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα, ανάλογα με τη γεωμετρία του κάθε υλικού.

Πίνακας 5. 1. Σχέσεις υπολογισμού του φαινόμενου όγκου των υλικών.

| Προϊόν                                | Σχέση υπολογισμού  |
|---------------------------------------|--|
| Γεωργικά προϊόντα (Ορθογώνια τεμάχια) | $V_{\varphi} = L \cdot W \cdot H$  |
| Κόκκοι ρυζιού                         | $V_{\varphi} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot (h - d)}{4} + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3$ |
| Προϊόντα εκβολής                      | $V_{\varphi} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4}$  |

όπου  $V_{\varphi}$  (m<sup>3</sup>) είναι ο φαινόμενος όγκος,  $L$  (m) είναι το μήκος,  $W$  (m) είναι το πλάτος,  $H$  (m) είναι το ύψος,  $h$  (m) είναι το ύψος κυλίνδρου και  $d$  (m) είναι η διάμετρος.

#### 5.3.2.2 Εμβάπτιση σε κανονικό επτάνιο

Ο φαινόμενος όγκος αφυδατωμένων προϊόντων υπολογίστηκε με εμβάπτιση των τεμαχίων σε κανονικό επτάνιο (n-heptane), και στη συνέχεια προσδιορισμό του όγκου του επτανίου που εκτοπίζεται. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε στα δείγματα που υπέστησαν ξήρανση σε ρεύμα αέρα και ξήρανση υπό κενό, οι οποίες οδήγησαν σε σημαντική συρρίκνωση των προϊόντων και μεταβολή του σχήματός τους. Η μέθοδος έχει ακρίβεια 0,05 mL. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις για κάθε δείγμα.

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του φαινόμενου όγκου αποτελείται από μία προχοΐδα, όπου στο πάνω άκρο της έχει προσαρμοστεί κατάλληλο δοχείο για την τοποθέτηση του δείγματος. Η προχοΐδα πληρείται με κατάλληλη ποσότητα κανονικού επτανίου. Αρχικά, η συσκευή αναποδογυρίζεται και σημειώνεται η ένδειξη. Στη συνέχεια, αφού το δείγμα προζυγιστεί, τοποθετείται στη συσκευή, η οποία αναποδογυρίζεται ξανά και σημειώνεται η νέα ένδειξη. Ο όγκος του υγρού που εκτοπίζεται είναι ίσος με τον ολικό όγκο του δείγματος.



Εικόνα 5. 3. Συσκευή μέτρησης του φαινόμενου όγκου.

### 5.3.3 Προσδιορισμός του πορώδους των προϊόντων

Το πορώδες των παραχθέντων αφυδατωμένων προϊόντων και των προϊόντων εκβολής προσδιορίστηκε από τη σχέση (2.4):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\varphi}}{\rho_{\pi\rho}}$$

### 5.3.4 Προσδιορισμός του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής

Ο συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής προσδιορίστηκε από το λόγο της διαμέτρου των προϊόντων προς τη διάμετρο της μήτρας:

$$Exp = \frac{d}{d_0} \quad 5.1$$

όπου  $d$  (m) είναι η διάμετρος των προϊόντων εκβολής, η οποία μετρήθηκε με τη χρήση ψηφιακού παχύμετρου και  $d_0$  (m) είναι η διάμετρος της μήτρας του εκβολέα (ίση με 3 mm).

### 5.3.5 Προσδιορισμός της κατανομής πόρων των προϊόντων

Το πορώδες, η κατανομή πόρων και το μέσο μέγεθος πόρων των προϊόντων προσδιορίστηκαν με ποροσίμετρο υδραργύρου (MIP, Fisons, Porosimeter 2000, Milano, Italy) (Karathanos & Saravacos, 1993). Η διάταξη (Εικόνα 5. 4) αποτελείται από δύο ξεχωριστές μονάδες: τη μονάδα Macropores unit 120 για τον προσδιορισμό των πόρων από 7,5 έως 100  $\mu\text{m}$  και τη μονάδα Porosimeter 2000 series για τον προσδιορισμό των πόρων από 3,75 nm έως 7,5  $\mu\text{m}$ . Τα δύο τμήματα είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο γίνεται απευθείας η αποθήκευση και η επεξεργασία των δεδομένων. Καταγράφεται ο όγκος του εισερχόμενου υδραργύρου σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση και το πρόγραμμα κατασκευάζει διάγραμμα ειδικού όγκου εισερχόμενου υδραργύρου - πίεσης

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

και ιστόγραμμα που παρουσιάζει την κατανομή του μεγέθους των πόρων του υλικού. Το γινόμενο του ολικού ειδικού όγκου του υδραργύρου και της φαινόμενης πυκνότητας δίνει το πορώδες του υλικού (Αναστασοπούλου et al., 2006).



Εικόνα 5. 4. Ποροσίμετρο υδραργύρου (MIP, Fisons, Porosimeter 2000, Milano, Italy).

Αρχικά το δείγμα ζυγίζεται, εισάγεται σε κυψελίδα και τοποθετείται στη μονάδα MacroPores unit 120. Μέσω μίας αντλίας κενού αφαιρείται ο αέρας. Στη συνέχεια, η κυψελίδα πληρείται με υδράργυρο και η πίεση αυξάνεται σταδιακά από 0-1 bar, όπου ο υδράργυρος εισέρχεται στους μεγάλους πόρους. Η κυψελίδα ζυγίζεται και στη συνέχεια, μεταφέρεται στη μονάδα Porosimeter 2000, όπου εφαρμόζεται πίεση έως 2000 bar (200 MPa) για την είσδυση του υδραργύρου στους μικρότερους πόρους. Τα δεδομένα καταγράφονται απευθείας και επεξεργάζονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

### 5.3.6 Μικροσκοπία

#### 5.3.6.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης

Η μικροδομή των προϊόντων εκβολής και των αφυδατωμένων προϊόντων προσδιορίστηκε με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM). Τα υλικά κόπηκαν σε δείγματα πάχους 1-2 mm και εξετάστηκαν οι κάθετες διατομές τους. Τα δείγματα, για να γίνουν αγωγίμα, τοποθετήθηκαν αρχικά στη συσκευή SC7620 Mini Sputter Coater (Quorum Technologies, West Sussex, UK), όπου επιμεταλλώθηκαν με χρυσό για 90 s, δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα χρυσού πάχους 15 nm.

Στη συνέχεια, τα δείγματα απεικονίστηκαν, σε ποικίλες μεγεθύνσεις ανάλογα με το υλικό, με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Quanta 200 FEI (2004), OR, USA), χρησιμοποιώντας ανιχνευτή ευρέως πεδίου (large field detector, LFD) σε δυναμικό 20-25kV. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. 5.





Εικόνα 5. 5. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Quanta 200 FEI (2004), OR, USA).

### 5.3.6.2 Οπτική Μικροσκοπία

Η απεικόνιση της μακροδομής των προϊόντων εκβολής πραγματοποιήθηκε με οπτικό μικροσκόπιο (στερεομικροσκόπιο, Olympus, SZ, Hamburg, Germany), το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. 6. Τα δείγματα κόπηκαν σε πάχος 2 mm με λεπίδα και φωτογραφήθηκαν σε μεγέθυνση 10x.



Εικόνα 5. 6. Στερεομικροσκόπιο (Olympus, SZ).

## 5.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

Για την πρόβλεψη των δομικών ιδιοτήτων των μελετώμενων προϊόντων από τις συνθήκες επεξεργασίας αναπτύχθηκαν ή επιλέχθηκαν απλά μαθηματικά πρότυπα, τα οποία περιέχουν παραμέτρους με φυσική σημασία. Πιο αναλυτικά:

### 5.4.1 Αφυδατωμένο υπό κατάψυξη ρύζι

Το πρότυπο που περιγράφει την εξάρτηση του πορώδους δειγμάτων ρυζιού από την πίεση ξήρανσης υπό κατάψυξη και το χρόνο βρασμού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^m \cdot \exp\left(\frac{t}{t_0}\right)^n \quad 5.2$$

όπου,  $\varepsilon_0$ ,  $m$ ,  $n$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό,  $\varepsilon$  είναι το πορώδες,  $P$  (mbar) είναι η πίεση της ξήρανσης υπό κατάψυξη,  $t$  (min) είναι ο χρόνος βρασμού,  $P_0$  (mbar) και  $t_0$  (min) είναι οι

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

αντίστοιχες τιμές σε συνθήκες αναφοράς. Ως συνθήκες αναφοράς λαμβάνονται η πίεση ίση με 0,80 mbar και ο μέσος χρόνος βρασμού ίσος με 14 min.

Επίσης, το μαθηματικό πρότυπο που περιγράφει την εξάρτηση του εισερχόμενου όγκου του υδραργύρου, όπως μετριέται με το ποροσίμετρο υδραργύρου, από τις συνθήκες της διεργασίας δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{cum} = V_o \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^{m_1} \cdot \exp\left(n_1 \cdot \frac{t}{t_o}\right) \quad 5.3$$

όπου  $V_o$  (m<sup>3</sup>/kg),  $m_1$ ,  $n_1$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό και  $V_{cum}$  (m<sup>3</sup>/kg) είναι ο ολικός όγκος του υδραργύρου.

### 5.4.2 Αφυδατωμένα υπό κατάψυξη γεωργικά προϊόντα

Το πρότυπο που περιγράφει την εξάρτηση του πορώδους από την πίεση ξήρανσης υπό κατάψυξη για τα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα, δίνεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^m \quad 5.4$$

όπου  $\varepsilon_o$ ,  $m$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό,  $\varepsilon$  είναι το πορώδες,  $P$  (mbar) είναι η πίεση της ξήρανσης υπό κατάψυξη και  $P_o$  (mbar) η αντίστοιχη τιμή σε συνθήκες αναφοράς (0,80 mbar).

### 5.4.3 Προϊόντα εκβολής

Το πρότυπο που περιγράφει την εξάρτηση της φαινόμενης πυκνότητας και του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής από τις συνθήκες της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών δίνεται από την εξίσωση (Katsavou et al., 2011; Lazou & Krokida, 2010):

$$Y = Y_o \cdot \left(\frac{X}{X_o}\right)^{Y_X} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_o}\right)^{Y_C} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{Y_T} \cdot \left(\frac{N}{N_o}\right)^{Y_N} \quad 5.5$$

όπου  $Y$  είναι η μετρούμενη ιδιότητα (φαινόμενη πυκνότητα ( $\rho_\phi$ , (kg/m<sup>3</sup>)) ή συντελεστής διόγκωσης ( $Exp$ )),  $X$  (% υ.β.) είναι η αρχική περιεχόμενη υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας,  $C$  (%) είναι η συγκέντρωση του καρότου,  $T$  (°C) είναι η θερμοκρασία εκβολής,  $N$  (rpm) είναι η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών,  $Y_o$  είναι σταθερά,  $X_o$ ,  $C_o$ ,  $T_o$ ,  $N_o$ , είναι οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων στις συνθήκες αναφοράς (κεντρικές τιμές, Πίνακας 4.3) και  $Y_X$ ,  $Y_C$ ,  $Y_T$ ,  $Y_N$  είναι οι εκθέτες των παραμέτρων οι οποίοι εξαρτώνται από την εκάστοτε ιδιότητα και το υλικό.

## 5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

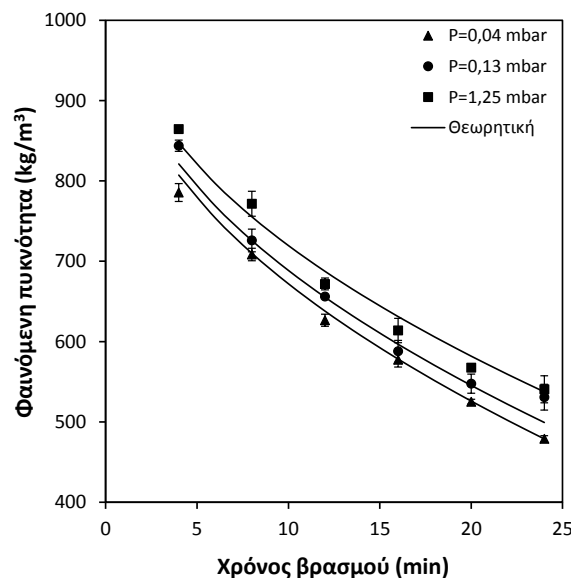
### 5.5.1 Επίδραση των συνθηκών ξήρανσης υπό κατάψυξη στις δομικές ιδιότητες προϊόντων ρυζιού

#### 5.5.1.1 Πραγματική πυκνότητα

Ο πραγματικός όγκος των αφυδατωμένων κόκκων βρασμένου ρυζιού υπολογίστηκε με πυκνόμετρο ηλίου. Η πραγματική πυκνότητα υπολογίστηκε από την Εξίσωση 2. 2 και θεωρήθηκε σταθερή και ίση με την πυκνότητα του στερεού υλικού ( $\rho_{\pi\rho}=1504 \text{ kg/m}^3$ ). Η πραγματική πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ της πυκνότητας του νερού και της πυκνότητας του ξηρού στερεού υλικού. Δεδομένου ότι τα αφυδατωμένα προϊόντα χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά επίπεδα υγρασίας, η πραγματική πυκνότητα θεωρείται ίση με αυτή των αφυδατωμένων στερεών.

#### 5.5.1.2 Φαινόμενη πυκνότητα

Η φαινόμενη πυκνότητα των αφυδατωμένων κόκκων βρασμένου ρυζιού βρέθηκε ισχυρά εξαρτώμενη από τις συνθήκες της ξήρανσης υπό κατάψυξη, αλλά και από το χρόνο βρασμού τους (Σχήμα 5. 1). Οι συνεχείς γραμμές παρουσιάζουν τις προβλεπόμενες από το πρότυπο τιμές της φαινόμενης πυκνότητας. Η συμφωνία των πειραματικών και θεωρητικών τιμών υποδηλώνει ότι το χρησιμοποιούμενο πρότυπο εφαρμόζεται καλά στα πειραματικά δεδομένα. Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης, η φαινόμενη πυκνότητα των κόκκων ρυζιού μειώθηκε σημαντικά ( $p<0,05$ ) καθώς η πίεση λειτουργίας μειώθηκε από 1,25 σε 0,04 mbar. Παραδείγματος χάριν, για 20 min χρόνο βρασμού, η φαινόμενη πυκνότητα μειώθηκε από 567 σε 525  $\text{kg/m}^3$  με μείωση της πίεσης. Επιπλέον, τα δείγματα που έβρασαν για μεγαλύτερους χρόνους παρουσίασαν σημαντικά ( $p<0,05$ ) χαμηλότερες τιμές φαινόμενης πυκνότητας σε σχέση με εκείνα που έβρασαν για λίγα λεπτά.

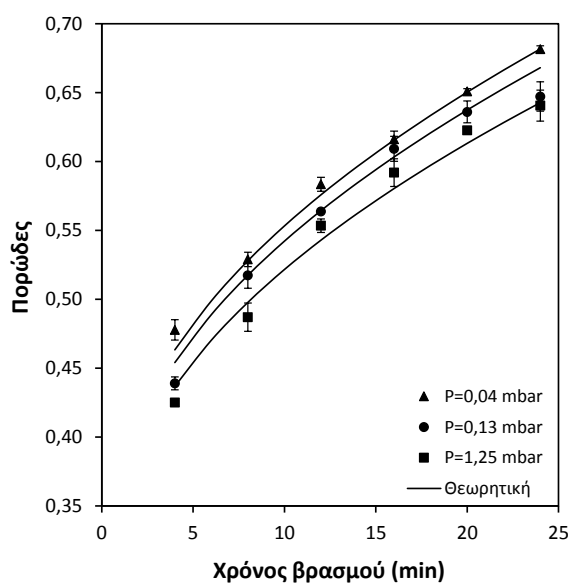


Σχήμα 5. 1. Επίδραση του χρόνου βρασμού και της πίεσης λυοφιλίωσης στη φαινόμενη πυκνότητα των αφυδατωμένων κόκκων ρυζιού.

### 5.5.1.3 Πορώδες

Το πορώδες των αφυδατωμένων κόκκων βρασμένου ρυζιού επηρεάστηκε σημαντικά από τις συνθήκες επεξεργασίας και εμφάνισε αντίθετη τάση από αυτή της φαινόμενης πυκνότητας. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το πορώδες παρουσιάζει αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά με τη φαινόμενη πυκνότητα των υλικών. Σε χαμηλές πιέσεις λυοφιλίωσης παρατηρήθηκε το υψηλότερο πορώδες, το οποίο μειώθηκε με αύξηση της πίεσης λειτουργίας (από 0,65 σε 0,60, για χρόνο βρασμού 20 min) (Σχήμα 5. 2). Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται για άλλα γεωργικά προϊόντα όπως μήλα, μπανάνες και καρότα (Krokida et al., 1998a), αλλά και για λυοφιλισμένα ψάρια (Rahman & Sablani, 2003).

Το πορώδες επηρεάστηκε επίσης από το χρόνο βρασμού, παρουσιάζοντας υψηλότερες τιμές για μεγαλύτερους χρόνους. Όσο αυξάνεται ο χρόνος βρασμού τα υλικά προσλαμβάνουν μεγαλύτερη ποσότητα ύδατος που φτάνει περίπου 2,5 φορές τη μάζα των κόκκων του ρυζιού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος τους. Κατά τη διάρκεια της κατάψυξης και μετέπειτα ξήρανσης των υλικών, ο πάγος εξαχνώνεται και δημιουργεί πόρους. Το ποσοστό των πόρων (πορώδες) σχετίζεται με την ποσότητα νερού που έχει προσληφθεί. Επομένως, εάν δεν υπάρξει κατάρρευση της δομής εξαιτίας του αυξημένου χρόνου βρασμού, το πορώδες αυξάνεται όσο αυξάνεται η πρόσληψη νερού. Η αύξηση του πορώδους κυμάνθηκε από 40 έως 50%, λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς το μικρότερο χρόνο βρασμού, ανάλογα με την πίεση που εφαρμόζεται.



Σχήμα 5. 2. Επίδραση του χρόνου βρασμού και της πίεσης λυοφιλίωσης στο πορώδες των κόκκων ρυζιού.

Από το Σχήμα 5. 2 μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι το χρησιμοποιούμενο πρότυπο προβλέπει ικανοποιητικά το πορώδες των προϊόντων με βάση τις συνθήκες επεξεργασίας. Οι τιμές των εκτιμώμενων παραμέτρων και η στατιστική επεξεργασία τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. 2.

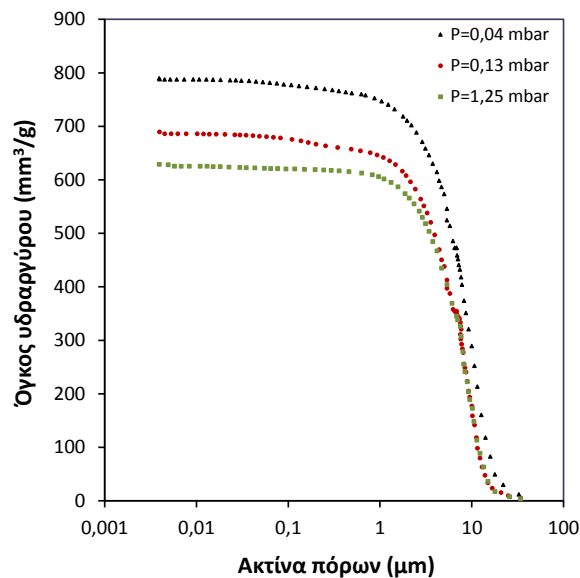
Πίνακας 5. 2. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για το πορώδες και τη φαινόμενη πυκνότητα λυοφιλισμένων κόκκων ρυζιού.

| Παράμετροι     | $\epsilon_0$ | $m$    | $n$   | $R^2$ |
|----------------|--------------|--------|-------|-------|
|                | 0,208        | -0,017 | 0,232 | 0,988 |
| <i>p-value</i> | 0,001        | 0,002  | 0,005 |       |

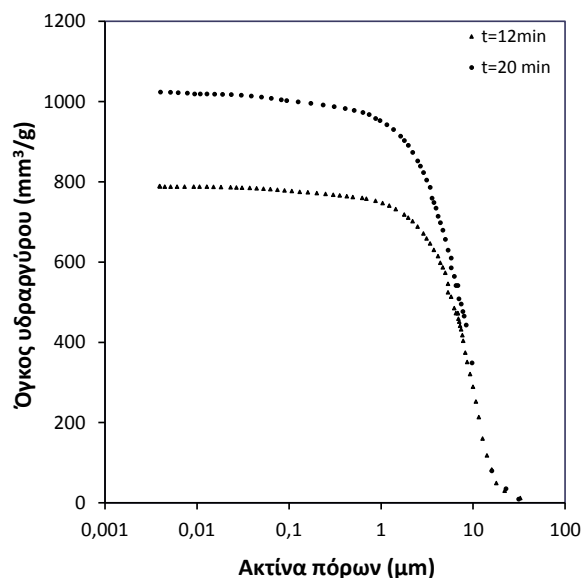
### 5.5.1.4 Κατανομή πόρων

Το Σχήμα 5. 3 και το Σχήμα 5. 4 παρουσιάζουν την επίδραση της πίεσης λειτουργίας στον όγκο του υδραργύρου που εισδύει με την εφαρμογή της ποροσιμετρίας υδραργύρου, σε αντιπροσωπευτικά δείγματα ρυζιού. Το σημείο στο οποίο η κοίλη καμπύλη μετατρέπεται σε κυρτή παρουσιάζει τη μέση ακτίνα πόρων. Η μέση ακτίνα πόρων για όλα τα δείγματα κυμάνθηκε στην περιοχή από 7,8 έως 9,8  $\mu\text{m}$ .

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ποροσιμετρίας υδραργύρου, το πορώδες των κόκκων ρυζιού που έβρασαν για 12 min και αφυδατώθηκαν σε πίεση 0,04 mbar προσδιορίστηκε ίσο με 0,537. Χρησιμοποιώντας το στερεοπυκνόμετρο ηλίου το πορώδες βρέθηκε ίσο με 0,583. Η διαφορά αυτή παρατηρήθηκε σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν και αποδίδεται στο γεγονός ότι η ποροσιμετρία υδραργύρου δε μπορεί να μετρήσει όλο το εύρος μεγέθους των πόρων. Ο υδράργυρος διέρχεται εύκολα σε πόρους μεγαλύτερους από 100  $\mu\text{m}$  χωρίς εφαρμογή πίεσης, ενώ δεν μπορεί να διεισδύσει σε πόρους μικρότερους από 2  $\mu\text{m}$ , οι οποίοι όμως είναι διαπερατοί από το ήλιο.

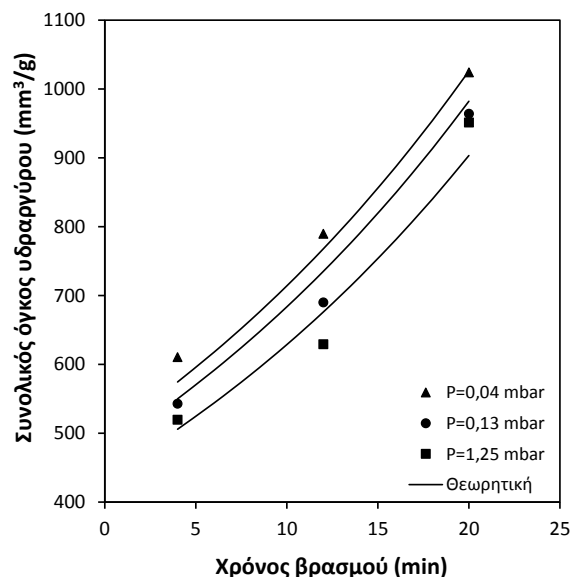


Σχήμα 5. 3. Εισερχόμενος όγκος υδραργύρου, όπως μετρείται με ποροσιμετρία υδραργύρου, συναρτήσει της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπευτικών λυοφιλιωμένων δειγμάτων ρυζιού ( $t=12$  min), για διάφορες πιέσεις ξήρανσης.



Σχήμα 5. 4. Εισερχόμενος όγκος υδραερίου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραερίου, συναρτήσει της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπευτικών λυοφιλωμένων δειγμάτων ρυζιού ( $P=0,04$  mbar), για διάφορους χρόνους βρασμού.

Η μεταβολή του συνολικού όγκου του υδραερίου ως προς τις συνθήκες ξήρανσης και το χρόνο βρασμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 5. Είναι προφανές ότι η αύξηση του χρόνου βρασμού και η μείωση της εφαρμοζόμενης πίεσης κατά τη διάρκεια της λυοφιλίωσης οδήγησε στην αύξηση του συνολικού όγκου του υδραερίου. Οι προβλεπόμενες, από το πρότυπο, τιμές παρουσιάζονται με τις συμπαγείς γραμμές. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων του μαθηματικού προτύπου για το συνολικό όγκο του υδραερίου, συνοψίζονται στον Πίνακα 5. 3.

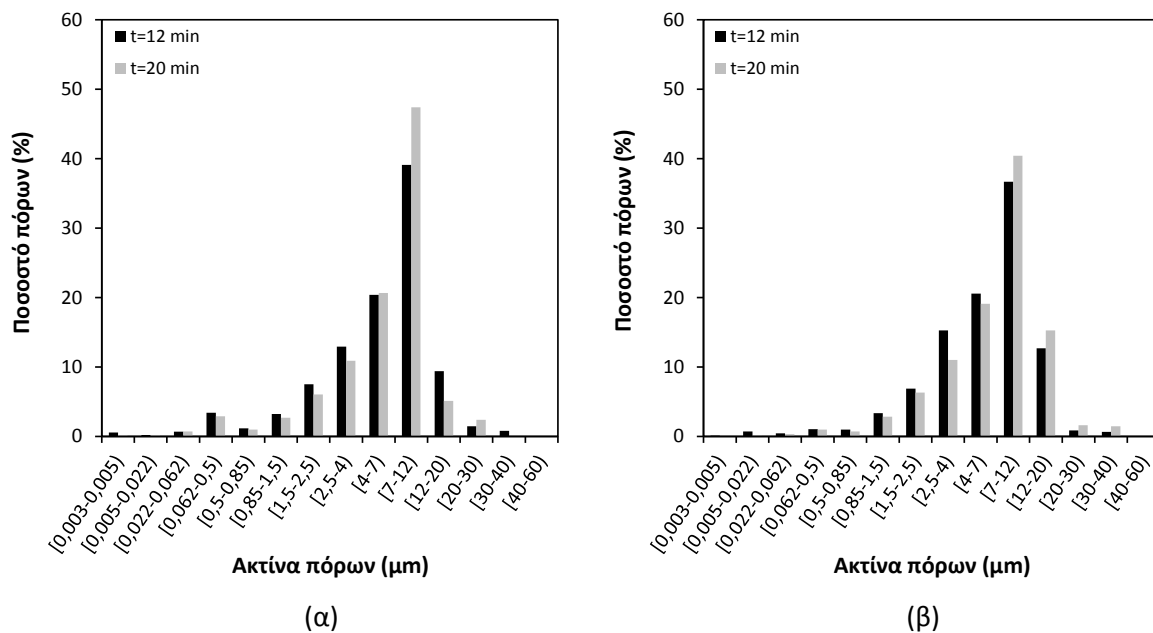


Σχήμα 5. 5. Επίδραση του χρόνου βρασμού και της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στο συνολικό όγκο υδραερίου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραερίου.

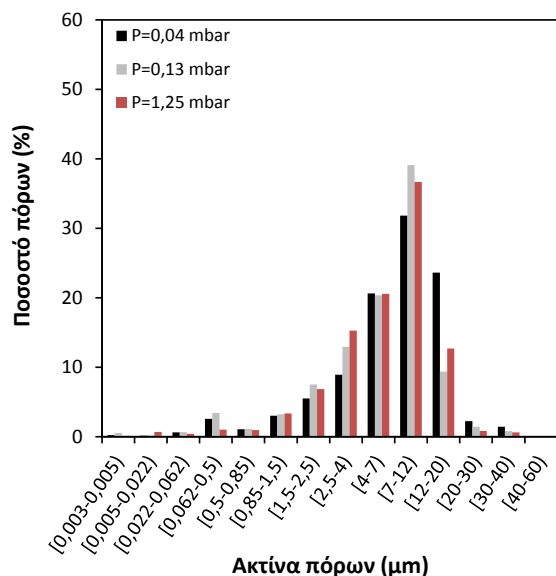
Πίνακας 5. 3. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για το συνολικό όγκο υδραργύρου, όπως μετρείται με ποροσιμετρία υδραργύρου, λυοφιλιωμένων κόκκων ρυζιού.

| Παράμετροι     | $V_o$ ( $\times 10^{-6}$ m <sup>3</sup> /kg) | $m_1$  | $n_1$ | $R^2$ |
|----------------|--|--------|-------|-------|
|                | 444,810                                      | -0,037 | 0,507 | 0,985 |
| <i>p-value</i> | 0,000  | 0,000  | 0,000 |       |

Το Σχήμα 5. 6 παρουσιάζει την κατανομή των πόρων αντιπροσωπευτικών αφυδατωμένων δειγμάτων ρυζιού για διάφορους χρόνους βρασμού, για δύο διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης ( $P=0,13$  mbar και  $P=1,25$  mbar). Όπως παρατηρείται, το ποσοστό των μεγάλων πόρων αυξήθηκε με την αύξηση του χρόνου βρασμού. Καθώς αυξάνεται ο χρόνος βρασμού τα δείγματα απορροφούν περισσότερο νερό, με αποτέλεσμα τη διόγκωση του υλικού, τη διαμόρφωση μεγαλύτερων περιοχών που περιέχουν νερό και τη δημιουργία μεγαλύτερων κρυστάλλων πάγου κατά την κατάψυξη. Κατά συνέπεια, η εξάχνωση του πάγου δημιουργεί μεγαλύτερους πόρους ή κενά στο εσωτερικό του κόκκου. Επίσης, το Σχήμα 5. 7 παρουσιάζει την κατανομή των πόρων δειγμάτων ρυζιού, που αρχικά έβρασαν για 12 min, και αφυδατώθηκαν για διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης. Στην υψηλότερη πίεση όπου το πορώδες είναι χαμηλότερο, εμφανίζεται υψηλότερο ποσοστό μικρών πόρων. Η υψηλότερη πίεση που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη οδηγεί σε μείωση του ιξώδους των τροφίμων και επομένως επιτάχυνση της συρρίκνωσης (Krokida et al., 1998a). Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν τα δεδομένα που λαμβάνονται από το στερεοοπκνόμετρο ηλίου, τα οποία αποδεικνύουν δημιουργία υψηλότερου πορώδους με μείωση της εφαρμοζόμενης πίεσης ξήρανσης.

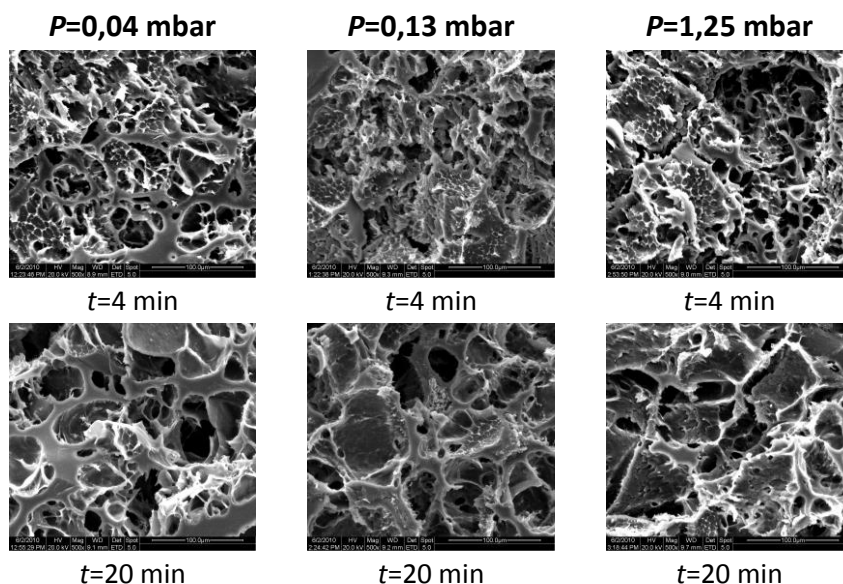


Σχήμα 5. 6. Κατανομή πόρων δειγμάτων βρασμένου ρυζιού τα οποία είχαν βράσει για διάφορους χρόνους, και αφυδατώθηκαν σε δύο διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη α)  $P=0,13$  mbar και β)  $P=1,25$  mbar.



Σχήμα 5. 7. Κατανομή πόρων δειγμάτων βρασμένου ρυζιού ( $t=12$  min) που αφυδατώθηκε σε διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.

Η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στο πορώδες των κόκκων ρυζιού απεικονίστηκε με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Σχήμα 5. 8). Οι φωτογραφίες ελήφθησαν σε μεγέθυνση 500x για τη βέλτιστη απεικόνιση της μικροδομής των υλικών. Η παρατήρηση των εικόνων ενισχύει σημαντικά τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς παρατηρείται και οπτικά η αύξηση του συνολικού πορώδους και του μεγέθους των πόρων στα δείγματα που έβρασαν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και αφυδατώθηκαν σε χαμηλότερες πιέσεις λυοφιλίωσης.



Σχήμα 5. 8. Απεικόνιση της μικροδομής των λυοφιλιωμένων κόκκων ρυζιού.



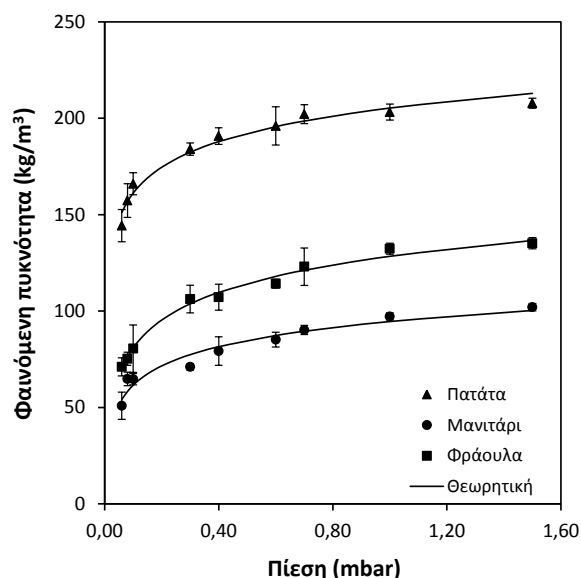
## 5.5.2 Επίδραση των συνθηκών ξήρανσης υπό κατάψυξη στις δομικές ιδιότητες γεωργικών προϊόντων

### 5.5.2.1 Πραγματική πυκνότητα

Η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία των αφυδατωμένων προϊόντων προσδιορίστηκε μεταξύ 3 και 3,5% για τις πατάτες, 5 και 6% για τα μανιτάρια και 6 και 7% για τις φράουλες. Ο πραγματικός τους όγκος υπολογίστηκε με πυκνόμετρο ηλίου. Η πραγματική πυκνότητα των αφυδατωμένων γεωργικών προϊόντων υπολογίστηκε από την Εξίσωση 2.2 και θεωρήθηκε σταθερή και ίση με την πυκνότητα του στερεού υλικού. Η πραγματική πυκνότητα βρέθηκε ίση με  $1543 \pm 12 \text{ kg/m}^3$  για την πατάτα,  $1591 \pm 39 \text{ kg/m}^3$  για το μανιτάρι και  $1602 \pm 56 \text{ kg/m}^3$  για τη φράουλα.

### 5.5.2.2 Φαινόμενη πυκνότητα

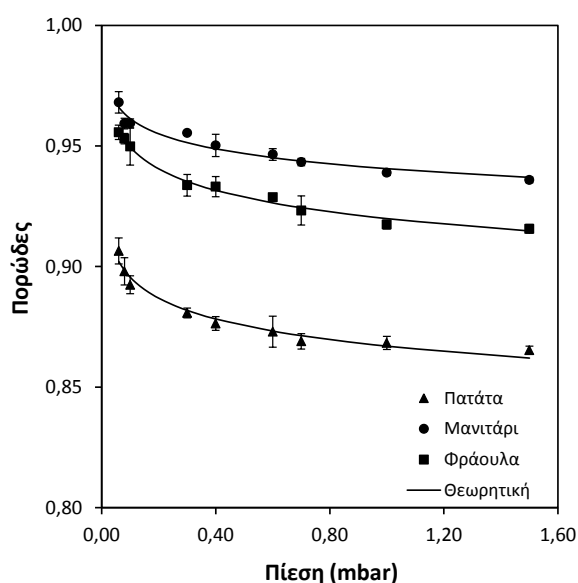
Το Σχήμα 5. 9 παρουσιάζει την εξάρτηση της φαινόμενης πυκνότητας των λυοφιλιωμένων προϊόντων από τις συνθήκες ξήρανσης υπό κατάψυξη. Οι γραμμές αναπαριστούν τις θεωρητικές τιμές της φαινόμενης πυκνότητας όπως εξήχθησαν από το χρησιμοποιούμενο πρότυπο. Ανάμεσα στα γεωργικά προϊόντα, η πατάτα παρουσίασε την υψηλότερη φαινόμενη πυκνότητα, ενώ το μανιτάρι τη χαμηλότερη, πιθανώς λόγω του υψηλότερου όγκου αέρα που περιέχει. Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης, η φαινόμενη πυκνότητα των αφυδατωμένων προϊόντων αυξήθηκε σημαντικά ( $p < 0,05$ ) με την αύξηση της εφαρμοζόμενης πίεσης ξήρανσης (από 0,06 σε 1,50 mbar). Σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες κάτω από το σημείο υαλώδους μετάπτωσης, το υλικό παραμένει στην υαλώδη κατάσταση όπου μπορεί να διατηρήσει τη δομή του κατά τη διάρκεια της ξήρανσης και δεν υφίσταται συρρίκνωση. Σε υψηλότερες πιέσεις, και συνεπώς σε θερμοκρασίες ξήρανσης κοντά ή πάνω από το σημείο υαλώδους μετάπτωσης των υλικών, ή όσο μειώνεται η διαφορά από το σημείο υαλώδους μετάπτωσης, το ιξώδες των υλικών μειώνεται, το υλικό δε μπορεί να συγκρατήσει το δικό του βάρος, με αποτέλεσμα την αύξηση της συρρίκνωσης και την υποβάθμιση της ποιότητας των προϊόντων (Anglea et al., 1993a; Roos, 1995). Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ξήρανσης από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης η κατάρρευση της δομής είναι μεγαλύτερη. Όσο αυξάνει η πίεση ξήρανσης υπό κατάψυξη, η μετάβαση από την υαλώδη στην ελαστική περιοχή και η τήξη του πάγου πλαστικοποιούν τη μήτρα και αυξάνουν την πυκνότητα. Ως αποτέλεσμα αυτού, η φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων παρουσιάζει υψηλότερες τιμές. Σε χαμηλές πιέσεις κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη, τα προϊόντα δεν συρρικνώνονται σημαντικά, παρουσιάζοντας χαμηλότερη φαινόμενη πυκνότητα. Στις πιέσεις αυτές, το υψηλό ιξώδες του συμπυκνωμένου άμορφου διαλύματος γύρω από τον πάγο μπορεί να αποτρέψει τη συρρίκνωση (Krokida et al., 1998a).



Σχήμα 5. 9. Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στη φαινόμενη πυκνότητα, για την πατάτα, το μανιτάρι και τη φράουλα.

### 5.5.2.3 Πορώδες

Η εξάρτηση του πορώδους των αφυδατωμένων προϊόντων από τις συνθήκες επεξεργασίας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 10. Στις χαμηλές πιέσεις, παρατηρήθηκε το υψηλότερο πορώδες, το οποίο μειώθηκε με την αύξηση της πίεσης. Η μείωση της πίεσης από 1,50 mbar σε 0,06 mbar οδήγησε σε αύξηση του πορώδους κατά 5 με 10%. Παρόμοια αποτελέσματα που αφορούν σε αφυδατωμένα φρούτα και λαχανικά έχουν δημοσιευτεί από άλλους ερευνητές (Karathanos et al., 1996a; Krokida et al., 1998a). Ανάμεσα στα γεωργικά προϊόντα, το μανιτάρι παρουσίασε την πιο πορώδη δομή, εξαιτίας της υψηλής αρχικής περιεχόμενης υγρασίας, ενώ η πατάτα εμφάνισε το χαμηλότερο πορώδες, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το πορώδες και τη φαινόμενη πυκνότητα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. 4.



Σχήμα 5. 10. Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στο πορώδες, για την πατάτα, το μανιτάρι και τη φράουλα.

Πίνακας 5. 4. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για το πορώδες και τη φαινόμενη πυκνότητα λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων.

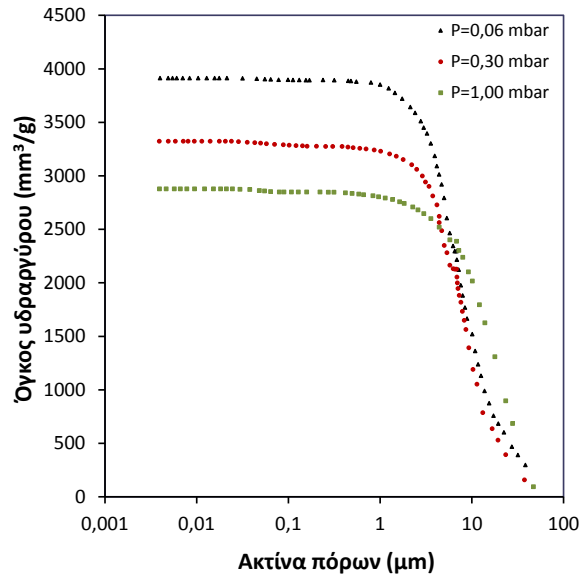
| Παράμετροι     |              |        |       |  |
|----------------|--------------|--------|-------|--|
| Υλικό          | $\epsilon_0$ | $m$    | $R^2$ |  |
| Πατάτα         | 0,875        | -0,014 | 0,943 |  |
| <i>p-value</i> | 0,000        | 0,000  |       |  |
| Μανιτάρι       | 0,947        | -0,010 | 0,945 |  |
| <i>p-value</i> | 0,000        | 0,000  |       |  |
| Φράουλα        | 0,929        | -0,014 | 0,924 |  |
| <i>p-value</i> | 0,000        | 0,000  |       |  |

#### 5.5.2.4 Κατανομή πόρων

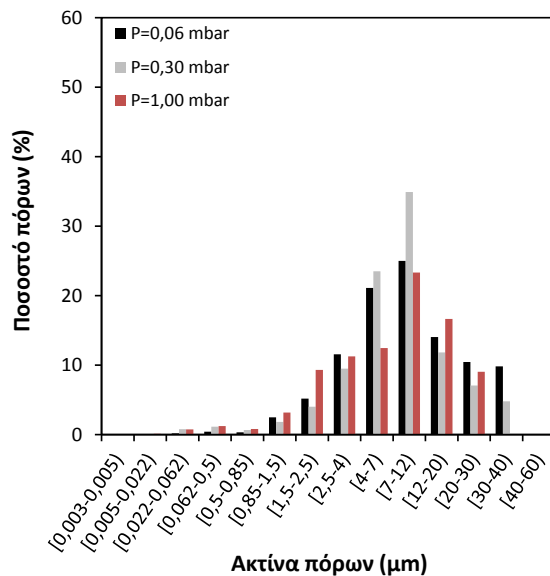
Το Σχήμα 5. 11 απεικονίζει τον εισερχόμενο όγκο του υδραργύρου κατά την εφαρμογή ποροσιμετρίας υδραργύρου, σε αντιπροσωπευτικά δείγματα αφυδατωμένων πατατών. Αρχικά, όταν οι εφαρμοζόμενες πιέσεις κατά την ποροσιμετρία υδραργύρου είναι χαμηλές, παρατηρείται μία απότομη αύξηση του όγκου του υδραργύρου, η οποία μπορεί να είναι ένδειξη της ύπαρξης μακροπόρων στην επιφάνεια των αφυδατωμένων τροφίμων. Η περιοχή αυτή ακολουθείται από μια σχετικά σταθερή περιοχή, σε υψηλότερες πιέσεις. Μια σταδιακή αύξηση της κλίσης της καμπύλης μπορεί να εξηγηθεί με τη μείωση του μεγέθους των πόρων στο εσωτερικό του προϊόντος (Rahman et al., 2002).

Η αύξηση της πίεσης που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη οδηγεί στη μείωση του όγκου του υδραργύρου που εισδύει στο υλικό. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει τα πειραματικά αποτελέσματα που λαμβάνονται με το στερεοπυκνόμετρο ηλίου, τα οποία παρουσιάζουν μείωση του πορώδους με αύξηση της πίεσης. Επίσης, το Σχήμα 5. 12 παρουσιάζει την κατανομή των πόρων αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας για διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης, όπου παρατηρείται η δημιουργία μεγαλύτερων πόρων κατά την ξήρανση στη μικρότερη πίεση.

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

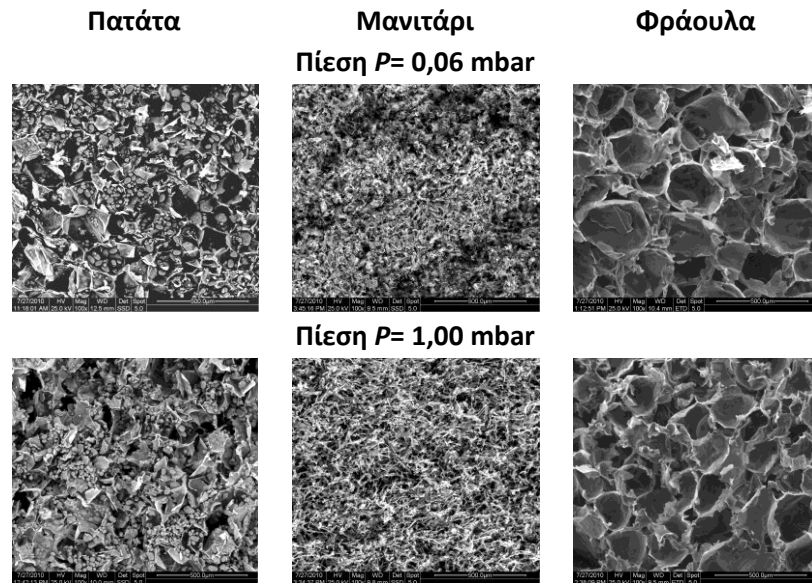


Σχήμα 5. 11. Εισερχόμενος όγκος υδραργύρου, όπως μετριέται με ποροσιμετρία υδραργύρου, συναρτήσει της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπευτικών λυοφιλωμένων δειγμάτων πατάτας, για διάφορες πιέσεις ξήρανσης.



Σχήμα 5. 12. Κατανομή πόρων δειγμάτων πατάτας που αφυδατώθηκαν σε διαφορετικές πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.

Η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στο πορώδες των γεωργικών προϊόντων απεικονίστηκε με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Σχήμα 5. 13). Οι φωτογραφίες ελήφθησαν σε μεγέθυνση 100x για τη βέλτιστη απεικόνιση της μικροδομής των υλικών. Η παρατήρηση των εικόνων ενισχύει σημαντικά τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη στερεοτυκνομετρία ηλίου και την ποροσιμετρία υδραργύρου.



Σχήμα 5. 13. Απεικόνιση της μικροδομής των λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων.

### 5.5.3 Επίδραση των μεθόδων και συνθηκών ξήρανσης στις δομικές ιδιότητες γεωργικών προϊόντων

#### 5.5.3.1 Πορώδες

Ο Πίνακας 5. 5 παρουσιάζει τις τιμές του πορώδους για τα αφυδατωμένα δείγματα πατάτας και μπανάνας τα οποία υπέστησαν προ-επεξεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης. Το πορώδες των υλικών επηρεάστηκε από τη μέθοδο και τις συνθήκες ξήρανσης (Krokida et al., 2000c).

Τα λυοφιλιωμένα προϊόντα πατάτας και μπανάνας τα οποία υπέστησαν αφυδάτωση για 2 h εμφάνισαν πορώδες της τάξεως του 0,70 και 0,50 αντίστοιχα, ενώ τα αντίστοιχα προϊόντα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κενό και σε ρεύμα αέρα εμφάνισαν μειωμένο πορώδες (Gong et al., 2007), εξαιτίας της κατάρρευσης των κυτταρικών τοιχωμάτων των υλικών λόγω της διάχυσης του νερού από το κέντρο προς την επιφάνεια του υλικού. Κατά την ξήρανση σε ρεύμα αέρα και υπό κενό, η θερμοκρασία διατηρείται σε τιμές πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, με αποτέλεσμα την κατάρρευση του υλικού και τη δημιουργία προϊόντων με χαμηλό πορώδες. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σύμφωνες με δεδομένα της βιβλιογραφίας (Dutta et al., 2012; Krokida & Maroulis, 1997).

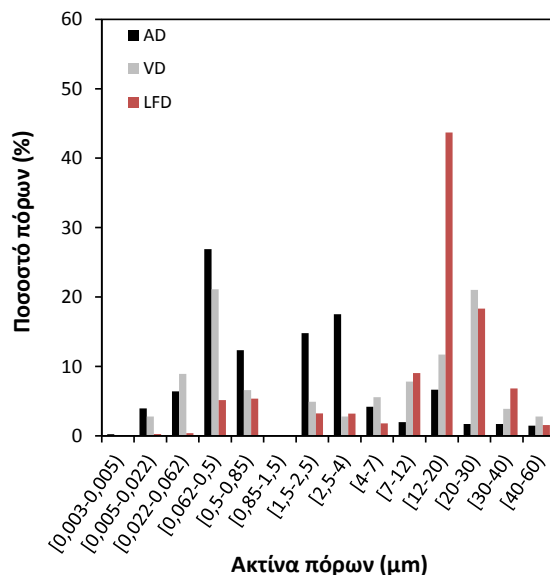
Πίνακας 5. 5. Τιμές του πορώδους ωσμωτικά προ-επεξεργασμένων δειγμάτων πατάτας και μπανάνας, τα οποία αφυδατώθηκαν με διάφορες μεθόδους ξήρανσης.

|                  | Πατάτα      | Μπανάνα     |
|------------------|-------------|-------------|
| Μέθοδος ξήρανσης | 2 h OD      | 2 h OD      |
| LFD*             | 0,714±0,024 | 0,516±0,020 |
| HFD*             | 0,416±0,043 | 0,503±0,003 |
| VD*              | 0,083±0,001 | 0,283±0,009 |
| AD*              | 0,040±0,051 | 0,142±0,004 |

\*LFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις, HFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε υψηλές πιέσεις, VD: ξήρανση υπό κενό, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα και OD: ωσμωτική αφυδάτωση

### 5.5.3.2 Κατανομή πόρων

Η κατανομή μεγέθους των πόρων των αφυδατωμένων δειγμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 14. Τα δείγματα που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερους πόρους σε σχέση με τα αφυδατωμένα σε ρεύμα αέρα ή υπό κενό δείγματα.



Σχήμα 5. 14. Κατανομή πόρων δειγμάτων που αφυδατώθηκαν με διάφορες μεθόδους (LFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις, VD: ξήρανση υπό κενό, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα).

### 5.5.4 Επίδραση των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών και των συνθηκών επεξεργασίας στις δομικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής

Τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν από τη μέτρηση των δομικών ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής αναλύθηκαν στατιστικά για να προσδιοριστεί η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών σε αυτά. Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης, όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές (αρχική περιεχόμενη υγρασία, συγκέντρωση καρότου, θερμοκρασία εκβολής, ταχύτητα περιστροφής κοχλιών) επηρέασαν σημαντικά τη φαινόμενη πυκνότητα, το πορώδες και το συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων. Πιο αναλυτικά:

#### 5.5.4.1 Πραγματική πυκνότητα

Οι τιμές της πραγματικής πυκνότητας για όλα τα προϊόντα εκβολής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. 6. Όπως παρατηρείται, οι συνθήκες επεξεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών δεν επηρέασαν σημαντικά τις τιμές της πραγματικής πυκνότητας των προϊόντων.

Πίνακας 5. 6. Τιμές της πραγματικής πυκνότητας των προϊόντων εκβολής.

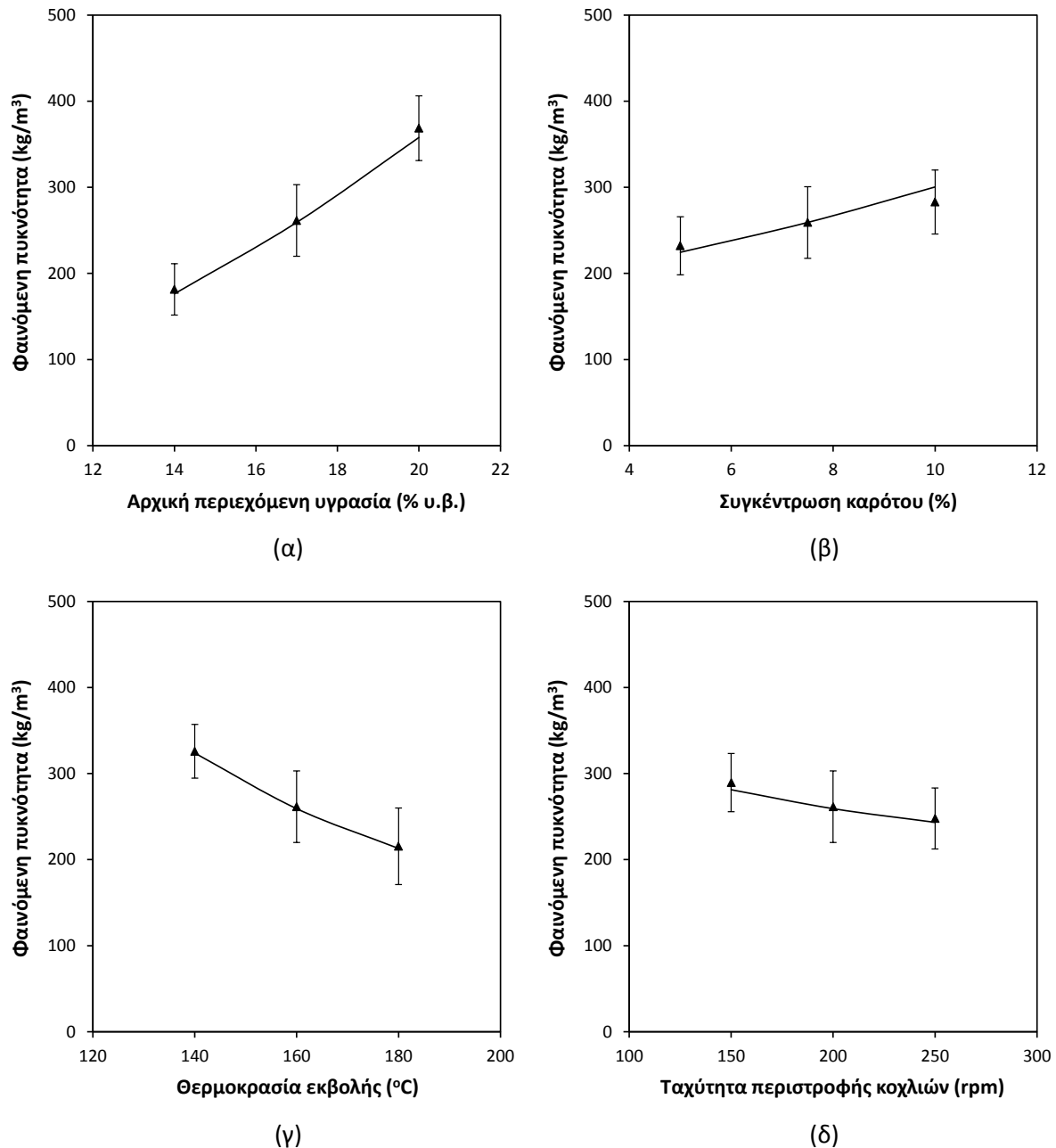
|          | <i>X</i> (% υ.β.) | <i>C</i> (%) | <i>T</i> (°C) | <i>N</i> (rpm) | $\rho_{\pi\rho}$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|-------------------|--------------|---------------|----------------|---------------------------------------|
| 11-1-1   | 20                | 10           | 140           | 150            | 1456±0,002                            |
| 11-11    | 20                | 10           | 140           | 250            | 1466±0,010                            |
| 1-1-11   | 20                | 5            | 140           | 250            | 1463±0,002                            |
| 1-1-1-1  | 20                | 5            | 140           | 150            | 1463±0,015                            |
| 00-10    | 17                | 7,5          | 140           | 200            | 1471±0,003                            |
| -11-1-1  | 14                | 10           | 140           | 150            | 1476±0,002                            |
| -11-11   | 14                | 10           | 140           | 250            | 1482±0,003                            |
| -1-1-11  | 14                | 5            | 140           | 250            | 1479±0,004                            |
| -1-1-1-1 | 14                | 5            | 140           | 150            | 1472±0,005                            |
| 1000     | 20                | 7,5          | 160           | 200            | 1466±0,007                            |
| 0100     | 17                | 10           | 160           | 200            | 1471±0,008                            |
| 0000     | 17                | 7,5          | 160           | 200            | 1463±0,005                            |
| 0000     | 17                | 7,5          | 160           | 200            | 1474±0,008                            |
| 0001     | 17                | 7,5          | 160           | 250            | 1476±0,009                            |
| 000-1    | 17                | 7,5          | 160           | 150            | 1482±0,014                            |
| 0-100    | 17                | 5            | 160           | 200            | 1477±0,003                            |
| -1000    | 14                | 7,5          | 160           | 200            | 1479±0,007                            |
| 1111     | 20                | 10           | 180           | 250            | 1486±0,003                            |
| 111-1    | 20                | 10           | 180           | 150            | 1487±0,013                            |
| 1-11-1   | 20                | 5            | 180           | 150            | 1477±0,014                            |
| 1-111    | 20                | 5            | 180           | 250            | 1480±0,011                            |
| 0010     | 17                | 7,5          | 180           | 200            | 1494±0,023                            |
| -1111    | 14                | 10           | 180           | 250            | 1499±0,018                            |
| -111-1   | 14                | 10           | 180           | 150            | 1504±0,034                            |
| -1-11-1  | 14                | 5            | 180           | 150            | 1482±0,015                            |
| -1-111   | 14                | 5            | 180           | 250            | 1471±0,005                            |

#### 5.5.4.2 Φαινόμενη πυκνότητα

Το Σχήμα 5. 15 εμφανίζει την επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στη φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής. Στο Σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα κεντρικά σημεία του πειραματικού σχεδιασμού, ενώ οι συνεχείς γραμμές παριστάνουν τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από την προσαρμογή του προτύπου στα πειραματικά δεδομένα. Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα απλό δυναμικό μοντέλο, το οποίο περιέχει παραμέτρους με φυσική σημασία. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. 7. Η τιμή της σταθεράς  $\rho_o$  είναι περίπου ίση με τη τιμή που προκύπτει από τον υπολογισμό του μέσου όρου της φαινόμενης πυκνότητας όλων των προϊόντων εκβολής ( $\bar{\rho}=274,673$  kg/m<sup>3</sup>), γεγονός που φανερώνει τη σημαντικότητα του επιλεγόμενου μοντέλου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα, το χρησιμοποιούμενο πρότυπο περιγράφει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα, παρέχοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης της φαινόμενης πυκνότητας από τις συνθήκες της διεργασίας. Τόσο τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών όσο και οι

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

συνθήκες επεξεργασίας επηρέασαν σημαντικά ( $p < 0,05$ ) τη φαινόμενη πυκνότητα των παραχθέντων προϊόντων.



Σχήμα 5. 15. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στη φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής.

Η φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων εκβολής κυμάνθηκε από 143 έως 600 kg/m<sup>3</sup>. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. 15, η φαινόμενη πυκνότητα παρουσίασε αυξανόμενη τάση με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας του αρχικού μίγματος και της συγκέντρωσης του καρότου. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Chiu et al., 2012; Hutchinson et al., 1987; Karkle et al., 2012; Robin et al., 2012). Η προστιθέμενη ξηρή σκόνη καρότου περιέχει φυτικές ίνες και



πρωτεΐνες. Η προσθήκη φυτικών ινών σε προϊόντα τα οποία είναι πλούσια σε άμυλο οδηγεί σε θραύση των κυτταρικών τοιχωμάτων και εμποδίζει τις φυσαλίδες του αέρα να διογκωθούν προκαλώντας αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας (Anton et al., 2009; Sacchetti et al., 2004; Yu et al., 2013). Η αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας με την αύξηση της αρχικής υγρασίας αποδίδεται στη μεταβολή των ρεολογικών χαρακτηριστικών του μίγματος. Η υγρασία μειώνει το ιξώδες της ζύμης και την τριβή μεταξύ της ζύμης και του εσωτερικού του εκβολέα, οδηγώντας σε μείωση της ζελατινοποίησης του αμύλου και στη δημιουργία πιο συμπαγών τελικών προϊόντων (Liu et al., 2000). Επιπλέον, εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, το μίγμα υφίσταται κατά τη διάρκεια της εκβολής υαλώδη μετάπτωση, διευκολύνοντας, έτσι, τη δημιουργία πυκνών δομών.

Αντίθετη επίδραση προκαλούν οι συνθήκες εκβολής (θερμοκρασία εκβολής και ταχύτητα περιστροφής κοχλιών). Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής βοηθά στην ανάπτυξη φυσαλίδων κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Ως αποτέλεσμα αυτού, παράγονται προϊόντα με υψηλότερο κενό χώρο και χαμηλότερη πυκνότητα (Ding et al., 2005). Η αυξημένη θερμοκρασία προκαλεί επίσης, αύξηση της υπερθέρμανσης του νερού, η οποία ενισχύει τη διόγκωση της ζύμης και μειώνει την πυκνότητα των προϊόντων (Ding et al., 2005; Jyothi et al., 2009). Ταυτόχρονα, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας των εκβαλλόμενων προϊόντων. Η υψηλή ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών οδηγεί σε αυξημένο ρυθμό διάτμησης στο εσωτερικό του εκβολέα. Καθώς η ζύμη είναι ψευδοπλαστική (Bhattacharya, 1997) η αύξηση του ρυθμού διάτμησης οδηγεί σε μείωση του ιξώδους, αύξηση της ελαστικότητας της ζύμης και ζελατινοποίηση του αμύλου (Hagenimana et al., 2006; Sacchetti et al., 2004). Οι Kumar et al. (2010) μελέτησαν τις ιδιότητες προϊόντων εκβολής ρυζάλευρου με προσθήκη αφυδατωμένου σε ρεύμα αέρα καρότου, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής κοχλιών. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες οδήγησαν σε αυξημένη πυκνότητα. Ωστόσο, η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας μείωσε την πυκνότητα και αύξησε τον κενό χώρο των δειγμάτων.

**Πίνακας 5. 7. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για τις δομικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής.**

| Φαινόμενη πυκνότητα   |          |          |          |          |          |       |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
|                       | $\rho_o$ | $\rho_x$ | $\rho_c$ | $\rho_T$ | $\rho_N$ | $R^2$ |
|                       | 259,183  | 1,984    | -5,382   | -1,667   | -0,283   | 0,821 |
| <i>p</i> -value       | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    |       |
| Συντελεστής διόγκωσης |          |          |          |          |          |       |
|                       | $Exp_o$  | $Exp_x$  | $Exp_c$  | $Exp_T$  | $Exp_N$  | $R^2$ |
|                       | 2,241    | -0,427   | 2,526    | -0,803   | 0,209    | 0,826 |
| <i>p</i> -value       | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    |       |

### 5.5.4.3 Πορώδες

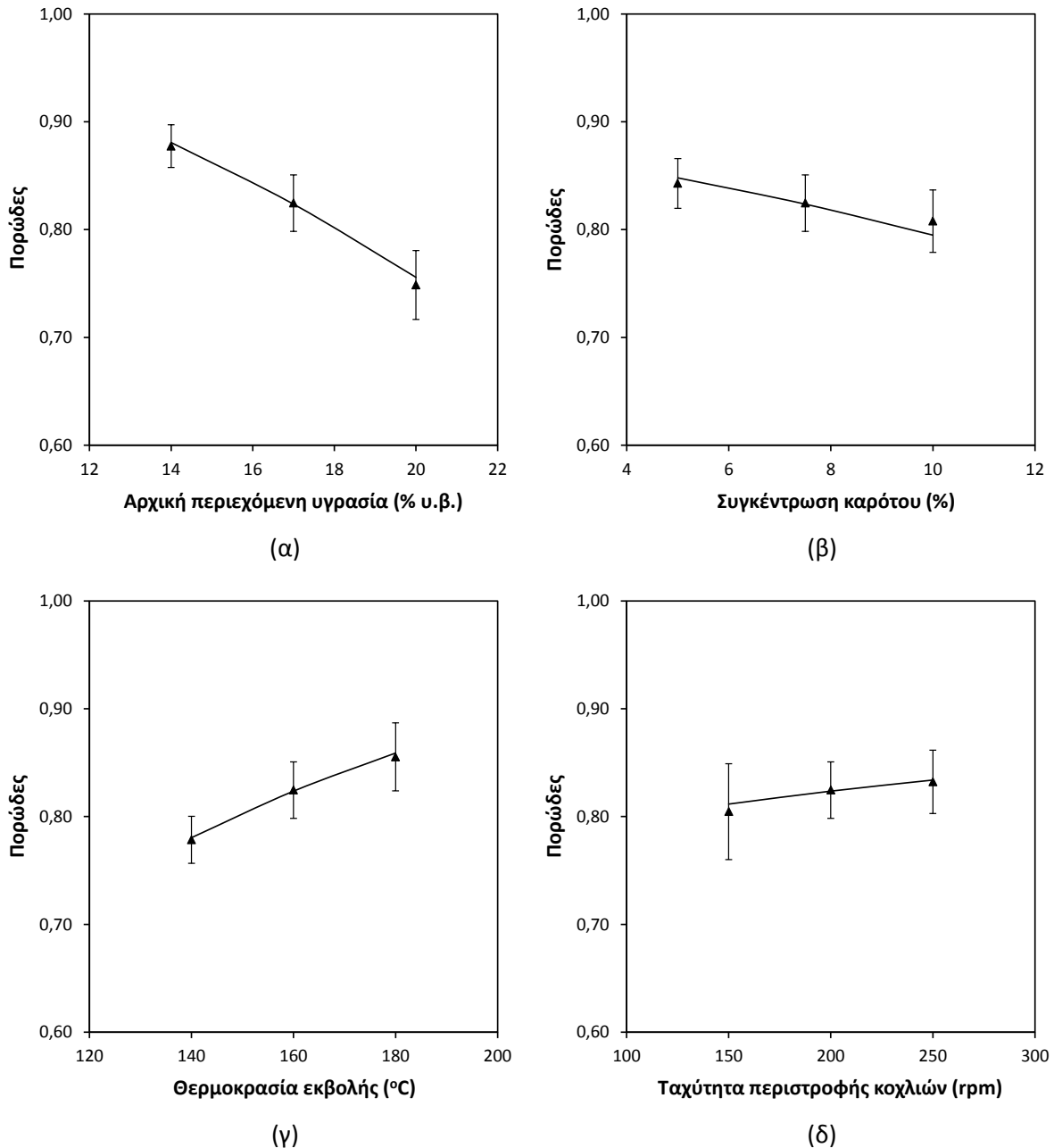
Η μεταβολή του πορώδους των εκβαλλόμενων προϊόντων με τις συνθήκες επεξεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών παρουσίασε την αντίθετη τάση σε σχέση με τη φαινόμενη πυκνότητα (Σχήμα 5. 16), καθώς τα μεγέθη αυτά είναι αντιστρόφως ανάλογα. Το πορώδες όλων των προϊόντων παρουσίασε υψηλές τιμές, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό και έρχεται σε συμφωνία με τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Τόσο τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών όσο και οι συνθήκες επεξεργασίας επηρέασαν σημαντικά ( $p < 0,05$ ) το πορώδες των παραχθέντων προϊόντων. Η αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας και η αύξηση της ποσότητας του καρότου στο αρχικό

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

μίγμα προκάλεσαν τη μείωση του πορώδους, ενώ αντίθετα η αύξηση των παραμέτρων των συνθηκών εκβολής (θερμοκρασία εκβολής και ταχύτητα περιστροφής κοχλιών) προκάλεσε την αύξηση του πορώδους. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 140 σε 180°C οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,78 σε 0,86, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,80 σε 0,83. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας τροφοδοσίας από 14 σε 20% οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,88 σε 0,75, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου από 5 σε 10% οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,85 σε 0,80.

Η αρχική υγρασία του μίγματος αποτελεί βασικό παράγοντα για τον καθορισμό των ιδιοτήτων ροής της ζύμης κατά τη διάρκεια της εκβολής. Αυξημένη υγρασία τροφοδοσίας μειώνει το ιξώδες του μίγματος και την τριβή των κοχλιών, οδηγώντας σε χαμηλότερη ροπή και κατά συνέπεια σε χαμηλότερο πορώδες. Η παρουσία των ινών επίσης, μειώνει τη διόγκωση και τη ζελατινοποίηση του αμύλου, οδηγώντας κατά συνέπεια σε μειωμένο πορώδες. Επιπλέον, η πορώδης δομή εξαρτάται από την πλαστικότητα της μάζας, η οποία βασίζεται κυρίως στο άμυλο. Η παρουσία των μη-πλαστικοποιητικών ουσιών, όπως είναι οι ίνες, μειώνει τη διόγκωση και τη δημιουργία πόρων (Steel et al., 2012). Επίσης, οι Nor et al. (2013) και Jin et al. (1995) αναφέρουν ότι αυξημένα επίπεδα σακχάρων, όπως συμβαίνει με αύξηση της ποσότητας καρότου στο μίγμα, μειώνουν το ιξώδες του τήγματος οδηγώντας σε προϊόντα αυξημένης πυκνότητας και χαμηλότερου πορώδους.

Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής οδήγησε σε προϊόντα αυξημένου πορώδους. Οι υψηλές θερμοκρασίες διαταράσσουν τους κόκκους του αμύλου σχηματίζοντας μια ιξώδη μάζα, η οποία παγιδεύει τα αέρια που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της εκβολής, οδηγώντας σε μια λιγότερο πυκνή δομή με υψηλό πορώδες (Steel et al., 2012). Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία επεξεργασίας τόσο υψηλότερο είναι το πορώδες, γεγονός το οποίο είναι αντίθετο με τη θεωρία της υαλώδους μετάπτωσης. Αυτό οφείλεται στην ταχεία εξάτμιση των ατμών του νερού στην έξοδο του εκβολέα. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών αυξάνει την απόλυτη πίεση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του εκβολέα. Όταν η ζύμη εξωθείται μέσω της μήτρας, η απότομη πτώση πίεσης σχηματίζει περισσότερους υδρατμούς, οδηγώντας σε μεγαλύτερη διόγκωση και αυξημένο πορώδες.



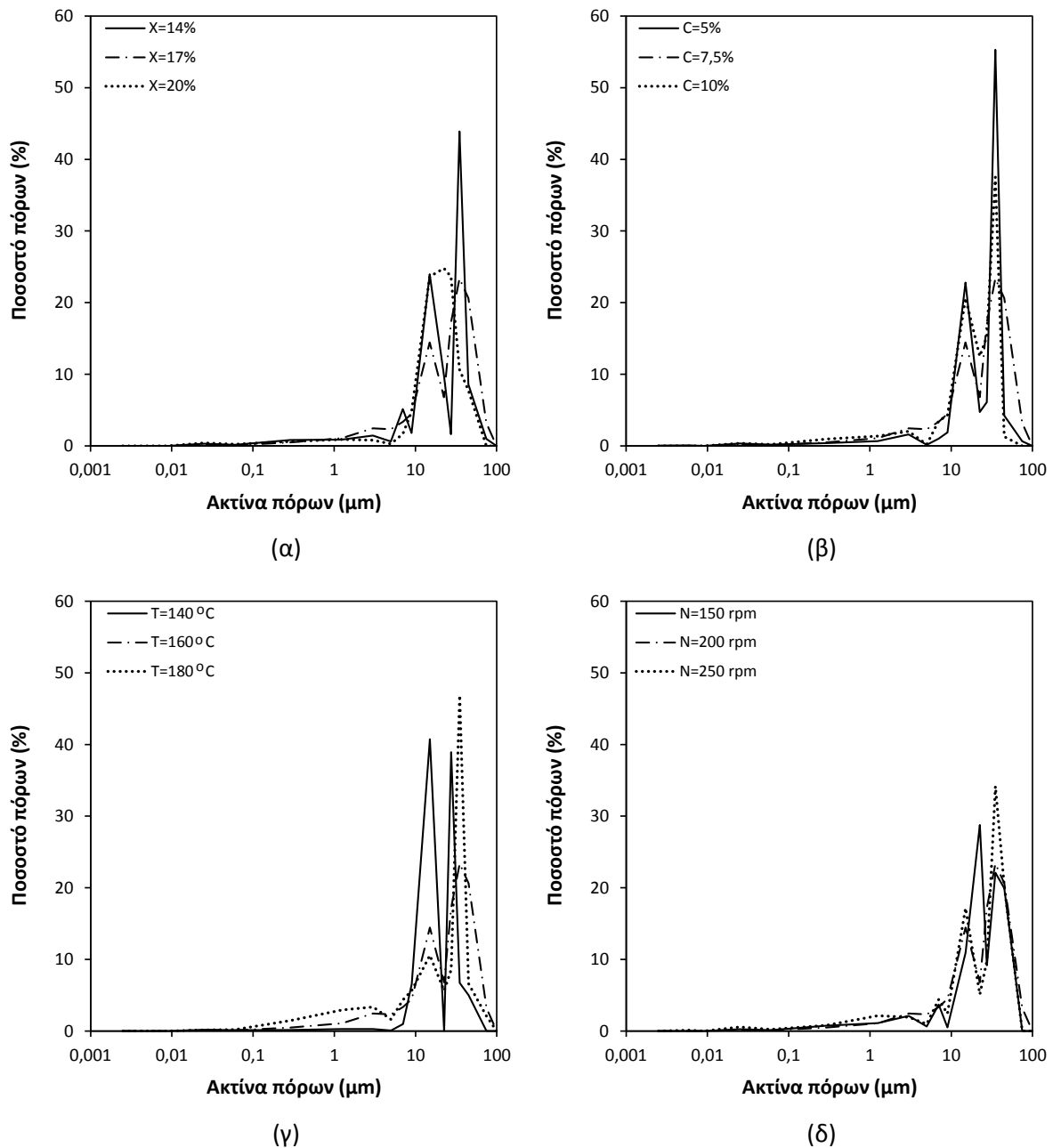
Σχήμα 5. 16. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στο πορώδες των προϊόντων εκβολής.

#### 5.5.4.4 Κατανομή πόρων

Η κατανομή πόρων των προϊόντων εκβολής αξιολογήθηκε με ποροσιμετρία υδραργύρου και απεικονίζεται στο Σχήμα 5. 17. Λόγω του γεγονότος ότι η ποροσιμετρία υδραργύρου μετρά πόρους μικρότερους από 100 μm, η σύγκριση μεταξύ των δειγμάτων θα γίνει σε αυτή τη βάση (Jamroz et al., 1999). Τα δείγματα με υψηλή αρχική υγρασία και υψηλή συγκέντρωση σε καρότο παρουσίασαν μικρότερους πόρους, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες εκβολής και οι υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής κοχλιών οδήγησαν στο σχηματισμό πόρων με μεγαλύτερες διαμέτρους. Όπως

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

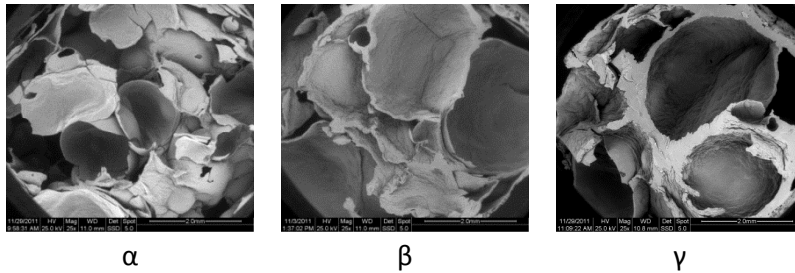
παρατηρείται, τα δείγματα τα οποία περιείχαν αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία 14% υ.β. ανέπτυξαν πόρους με μεγαλύτερη ακτίνα. Η προσθήκη του καρότου επίσης, δημιούργησε πόρους με μικρότερες διαμέτρους. Η παρουσία των ινών του καρότου διαρρηγνύει τα κυτταρικά τοιχώματα, μειώνει τη ζελατινοποίηση του αμύλου και οδηγεί σε προϊόντα με μικρούς πόρους. Παράλληλα, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών και της θερμοκρασίας εκβολής προκάλεσε μία ελαφρά αύξηση της διαμέτρου των πόρων των προϊόντων.



Σχήμα 5. 17. Κατανομή πόρων των προϊόντων εκβολής ως συνάρτηση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ).

Οι φωτογραφίες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρέχουν μία εικόνα για την αρχιτεκτονική των κυττάρων των προϊόντων εκβολής (Σχήμα 5. 18). Όπως παρατηρείται, η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία και της συγκέντρωσης σε καρότο οδήγησε στη δημιουργία λιγότερων πόρων και πιο συμπαγών δομών. Η παρατήρηση αυτή είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τις άλλες μεθόδους μέτρησης. Η προσθήκη της σκόνης καρότου στο μίγμα προκάλεσε κάποιες ασυνέχειες και μείωσε την ελαστικότητα της ζύμης, με αποτέλεσμα τη μείωση των πόρων (Karkle et al., 2012). Η αύξηση των συνθηκών λειτουργίας (θερμοκρασία εκβολής και ταχύτητα περιστροφής κοχλιών), οδήγησε σε προϊόντα με υψηλότερο πορώδες.

#### Α. Αρχική περιεχόμενη υγρασία, $X$ (% υ.β.)

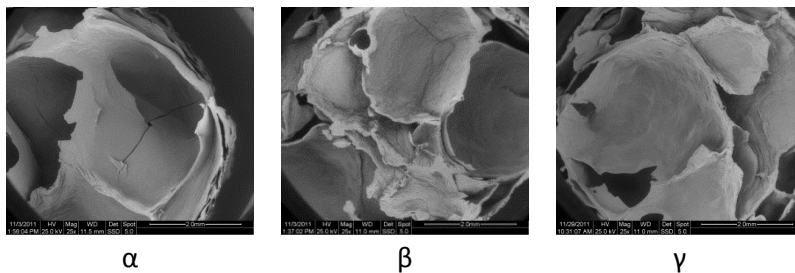


α

β

γ

#### Β. Συγκέντρωση καρότου, $C$ (%)

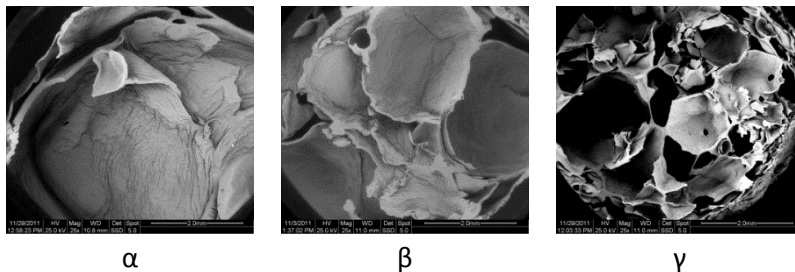


α

β

γ

#### Γ. Θερμοκρασία εκβολής, $T$ (°C)

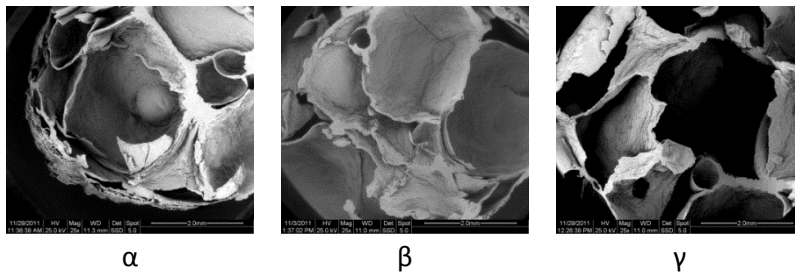


α

β

γ

#### Δ. Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών, $N$ (rpm)



α

β

γ

Σχήμα 5. 18. Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη μικροδομή των προϊόντων εκβολής. Α: ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm) α)  $X=14\%$ , β)  $X=17\%$ , γ)  $X=20\%$ , Β: ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm) α)  $C=5\%$ , β)  $C=7,5\%$ , γ)  $C=10\%$ , Γ: ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) α)  $T=140^{\circ}\text{C}$ , β)  $T=160^{\circ}\text{C}$ , γ)  $T=180^{\circ}\text{C}$ , Δ: ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) α)  $N=150$  rpm, β)  $N=200$  rpm, γ)  $N=250$  rpm.

**5.5.4.5 Συντελεστής διόγκωσης**

Ο συντελεστής διόγκωσης των προϊόντων εκβολής συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας δίνεται στο Σχήμα 5. 19. Η ανάλυση παλινδρόμησης δείχνει ότι η προσαρμογή του προτεινόμενου προτύπου στα πειραματικά δεδομένα θεωρείται αρκετά ικανοποιητική. Το επιλεγμένο μαθηματικό πρότυπο περιέχει παραμέτρους με φυσική σημασία. Η υπολογιζόμενη σταθερά  $Exp_0$  είναι κοντά στη μέση τιμή του πειραματικού συντελεστή διόγκωσης ( $\overline{Exp}=2,264$ ). Η στατιστική επεξεργασία έδειξε ότι η συγκέντρωση καρότου και η θερμοκρασία εκβολής είχαν την πιο σημαντική επίδραση στη διόγκωση. Ο συντελεστής διόγκωσης μειώθηκε με την περιεκτικότητα σε υγρασία, τη συγκέντρωση του καρότου και τη θερμοκρασία εκβολής και αυξήθηκε με την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών. Οι τιμές του συντελεστή διόγκωσης κυμαίνονται από 1,68 έως 3,00 και είναι σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Hagenimana et al., 2006).

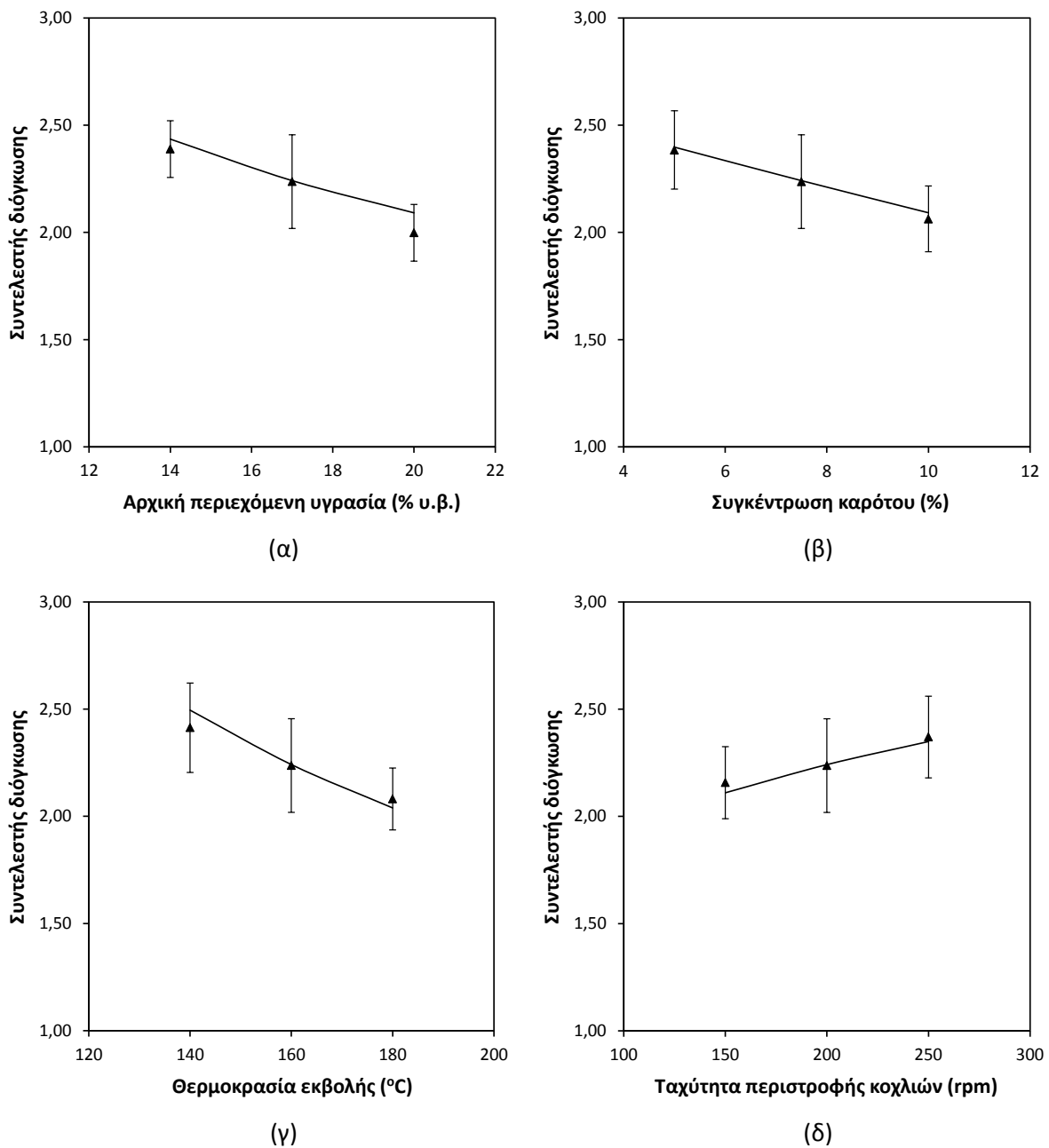
Η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία από 14% σε 20% μειώνει σημαντικά ( $p<0,05$ ) το ιξώδες του μίγματος και την τριβή μεταξύ της ζύμης και των κοχλιών και κατά συνέπεια οδηγεί σε μειωμένη διόγκωση και πιο συμπαγείς δομές (Agbisit et al., 2007; Liu et al., 2000). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί για προϊόντα εκβολής καθαρού ρυζάλευρου (Hagenimana et al., 2006).

Η αύξηση της ποσότητας καρότου στο αρχικό μίγμα προκάλεσε τη σημαντική ( $p<0,05$ ) μείωση της διόγκωσης από 2,40 σε 2,05. Προηγούμενες εργασίες αναφέρουν επίσης, μείωση της διόγκωσης που προκαλείται από την παρουσία ινών (Altan et al., 2008b). Καθώς ένα ποσοστό του αμύλου αντικαταστάθηκε από καρότο, η συγκέντρωση των φυτικών ινών και των σακχάρων στο αρχικό μίγμα αυξήθηκε. Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των συστατικών και του αμύλου οδήγησε στο σχηματισμό λιγότερο διογκωμένων προϊόντων (Anton et al., 2009; Onwulata et al., 2001). Επίσης, οι Nor et al. (2013) και Jin et al. (1995) αναφέρουν ότι αυξημένα επίπεδα σακχάρων μειώνουν το ιξώδες του τήγματος οδηγώντας σε προϊόντα χαμηλής διόγκωσης. Η μειωμένη διόγκωση και η αυξημένη πυκνότητα με αύξηση της περιεκτικότητας των σακχάρων οφείλεται στο συνδυασμό της μείωσης της ανάπτυξης φυσαλίδων και της αύξησης του βαθμού συρρίκνωσης κατά την έξοδο από τη μήτρα. Η μείωση του ιξώδους μειώνει τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική, μειώνοντας τη θερμοκρασία του προϊόντος στη μήτρα. Επίσης, δεδομένου ότι η μετατροπή του αμύλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μηχανική ενέργεια, η μείωση της μηχανικής ενέργειας αναμένεται να μειώσει τον βαθμό μετατροπής του αμύλου. Ο χαμηλότερος βαθμός μετατροπής του αμύλου οδηγεί σε μικρότερο βαθμό διόγκωσης (Fan et al., 1996). Επίσης, η προσθήκη χαμηλού μοριακού βάρους πλαστικοποιητών, όπως είναι το νερό και τα σάκχαρα, μειώνει τη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως του τήγματος και, ως εκ τούτου, αυξάνει το εύρος θερμοκρασίας πάνω από την οποία τα προϊόντα συρρικνώνονται.

Όσον αφορά στη θερμοκρασία εκβολής, η αύξησή της προκαλεί, σε γενικές γραμμές, την αύξηση της διόγκωσης, καθώς η υπερθέρμανση του νερού στις υψηλότερες θερμοκρασίες ευνοεί την ανάπτυξη φυσαλίδων. Η μείωση της διόγκωσης από 2,40 σε 2,10 με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη, είναι πιθανόν να οφείλεται σε μεγαλύτερη αποικοδόμηση του αμύλου κατά την εκβολή στις υψηλότερες θερμοκρασίες (Hagenimana et al., 2006). Η μείωση της διόγκωσης και η αύξηση του πορώδους με την αύξηση της θερμοκρασίας, που παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, παρατηρήθηκε και από άλλους ερευνητές (Hagenimana et al., 2006; Jyothi et al., 2009).

Παράλληλα, ο συντελεστής διόγκωσης επηρεάστηκε σημαντικά ( $p<0,05$ ) από την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών και παρουσίασε μία θετική συσχέτιση. Η αύξηση της ταχύτητας

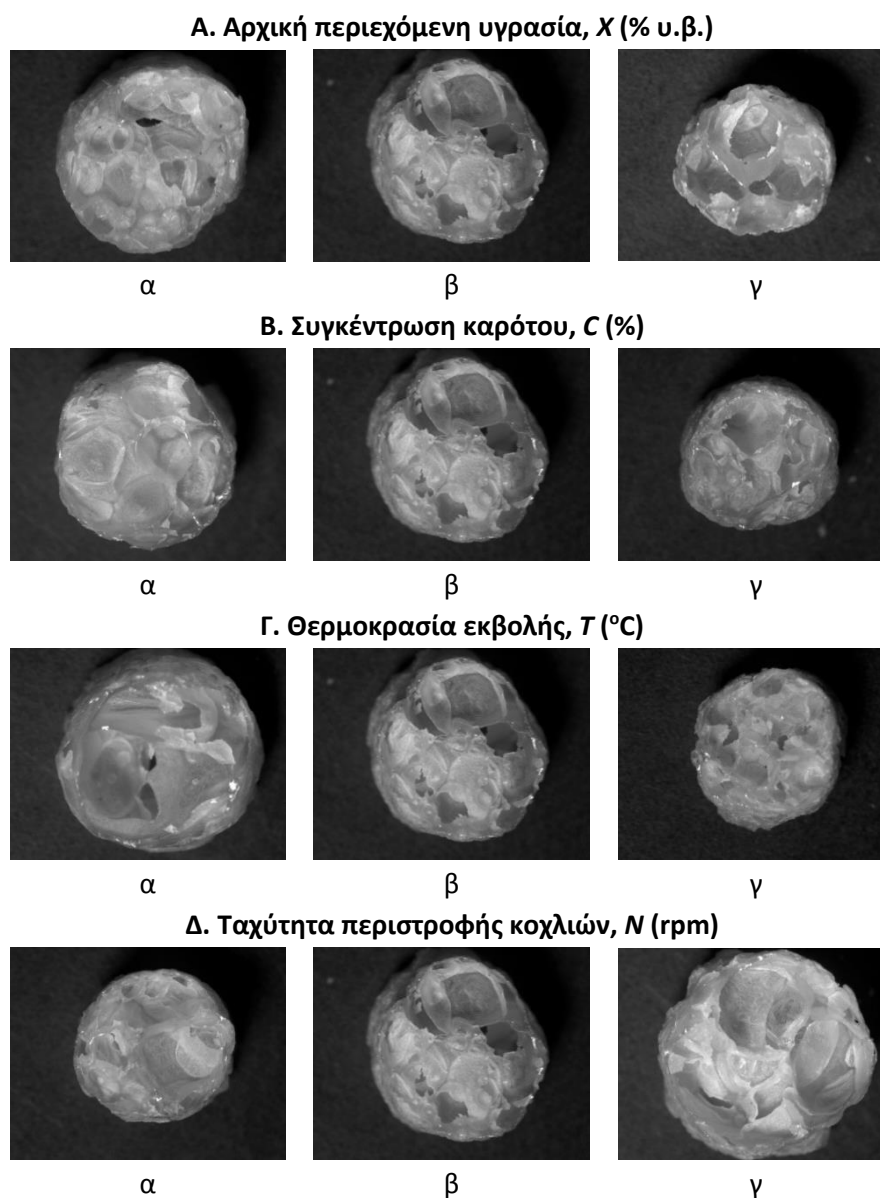
περιστροφής των κοχλιών οδηγεί σε υψηλότερη μηχανική ενέργεια, μειώνει το χρόνο παραμονής και προκαλεί μείωση του ιξώδους του μίγματος. Επιπλέον, οδηγεί σε αύξηση της ελαστικότητας της ζύμης, που έχει ως συνέπεια το σχηματισμό περισσότερο διογκωμένων προϊόντων (Lue & Huff, 1991).



Σχήμα 5. 19. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στο συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής.

## ΔΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται και με τη χρήση στερεομικροσκοπίου (Σχήμα 5. 20).



**Σχήμα 5. 20.** Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στη διόγκωση των προϊόντων εκβολής. A: ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm) α)  $X=14\%$ , β)  $X=17\%$ , γ)  $X=20\%$ , B: ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm) α)  $C=5\%$ , β)  $C=7,5\%$ , γ)  $C=10\%$ , Γ: ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) α)  $T=140^{\circ}\text{C}$ , β)  $T=160^{\circ}\text{C}$ , γ)  $T=180^{\circ}\text{C}$ , Δ: ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) α)  $N=150$  rpm, β)  $N=200$  rpm, γ)  $N=250$  rpm.

## 5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι διάφορες μέθοδοι και συνθήκες επεξεργασίας επηρέασαν σημαντικά τη δομή των παραχθέντων προϊόντων. Η γνώση της επίδρασης των μεθόδων και συνθηκών ξήρανσης και εκβολής στα χαρακτηριστικά των προϊόντων είναι υψίστης σημασίας για την ανάπτυξη προϊόντων υψηλής ποιότητας, προηγμένων χαρακτηριστικών και αυξημένης αποδοχής από τους καταναλωτές.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η ξήρανση υπό κατάψυξη οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων μεγάλου πορώδους, τα οποία χαρακτηρίζονται από πόρους μεγαλύτερων διαμέτρων. Αντίθετα, η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση σε ρεύμα αέρα οδήγησε στην ανάπτυξη πιο συμπαγών



δομών. Όσον αφορά στα λυοφιλιωμένα προϊόντα, η μείωση της πίεσης ξήρανσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους, τόσο των κόκκων ρυζιού όσο και των άλλων γεωργικών προϊόντων. Όσον αφορά στα προϊόντα ρυζιού, σε δείγματα που έβρασαν για 20 min, η αύξηση της πίεσης ξήρανσης από 0,04 mbar σε 1,25 mbar οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,65 σε 0,60. Επίσης, η αύξηση του χρόνου βρασμού πριν την ξήρανση, οδήγησε σε προϊόντα αυξημένου πορώδους. Όσον αφορά στα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα) η μείωση της πίεσης από 1,50 mbar σε 0,06 mbar οδήγησε σε αύξηση του πορώδους κατά 5 με 10%.

Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, μελετήθηκε η επίδραση τεσσάρων ανεξάρτητων παραμέτρων (αρχική υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας, συγκέντρωση καρότου, θερμοκρασία εκβολής, ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών) στην πυκνότητα, το πορώδες και το συντελεστή διόγκωσης προϊόντων εκβολής ρυζάλευρου και ξηρής σκόνης καρότου. Η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας από 14 σε 20% ( $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,88 σε 0,75 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,20, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου από 5 σε 10% ( $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,85 σε 0,80 και σε μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,05. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm ( $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) αύξησε το συντελεστή διόγκωσης από 2,15 σε 2,35 και μείωσε τη φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων. Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής από 140 σε 180°C ( $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,78 σε 0,86 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,10. Η αυξημένη θερμοκρασία εκβολής οδήγησε στην παραγωγή σνακ με υψηλό πορώδες, καθώς ευνοεί την ανάπτυξη των φυσαλίδων, αλλά οδήγησε ταυτόχρονα σε μειωμένη διόγκωση, πιθανόν εξαιτίας της μεγαλύτερης αποικοδόμησης του αμύλου κατά την εκβολή στις υψηλότερες θερμοκρασίες.



# 6.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Αντικείμενο και στόχοι

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πειραματική διαδικασία

Μαθηματικό πρότυπο

Αποτελέσματα - Συζήτηση αποτελεσμάτων

Συμπεράσματα



## 6.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η αποδοχή των διαφόρων τροφίμων από τους καταναλωτές βασίζεται σε ποικίλες ιδιότητες, όπως είναι η υφή, η εμφάνιση, η γεύση, το χρώμα, η δυνατότητα ενυδάτωσης, η διάχυση μάζας, η διατηρησιμότητα, κτλ. Οι ιδιότητες αυτές επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες επεξεργασίας αλλά και τη διαμόρφωση της δομής των προϊόντων (Karathanos & Saravacos, 1993; Rahman, 2001). Μεταξύ των ιδιοτήτων αυτών, οι μηχανικές (υφή) και θερμικές ιδιότητες, καθώς και η ικανότητα ρόφησης υγρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

### Μηχανικές ιδιότητες (ιδιότητες υφής)

Οι μηχανικές ιδιότητες των τροφίμων καθορίζουν την υφή τους και επηρεάζουν τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά, και επομένως την αποδοχή τους από τους καταναλωτές (Ormerod et al., 2004). Η γνώση των ιδιοτήτων υφής μπορεί να βελτιώσει την τεχνολογία που εφαρμόζεται μέχρι στιγμής, στο σχεδιασμό διαφόρων διεργασιών επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών, αλλά και πολλών «έτοιμων» προς κατανάλωση προϊόντων (Mayor et al., 2007).

Η υφή των προϊόντων χαρακτηρίζεται από μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η τάση θραύσης, η παραμόρφωση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας, οι οποίες είναι ενδεικτικές για τη σκληρότητα και την τραγανότητά τους. Η υφή των τροφίμων αξιολογείται με οργανοληπτικές μεθόδους, οι οποίες όμως είναι ιδιαίτερα ακριβές και απαιτούν εκπαιδευμένους δοκιμαστές. Για το λόγο αυτό, οι δοκιμές αυτές μπορούν να αντικατασταθούν με μηχανικές δοκιμές οι οποίες είναι λιγότερο ακριβές και λιγότερο χρονοβόρες (Sahin & Sumnu, 2006). Οι μηχανικές δοκιμές συνδέονται με χαρακτηριστικά του υλικού τα οποία είναι αντιληπτά από τον ανθρώπινο οργανισμό κατά το δάγκωμα και το μάσημα. Ως αποτέλεσμα αυτού, ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των τροφίμων είναι υψίστης σημασίας για την περιγραφή των χαρακτηριστικών υφής. Η πιο κοινή μέθοδος προσδιορισμού των ιδιοτήτων υφής στα τρόφιμα είναι η μονοαξονική δοκιμή συμπίεσης, η οποία περιεγράφηκε αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα.

### Ιδιότητες προσρόφησης ύδατος

Η ανάπτυξη μικροοργανισμών, η ενζυμική δράση και η υποβάθμιση των τροφίμων σχετίζονται με την ενεργότητα ύδατος. Η γνώση των ισόθερμων ρόφησης και της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της σταθερότητας των τροφίμων και την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας αποθήκευσης. Οι ισόθερμες ρόφησης συναντώνται σε διεργασίες ξήρανσης, ανάμιξης, συσκευασίας και αποθήκευσης (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).

### Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, $T_g$ )

Η γνώση των διαφόρων μεταπτώσεων φάσεων των τροφίμων είναι ιδιαίτερα σημαντική για το χαρακτηρισμό της ποιότητάς τους και το σχεδιασμό των διεργασιών επεξεργασίας τους (Sablan et al., 2009). Η επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στις χημικές μεταβολές που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και αποθήκευσης των τροφίμων σχετίζεται με τη φυσική κατάσταση των προϊόντων, κυρίως σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996).

Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τη θεωρία της υαλώδους μετάπτωσης για να εξηγήσουν τους διάφορους μηχανισμούς υποβάθμισης των τροφίμων, όπως επίσης και τα φαινόμενα συρρίκνωσης,

κατάρρευσης και δημιουργίας ρωγμών κατά την ξήρανση διαφόρων τροφίμων (Cnossen et al., 2001; Karathanos et al., 1993; Karathanos et al., 1996a; Krokida et al., 1998a; Rahman, 2001; Sablani et al., 2008). Εάν η θερμοκρασία των προϊόντων είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, το ιξώδες των προϊόντων μειώνεται και τα υλικά συρρικνώνονται ή καταρρέουν. Επίσης, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης έχει αποκτήσει αυξημένο ενδιαφέρον λόγω της σημαντικής επίδρασής της στην υφή, την ποιότητα και τις ιδιότητες μεταφοράς διαφόρων τροφίμων (Maroulis & Saravacos, 2001; Roos, 1995). Παράλληλα, η αποθήκευση των τροφίμων σε θερμοκρασία πάνω ή κοντά στο σημείο υαλώδους μετάπτωσης αυξάνει την κινητικότητα των μοριακών αλυσίδων και ελαττώνει τη σταθερότητα των προϊόντων. Οι θερμικές μεταπτώσεις μπορούν να προσδιοριστούν με ποικίλες μεθόδους, όπως είναι η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC) και η Θερμομηχανική Ανάλυση (Thermomechanical Analysis, TMA) (Normand & Marshall, 1989; Perdon et al., 2000; Sun et al., 2002). Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για τον προσδιορισμό των θερμικών μεταπτώσεων στα τρόφιμα (Georget et al., 1999; Pereira et al., 2009), όπως περιεγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Οι παραπάνω ιδιότητες εξαρτώνται σημαντικά από τις συνθήκες παραγωγής και επεξεργασίας των τροφίμων, αλλά αποτελούν και ισχυρή συνάρτηση της διαμόρφωσης των δομικών τους χαρακτηριστικών. Επομένως, κύριος στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η μελέτη της επίδρασης των μεθόδων και συνθηκών επεξεργασίας στις ιδιότητες των αφυδατωμένων τροφίμων και των προϊόντων εκβολής, καθώς επίσης, και η επίδραση της δομής στις ιδιότητες αυτές. Απλά μαθηματικά πρότυπα προσαρμόζονται στα πειραματικά δεδομένα με στόχο την πρόβλεψη των ιδιοτήτων από τις συνθήκες και μεθόδους επεξεργασίας, όπως επίσης, και τη συσχέτιση των επιμέρους ιδιοτήτων με τις δομικές ιδιότητες των τροφίμων.

## 6.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 6.2.1 Μηχανικές ιδιότητες

Η υφή των τροφίμων μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους, όπως αναλυτή υφής, δοκιμή διάτρησης, μονοαξονική δοκιμή συμπίεσης, το κελί διάτμησης Warner-Bratzler, δοκιμές κάμψης τριών σημείων ή δοκιμή κρούσης Izod (Anton & Luciano, 2007; Hayter & Smith, 1988; Hutchinson et al., 1987; Mazumder et al., 2007; Vincent, 1998). Η μονοαξονική δοκιμή συμπίεσης είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για τον προσδιορισμό της υφής διαφόρων τροφίμων.

Η πορώδης δομή των προϊόντων εκβολής αλλά και των αφυδατωμένων προϊόντων τους προσδίδει τη χαρακτηριστική αφρώδη υφή. Οι Ashby και Medalist (1983) αναφέρουν ότι κατά τη συμπίεση τέτοιων υλικών, τα κυτταρικά τοιχώματα αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, γεγονός που δημιουργεί την αρχική γραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης. Μετά από μία κρίσιμη τιμή τάσης, παρατηρείται κατάρρευση της δομής λόγω ψαθυρής θραύσης ή ελαστική κατάρρευση των κυτταρικών τοιχωμάτων (Attenburrow et al., 1989). Οι Gibson και Ashby (1997) προτείνουν ένα μοντέλο για να χαρακτηρίσουν την τρισδιάστατη δομή των πορωδών υλικών και να ποσοτικοποιήσουν την εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και της τάσης από τη δομή. Η βασική παράμετρος η οποία αναμένεται να χαρακτηρίσει τη μικροδομή είναι η αναλογία της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού προς τη φαινόμενη πυκνότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων.

$$\frac{E}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2$$

όπου,  $E$  (Pa) είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού,  $E_s$  (Pa) είναι το μέτρο ελαστικότητας των τοιχωμάτων,  $\rho_\phi$  ( $\text{kg/m}^3$ ) είναι η φαινόμενη πυκνότητα του υλικού,  $\rho_s$  ( $\text{kg/m}^3$ ) είναι φαινόμενη πυκνότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων,  $C_1$ , είναι σταθερά.

Κάποιοι ερευνητές έχουν μελετήσει μέχρι στιγμής την επίδραση του πορώδους και των συνθηκών επεξεργασίας στις ιδιότητες υφής των τροφίμων (Huang & Clayton, 1990). Οι Attenburrow et al. (1989) αναφέρουν μία συσχέτιση μεταξύ των δομικών και μηχανικών ιδιοτήτων για αφράτο κέικ, ενώ οι Keetels et al. (1996) για αμυλώδες ψωμί. Οι Attenburrow et al. (1989) παρατήρησαν επίσης, ότι με την αύξηση της ενεργότητας νερού, το μέτρο ελαστικότητας και η κρίσιμη τάση μειώθηκαν κατά μία τάξη μεγέθους, ενώ οι ιδιότητες αυτές συσχετίστηκαν με την οργανοληπτική σκληρότητα. Η σχέση των ιδιοτήτων υφής με τις δομικές ιδιότητες κατά την ωσμωτική αφυδάτωση κολοκύθας μελετήθηκε σε παλαιότερη εργασία (Mayor et al., 2007). Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση μειώθηκε η τάση σπαργής με αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Οι Lee & Rhee (2007) εξέτασαν τα χαρακτηριστικά πάστας από άμυλο ρυζιού που αφυδατώθηκε υπό κατάψυξη και αναφέρουν ότι οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάστηκαν από την περιεκτικότητα σε άμυλο και τη θερμοκρασία.

Οι Rahman & Sablani (2003) αναφέρουν ότι κατά την ξήρανση υπό κατάψυξη ψαριών, η μέγιστη δύναμη και το έργο διάτρησης αυξήθηκαν με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης, πιθανώς εξαιτίας της μείωσης του πορώδους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης υπό κατάψυξη. Οι Krokida et al. (1998b) μελέτησαν τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες δειγμάτων καρότου και πατάτας χρησιμοποιώντας μονοαξονικές δοκιμές συμπίεσης. Η συμπεριφορά των υλικών δεν επηρεάστηκε από την ταχύτητα παραμόρφωσης, αλλά εξαρτήθηκε σημαντικά από την περιεχόμενη υγρασία. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης η παραμόρφωση θραύσης αυξάνεται, καθώς η περιεχόμενη υγρασία μειώνεται. Η ξήρανση υπό κατάψυξη οδηγεί σε υλικά εύθραυστης δομής εξαιτίας του υψηλού πορώδους και της απώλειας ελαστικότητας. Η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση σε ρεύμα αέρα οδηγεί σε πιο ανθεκτικά προϊόντα, εξαιτίας της συρρίκνωσης.

Οι Iwaniw & Mittal (1990) μελέτησαν επίσης, την ξήρανση υπό κατάψυξη δειγμάτων φράουλας και προσδιόρισαν τις βέλτιστες συνθήκες που οδηγούν στην ελάχιστη υποβάθμιση της υφής. Οι συνθήκες ξήρανσης δεν επηρέασαν σημαντικά την υφή των προϊόντων. Αντίθετα, η υφή των προϊόντων επηρεάστηκε από την ταχύτητα κατάψυξης. Η υφή των προϊόντων διατηρήθηκε καλύτερα σε υψηλές ταχύτητες ψύξης, καθώς ο σχηματισμός μικρών κρυστάλλων πάγου περιόρισε την καταστροφή των ιστών που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της κατάψυξης.

Οι Bondaruk et al. (2007) μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες δειγμάτων πατάτας που αφυδατώθηκαν με συμβατική μέθοδο και με μικροκύματα υπό κενό. Η μέση δύναμη ήταν υψηλότερη για τα ζεματισμένα και αφυδατωμένα σε θερμό αέρα δείγματα και χαμηλότερη για τα αφυδατωμένα σε μικροκύματα υπό κενό δείγματα. Εξαιτίας των καλά διατηρημένων κυτταρικών δομών, καθώς και των ισχυρών συνδέσεων μεταξύ των κυττάρων, τα ζεματισμένα και αφυδατωμένα σε θερμό αέρα δείγματα πατάτας χαρακτηρίστηκαν από υψηλότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με τα μη ζεματισμένα δείγματα. Επίσης, τα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε υψηλότερη θερμοκρασία ( $70^\circ\text{C}$ ) έδειξαν υψηλότερη μηχανική αντοχή, σε σύγκριση με τα δείγματα που αφυδατώθηκαν στους  $50^\circ\text{C}$ , παρά το υψηλότερο πορώδες. Οι Ormerod et al. (2004) παρατήρησαν ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η αστοχία δειγμάτων καρότου και κάστανου εξαρτώνται από το πορώδες των ιστών και την ευκολία της ροής του ρευστού, η οποία επηρεάζεται από την ταχύτητα παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση. Οι Stanley & DeMan (1978) μέτρησαν τη φαινόμενη πυκνότητα και τη διατμητική δύναμη πρωτεϊνών

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

σόγιας οι οποίες αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα στους 50 και 100°C. Η διατμητική δύναμη ήταν μεγαλύτερη όταν το δείγμα αφυδατώθηκε στους 100°C σε σχέση με το δείγμα που αφυδατώθηκε στους 50°C.

Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, οι συνθήκες επεξεργασίας επηρεάζουν σημαντικά την υφή των προϊόντων. Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας και του ποσοστού του περιεχόμενου υλικού συνεκβολής οδηγεί σε αύξηση της δύναμης που απαιτείται για το σπάσιμο των προϊόντων εκβολής (Karkle et al., 2012; Liu et al., 2000; Obatolu et al., 2005). Οι Ryu & Ng (2001) αναφέρουν ότι η αύξηση της υγρασίας σε προϊόντα σιτάλευρου και καλαμποκιού οδηγεί σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας των προϊόντων. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδηγεί σε λιγότερο συμπαγή και πιο μαλακά προϊόντα, ειδικότερα σε υψηλές θερμοκρασίες εκβολής. Σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας, η αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας αυξάνει σημαντικά τη σκληρότητα των προϊόντων εκβολής, ενώ σε υψηλά επίπεδα υγρασίας η επίδραση γίνεται λιγότερο σημαντική (Ding et al., 2006). Επίσης, οι Brncic et al. (2006) παρατήρησαν ότι η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, η θερμοκρασία εκβολής και η περιεκτικότητα σε υγρασία έχουν σημαντική επίδραση στη σκληρότητα των προϊόντων εκβολής με βάση το άλευρο σίτου. Η περιεκτικότητα σε υγρασία έχει μια θετική επίδραση στη σκληρότητα των προϊόντων, ενώ η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών και η θερμοκρασία έχουν αρνητική επίπτωση. Οι Liu et al. (2000) παρατήρησαν επίσης, ότι η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα οδηγεί σε μείωση της σκληρότητας των εκβαλλόμενων προϊόντων. Ακόμα, η προσθήκη παραπροϊόντων από φρούτα στο μίγμα εκβολής επηρέασε τις μηχανικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής με βάση το ρυζάλευρο. Σε υψηλές και χαμηλές συγκεντρώσεις, η σκληρότητα των προϊόντων εμφανίστηκε μειωμένη, ενώ σε ενδιάμεσα επίπεδα η σκληρότητα αυξήθηκε (Yagci & Gogus, 2009).

Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει επικεντρωθεί στη συμβολή της μικροδομής στις ιδιότητες υφής των τροφίμων (Cheng et al., 2007). Πολλές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε προϊόντα εκβολής (Agbisit et al., 2007; Barrett et al., 1994; Gogoi et al., 2000) συνδέουν την τάση θραύσης, την παραμόρφωση θραύσης, το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο παραμόρφωσης, κτλ. με δομικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η κυτταρική πυκνότητα, το μέσο μέγεθος κυττάρων και το πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων. Επίσης, το πορώδες επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες. Εκτός από το μέγεθος των πόρων, οι ιδιότητες υφής επηρεάζονται και από την κατανομή των πόρων μέσα στο υλικό. Οι Guraya & Toledo (1996) μελέτησαν τις δομικές και μηχανικές ιδιότητες διογκωμένων (puffed) προϊόντων και τη συσχέτισή τους με τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά και παρατήρησαν ότι το μέσο μέγεθος των πόρων, ο ειδικός όγκος και η κατανομή των πόρων έχουν σημαντική επίδραση στην υφή των προϊόντων.

### 6.2.2 Ιδιότητες προσρόφησης - Ενεργότητα ύδατος

Η αυξημένη ποιότητα και ασφάλεια των τροφίμων είναι οι βασικότεροι στόχοι της επιστήμης τροφίμων αλλά και της βιομηχανίας. Η γνώση της περιεκτικότητας σε υγρασία ισορροπίας των τροφίμων παίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική επεξεργασία τους και βοηθά επίσης, στην προδιαγραφή των συνθηκών αποθήκευσης των προϊόντων. Η ενεργότητα ύδατος παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη σταθερότητα των τροφίμων, τη διαθεσιμότητά τους για την ανάπτυξη μικροοργανισμών (αλλοιογόνων και παθογόνων) και τις διεργασίες αποικοδόμησης (ενζυμικές και μη ενζυμικές αντιδράσεις υποβάθμισης). Η μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας είναι, επομένως, σημαντική παράμετρος για την πρόβλεψη και τη διασφάλιση της ποιότητας και της



ασφάλειας των τροφίμων. Συνήθως, τα αλλοιογόνα και παθογόνα βακτήρια δεν αναπτύσσονται σε τιμή ενεργότητας νερού μικρότερη από 0,90 (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2006). Ακόμα, η ανάπτυξη μούχλας διακόπτεται σε τιμές ενεργότητας νερού μικρότερες από 0,80, με εξαίρεση τον μύκητα *Zygosaccharomyces rouxii* που μπορεί να αναπτυχθεί σε τιμές ενεργότητας νερού 0,61-0,65.

Το πορώδες των τροφίμων επηρεάζει, επίσης, τη θερμοδυναμική κατάσταση του νερού. Οι αλλαγές που πραγματοποιούνται στη δομή και τη γεωμετρία των τροφίμων κατά την ξήρανσή τους, επηρεάζουν τη ρόφηση της υγρασίας (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996). Οι Moraga et al. (2004) μελέτησαν τις ισόθερμες ρόφησης - εκρόφησης σε δείγματα φράουλας τα οποία είχαν προεπεξεργαστεί. Η προ-επεξεργασία προκάλεσε αλλαγές στη δομή των ιστών που επηρέασε την ικανότητα σύνδεσης του νερού. Οι Sablani et al. (2007a) συγκέντρωσαν πειραματικά δεδομένα ρόφησης νερού για διάφορα τρόφιμα από τη βιβλιογραφία. Η υγρασία στη μονοστοιβάδα κυμαινόταν από 2% έως 15% (υ.β.) ανάλογα με το υλικό.

Οι ισόθερμες καμπύλες ρόφησης και οι χρησιμοποιούμενες εξισώσεις δίνουν πληροφορίες για τον τρόπο σύνδεσης του νερού στα τρόφιμα και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του προσροφημένου νερού (Al-Muhtaseb et al., 2002). Οι ισόθερμες ρόφησης σε προϊόντα τροφίμων περιγράφονται κυρίως με χρήση της εξίσωσης GAB. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις η φυσική έννοια των παραμέτρων της εξίσωσης δεν ισχύει (Chirife et al., 1992; Gogus et al., 1998). Οι McLaughlin & Magee (1998) αναφέρουν ότι οι εξισώσεις GAB και Oswin έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα για τις ισόθερμες ρόφησης δειγμάτων πατάτας. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται για πατάτες από τους Wang & Brennan (1991) και για δείγματα πατάτας, καρότου, ντομάτας, πράσινης πιπεριάς και κρεμμυδιού από τους Kiranoudis et al. (1993). Οι Lomauro et al. (1985) αναφέρουν ότι η εξίσωση GAB έδωσε καλά αποτελέσματα για πάνω από το 75% των ισόθερμων ρόφησης των τροφίμων που μελέτησαν (αμυλούχα τρόφιμα, φρούτα, λαχανικά και προϊόντα με βάση το κρέας), ενώ το πρότυπο Oswin περιέγραψε το 57% των ισόθερμων ρόφησης των τροφίμων. Οι Siripatrawan & Jantawat (2006) αναφέρουν ότι η εξίσωση GAB παρουσιάζει τη βέλτιστη προσαρμογή στα δεδομένα ρόφησης των κράκερ ρυζιού σε όλο το εύρος ενεργοτήτων ύδατος, ενώ παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν για ωμό και ημιβρασμένο αναποφλοιώτο καστανό ρύζι (Reddy & Chakraverty, 2004) και άγριο ρύζι (San Marin et al., 2001).

Οι Albena & Nikolay (2004) προσδιόρισαν τις ισόθερμες ρόφησης – εκρόφησης σε άλευρο ρυζιού χρησιμοποιώντας τη σταθμική μέθοδο, σε τρεις θερμοκρασίες αποθήκευσης, 10, 20 και 30°C και ενεργότητες ύδατος που κυμαίνονταν από 0,11 έως 0,85. Στα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκαν τέσσερις εξισώσεις (τροποποιημένη εξίσωση Oswin, τροποποιημένη εξίσωση Halsey, τροποποιημένη εξίσωση Chung-Pfost και τροποποιημένη εξίσωση Henderson). Η υγρασία της μονοστοιβάδας εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση BET, ενώ οι θερμοότητες ρόφησης αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση Clausius-Clapeyron. Η τροποποιημένη εξίσωση Chung-Pfost και η τροποποιημένη εξίσωση Oswin θεωρήθηκαν οι πιο κατάλληλες για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της υγρασίας ισορροπίας, της ενεργότητας ύδατος και της θερμοκρασίας για το άλευρο ρυζιού. Η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης σε όλες τις ενεργότητες νερού, ενώ οι ισόθερμες παρουσίασαν τη χαρακτηριστική σιγμοειδή μορφή. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν βρεθεί και από άλλους ερευνητές. Οι Palirane & Driscoll (1993) αναφέρουν ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες μερικά μόρια νερού ενεργοποιούνται σε επίπεδα ενέργειας που τους επιτρέπουν να ξεφύγουν από τις θέσεις προσρόφησης τους, μειώνοντας, έτσι, την υγρασία ισορροπίας. Μία απόκλιση από τη συμπεριφορά αυτή έχει βρεθεί για ορισμένα σάκχαρα (γλυκόζη) και άλλα χαμηλού μοριακού βάρους συστατικά (άλατα), τα οποία γίνονται πιο

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

υγροσκοπικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες χάρη στην ικανότητά τους να διαλύονται στο νερό (Karsalis, 1987).

Οι Khalloufi et al. (2000) μελέτησαν τις ισόθερμες ρόφησης για διαφορετικά είδη λυοφιλιωμένων μούρων και μανιταριών. Όσον αφορά στα μούρα, δεν παρουσιάστηκε σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στην υγρασία ισορροπίας, στην περιοχή των θερμοκρασιών που μελετήθηκαν. Αντίθετα, η επίδραση της θερμοκρασίας στην υγρασία ισορροπίας για τα μανιτάρια ήταν σημαντική. Η εξίσωση GAB προσαρμόστηκε αρκετά καλά στα πειραματικά δεδομένα. Οι Pagano & Mascheroni (2005) μελέτησαν τις ισόθερμες ρόφησης κόκκων αμάραντου (*Amaranthus cruentus* L.) για ενεργότητες ύδατος που κυμαίνονταν από 0,03 έως 0,98 και θερμοκρασίες από 25 έως 90°C. Προσαρμόστηκαν πέντε εξισώσεις (τροποποιημένη εξίσωση Henderson, τροποποιημένη εξίσωση Chung-Pfost, τροποποιημένη εξίσωση Halsey, τροποποιημένη εξίσωση Oswin και εξίσωση GAB) στα πειραματικά δεδομένα. Η εξίσωση GAB προσαρμόστηκε καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα, ενώ η τροποποιημένη εξίσωση Halsey απορρίφθηκε.

Οι Maroulis et al. (1988) προσδιόρισαν τις ισόθερμες ρόφησης αφυδατωμένων προϊόντων σταφίδας, σύκων, δαμάσκηνων και βερίκοκων σε τέσσερις θερμοκρασίες (15, 30, 45 και 60°C) χρησιμοποιώντας τη σταθμική μέθοδο. Παρατήρησαν την αρνητική επίδραση της θερμοκρασίας στην υγρασία ισορροπίας σε χαμηλές ενεργότητες ύδατος, ενώ το αντίθετο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε σε υψηλότερες ενεργότητες. Παρατήρησαν επίσης, ότι η προσαρμογή της εξίσωσης GAB στα πειραματικά αποτελέσματα εξαρτάται από τη μέθοδο παλινδρόμησης. Σε χαμηλές τιμές ενεργότητας ύδατος, η ρόφηση του νερού οφείλεται κυρίως στα βιοπολυμερή και η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στη μείωση των ισόθερμων. Καθώς όμως η ενεργότητα ύδατος αυξάνεται πέρα από την ενδιάμεση περιοχή, το νερό αρχίζει να προσροφάται από τα σάκχαρα και τα άλλα συστατικά χαμηλού μοριακού βάρους, αντισταθμίζοντας την επίδραση της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της υγρασίας και η διασταύρωση των ισόθερμων. Το σημείο τομής εξαρτάται από τη σύνθεση του τροφίμου και τη διαλυτότητα των σακχάρων (Karsalis, 1987).

Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, οι Lazou & Krokida (2011) μελέτησαν τις ισόθερμες ρόφησης προϊόντων εκβολής από άλευρο καλαμποκιού με προσθήκη φακής, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ισόθερμες ρόφησης παρουσίασαν τη χαρακτηριστική καμπύλη σχήματος S και περιεγράφηκαν από την εξίσωση GAB. Οι Sandoval et al. (2009) προσδιόρισαν τις ισόθερμες εκρόφησης προϊόντων εκβολής από άλευρο βρόμης και άλευρο ρυζιού, τόσο σε σκόνη όσο και στα παραχθέντα τελικά προϊόντα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η υγρασία της σκόνης ήταν ελαφρώς υψηλότερη από ότι στα ολόκληρα δείγματα, γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη μεγαλύτερη εκτεθειμένη επιφάνεια της σκόνης. Οι Bindzus et al. (2002) μελέτησαν τη ρόφηση προϊόντων εκβολής από άμυλο σιταριού, καλαμποκιού και ρυζιού. Παρατήρησαν ότι η μοριακή αποικοδόμηση επηρεάζει τη συμπεριφορά ενυδάτωσης των προϊόντων. Στην ίδια ενεργότητα νερού, παρατηρήθηκε χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό για τα προϊόντα τα οποία παρήχθησαν με την υψηλότερη μηχανική ενέργεια.

### 6.2.3 Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, $T_g$ )

Όπως αναφέρθηκε, η γνώση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και των ισόθερμων ρόφησης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον έλεγχο της διεργασίας και τις τελικές ιδιότητες των προϊόντων και βοηθά στον προσδιορισμό των συνθηκών αποθήκευσης, με σκοπό την αποφυγή των αντιδράσεων υποβάθμισης (Jouppila & Roos, 1997). Η υποβάθμιση των τροφίμων εξαρτάται από τη διαφορά της θερμοκρασίας αποθήκευσης από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Αν η θερμοκρασία

υαλώδους μετάπτωσης είναι ίση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης δεν πραγματοποιείται αποικοδόμηση. Η αποθήκευση των προϊόντων σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την  $T_g$ , περιορίζει τις αντιδράσεις υποβάθμισης των προϊόντων. Αντίθετα, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από την  $T_g$ , η ρευστή φάση επιτρέπει τη μεγαλύτερη κινητικότητα και διάχυση των μορίων και τη συμμετοχή τους σε αντιδράσεις που υποβαθμίζουν την ποιότητα των προϊόντων (Sa & Sereno, 1994).

Τα πρώτα άρθρα σχετικά με τη μελέτη της θερμοκρασίας υαλώδους μεταπτώσεως στα τρόφιμα και τα βιολογικά συστήματα εμφανίστηκαν στη βιβλιογραφία στη δεκαετία του 1960 (Luyet & Rasmussen, 1968; White & Cakebread, 1966). Οι σημαντικές εφαρμογές της υαλώδους μετάπτωσης εμφανίστηκαν στη δεκαετία του 1980 (Levine & Slade, 1989). Στη δεκαετία του 1990, πολλοί ερευνητές δημιούργησαν σημαντικά δεδομένα σχετικά με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και τα συστατικά των διαγραμμάτων φάσεων για πολλά τρόφιμα (Roos & Karel, 1991). Τα διαγράμματα φάσεων (state diagrams) αποτελούν χάρτες των διαφορετικών καταστάσεων ενός τροφίμου συναρτήσει του νερού ή των στερεών και της θερμοκρασίας. Με τα διαγράμματα αυτά μπορούν να βρεθούν οι διαφορετικές καταστάσεις ενός τροφίμου, όπως είναι το σημείο ψύξης και υαλώδους μετάπτωσης, που βοηθούν στην κατανόηση των διαφόρων αλλαγών, όταν μεταβάλλονται η υγρασία και η θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, συμβάλλουν στον προσδιορισμό της σταθερότητας των τροφίμων κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και στην επιλογή κατάλληλων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Εκτός από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί, όπως είναι ο σχηματισμός πόρων, η διάχυση, η μικροβιακή σταθερότητα, η μη-ενζυματική αμαύρωση, κτλ. οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα των τροφίμων (Rahman, 2006).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες επηρεάζουν και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης η οποία χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό των μεταβολών της υφής των τροφίμων (Ross et al., 2002). Η υαλώδης κατάσταση παρέχει συνήθως την τραγανή υφή των αφυδατωμένων τροφίμων. Το μοριακό βάρος των προϊόντων, η δομή και η παρουσία πλαστικοποιητών καθορίζουν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, η οποία στη συνέχεια, επηρεάζει την επεξεργασία τροφίμων (π.χ., κατάψυξη, ξήρανση, εκβολή) και σχετίζεται με χαρακτηριστικά ποιότητας, όπως είναι η υφή, η σταθερότητα, κτλ. (Chen & Yeh, 2001). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώνεται με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, καθώς το νερό δρα ως πλαστικοποιητής. Καθώς η υγρασία μειώνεται προς χαμηλότερες τιμές, μικρές αλλαγές στην υγρασία επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Sandoval et al., 2009). Σε υψηλές ενεργότητες ύδατος, όπου η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώνεται, η αποθήκευση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να διευκολύνει την υποβάθμιση των προϊόντων (Sablani et al., 2007a).

Όσον αφορά σε γεωργικά προϊόντα, οι Moraga et al. (2004) μελέτησαν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ως συνάρτηση της περιεκτικότητας σε υγρασία σε δείγματα φράουλας τα οποία είχαν προ-επεξεργαστεί. Η εξίσωση Gordon-Taylor χρησιμοποιήθηκε για την προτυποποίηση της επίδρασης της πλαστικοποιητικής ικανότητας του νερού. Οι Sa & Sereno (1994) μελέτησαν τις μεταπτώσεις φάσεων σε φρέσκα ή λυοφιλιωμένα δείγματα κρεμμυδιού, σταφυλιού και φράουλας, μετά την εξισορρόπησή τους σε διαφορετικές σχετικές υγρασίες. Κατά τη θέρμανση, παρατηρήθηκε μία θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, η οποία μειώθηκε με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας. Η τήξη του πάγου παρατηρήθηκε σε δείγματα που εξισορροπήθηκαν σε σχετική υγρασία 0,85 ή παραπάνω, για όλα τα προϊόντα.

Επίσης, ο Roos (1987) χρησιμοποίησε τη διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης για τον προσδιορισμό των θερμικών μεταπτώσεων σε φρέσκα και λυοφιλωμένα δείγματα φράουλας. Τα λυοφιλωμένα δείγματα παρουσίασαν θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης στους 30-60°C. Η μετάπτωση έγινε πιο απότομη και η θερμοκρασία κορυφής αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας λυοφιλίωσης. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία. Πάνω από τους 100°C παρατηρήθηκε μία εξώθερμη μετάπτωση, η οποία πιθανώς να σχετίζεται με το θερμικό αμαύρισμα του αφυδατωμένου προϊόντος. Η μετάπτωση αυτή ακολουθήθηκε από την τήξη των υδατανθράκων. Η τήξη του πάγου ομοίως παρατηρήθηκε στα δείγματα που ισορρόπησαν σε ενεργότητες ύδατος 0,85 ή παραπάνω.

Οι Georget et al. (1999) μελέτησαν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης λυοφιλωμένων δειγμάτων καρότου και διαφορετικών συστατικών των κυτταρικών τους τοιχωμάτων (cell wall components), σε υγρασίες που κυμαίνονται από 0% έως 20% (υ.β.), με χρήση DSC. Παρατηρήθηκαν δύο θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης που συνδέονται με δύο φάσεις, μία φάση πλούσια σε σάκχαρα και μία φάση πλούσια σε κύτταρα (cell wall). Η φάση πλούσια σε σάκχαρα παρουσίασε χαμηλότερο  $T_g$ , πιθανώς λόγω της άνισης κατανομής της υγρασίας μεταξύ των δύο φάσεων.

Οι Cao et al. (2004) αναφέρουν ότι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μεμονωμένων κόκκων μαύρου ρυζιού μειώθηκε από τους 53°C στους 22°C, καθώς η υγρασία αυξήθηκε από 12 σε 25% (υ.β.). Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν κόκκους ρυζιού και όχι άλευρο, για να ληφθεί υπόψη η φυσική διαφορά στο μέγεθος και στην περιεκτικότητα σε υγρασία των κόκκων και παρατήρησαν τρεις θερμικές μεταπτώσεις. Αυτές οι μεταπτώσεις μπορεί να προκαλούνται από τις διάφορες διαμορφώσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ της αμυλόζης, της αμυλοπηκτίνης, των πρωτεϊνών και των λιπιδίων. Η δεύτερη μετάπτωση θεωρήθηκε ως η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, καθώς εξαρτήθηκε σημαντικά από την υγρασία. Όταν η υγρασία των κόκκων ήταν μεγαλύτερη από 22%, εμφανίστηκαν δύο ενδόθερμες κορυφές: ένα ενδόθερμο χαμηλής θερμοκρασίας (τήξη του πάγου) και ένα ενδόθερμο υψηλής θερμοκρασίας (τήξη των κρυσταλλιτών του αμύλου). Σε χαμηλότερες υγρασίες, παρατηρήθηκε μια ενδόθερμη κορυφή. Η θερμοκρασία τήξης αυξήθηκε σημαντικά με τη μείωση της υγρασίας. Οι θερμικές μεταπτώσεις κόκκων μαύρου ρυζιού, ποικιλιών με μέσο και μεγάλο μέγεθος κόκκων, έχουν μελετηθεί επίσης, από τους Perdon et al. (2000) και τους Sun et al. (2002).

Παράλληλα, κατά τη διάρκεια της εκβολής, οι υψηλές θερμοκρασίες, οι πιέσεις, οι ισχυρές διατμητικές δυνάμεις και η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας, έχουν σα συνέπεια τη ζελατινοποίηση, την τήξη και τις αλλαγές φάσεων του αμύλου. Στη διεργασία της εκβολής, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης χρησιμοποιείται ως κριτήριο για τον καθορισμό των συνθηκών λειτουργίας με στόχο την παραγωγή προϊόντων με βέλτιστες ιδιότητες υφής, καθώς και την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών αποθήκευσης για την αύξηση της σταθερότητας των προϊόντων εκβολής (Chen & Yeh, 2001; Kaletunc & Breslauer, 1993).

Οι Blanche & Sun (2004) αναφέρουν ότι κατά τη μελέτη προϊόντων εκβολής αμύλου με διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης δεν παρατηρείται κορυφή ζελατινοποίησης, πιθανώς εξαιτίας της πλήρους ζελατινοποίησης του αμύλου κατά τη διάρκεια της εκβολής και της διάσπασης των συστατικών του αμύλου σε μικρότερου μεγέθους μόρια. Οι Ortiz et al. (2008) μελέτησαν τις ιδιότητες προϊόντων εκβολής από ρύζι και πρωτεΐνη σόγιας και διαπίστωσαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του προϊόντος σε άμυλο ρυζιού αυξάνει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και τη θερμοκρασία τήξης, καθώς και το ιξώδες. Οι Lazou & Krokida (2011) μελέτησαν τις μεταπτώσεις φάσεων προϊόντων

εκβολής καλαμποκιού-φακής και παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αυξήθηκε με την παροχή της τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία εκβολής και την προσθήκη φακής στο μίγμα.

Όσον αφορά στα πολύπλοκα συστήματα τροφίμων, παρόλο που η γνώση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των μεμονωμένων συστατικών (αμυλοπηκτίνη, αμυλόζη, μαλτο-ολιγοσακχαρίτες, γλουτένη, γλουτενίνη) είναι ευρεία (Cocero & Kokini, 1991; Kalichevsky et al., 1992), απαιτείται περαιτέρω μελέτη για την κατανόηση των διάφορων αλληλεπιδράσεων και τη συμβολή τους στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Έχουν μελετηθεί σύνθετα συστήματα και έχει παρατηρηθεί διαφορετική συμπεριφορά του σύνθετου συστήματος σε σύγκριση με εκείνη των μεμονωμένων συστατικών (Chanvriat et al., 2005; Chen & Yeh, 2000; Cuq & Icard-Vernière, 2001). Οι τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των σύνθετων τροφίμων είναι συνήθως μεταξύ των τιμών των μεμονωμένων συστατικών ή μεγαλύτερες (Brent et al., 1997; Cuq & Icard-Vernière, 2001). Οι Sandoval et al. (2009) μελέτησαν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τελικών προϊόντων εκβολής από άλευρο βρόμης και άλευρο ρυζιού, καθώς και των μεμονωμένων συστατικών, με διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC) και με δυναμική μηχανική θερμική ανάλυση (DMTA) (κορυφή του tanδ). Οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων βρέθηκαν περίπου 30°C χαμηλότερες από αυτές των μεμονωμένων συστατικών τους, εξαιτίας της παρουσίας υλικών χαμηλότερου μοριακού βάρους (σάκχαρα). Επίσης, παρατήρησαν ότι οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης που προσδιορίστηκαν με την τεχνική DSC ήταν χαμηλότερες από εκείνες που προσδιορίστηκαν με την τεχνική DMTA.

## 6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων ποιότητας των αφυδατωμένων προϊόντων και των προϊόντων εκβολής περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

### 6.3.1 Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων

Οι μηχανικές ιδιότητες προσδιορίστηκαν στα λυοφιλιωμένα γεωργικά προϊόντα (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα), καθώς και στα προϊόντα εκβολής.

Οι δοκιμές μονοαξονικής συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή μηχανικών δοκιμών Zwick (model Z2.5/TN1S, Ulm, Germany), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 6. 1.



Εικόνα 6. 1. Συσκευή μηχανικών δοκιμών (Zwick, model Z2.5/TN1S).

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Η συσκευή περιλαμβάνει δύο παράλληλες πλάκες για τη μονοαξονική συμπίεση, μία σταθερή και μία κινούμενη. Ο χειρισμός της συσκευής γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πριν την έναρξη του κάθε πειράματος, μετρήθηκαν οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου με χρήση ψηφιακού παχύμετρου. Σημειώνεται ότι όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, επιλέχθηκαν ευθύγραμμα τμήματα ομοιόμορφης διαμέτρου, τα οποία κόπηκαν σε κυλίνδρους ύψους περίπου 5 cm το καθένα. Πριν την έναρξη της δοκιμής, η απόσταση των παράλληλων πλακών ρυθμίστηκε στα 25 mm. Οι δοκιμές συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C), με σταθερή ταχύτητα 5 mm/min (Krokida et al., 2000a) χρησιμοποιώντας σταθερή δύναμη 100 N. Η δοκιμή σταματούσε όταν η δύναμη έφτανε στη μέγιστη τιμή της. Οι τιμές της δύναμης και της παραμόρφωσης καταγράφονταν ηλεκτρονικά με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού (Zwick PC Software, Version 3.1.). Με βάση τις σχέσεις (2.8) και (2.9) κατασκευάστηκαν οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε ως η κλίση του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της ελαστικής περιοχής. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε 5-10 επαναλήψεις, ανάλογα με το προϊόν.

### 6.3.2 Προσδιορισμός των ιδιοτήτων προσρόφησης των προϊόντων

Οι ισόθερμες ρόφησης προσδιορίστηκαν στα λυοφιλωμένα προϊόντα (ρύζι, πατάτα, μανιτάρια, φράουλα), καθώς και σε αντιπροσωπευτικά δείγματα των προϊόντων εκβολής. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν αρχικά σε ξηραντήρα με πεντοξείδιο του φωσφόρου (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) για τρεις εβδομάδες, με στόχο την ελαχιστοποίηση της υγρασίας τους. Σημειώνεται ότι τα προϊόντα εκβολής λειοτριβήθηκαν πριν την τοποθέτησή τους στον ξηραντήρα.

Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό των ισόθερμων ρόφησης, προκαθορισμένες ποσότητες δειγμάτων τοποθετήθηκαν σε θαλάμους συγκεκριμένης ενεργότητας ύδατος, σε θερμοκρασία 25°C, μέχρι να ισορροπήσουν (Labuza et al., 1985). Οι ενεργότητες ύδατος κυμάνθηκαν από 0,11 έως 0,94 και επιτεύχθηκαν χρησιμοποιώντας τα κορεσμένα διαλύματα αλάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 1. Στις μεγάλες ενεργότητες ύδατος υπάρχει η πιθανότητα ανάπτυξης μικροοργανισμών στα μελετώμενα δείγματα. Για την επιβράδυνση της μικροβιακής ανάπτυξης, τοποθετήθηκε μία μικρή ποσότητα φαινόλης στους θαλάμους.

Πίνακας 6. 1. Ενεργότητα ύδατος των χρησιμοποιούμενων κορεσμένων αλάτων.

| Κορεσμένα άλατα                   | Τιμές ενεργότητας |
|-----------------------------------|-------------------|
| LiCl                              | 0,11              |
| MgCl <sub>2</sub>                 | 0,33              |
| Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 0,53              |
| NaCl                              | 0,75              |
| KNO <sub>3</sub>                  | 0,94              |

Τα δείγματα ζυγίζονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, έως ότου ισορροπήσουν. Η ισορροπία επήλθε όταν τρεις διαδοχικές μετρήσεις βάρους δεν διέφεραν περισσότερο από 0,001 g. Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την επίτευξη της ισορροπίας ήταν περίπου τρεις εβδομάδες για όλα τα δείγματα. Η περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων υπολογίστηκε σε φούρνο κενού στους 70°C μέχρι σταθερού βάρους.

Η περιεχόμενη υγρασία υπολογίστηκε επί ξηρής βάσης (ξ.β.) σύμφωνα με τη σχέση:

$$X = \frac{m_i - m_o}{m_o}$$

6.2

όπου  $X$  (Kg H<sub>2</sub>O/kg ξηρού στερεού) είναι η υγρασία των δειγμάτων (ξ.β.),  $m_i$  είναι η μάζα των δειγμάτων μετά την επίτευξη της ισορροπίας και  $m_o$  είναι η μάζα των δειγμάτων μετά την ξήρανσή τους στο φούρνο κενού.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκαν τέσσερις επαναλήψεις για κάθε δείγμα. Από αυτές οι δύο χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ισόθερμων ρόφησης και οι άλλες δύο για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

### 6.3.3 Προσδιορισμός της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων

Τα δείγματα τα οποία εξισορρόπησαν στις διάφορες ενεργότητες ύδατος αξιολογήθηκαν ως προς τις θερμικές τους μεταπτώσεις. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης προσδιορίστηκε με χρήση συσκευής διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry, DSC) (Perkin Elmer DSC 6, CT, USA), η οποία χρησιμοποιεί λογισμικό Pyris 6 (Software, Perkin Elmer). Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. 2.



Εικόνα 6. 2. Συσκευή Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (Perkin Elmer DSC 6).

Για τη δημιουργία αδρανούς ατμόσφαιρας χρησιμοποιήθηκε αέριο άζωτο, με παροχή 20 L/min. Ποσότητα 5-10 mg από κάθε δείγμα σφραγίστηκε σε δειγματοφορέα αλουμινίου, ο οποίος εισήχθη στη συσκευή DSC. Ένας κενός, σφραγισμένος δειγματοφορέας χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα αναφοράς. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε θερμοκρασιακό πρόγραμμα, το εύρος του οποίου διαφοροποιήθηκε ανάλογα με το υλικό και συγκεκριμένα:

- (α) Τα δείγματα ρυζιού ψύχθηκαν στους 0°C με ρυθμό 5°C/min και θερμάνθηκαν μέχρι τους 100°C με τον ίδιο ρυθμό.
- (β) Τα λυοφιλωμένα γεωργικά προϊόντα ψύχθηκαν στους -100°C με ρυθμό 5°C/min και θερμάνθηκαν μέχρι τους 150°C με τον ίδιο ρυθμό.
- (γ) Τα προϊόντα εκβολής ψύχθηκαν στους -15°C με ρυθμό 5°C/min και θερμάνθηκαν μέχρι τους 150°C με τον ίδιο ρυθμό. Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

χρησιμοποιήθηκαν τα κεντρικά δείγματα του πειραματικού σχεδιασμού, τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Η ψύξη επιτεύχθηκε με χρήση υγρού αζώτου. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις επαναλήψεις.

Πίνακας 6. 2. Πειραματικός σχεδιασμός για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης.

| Κωδικός | X (% υ.β.) | C (%) | T (°C) | N (rpm) |
|---------|------------|-------|--------|---------|
| 00-10   | 17         | 7,5   | 140    | 200     |
| 1000    | 20         | 7,5   | 160    | 200     |
| 0100    | 17         | 10    | 160    | 200     |
| 0000    | 17         | 7,5   | 160    | 200     |
| 0001    | 17         | 7,5   | 160    | 250     |
| 000-1   | 17         | 7,5   | 160    | 150     |
| 0-100   | 17         | 5     | 160    | 200     |
| -1000   | 14         | 7,5   | 160    | 200     |
| 0010    | 17         | 7,5   | 180    | 200     |

## 6.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

Για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των μελετώμενων προϊόντων από τις συνθήκες επεξεργασίας αλλά και τις δομικές ιδιότητες, αναπτύχθηκαν ή επιλέχθηκαν απλά μαθηματικά πρότυπα, τα οποία περιέχουν παραμέτρους με φυσική σημασία. Πιο αναλυτικά:

### 6.4.1 Μηχανικές ιδιότητες

#### 6.4.1.1 Λυοφιλωμένα γεωργικά προϊόντα

Το πρότυπο που περιγράφει την εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων από την πίεση ξήρανσης υπό κατάψυξη δίνεται από την εξίσωση:

$$Z = b \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^y \quad 6.3$$

όπου  $Z$  είναι η μετρούμενη ιδιότητα (τάση θραύσης  $\sigma_f$  (kPa), παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_f$  (mm/mm), μέτρο ελαστικότητας  $E$  (kPa)),  $b$ ,  $y$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό,  $P$  (mbar) είναι η πίεση της ξήρανσης υπό κατάψυξη και  $P_0$  (mbar) είναι η αντίστοιχη τιμή σε συνθήκες αναφοράς (0,80 mbar).

Επιπλέον, οι ιδιότητες υφής συσχετίστηκαν με το πορώδες των προϊόντων, συνδυάζοντας τις σχέσεις (6.3) και (5.4):

$$Z = b \cdot \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^{\frac{y}{m}} \quad 6.4$$



#### 6.4.1.2 Προϊόντα εκβολής

Το πρότυπο που περιγράφει την εξάρτηση των ιδιοτήτων υφής των προϊόντων εκβολής από τις συνθήκες της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών δίνεται από την εξίσωση:

$$Y = Y_o \cdot \left(\frac{X}{X_o}\right)^{Y_X} \cdot \left(\frac{100-C}{100-C_o}\right)^{Y_C} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{Y_T} \cdot \left(\frac{N}{N_o}\right)^{Y_N} \quad 6.5$$

όπου  $Y$  είναι η μετρούμενη ιδιότητα (τάση θραύσης  $\sigma_f$  (kPa), παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_f$  (mm/mm), μέτρο ελαστικότητας  $E$  (kPa)),  $X$  (% υ.β.) είναι η αρχική περιεχόμενη υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας,  $C$  (%) είναι η συγκέντρωση του καρότου,  $T$  (°C) είναι η θερμοκρασία εκβολής,  $N$  (g/m) είναι η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών,  $Y_o$  είναι σταθερά,  $X_o$ ,  $C_o$ ,  $T_o$ ,  $N_o$ , είναι οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων στις συνθήκες αναφοράς (κεντρικές τιμές, Πίνακας 4.3) και  $Y_X$ ,  $Y_C$ ,  $Y_T$ ,  $Y_N$  είναι οι εκθέτες των παραμέτρων οι οποίοι εξαρτώνται από την εκάστοτε ιδιότητα και το υλικό.

Επιπλέον, οι ιδιότητες υφής συσχετίστηκαν με τις δομικές ιδιότητες:

$$I = I_o \cdot \left(\frac{Exp}{Exp_o}\right)^{\alpha} \quad 6.6$$

όπου,  $I$  είναι η ιδιότητα υφής,  $Exp$  είναι ο συντελεστής διόγκωσης,  $Exp_o$  είναι ο μέσος όρος των πειραματικών τιμών των συντελεστών διόγκωσης ( $\overline{Exp}=2,264$ ) και  $I_o$ ,  $\alpha$  είναι σταθερές.

#### 6.4.2 Ιδιότητες προσρόφησης - Ενεργότητα ύδατος

Η εξίσωση των Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) θεωρείται ως η πιο ευέλικτη εξίσωση και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από πολλούς συγγραφείς για να περιγράψει τις ισόθερμες ρόφησης σιτηρών, δημητριακών και γεωργικών προϊόντων.

Η εξίσωση GAB δίνεται από τη σχέση:

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad 6.7$$

όπου,  $X$  (kg H<sub>2</sub>O/kg ξηρών στερεών) είναι η περιεχόμενη υγρασία των υλικών επί ξηρής βάσης (ξ.β.),  $a_w$  είναι η ενεργότητα ύδατος,  $X_m$  είναι η περιεχόμενη υγρασία που αντιστοιχεί στη μονοστοιβάδα,  $C$  και  $K$  είναι σταθερές που σχετίζονται με τη θερμοκρασία.

#### 6.4.3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης

Η επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης περιγράφεται από την εξίσωση των Gordon και Taylor (Gordon & Taylor, 1952):

$$T_g = \frac{X_s \cdot T_{gs} + k \cdot X_w \cdot T_{gw}}{X_s + k \cdot X_w} \quad 6.8$$

όπου,  $T_g$  (°C) είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού,  $T_{gs}$  και  $T_{gw}$  (°C) είναι οι θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης των άνυδρων στερεών και του νερού αντίστοιχα,  $X_w$  και  $X_s$  είναι το ποσοστό νερού και στερεών, αντίστοιχα και  $k$  είναι μία εμπειρική παράμετρος. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του νερού είναι περίπου -135°C.

## 6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

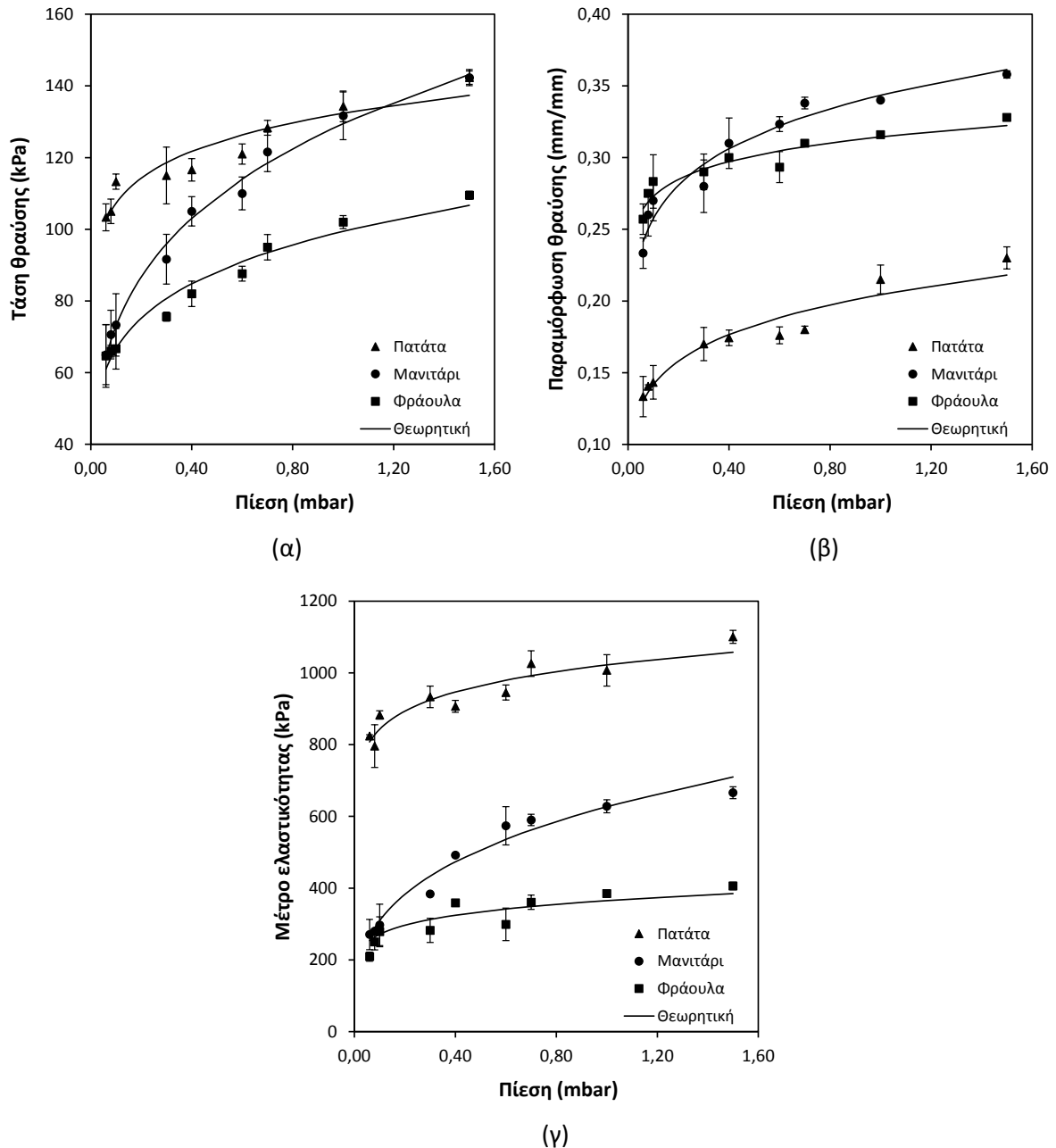
### 6.5.1 Μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων

#### 6.5.1.1 Λυοφιλωμένα γεωργικά προϊόντα

Το Σχήμα 6. 1 παρουσιάζει την εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων (τάση θραύσης, παραμόρφωση θραύσης, μέτρο ελαστικότητας) από τις συνθήκες ξήρανσης υπό κατάψυξη, για τα αφυδατωμένα γεωργικά προϊόντα (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα). Το μέτρο ελαστικότητας μετρά την ικανότητα του υλικού να υποβάλλεται σε ελαστική παραμόρφωση και υπολογίστηκε από την κλίση του πρώτου γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης. Η τάση και η παραμόρφωση θραύσης αντιπροσωπεύουν το σημείο θραύσης του κάθε υλικού, το οποίο είναι ενδεικτικό της σκληρότητας των υλικών. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, οι ιδιότητες υψής αυξήθηκαν σημαντικά ( $p < 0,05$ ), με την αύξηση της εφαρμοζόμενης πίεσης κατά τη διάρκεια της λυοφιλίωσης. Σε υψηλές πιέσεις, η πλαστικοποίηση της μήτρας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη, οδηγεί σε μια πιο σταθερή δομή και αυξάνει την ακαμψία του υλικού. Ως αποτέλεσμα αυτού, το μέτρο ελαστικότητας και η τάση θραύσης είναι αυξημένες. Μεταξύ των γεωργικών προϊόντων, η πατάτα παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας και τάσης θραύσης, ενώ η φράουλα τις χαμηλότερες τιμές, αντιστοίχως. Οι υψηλότερες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα δείγματα πατάτας οφείλονται στο περιεχόμενο άμυλο, το οποίο συνθέτει μια πιο σταθερή δομή. Από την άλλη πλευρά, τα σάκχαρα που περιέχονται στις φράουλες είναι υπεύθυνα για τις χαμηλότερες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων (Anglea et al., 1993a). Οι συνεχείς γραμμές στα διαγράμματα αναπαριστούν τις προβλεπόμενες από το πρότυπο τιμές (Εξ. 6. 5), του οποίου οι εκτιμώμενες παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 6. 3.

Πίνακας 6. 3. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για τις μηχανικές ιδιότητες των αφυδατωμένων γεωργικών προϊόντων.

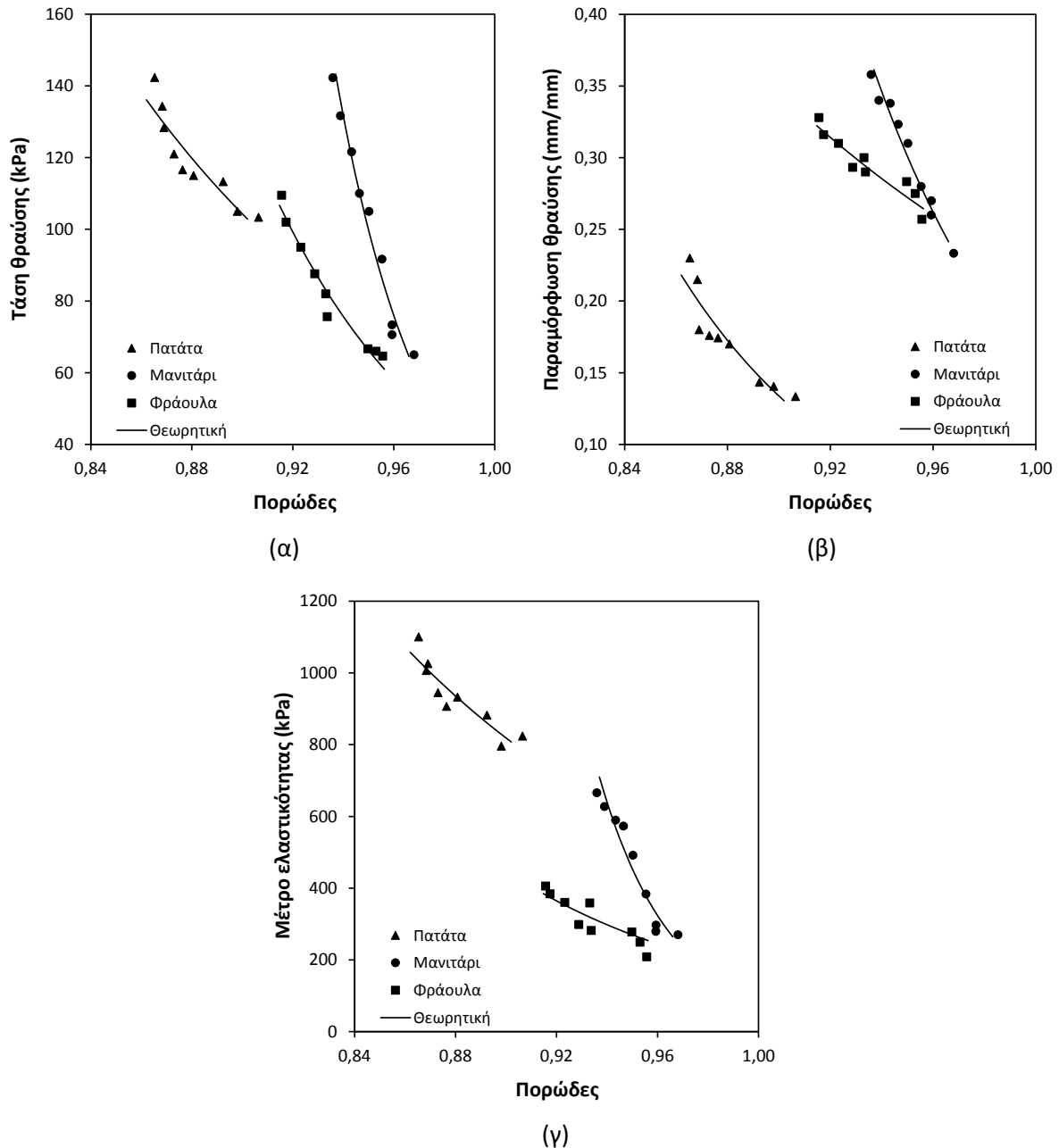
|                 | Μηχανικές ιδιότητες |          |                       |                     |          |                       |                     |          |                       |
|-----------------|---------------------|----------|-----------------------|---------------------|----------|-----------------------|---------------------|----------|-----------------------|
|                 | Τάση θραύσης        |          |                       | Παραμόρφωση θραύσης |          |                       | Μέτρο ελαστικότητας |          |                       |
|                 | <i>b</i>            | <i>y</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> | <i>b</i>            | <i>y</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> | <i>b</i>            | <i>y</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> |
| <b>Πατάτα</b>   | 123,697             | 0,087    | 0,842                 | 0,183               | 0,160    | 0,747                 | 964,597             | 0,084    | 0,745                 |
| <i>p-value</i>  | 0,000               | 0,000    |                       | 0,000               | 0,000    |                       | 0,000               | 0,000    |                       |
| <b>Μανιτάρι</b> | 109,121             | 0,249    | 0,923                 | 0,315               | 0,125    | 0,850                 | 506,809             | 0,307    | 0,695                 |
| <i>p-value</i>  | 0,000               | 0,000    |                       | 0,000               | 0,000    |                       | 0,000               | 0,000    |                       |
| <b>Φράουλα</b>  | 88,144              | 0,173    | 0,824                 | 0,301               | 0,062    | 0,761                 | 333,838             | 0,129    | 0,654                 |
| <i>p-value</i>  | 0,000               | 0,000    |                       | 0,000               | 0,007    |                       | 0,000               | 0,000    |                       |



Σχήμα 6. 1. Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στις μηχανικές ιδιότητες των γεωργικών προϊόντων, (α) τάση θραύσης, (β) παραμόρφωση θραύσης και (γ) μέτρο ελαστικότητας.

Στη συνέχεια, οι ιδιότητες υφής των λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων συσχετίστηκαν με τις δομικές τους ιδιότητες (πορώδες). Τα διαγράμματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. 2. Οι συνεχείς γραμμές παριστάνουν τις προβλεπόμενες από το πρότυπο θεωρητικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων. Η τάση θραύσης, η παραμόρφωση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας μειώθηκαν με την αύξηση του πορώδους για όλα τα γεωργικά προϊόντα. Η αύξηση του πορώδους κατά περίπου 10% οδήγησε σε σημαντική ( $p < 0,05$ ) μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 30%. Όσο υψηλότερο είναι το πορώδες τα δείγματα περιέχουν περισσότερο όγκο αέρα, με αποτέλεσμα το υλικό να μπορεί να φτάσει στο σημείο θραύσης του με μικρότερη εφαρμοζόμενη δύναμη.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



Σχήμα 6. 2. Συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων των λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων με το πορώδες, (α) τάση θραύσης, (β) παραμόρφωση θραύσης και (γ) μέτρο ελαστικότητας.

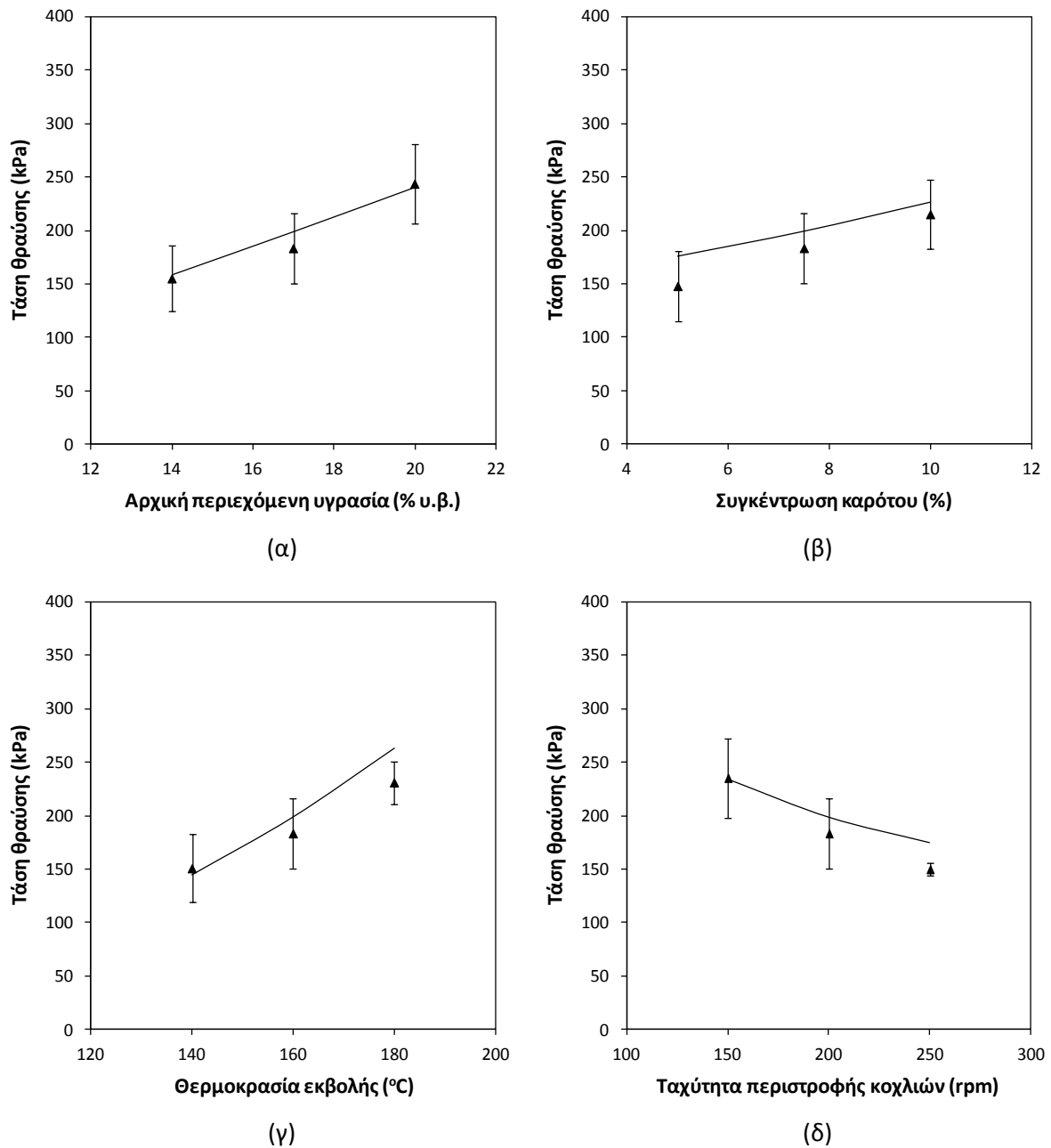
### 6.5.1.2 Προϊόντα εκβολής

Τα Σχήματα 6. 3, 6. 4 και 6. 5 δείχνουν τη μεταβολή των ιδιοτήτων υφής με τις παραμέτρους της διεργασίας εκβολής και απεικονίζουν τα κεντρικά σημεία του πειραματικού σχεδιασμού. Η τάση θραύσης κυμάνθηκε μεταξύ 85 και 430 kPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας μεταβλήθηκε από 363 έως 1210 kPa. Οι τιμές αυτές είναι σε συμφωνία με βιβλιογραφικά δεδομένα (Agbisit et al., 2007). Σύμφωνα με τις εκτιμώμενες παραμέτρους (Πίνακας 6. 4), η τάση θραύσης, η παραμόρφωση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκαν με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας της τροφοδοσίας και της θερμοκρασίας εκβολής, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών είχε την αντίθετη επίδραση. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται από άλλους ερευνητές

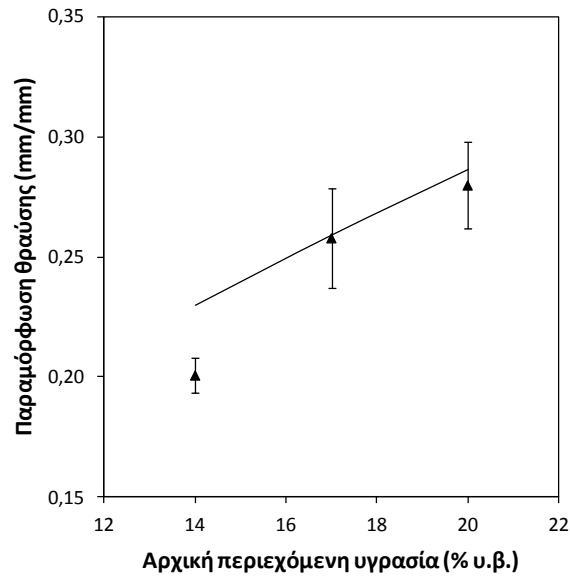
(Chakraborty et al., 2009). Επίσης, η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου στο αρχικό μίγμα εκβολής προκάλεσε την αύξηση της τάσης θραύσης και του μέτρου ελαστικότητας, ενώ δεν επηρέασε σημαντικά την παραμόρφωση θραύσης. Οι ιδιότητες υφής επηρεάζονται από τις παραμέτρους της διεργασίας εξαιτίας των πολύπλοκων αντιδράσεων και των αλλαγών φάσεων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας (Gogoi et al., 2000). Όπως παρατηρείται, τα επιλεγμένα πρότυπα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα. Οι τιμές των παραμέτρων  $\sigma_0$ ,  $\epsilon_0$  και  $E_0$  πλησιάζουν το μέσο όρο των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων όλων των προϊόντων εκβολής ( $\bar{\sigma}=206,000$  kPa,  $\bar{\epsilon}=0,258$  mm/mm,  $\bar{E}=762,011$  kPa).

Η υφή των προϊόντων εκβολής ελέγχεται από την πυκνότητα, τη διόγκωση, την κατανομή του μεγέθους των πόρων, καθώς και το πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων (Agbisit et al., 2007). Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδήγησε σε προϊόντα με μεγαλύτερο πορώδες και μειωμένη τάση θραύσης και μέτρο ελαστικότητας (Hayter & Smith, 1988). Επιπλέον, η αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας και την αύξηση των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων. Τα αποτελέσματα αυτά φανερώνουν την επίδραση της δομής στη σκληρότητα των προϊόντων. Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας μειώνει τη ζελατινοποίηση του αμύλου και οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων με αυξημένη πυκνότητα και μεγαλύτερο πάχος κυτταρικών τοιχωμάτων (Karkle et al., 2012). Κατά συνέπεια, η σκληρότητα των εκβαλλόμενων προϊόντων είναι αυξημένη. Τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η τάση θραύσης μειώθηκαν με την αύξηση της διόγκωσης υποδεικνύοντας μία εξασθένηση της δομής των περισσότερο διογκωμένων προϊόντων. Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου στο αρχικό μίγμα εκβολής προκάλεσε την αύξηση της τάσης θραύσης και του μέτρου ελαστικότητας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητας. Επίσης, παρά το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε σε λιγότερο πυκνά προϊόντα εκβολής, προκάλεσε παράλληλα την αύξηση της τάσης θραύσης και του μέτρου ελαστικότητας. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη μειωμένη διόγκωση των προϊόντων. Οι Jozinovic et al. (2012) αναφέρουν ότι προϊόντα εκβολής χαμηλής διόγκωσης παρουσίασαν υψηλή σκληρότητα.

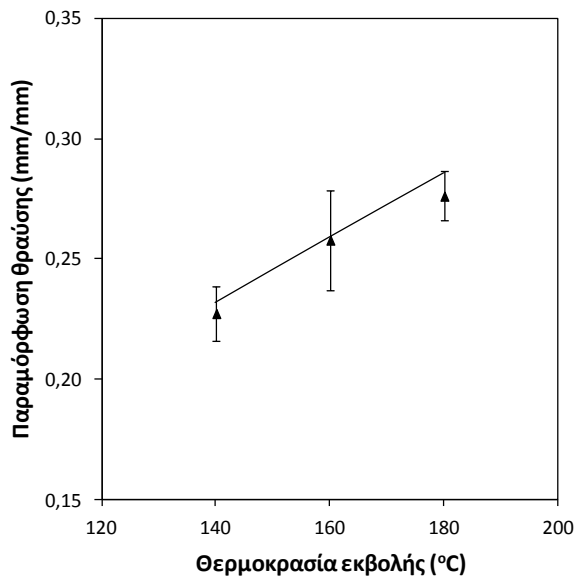
## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



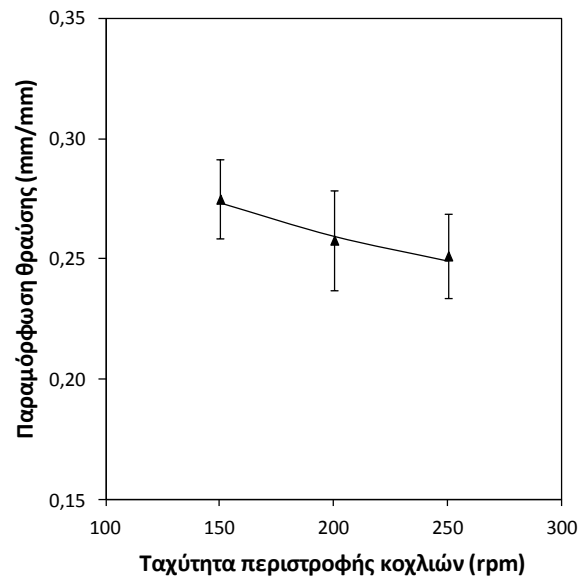
Σχήμα 6. 3. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην τάση θραύσης των προϊόντων εκβολής.



(α)



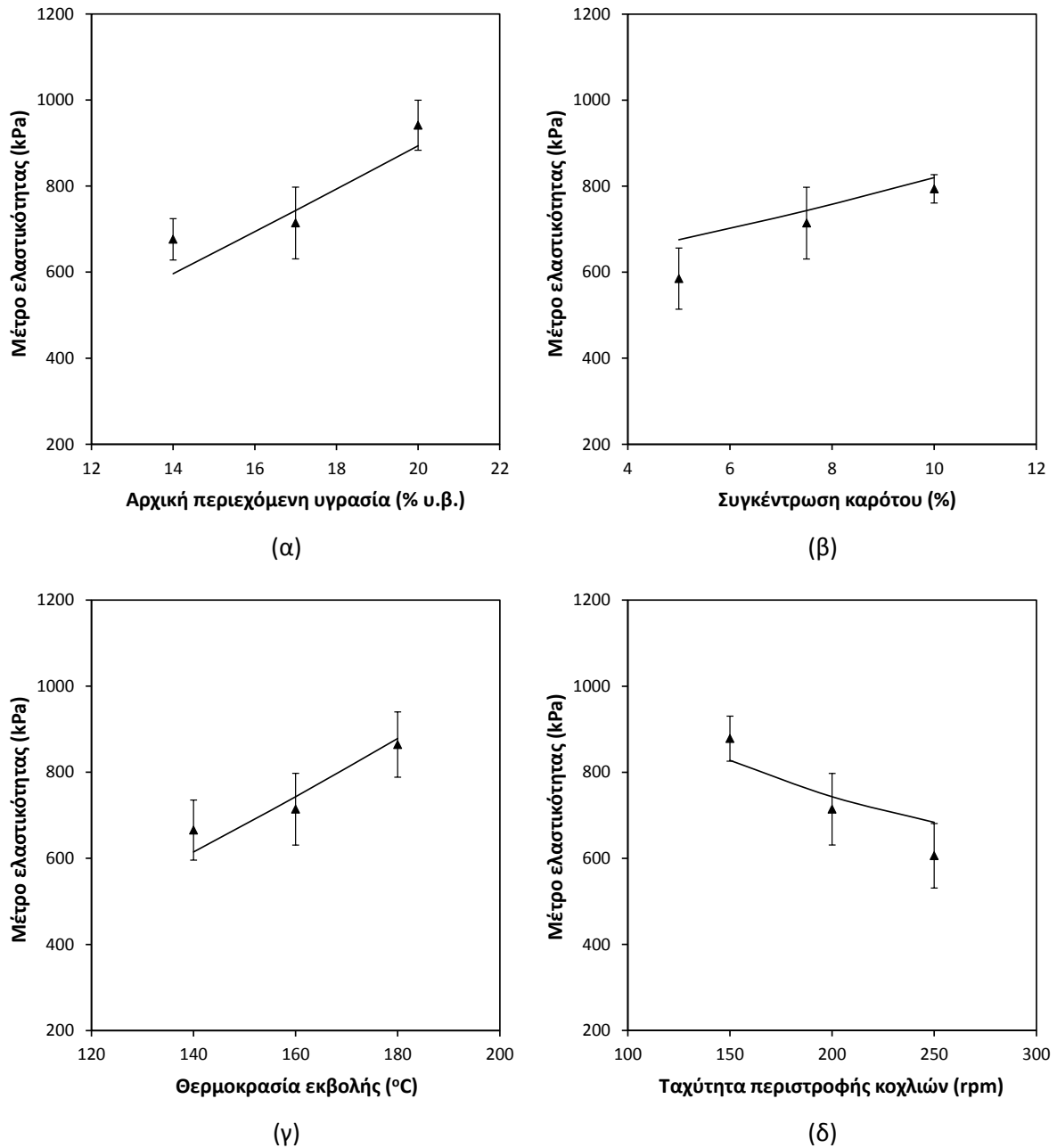
(β)



(γ)

Σχήμα 6. 4. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (γ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην παραμόρφωση θραύσης των προϊόντων εκβολής.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



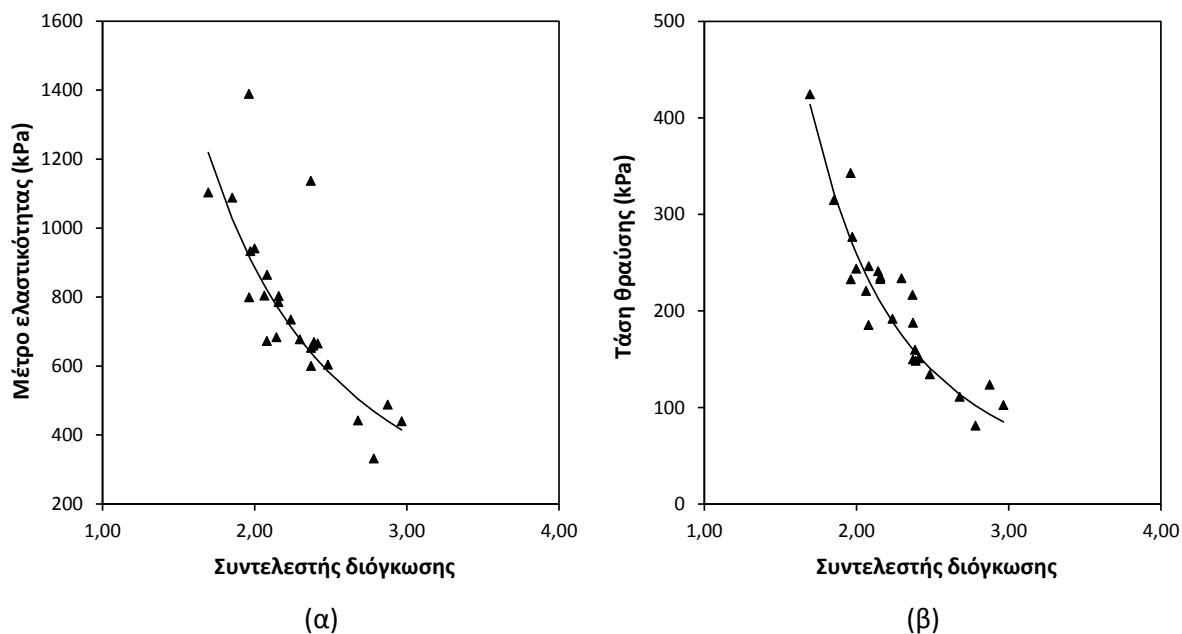
Σχήμα 6. 5. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στο μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων εκβολής.



Πίνακας 6. 4. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για τις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής.

| Μηχανικές ιδιότητες |              |              |              |              |              |       |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| Τάση θραύσης        |              |              |              |              |              |       |
|                     | $\sigma_o$   | $\sigma_x$   | $\sigma_c$   | $\sigma_T$   | $\sigma_N$   | $R^2$ |
|                     | 198,958      | 1,161        | -4,683       | 2,374        | -0,572       | 0,852 |
| <i>p-value</i>      | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        |       |
| Παραμόρφωση θραύσης |              |              |              |              |              |       |
|                     | $\epsilon_o$ | $\epsilon_x$ | $\epsilon_c$ | $\epsilon_T$ | $\epsilon_N$ | $R^2$ |
|                     | 0,259        | 0,616        | -            | 0,832        | -0,181       | 0,794 |
| <i>p-value</i>      | 0,000        | 0,000        | -            | 0,000        | 0,000        |       |
| Μέτρο ελαστικότητας |              |              |              |              |              |       |
|                     | $E_o$        | $E_x$        | $E_c$        | $E_T$        | $E_N$        | $R^2$ |
|                     | 743,164      | 1,134        | -3,582       | 1,420        | -0,374       | 0,810 |
| <i>p-value</i>      | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        |       |

Στη συνέχεια, οι μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων εκβολής συσχετίστηκαν με το συντελεστή διόγκωσής τους (Σχήμα 6. 6). Παρατηρήθηκε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων με αύξηση της διόγκωσης, υποδεικνύοντας επομένως, μείωση της σκληρότητας των διογκωμένων προϊόντων. Η αύξηση του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής κατά 70% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 1100 σε 400 kPa. Η εφαρμογή της Εξίσωσης 6. 6 στα πειραματικά δεδομένα κρίθηκε ικανοποιητική. Οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 5.



Σχήμα 6. 6. Συσχέτιση (α) του μέτρου ελαστικότητας και (β) της τάσης θραύσης με το συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής.

**Πίνακας 6. 5. Εκτιμώμενες παράμετροι του προτύπου συσχέτισης των μηχανικών και δομικών ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής.**

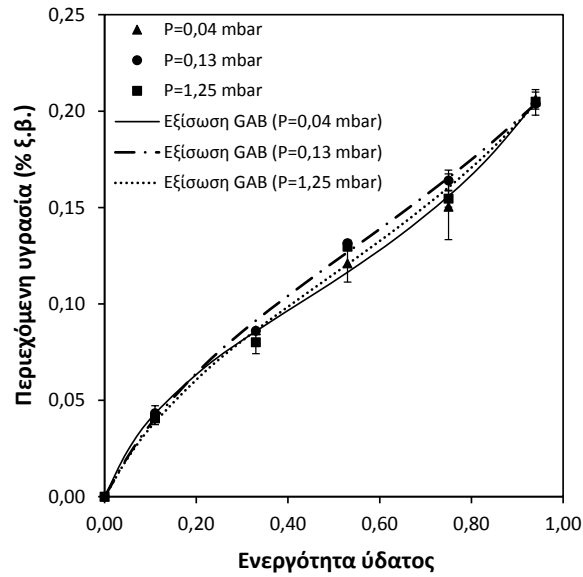
| Τάση θραύσης |        | Μέτρο ελαστικότητας |        |
|--------------|--------|---------------------|--------|
| $\sigma_o$   | $a$    | $E_o$               | $a$    |
| 192,066      | -2,599 | 723,511             | -1,844 |

Τα παραπάνω αποτελέσματα ενισχύονται με την παρατήρηση των εικόνων SEM που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.5.4. Η μείωση της συγκέντρωσης του καρότου και η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδήγησαν στο σχηματισμό προϊόντων εκβολής με λεπτότερα τοιχώματα και χαμηλότερο σημείο θραύσης (Agbisit et al., 2007). Τέλος, το πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής (Saeleaw et al., 2012).

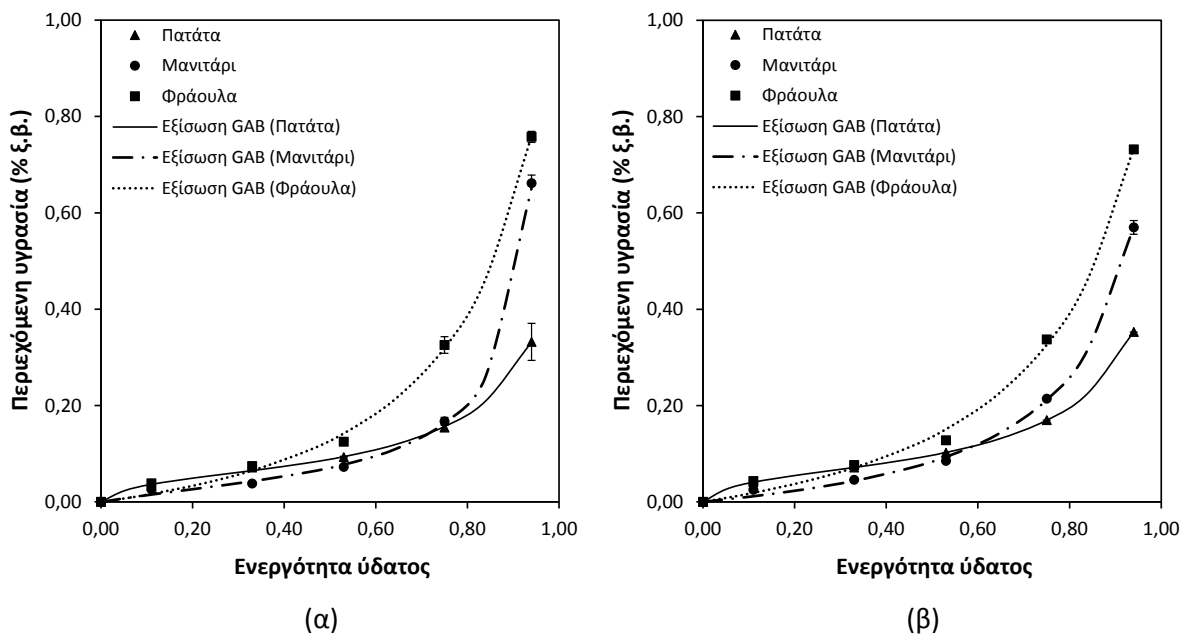
## **6.5.2 Ιδιότητες προσρόφησης των προϊόντων**

### **6.5.2.1 Λυοφιλωμένα προϊόντα**

Τα πειραματικά αποτελέσματα προσρόφησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. 7 για το ρύζι και στο Σχήμα 6. 8 για τα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα, συναρτήσει των συνθηκών επεξεργασίας. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται στη χρησιμοποιούμενη εξίσωση GAB, η οποία προσαρμόστηκε ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα. Τα δείγματα τα οποία αποθηκεύτηκαν σε περιβάλλοντα με υψηλότερη ενεργότητα ύδατος χαρακτηρίστηκαν από υψηλότερη υγρασία ισορροπίας, όπως αναμένεται (Lewicki, 2008). Οι ισόθερμες ρόφησης ακολουθούν το χαρακτηριστικό σιγμοειδές προφίλ (Τύπος II), το οποίο αντιστοιχεί σε πολυστρωματική προσρόφηση και βρίσκονται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Albena & Nikolay, 2004; Basunia & Abe, 1999; Khalloufi et al., 2000; Sablani et al., 2009). Οι αλλαγές στην υγρασία ισορροπίας οφείλονται στην αδυναμία των τροφίμων να διατηρήσουν την τάση ατμών στη μονάδα καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία. Η μείωση της υγρασίας προκαλεί τη μείωση της τάσης ατμών των τροφίμων κάτω από τη μονάδα, η οποία αλλάζει με την ατμοσφαιρική υγρασία. Το φαινόμενο αυτό εξηγεί το χαρακτηριστικό σιγμοειδές σχήμα των ισόθερμων ρόφησης (Ramesh, 2003). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία προκαλεί αυξημένη κινητικότητα των αλυσίδων στις άμορφες περιοχές υαλωδών και μερικώς κρυσταλλικών πολυμερών (Rowland, 1980). Εξάιρεση από τη συμπεριφορά αυτή παρουσίασαν τα δείγματα φράουλας. Τα δείγματα αυτά παρουσίασαν χαμηλές τιμές της σταθεράς  $C$  ( $<2$ ) με αποτέλεσμα να μπορούν να θεωρηθούν ότι ακολουθούν το προφίλ του Τύπου III, το οποίο είναι χαρακτηριστικό για τρόφιμα τα οποία περιέχουν πολλά σάκχαρα (Rao & Rizvi, 1995).



Σχήμα 6. 7. Ισόθερμες ρόφησης των βρασμένων ( $t=4$  min) κόκκων ρυζιού, που αφυδατώθηκαν σε διάφορες πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.



Σχήμα 6. 8. Ισόθερμες ρόφησης των γεωργικών προϊόντων (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα) που αφυδατώθηκαν σε διάφορες πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη, (α)  $P=0,06$  mbar και (β)  $P=0,60$  mbar.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Οι εκτιμώμενες παράμετροι της εξίσωσης GAB παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 6. 6).

Πίνακας 6. 6. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης GAB για τα λυοφιλωμένα προϊόντα.

|                   |          | Πίεση (mbar) | 0,06   | 0,30   | 0,60   |
|-------------------|----------|--------------|--------|--------|--------|
| Υλικό             | Σταθερές |              |        |        |        |
| Πατάτα            | $X_m$    |              | 0,053  | 0,052  | 0,058  |
|                   | $C$      |              | 14,787 | 18,001 | 16,022 |
|                   | $K$      |              | 0,896  | 0,908  | 0,892  |
|                   | $R^2$    |              | 0,987  | 0,987  | 1,000  |
| Μανιτάρι          | $X_m$    |              | 0,047  | 0,038  | 0,097  |
|                   | $C$      |              | 3,369  | 3,408  | 1,067  |
|                   | $K$      |              | 0,991  | 1,000  | 0,908  |
|                   | $R^2$    |              | 0,999  | 0,993  | 0,998  |
| Φράουλα           | $X_m$    |              | 0,193  | 0,142  | 0,196  |
|                   | $C$      |              | 0,813  | 1,309  | 0,915  |
|                   | $K$      |              | 0,856  | 0,886  | 0,843  |
|                   | $R^2$    |              | 0,997  | 0,996  | 0,997  |
|                   |          | Πίεση (mbar) | 0,04   | 0,13   | 1,25   |
| Ρύζι ( $t=4$ min) | $X_m$    |              | 0,096  | 0,136  | 0,118  |
|                   | $C$      |              | 10,219 | 7,380  | 7,325  |
|                   | $K$      |              | 0,598  | 0,460  | 0,522  |
|                   | $R^2$    |              | 0,985  | 0,995  | 0,991  |

### 6.5.2.2 Προϊόντα εκβολής

Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 6. 9) παρουσιάζονται οι ισόθερμες ρόφησης των προϊόντων εκβολής που προκύπτουν από τα κεντρικά σημεία του πειραματικού σχεδιασμού. Στα πειραματικά δεδομένα έχει προσαρμοστεί η εξίσωση GAB. Οι εκτιμώμενες παράμετροι της εξίσωσης GAB για όλα τα προϊόντα εκβολής παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 6. 7). Όπως παρατηρείται, οι τιμές της σταθεράς  $C$  είναι αρκετά υψηλές και για το λόγο αυτό οι ισόθερμες ρόφησης παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική σιγμοειδή μορφή (Τύπος II).

Πίνακας 6. 7. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης GAB για τα προϊόντα εκβολής.

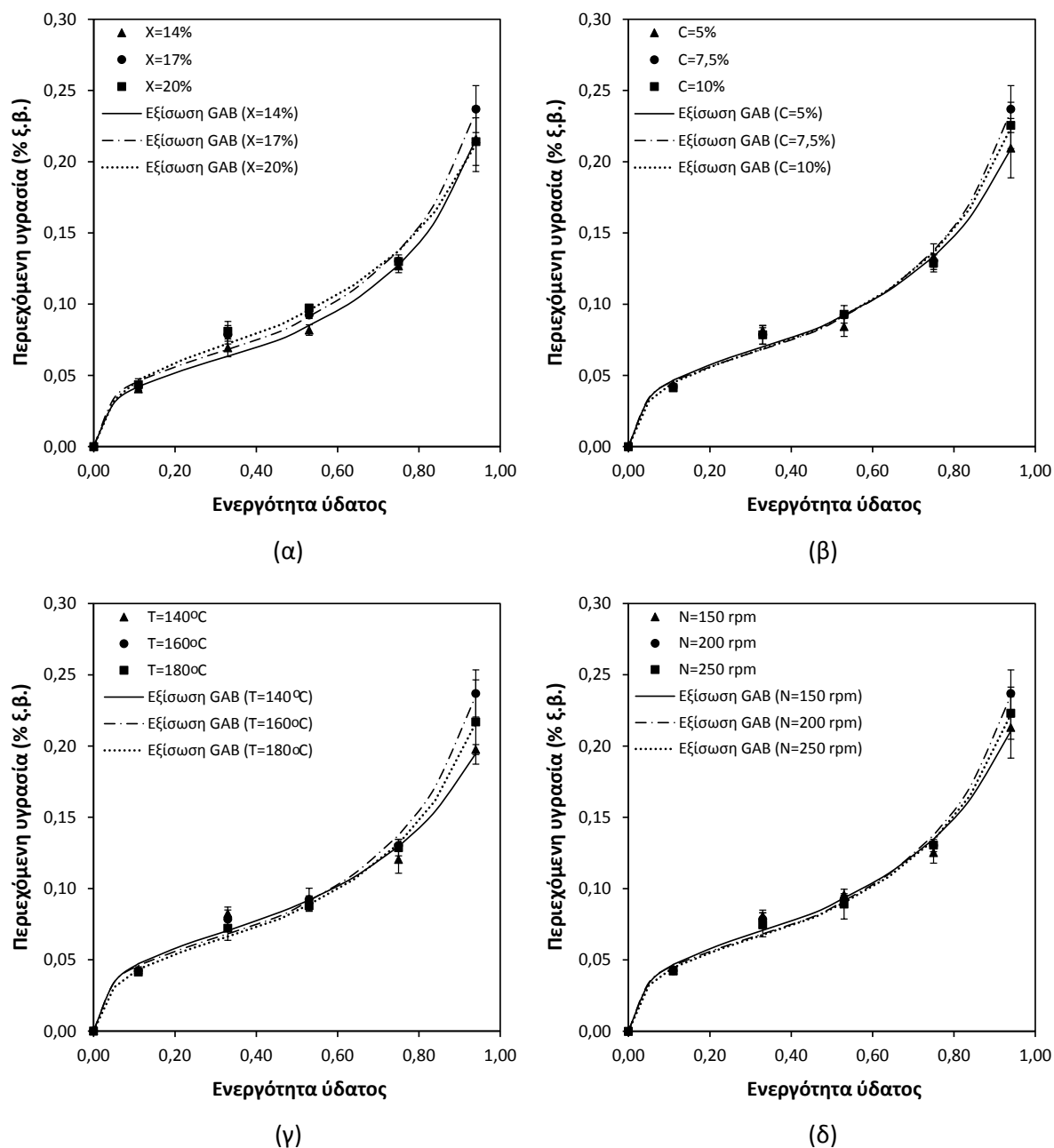
| Παράμετροι εκβολής |       |        |         | Σταθερές GAB |        |       |       |
|--------------------|-------|--------|---------|--------------|--------|-------|-------|
| X (% υ.β.)         | C (%) | T (°C) | N (rpm) | $X_m$        | C      | K     | $R^2$ |
| 20                 | 10    | 140    | 150     | 0,052        | 43,258 | 0,841 | 0,986 |
| 20                 | 10    | 140    | 250     | 0,058        | 29,065 | 0,796 | 0,987 |
| 20                 | 5     | 140    | 250     | 0,065        | 26,014 | 0,735 | 0,992 |
| 20                 | 5     | 140    | 150     | 0,063        | 24,042 | 0,744 | 0,991 |
| 17                 | 7,5   | 140    | 200     | 0,058        | 33,407 | 0,752 | 0,985 |
| 14                 | 10    | 140    | 150     | 0,052        | 34,067 | 0,805 | 0,992 |
| 14                 | 10    | 140    | 250     | 0,050        | 44,098 | 0,822 | 0,984 |
| 14                 | 5     | 140    | 250     | 0,054        | 38,657 | 0,797 | 0,969 |
| 14                 | 5     | 140    | 150     | 0,054        | 38,285 | 0,780 | 0,985 |
| 20                 | 7,5   | 160    | 200     | 0,060        | 27,833 | 0,768 | 0,988 |
| 17                 | 10    | 160    | 200     | 0,055        | 30,150 | 0,805 | 0,988 |
| 17                 | 7,5   | 160    | 200     | 0,056        | 36,236 | 0,805 | 0,958 |
| 17                 | 7,5   | 160    | 200     | 0,053        | 36,754 | 0,825 | 0,974 |
| 17                 | 7,5   | 160    | 250     | 0,054        | 31,864 | 0,809 | 0,971 |
| 17                 | 7,5   | 160    | 150     | 0,058        | 31,102 | 0,777 | 0,982 |
| 17                 | 5     | 160    | 200     | 0,057        | 32,576 | 0,778 | 0,952 |
| 14                 | 7,5   | 160    | 200     | 0,050        | 33,295 | 0,819 | 0,988 |
| 20                 | 10    | 180    | 250     | 0,062        | 19,625 | 0,791 | 0,966 |
| 20                 | 10    | 180    | 150     | 0,052        | 32,564 | 0,828 | 0,967 |
| 20                 | 5     | 180    | 150     | 0,059        | 27,555 | 0,785 | 0,986 |
| 20                 | 5     | 180    | 250     | 0,061        | 27,056 | 0,781 | 0,999 |
| 17                 | 7,5   | 180    | 200     | 0,053        | 29,507 | 0,804 | 0,981 |
| 14                 | 10    | 180    | 250     | 0,048        | 46,595 | 0,836 | 0,952 |
| 14                 | 10    | 180    | 150     | 0,050        | 28,415 | 0,842 | 0,976 |
| 14                 | 5     | 180    | 150     | 0,044        | 68,104 | 0,853 | 0,954 |
| 14                 | 5     | 180    | 250     | 0,044        | 53,715 | 0,851 | 0,966 |

Όπως αναφέρθηκε, οι τιμές των  $X_m$  και C αποτελούν ένα μέτρο της δυνατότητας ρόφησης του τροφίμου, ενώ το K υποδηλώνει τη σχέση των μορίων στην πολυστοιβάδα και στο νερό (Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004; Lazou & Krokida, 2011; Λαζαρίδης, 2000).

Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας της τροφοδοσίας και η μείωση της θερμοκρασίας εκβολής και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών προκάλεσαν αύξηση στο  $X_m$ . Επίσης, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του καρότου παρατηρείται αύξηση των  $X_m$  και C. Η αύξηση αυτή προκαλείται λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των φυτικών ινών, οι οποίες είναι υδρόφιλα μόρια που προσελκύουν τα πολωμένα μόρια του νερού (Sreekala et al., 2002).

Η υγρασία ισορροπίας των δειγμάτων εκβολής κυμάνθηκε μεταξύ 19,5 και 25% στην υψηλότερη ενεργότητα ύδατος. Από την παρατήρηση των υπολογιζόμενων σταθερών της εξίσωσης GAB μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η υγρασία του μονομοριακού στρώματος ( $X_m$ ) κυμάνθηκε κάτω από 6,5%. Το εύρος της μονομοριακής ζώνης είναι μικρό φανερώνοντας ότι μία μικρή ποσότητα της υγρασίας είναι στενά συνδεδεμένη με το υπόστρωμα.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



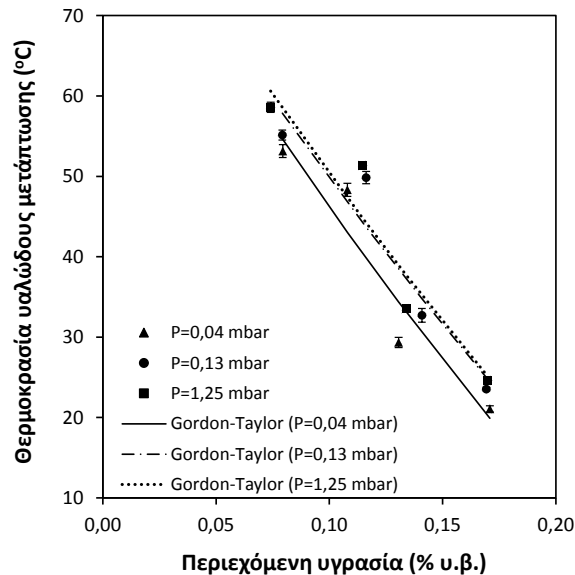
Σχήμα 6. 9. Ισόθερμες ρόφησης των προϊόντων εκβολής. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ).

### 6.5.3 Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων

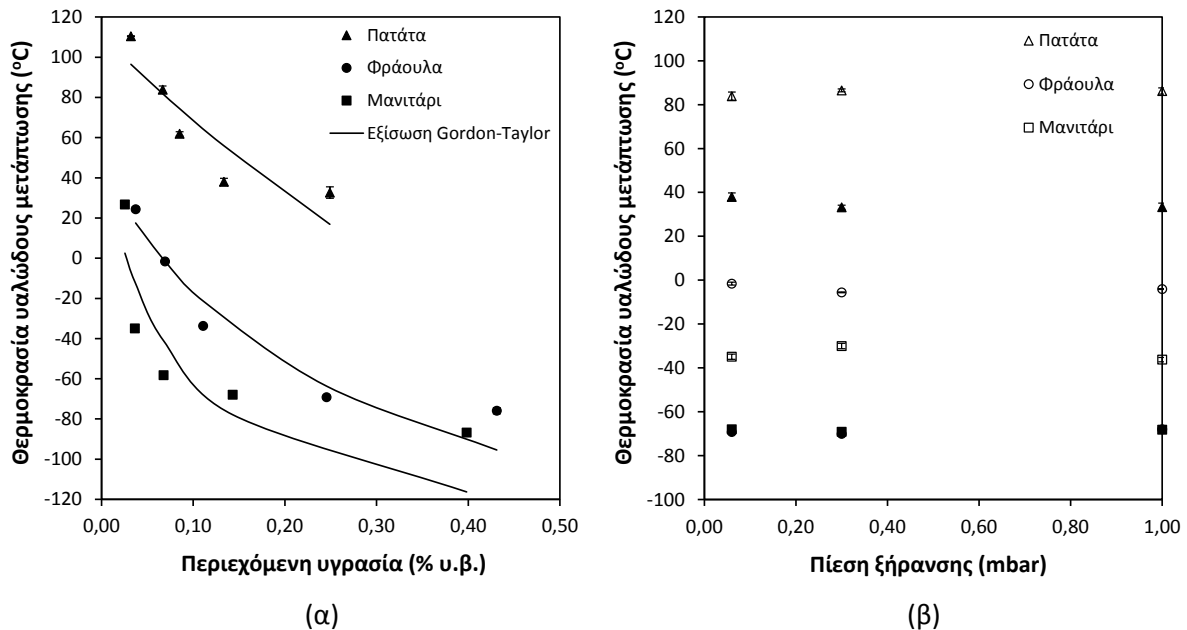
#### 6.5.3.1 Λυοφιλωμένα προϊόντα

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ) προσδιορίστηκε με την τεχνική DSC, από το μέσο της καμπύλης του θερμογραφήματος. Το Σχήμα 6. 10 και το Σχήμα 6. 11 παρουσιάζουν την επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης για αντιπροσωπευτικά δείγματα ρυζιού (χρόνος βρασμού πριν την ξήρανση  $t=4$  min) και γεωργικών προϊόντων ( $P=0,06$  mbar), αντίστοιχα. Παρόμοια αποτελέσματα με τις τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης έχουν

αναφερθεί από πολλούς συγγραφείς (Moraga et al., 2004; Perdon et al., 2000; Roos & Karel, 1990; Sun et al., 2002). Όσον αφορά στα προϊόντα ρυζιού, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης οφείλεται κυρίως στο περιεχόμενο άμυλο, το οποίο αποτελεί το κύριο συστατικό του ρυζιού (Sun et al., 2002). Οι πατάτες και το ρύζι χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές  $T_g$ , λόγω της υψηλής περιεκτικότητας τους σε άμυλο. Αντιθέτως, τα άμορφα σωματίδια σακχάρων στις φράουλες είναι εξαιρετικά υγροσκοπικά, με αποτέλεσμα να πλαστικοποιούν τη μήτρα και να μειώνουν σημαντικά τη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως.



Σχήμα 6. 10. Επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των βρασμένων ( $t=4$  min) κόκκων ρυζιού, που αφυδατώθηκαν σε διάφορες πιέσεις ξήρανσης υπό κατάψυξη.



Σχήμα 6. 11. (α) Επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των γεωργικών προϊόντων ( $P=0,06$  mbar), (β) Επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των γεωργικών προϊόντων,  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$   $\alpha_w=0,33$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ,  $\blacksquare$   $\alpha_w=0,75$ .

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Είναι σαφές ότι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε με την αύξηση της ενεργότητας ύδατος για το σύνολο των υλικών, ανεξάρτητα από τις συνθήκες της διεργασίας. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι το περιεχόμενο νερό, εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης (-135°C), δρα ως πλαστικοποιητής στα άμορφα τμήματα του υλικού (Bhandari & Howes, 1999; Champion et al., 2000; Johari et al., 1987). Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του ελεύθερου όγκου και μείωση του τοπικού ιξώδους. Ως αποτέλεσμα αυτού, αυξάνεται η κινητικότητα των μοριακών αλυσίδων στις άμορφες περιοχές, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης (Levine & Slade, 1989).

Η γνώση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης έχει ιδιαίτερη σημασία: πάνω από αυτή η μοριακή κινητικότητα είναι υψηλή, προκαλώντας την επιτάχυνση των αντιδράσεων, ενώ κάτω από αυτή το τρόφιμο είναι άκαμπτο και σταθερό (Hsu & Heldman, 2005). Οι εκτιμώμενες σταθερές της εξίσωσης Gordon-Taylor, για τα δείγματα ρυζιού και τα γεωργικά προϊόντα, παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες (Πίνακας 6. 8 και Πίνακας 6. 9) και βρίσκονται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Syamaladevi et al., 2010). Η εξίσωση Gordon-Taylor προσαρμόστηκε καλά στα πειραματικά δεδομένα για το ρύζι, τις φράουλες και τις πατάτες. Η συσχέτιση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης με την περιεχόμενη υγρασία ήταν λιγότερο ικανοποιητική για τα μανιτάρια.

Παρατηρείται επίσης, ότι η πίεση ξήρανσης υπό κατάψυξη επηρέασε τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων ρυζιού, αλλά δεν είχε σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των άλλων γεωργικών προϊόντων.

Πίνακας 6. 8. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα λυοφιλιωμένα προϊόντα ρυζιού ( $t=4$  min).

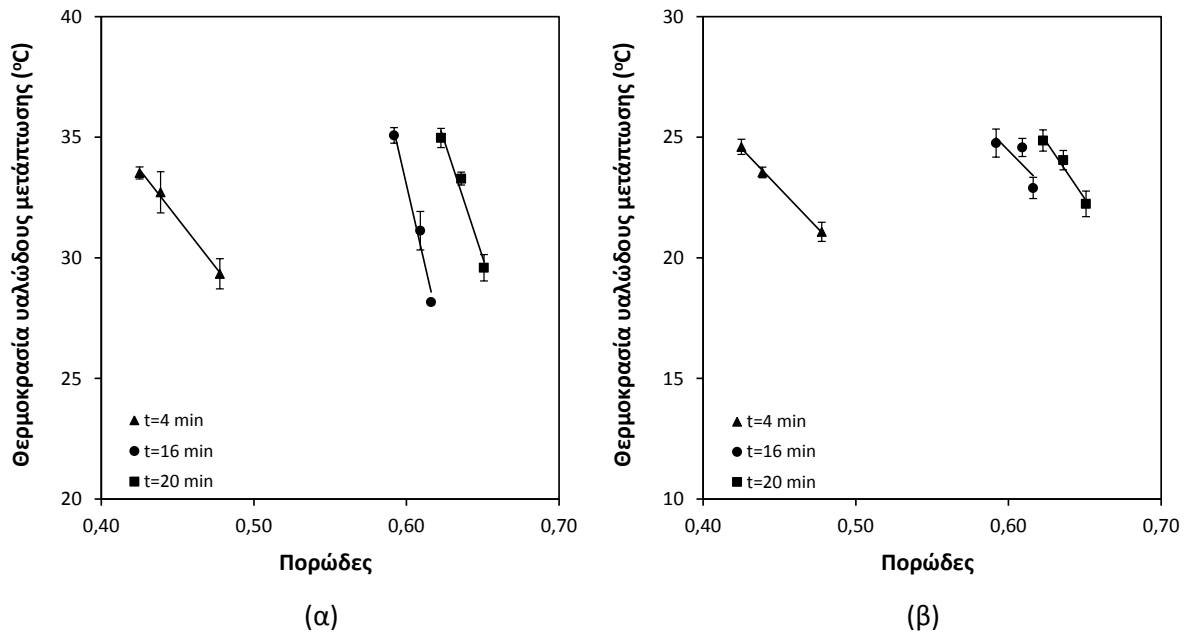
| Πίεση ξήρανσης (mbar) | 0,04   | 0,13   | 1,25   |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Σταθερές              |        |        |        |
| $k$                   | 2,229  | 2,052  | 2,073  |
| $T_{gs}$              | 91,056 | 91,906 | 93,078 |
| $R^2$                 | 0,917  | 0,917  | 0,910  |

Πίνακας 6. 9. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα λυοφιλιωμένα γεωργικά προϊόντα ( $P=0,06$  mbar).

| Υλικό    | Πατάτα  | Μανιτάρι | Φράουλα |
|----------|---------|----------|---------|
| Σταθερές |         |          |         |
| $k$      | 1,864   | 13,531   | 4,688   |
| $T_{gs}$ | 110,744 | 51,110   | 45,112  |
| $R^2$    | 0,772   | 0,694    | 0,916   |

Στη συνέχεια, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης συσχετίστηκε με τα δομικά χαρακτηριστικά των υλικών. Η συσχέτιση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης με το πορώδες των προϊόντων ρυζιού, για διάφορες ενεργότητες ύδατος, εμφανίζεται στο Σχήμα 6. 12. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των δειγμάτων ρυζιού μετατοπίστηκε προς χαμηλότερες τιμές καθώς αυξήθηκε το πορώδες για τις διάφορες ενεργότητες ύδατος. Τέλος, τα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα παρουσίασαν την ίδια θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ανεξαρτήτως των συνθηκών παραγωγής.





Σχήμα 6. 12. Συσχέτιση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης με το πορώδες των αφυδατωμένων βρασμένων ( $t=4$  min) κόκκων ρυζιού, για δύο διαφορετικές ενεργότητες ύδατος, (α) 0,75 και (β) 0,94.

### 6.5.3.2 Προϊόντα εκβολής

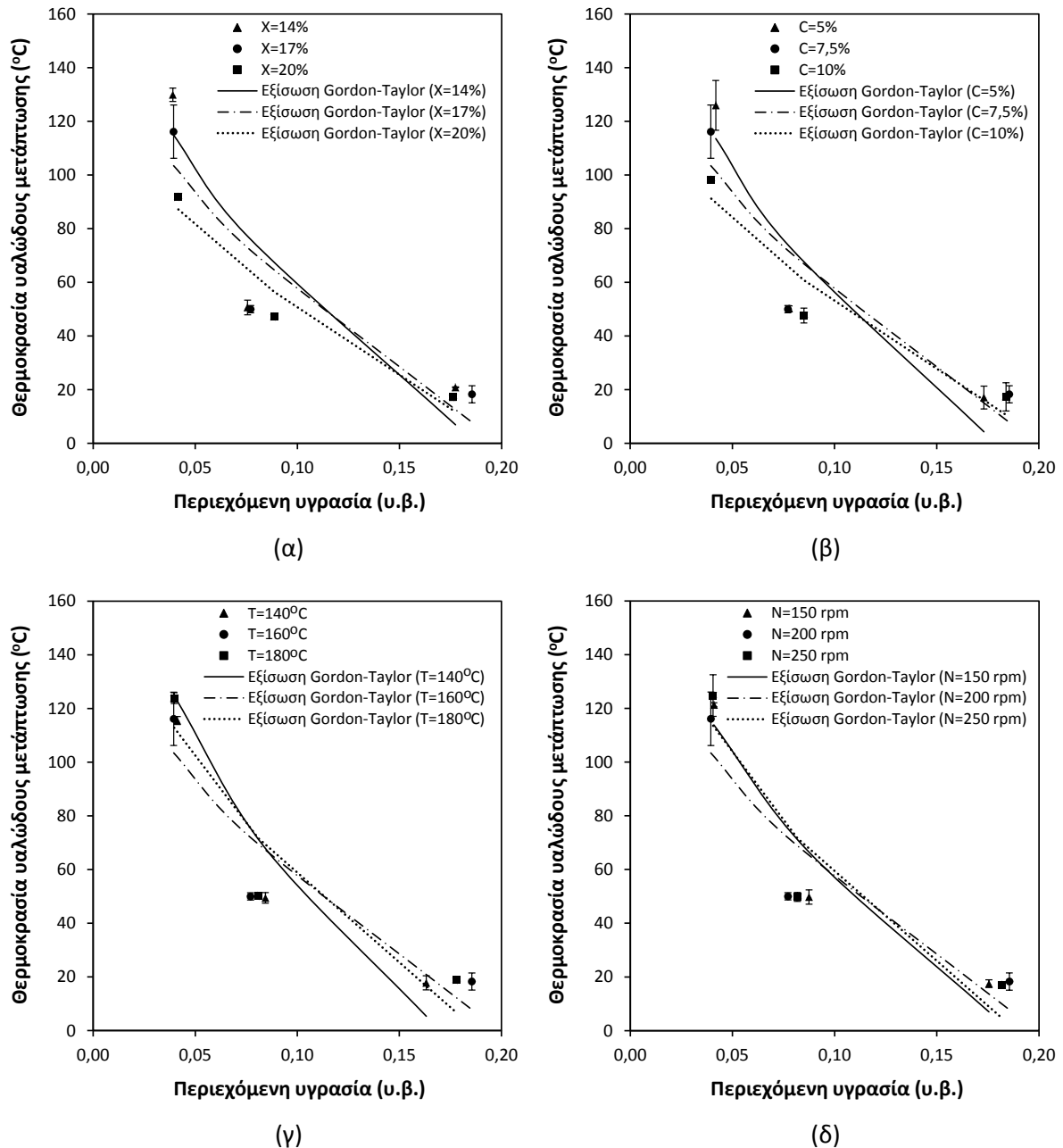
Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 6. 13) παρουσιάζεται η εξάρτηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων εκβολής από την περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων, μετά την εξισορρόπησή τους στις διαφορετικές ενεργότητες. Όπως είναι αναμενόμενο, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι της εξίσωσης Gordon-Taylor παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 6. 10).

Πίνακας 6. 10. Εκτιμώμενες τιμές των σταθερών της εξίσωσης Gordon-Taylor για τα προϊόντα εκβολής.

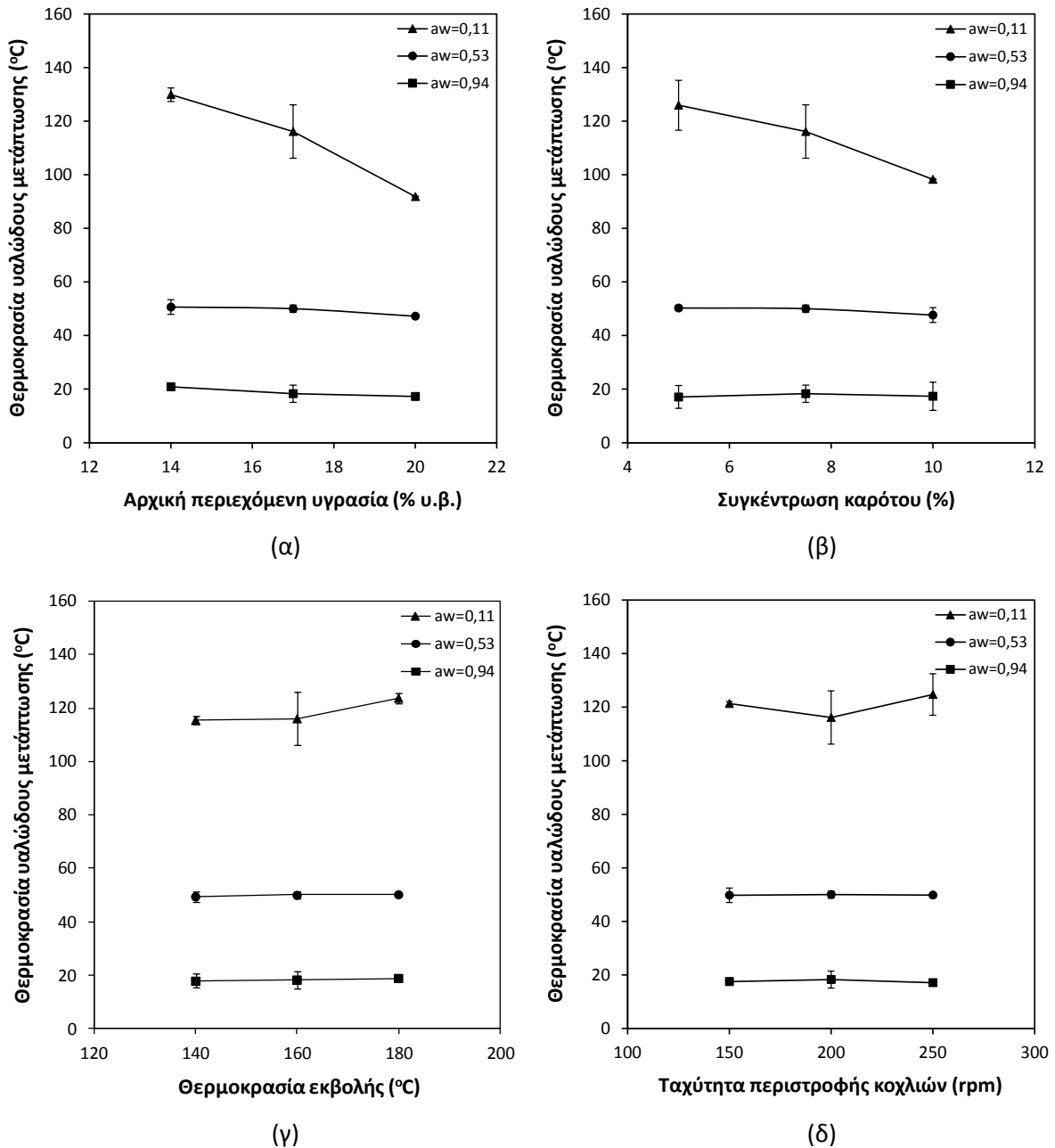
| X (% υ.β.) | Παράμετροι εκβολής |        |         | Σταθερές Gordon-Taylor |                 | R <sup>2</sup> |
|------------|--------------------|--------|---------|------------------------|-----------------|----------------|
|            | C (%)              | T (°C) | N (rpm) | k                      | T <sub>gs</sub> |                |
| 17         | 7,5                | 140    | 200     | 7,205                  | 202,576         | 0,917          |
| 20         | 7,5                | 160    | 200     | 3,424                  | 120,233         | 0,953          |
| 17         | 10                 | 160    | 200     | 3,432                  | 123,243         | 0,915          |
| 17         | 7,5                | 160    | 200     | 4,204                  | 144,572         | 0,816          |
| 17         | 7,5                | 160    | 250     | 5,293                  | 169,118         | 0,871          |
| 17         | 7,5                | 160    | 150     | 5,447                  | 171,657         | 0,920          |
| 17         | 5                  | 160    | 200     | 5,967                  | 178,343         | 0,851          |
| 14         | 7,5                | 160    | 200     | 5,296                  | 169,063         | 0,824          |
| 17         | 7,5                | 180    | 200     | 5,197                  | 166,117         | 0,874          |

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



Σχήμα 6. 13. Εξάρτηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από την περιεχόμενη υγρασία για τις διάφορες παραμέτρους της διεργασίας, (α) αρχική περιεχόμενη υγρασία ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) συγκέντρωση του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) θερμοκρασία εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης συναρτήσει της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας, της συγκέντρωσης του καρότου, της θερμοκρασίας εκβολής και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα.



Σχήμα 6. 14. Εξάρτηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από (α) την αρχική περιεχόμενη υγρασία ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200\text{ rpm}$ ), (β) τη συγκέντρωση του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200\text{ rpm}$ ), (γ) τη θερμοκρασία εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200\text{ rpm}$ ) και (δ) την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ), για τις διάφορες ενεργότητες ύδατος.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των προϊόντων εκβολής ρυζάλευρου/καρότου κυμαίνεται μεταξύ των  $130^{\circ}\text{C}$  και  $18^{\circ}\text{C}$ , για το εύρος ενεργοτήτων ύδατος από 0,11 έως 0,94, αντίστοιχα. Παρόμοιες τιμές παρατηρούνται και για άλλα προϊόντα εκβολής (Bindzus et al., 2002; Kaletunc & Breslauer, 1993; Lazou & Krokida, 2011).

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 6. 14, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, ενώ μειώνεται καθώς αυξάνεται η αρχική υγρασία της τροφοδοσίας και η συγκέντρωση του καρότου στο αρχικό μίγμα και μειώνεται η θερμοκρασία

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

εκβολής. Η μεταβολή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης είναι πιο έντονη για τη χαμηλή ενεργότητα νερού. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου στο μίγμα. Η προσθήκη καρότου αυξάνει το περιεχόμενο ποσοστό φυτικών ινών, οι οποίες επηρεάζουν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των υλικών (Lazou & Krokida, 2011). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης παρουσιάζει μία μικρή αύξηση στην υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί στο παρελθόν για ποικίλα προϊόντα εκβολής (Bindzus et al., 2002; Kaletunc & Breslauer, 1993). Επίσης, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής πιθανώς εξαιτίας της αύξησης του βαθμού ζελατινοποίησης του αμύλου στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες εκβολής (Hsieh & Huff, 1994; Lazou & Krokida, 2011). Πιο συγκεκριμένα, στη χαμηλή ενεργότητα, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120°C στους 130°C. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδήγησε σε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120°C στους 124°C. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 130°C στους 90°C, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 125°C στους 98°C.

## 6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τη στατιστική επεξεργασία, οι μέθοδοι της ξήρανσης και της εκβολής επηρέασαν σημαντικά τις ιδιότητες ποιότητας των τελικών προϊόντων. Σημαντικές ιδιότητες, όπως είναι οι μηχανικές που προσδιορίζουν την υφή των προϊόντων, εξαρτώνται επίσης, από τη δομή και την κατανομή πόρων των προϊόντων.

Όσον αφορά στα γεωργικά προϊόντα, οι μηχανικές ιδιότητες συσχετίστηκαν με τα δομικά χαρακτηριστικά και παρουσίασαν σημαντική μείωση με την αύξηση του πορώδους. Η αύξηση του πορώδους κατά περίπου 10% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 30%. Παράλληλα, οι πατάτες οι οποίες ανέπτυξαν τη λιγότερο πορώδη δομή παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές τάσης θραύσης και μέτρου ελαστικότητας. Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας (από το 14 στο 20%), της συγκέντρωσης καρότου (από το 5 στο 10%) και της θερμοκρασίας εκβολής (από τους 140 στους 180°C) οδήγησε στην παραγωγή σνακ με αυξημένη σκληρότητα, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (από τα 150 στα 250 rpm) είχε το αντίθετο αποτέλεσμα. Η αύξηση του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής κατά 70% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 1100 σε 400 kPa. Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης, τα πιο επιθυμητά προϊόντα εκβολής τα οποία χαρακτηρίστηκαν από υψηλή διόγκωση και χαμηλή σκληρότητα παρήχθησαν σε χαμηλές θερμοκρασίες (140°C), υψηλές ταχύτητες περιστροφής κοχλιών (250 rpm) και χαμηλή αρχική περιεχόμενη υγρασία (14%).

Η αύξηση της ενεργότητας ύδατος οδήγησε στην αυξημένη προσρόφηση υγρασίας, όπως αναμενόταν. Η εξίσωση GAB προσαρμόστηκε καλά στα πειραματικά δεδομένα που αφορούν τόσο στα γεωργικά προϊόντα όσο και στα προϊόντα εκβολής.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε σημαντικά με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, εξαιτίας της πλαστικοποιητικής ικανότητας του νερού. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης παρουσίασε μειωμένες τιμές με την αύξηση του πορώδους για τα αφυδατωμένα προϊόντα ρυζιού, ενώ δεν επηρεάστηκε από τα δομικά χαρακτηριστικά για τα υπόλοιπα γεωργικά

προϊόντα. Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης κυμάνθηκε μεταξύ των 130°C και των 18°C, για το εύρος ενεργοτήτων ύδατος από 0,11 έως 0,94, αντίστοιχα και αυξήθηκε καθώς αυξήθηκε η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών και η θερμοκρασία εκβολής, ενώ μειώθηκε με την αύξηση της αρχικής υγρασίας της τροφοδοσίας και της συγκέντρωσης του καρότου στο αρχικό μίγμα. Στην ενεργότητα 0,11, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής από τους 140°C στους 180°C ( $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120°C στους 130°C. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 rpm σε 250 rpm ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120°C στους 124°C. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας από 14 σε 20% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 130°C στους 90°C, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου από 5 σε 10% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 125°C στους 98°C.

Ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες των προϊόντων ως τελικά ή ενδιάμεσα τρόφιμα, οι κατάλληλες συνθήκες ξήρανσης και εκβολής μπορούν να επιλεγούν με βάση τα χρησιμοποιούμενα μαθηματικά πρότυπα. Η δομή ελέγχει σημαντικά την ποιότητα των τελικών αφυδατωμένων προϊόντων και προϊόντων εκβολής. Ως αποτέλεσμα, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των διαδικασιών ξήρανσης και εκβολής, ως προς τις τελικές δομικές και άλλες ιδιότητες των διαφόρων προϊόντων, είναι σημαντική για τις βιομηχανίες τροφίμων και μπορεί να καλύψει τις απαιτητικές ανάγκες των καταναλωτών για υγιεινά, υψηλής ποιότητας τρόφιμα.



# 7.

## **ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

Αντικείμενο και στόχοι

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πειραματική διαδικασία

Μαθηματικό πρότυπο

Αποτελέσματα - Συζήτηση αποτελεσμάτων

Συμπεράσματα





## 7.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η κατανάλωση των «έτοιμων» προϊόντων, όπως είναι τα προϊόντα εκβολής και τα αφυδατωμένα προϊόντα, εξαρτάται σημαντικά από τις οργανοληπτικές τους ιδιότητες. Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, όπως είναι η εμφάνιση, η γεύση και η υφή, καθορίζονται από τις συνθήκες επεξεργασίας αλλά και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Για το λόγο αυτό, οι βιομηχανίες τροφίμων στρέφονται στην αριστοποίηση των διεργασιών παραγωγής προκειμένου να παράγουν προϊόντα με επιθυμητά χαρακτηριστικά αρεστά στους καταναλωτές.

Στόχο του συγκεκριμένου κεφαλαίου αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των συνθηκών επεξεργασίας στις οργανοληπτικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής, καθώς και της εξάρτησή τους από τα δομικά τους χαρακτηριστικά. Τα παραχθέντα προϊόντα αξιολογούνται ως προς τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά όσον αφορά στην εμφάνιση, στη γεύση και στην υφή, χρησιμοποιώντας εκπαιδευμένους δοκιμαστές.

## 7.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 7.2.1 Εκβολή τροφίμων

Η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής είναι σημαντική. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η επίδραση των αντικειμενικών δομικών χαρακτηριστικών στην υφή των προϊόντων. Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας εκβολής στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των παραχθέντων προϊόντων.

Οι Liu et al. (2000) και Ding et al. (2005) αναφέρουν ότι η σκληρότητα των προϊόντων εκβολής αυξήθηκε καθώς αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε υγρασία, πιθανώς εξαιτίας της μειωμένης διόγκωσης που προκαλείται από την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες του τήγματος, ευνοώντας την ανάπτυξη φυσαλίδων, παράγοντας προϊόντα χαμηλής πυκνότητας με μικρά και λεπτά κύτταρα, αυξάνοντας έτσι την τραγανότητα των προϊόντων. Οι Liu et al. (2000) μελέτησαν ακόμα την επίδραση των παραμέτρων της εκβολής στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά προϊόντων αλεύρου καλαμποκιού και βρόμης. Τόσο το ποσοστό βρόμης όσο και η υγρασία επηρέασαν σημαντικά τις φυσικές και οργανοληπτικές ιδιότητες. Η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών δεν ήταν σημαντική. Η ανάλυση κύριων συνιστωσών έδειξε ότι τα χαρακτηριστικά αρώματος συνδέονται με το υψηλό ποσοστό της βρόμης. Επίσης, ένα υψηλό ποσοστό βρόμης οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων με αρνητικές ιδιότητες εμφάνισης, εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε λιπίδια και ίνες του αλεύρου βρόμης (Colonna et al., 1989). Προϊόντα εκβολής με υψηλή φαινόμενη πυκνότητα συνδέθηκαν με κάποιες αρνητικές οργανοληπτικές ιδιότητες. Επίσης, η ανάλυση κύριων συνιστωσών έδειξε υψηλές συσχετίσεις μεταξύ των αντικειμενικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών.

Οι Obatolu Veronica et al. (2006) παρατήρησαν ότι η προσθήκη μερικώς απολιπανθείσας σόγιας σε σνακ με βάση τον αραβόσιτο είχε αρνητική επίδραση στα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά. Τα δείγματα που δεν περιείχαν ή περιείχαν χαμηλή συγκέντρωση του πρόσθετου (10%), χαρακτηρίστηκαν πιο διογκωμένα και τραγανά, ενώ τα δείγματα που περιείχαν μεγάλη συγκέντρωση

## ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

(30%) θεωρήθηκαν ως μη διογκωμένα και πολύ σκληρά για προϊόντα σνακ. Η συνολική αποδοχή ήταν επίσης, χαμηλότερη για τα δείγματα αυτά. Οι Sacchetti et al. (2004) μελέτησαν τις οργανοληπτικές ιδιότητες διογκωμένων προϊόντων με βάση το άλευρο ρυζιού προσθέτοντας άλευρο κάστανου και παρατήρησαν ότι η σκληρότητα αυξήθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άλευρο κάστανου στο αρχικό μίγμα. Η σκληρότητα συσχετίστηκε θετικά με την πυκνότητα των προϊόντων. Το προϊόν με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε άλευρο κάστανου παρουσίασε μια ελαφρώς πικρή γεύση, η οποία μπορεί να οφείλεται στην αντίδραση Maillard.

Οι Altan et al. (2008a) μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων της εκβολής στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά προϊόντων με βάση το άλευρο κριθαριού. Η εμφάνιση των προϊόντων εκβολής αξιολογήθηκε όσον αφορά στο χρώμα και στο πορώδες. Το οργανοληπτικό χρώμα των προϊόντων που παρήχθησαν στους 150°C με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής κοχλίας δεν έδειξε σημαντικές διαφορές. Η υψηλότερη βαθμολογία για το πορώδες ελήφθη για τα προϊόντα που παρήχθησαν στους 160°C και στα 150 rpm. Η γεύση των προϊόντων αξιολογήθηκε ως προς τη γεύση σε πίτουρο και την πικρία και δεν παρουσίασε κάποια σημαντική διαφορά. Η υφή των προϊόντων εκβολής αξιολογήθηκε ως προς τη σκληρότητα, την τραγανότητα και την ευθραυστότητα. Η οργανοληπτική σκληρότητα συσχετίστηκε αρνητικά με την αντικειμενικά μετρούμενη μέγιστη δύναμη και την κλίση. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της μέγιστης δύναμης (σκληρότητα) και της κλίσης (ευθραυστότητα) της καμπύλης δύναμης - απόστασης προκάλεσε μείωση της προτίμησης από τους δοκιμαστές. Η οργανοληπτική ευθραυστότητα συσχετίστηκε, επίσης, θετικά με το πορώδες. Τα διογκωμένα προϊόντα με χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερους πόρους με λεπτότερα τοιχώματα, με αποτέλεσμα μια τραγανή υφή, και, συνεπώς, μια χαμηλή τιμή της δύναμης ευθραυστότητας (κλίση) και υψηλή βαθμολογία της οργανοληπτικής ευθραυστότητας. Δεδομένου ότι η δομή των προϊόντων γίνεται πιο ανοιχτή με μεγαλύτερους πόρους, η σκληρότητα μειώνεται, το χρώμα γίνεται πιο φωτεινό και τα προϊόντα χαρακτηρίζονται από υψηλότερες βαθμολογίες. Η συνολική αποδοχή των προϊόντων εκβολής συσχετίστηκε θετικά με την οργανοληπτική σκληρότητα, την τραγανότητα, την ευθραυστότητα, το χρώμα και το πορώδες.

Οι Duizer et al. (1998) αναφέρουν ότι προϊόντα εκβολής με βάση το άλευρο καλαμποκιού χαρακτηρίστηκαν πιο τραγανά και λιγότερο σκληρά με τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία, καθώς το νερό δρα ως πλαστικοποιητής. Οι Yagci & Gogus (2009) μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων της εκβολής στα χαρακτηριστικά προϊόντων εκβολής με βάση ρυζάλευρο, σκληρό αλεύρι και αλεύρι φουντουκιών (hazelnut flour), με πρόσθετα παραπροϊόντα φρούτων. Οι ιδιότητες υφής των προϊόντων, ειδικότερα η τραγανότητα και η ευθραυστότητα, πήραν υψηλή βαθμολογία από τους δοκιμαστές. Τα προϊόντα που περιείχαν μικρότερο ποσοστό αλεύρου φουντουκιών προτιμήθηκαν ως προς την τραγανότητα και είχαν τα υψηλότερα επίπεδα συνολικής αποδοχής. Δεν υπήρξε σημαντική επίδραση της προσθήκης των παραπροϊόντων φρούτων στις οργανοληπτικές ιδιότητες των παραχθέντων σνακ.

Οι Cheng et al. (2007) παρατήρησαν ότι τόσο η περιεχόμενη υγρασία όσο και η προσθήκη πρωτεϊνών σίτου είχαν σημαντική επίδραση στη σκληρότητα των προϊόντων εκβολής. Υψηλή υγρασία είχε ως αποτέλεσμα σημαντικά μεγαλύτερη σκληρότητα και η διαφορά ήταν περισσότερο έντονη σε χαμηλότερο περιεχόμενο πρωτεϊνών σίτου. Σε υψηλές υγρασίες, καθώς το περιεχόμενο πρωτεϊνών σίτου αυξήθηκε, παρατηρήθηκε μία σημαντική μείωση στη σκληρότητα. Σε χαμηλές υγρασίες, αύξηση της περιεκτικότητας πάνω από το 18% οδήγησε σε ελαφρώς πιο σκληρά προϊόντα. Η σκληρότητα των προϊόντων εκβολής αυξήθηκε με την αύξηση της πυκνότητας. Οι παράμετροι της μικροδομής (διάμετρος και πάχος των τοιχωμάτων) είναι θεμελιώδεις ιδιότητες των κυτταρικών

υλικών που επηρεάζουν τη συνολική μηχανική αντοχή τους. Η μείωση του πάχους των κυτταρικών τοιχωμάτων (λόγω του χαμηλότερου περιεχόμενου υγρασίας ή της υψηλότερης περιεκτικότητας πρωτεϊνών σίτου) συνοδεύτηκε από μείωση της σκληρότητας. Όμως πολύ κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό της μηχανικής αντοχής παίζει ο λόγος του πάχους των τοιχωμάτων προς τη μέση διάμετρο. Χαμηλότερη αναλογία πάχους των τοιχωμάτων προς μέση διάμετρο παρατηρήθηκε για τα προϊόντα εκβολής με χαμηλή περιεχόμενη υγρασία. Αντίθετα, σε σταθερή περιεχόμενη υγρασία, η σκληρότητα των προϊόντων εκβολής με διαφορετικά επίπεδα πρωτεϊνών δεν ακολουθεί την ίδια τάση όπως ο λόγος του πάχους προς τη μέση διάμετρο. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε σε αύξηση της μηχανικής ενέργειας και στις μεγαλύτερες ασυνέχειες στη μήτρα εξαιτίας της προσθήκης των πρωτεϊνών. Έτσι, υψηλότερο ποσοστό πρωτεϊνών μείωσε τη συνολική μηχανική αντοχή των προϊόντων.

## 7.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 7.3.1 Παραγωγή προϊόντων

Τα προϊόντα εκβολής που χρησιμοποιήθηκαν για την οργανοληπτική αξιολόγηση παρήχθησαν με βάση το σχεδιασμό κεντρικού σημείου, όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4.3.

### 7.3.2 Προσδιορισμός των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων εκβολής

Τα προϊόντα εκβολής αξιολογήθηκαν ως προς τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας δεκαμελή ομάδα από εκπαιδευμένους δοκιμαστές. Οι δοκιμές διεξήχθησαν στο Χώρο Οργανοληπτικών Δοκιμών του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, ο οποίος είναι διαπιστευμένος κατά ISO 17025.

Τα δείγματα έλαβαν τυχαία τριψήφια αρίθμηση και τοποθετήθηκαν σε λευκά πιάτα, όπου δόθηκαν στους δοκιμαστές. Οι δοκιμαστές βρίσκονταν σε ξεχωριστούς θαλάμους με σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες και κατάλληλο φωτισμό. Οι δοκιμαστές αξιολόγησαν τα υλικά με κλίμακα αξιολόγησης 1-9 (1- χαμηλό, 9- υψηλό), ως προς την εμφάνιση, τη γεύση και την υφή τους. Η εμφάνιση αναφέρεται στην ομοιομορφία, το πορώδες, τη διόγκωση και το χρώμα των δειγμάτων, ενώ η γεύση αναφέρεται στη γεύση καμένου ή άψητου υλικού, όπως επίσης, και στην αίσθηση της γεύσης του καρότου. Η υφή αξιολογήθηκε κατά τη μάσηση των τροφίμων ως προς τη σκληρότητα, την τραγανότητα, την ενυδάτωση, τη συγκολλητικότητα και τη συνοχή. Ο Πίνακας 7. 1 παρουσιάζει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, τους ορισμούς τους και τα όρια αξιολόγησης (Liu et al., 2000).

## ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Πίνακας 7. 1. Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, ορισμοί και όρια αξιολόγησης για τα προϊόντα εκβολής.

|          | Χαρακτηριστικό   | Ορισμός   | Όρια αξιολόγησης    |
|----------|------------------|---|---------------------|
| Εμφάνιση | Ομοιομορφία      | Ομοιομορφία του δείγματος   | χαμηλή προς υψηλή*  |
|          | Χρώμα            | Χρώμα του δείγματος   | ανοιχτό προς σκούρο |
|          | Πορώδες          | Ποσοστό κενού χώρου στο υλικό   | χαμηλό προς υψηλό   |
|          | Διόγκωση         | Μέγεθος διαμέτρου του υλικού  | χαμηλή προς υψηλή   |
| Γεύση    | Άψητο            | Γεύση άψητου υλικού   | χαμηλό προς υψηλό   |
|          | Καμένο           | Γεύση καμένου υλικού  | χαμηλό προς υψηλό   |
|          | Γεύση καρότου    | Γεύση του προστιθέμενου υλικού  | χαμηλή προς υψηλή   |
| Υφή      | Σκληρότητα       | Δύναμη που απαιτείται για το δάγκωμα του δείγματος                          | χαμηλή προς υψηλή   |
|          | Τραχανότητα      | Θόρυβος που γίνεται αισθητός κατά το μάσημα με γομφίους                     | χαμηλή προς υψηλή   |
|          | Ενυδάτωση        | Βαθμός στον οποίο το δείγμα αναμιγνύεται με το σάλιο                        | χαμηλή προς υψηλή   |
|          | Συγκολλητικότητα | Βαθμός στον οποίο το δείγμα κολλάει στην επιφάνεια του στόματος ή τα δόντια | χαμηλή προς υψηλή   |
|          | Συνοχή           | Βαθμός στον οποίο τα σωματίδια του δείγματος κολλάνε μεταξύ τους            | χαμηλή προς υψηλή   |

\*1- το χαρακτηριστικά είναι χαμηλό, 9- το χαρακτηριστικό είναι έντονο

## 7.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

### 7.4.1 Προϊόντα εκβολής

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής συσχετίστηκαν με το αντικειμενικό πορώδες χρησιμοποιώντας απλές γραμμικές εξισώσεις της μορφής:

$$y = a \cdot \varepsilon + \beta$$

7. 1

όπου  $y$  είναι η οργανοληπτική ιδιότητα,  $\varepsilon$  είναι το πορώδες και  $a$ ,  $\beta$  είναι σταθερές.

## 7.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 7.5.1 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής

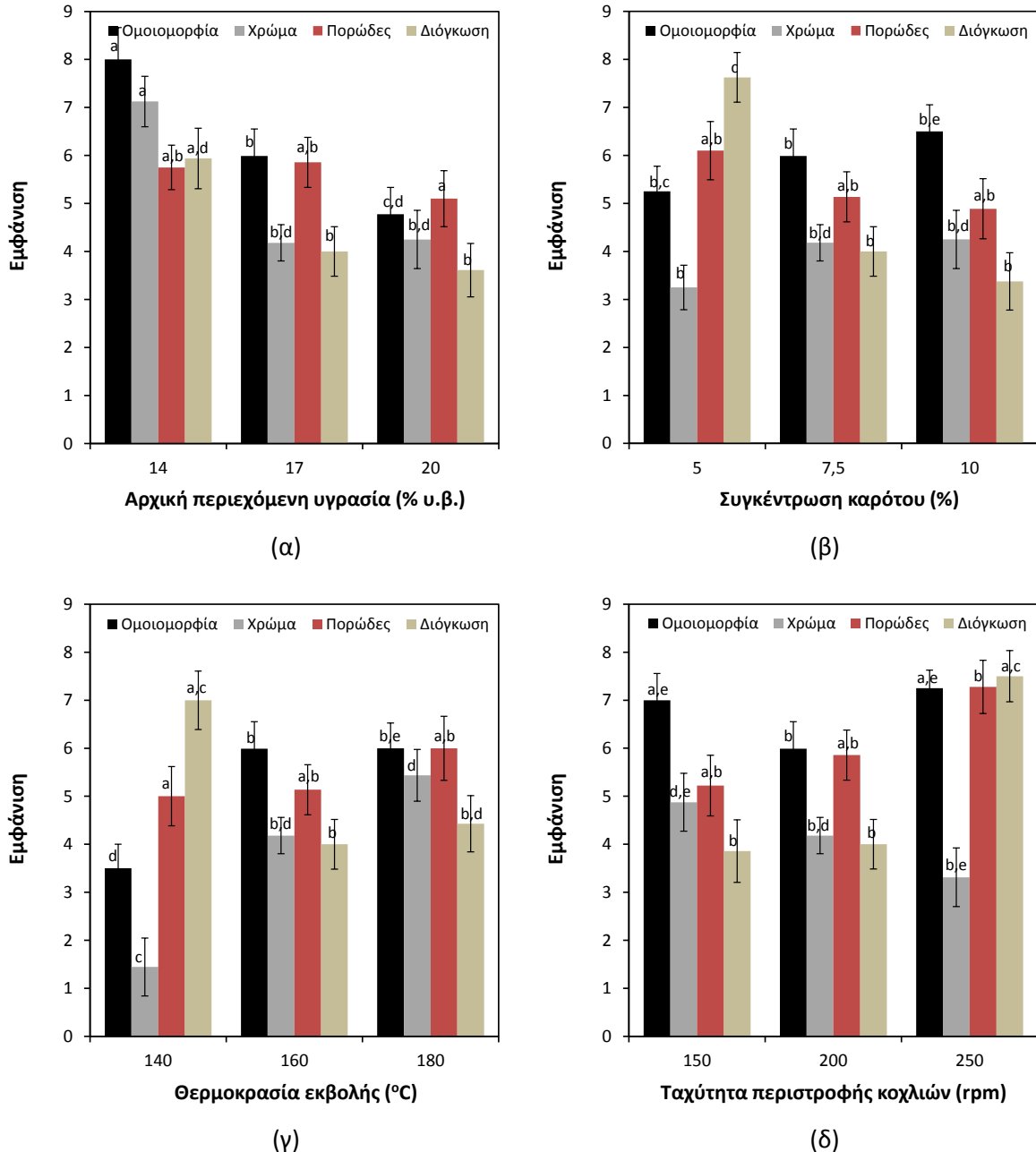
Στα παρακάτω Σχήματα παρουσιάζεται η επίδραση των συνθηκών εκβολής και της σύστασης του μίγματος τροφοδοσίας στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των παραχθέντων προϊόντων. Η στατιστική ανάλυση διασποράς (ANOVA) έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων.

Το Σχήμα 7. 1 παρουσιάζει ενδεικτικά τα κεντρικά σημεία του πειραματικού σχεδιασμού. Η εμφάνιση των προϊόντων επηρεάστηκε από τις παραμέτρους της διεργασίας (συνθήκες παραγωγής και χαρακτηριστικά των πρώτων υλών). Συγκεκριμένα, η ομοιομορφία των προϊόντων μειώθηκε (Βαθμολογία: από 8,0 στο 4,8) με την αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας, ενώ αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου (Βαθμολογία: από 5,3 στο 6,5) και της θερμοκρασίας εκβολής (Βαθμολογία: από 3,5 στο 6,0). Η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών δεν είχε σαφή επίδραση στην ομοιομορφία των προϊόντων. Τα προϊόντα τα οποία χαρακτηρίστηκαν από αυξημένο πορώδες παρουσίασαν υψηλότερη βαθμολογία ως προς την ομοιομορφία τους. Επίσης, ομοιόμορφα παρουσιάστηκαν τα προϊόντα τα οποία περιείχαν αυξημένη ποσότητα καρότου.

Επιπλέον, στο ίδιο Σχήμα παρατηρείται ότι η διόγκωση παρουσίασε μείωση με την αρχική υγρασία (Βαθμολογία: από 6,0 στο 3,5), τη συγκέντρωση του καρότου (Βαθμολογία: από 7,6 στο 3,4) και τη θερμοκρασία εκβολής (Βαθμολογία: από 7,0 στο 4,4), ενώ παρουσίασε αύξηση με την ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα (Βαθμολογία: από 3,9 στο 7,5). Η αρχική περιεχόμενη υγρασία, η συγκέντρωση του καρότου και η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών παρουσίασαν παρόμοια επίδραση και στο πορώδες των προϊόντων, ενώ η θερμοκρασία είχε αντίθετη επίδραση, δηλαδή με την αύξηση της θερμοκρασίας τα προϊόντα παρουσίασαν περισσότερο πορώδη δομή. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αντικειμενικές μεθόδους μέτρησης των δομικών χαρακτηριστικών, τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.5.4. Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής βοηθά στην ανάπτυξη φυσαλίδων στο εσωτερικό της ζύμης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία προϊόντων μεγαλύτερου πορώδους. Επίσης, η αυξημένη θερμοκρασία παρέχει μεγαλύτερη ενέργεια για την εκτόνωση του υπέρθερμου νερού με αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους. Η μείωση του πορώδους και του συντελεστή διόγκωσης με την αύξηση της περιεκτικότητας σε καρότο οφείλεται στην αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες, οι οποίες διαρρηγνύουν τα κυτταρικά τοιχώματα πριν την πλήρη διόγκωση των φυσαλίδων αέρα (Dullien, 1979). Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδηγεί στην αύξηση του όγκου των εκβαλλόμενων προϊόντων και τη μείωση της πυκνότητάς τους (Hagenimana et al., 2006). Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία περιορίζει τη ροή στο εσωτερικό του εκβολέα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διατμητική τάση και ο χρόνος παραμονής, οδηγώντας στην αύξηση της διόγκωσης και του πορώδους (Jyothi et al., 2009).

Το χρώμα των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε από τις συνθήκες επεξεργασίας τους και τη σύσταση του αρχικού μίγματος. Το χρώμα είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό των προϊόντων εκβολής το οποίο παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το βαθμό της θερμικής επεξεργασίας (Jouppila & Roos, 2008) και επηρεάζει την αποδοχή των καταναλωτών. Σύμφωνα με τους δοκιμαστές, το χρώμα των προϊόντων εκβολής παρουσιάστηκε πιο σκούρο με τη μείωση της υγρασίας, την αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου στο μίγμα, την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών. Είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια της εκβολής λαμβάνει χώρα μη ενζυματική αμαύρωση λόγω της αντιδράσεως Maillard ή της καραμελοποίησης (Michailidis et al., 2008b). Οι Chaiyakul et al. (1992) αναφέρουν ότι η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία εκβολής ευνοούν τις αντιδράσεις Maillard, με αποτέλεσμα να οδηγούν στην παραγωγή προϊόντων με σκούρο κίτρινο χρώμα (Hagenimana et al., 2006). Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου στο αρχικό μίγμα πιθανώς να αυξάνει την έκταση των αντιδράσεων Maillard και να οδηγεί στην παραγωγή πιο σκούρων προϊόντων, γεγονός που συμφωνεί με προηγούμενες μελέτες (Sacchetti et al., 2004).

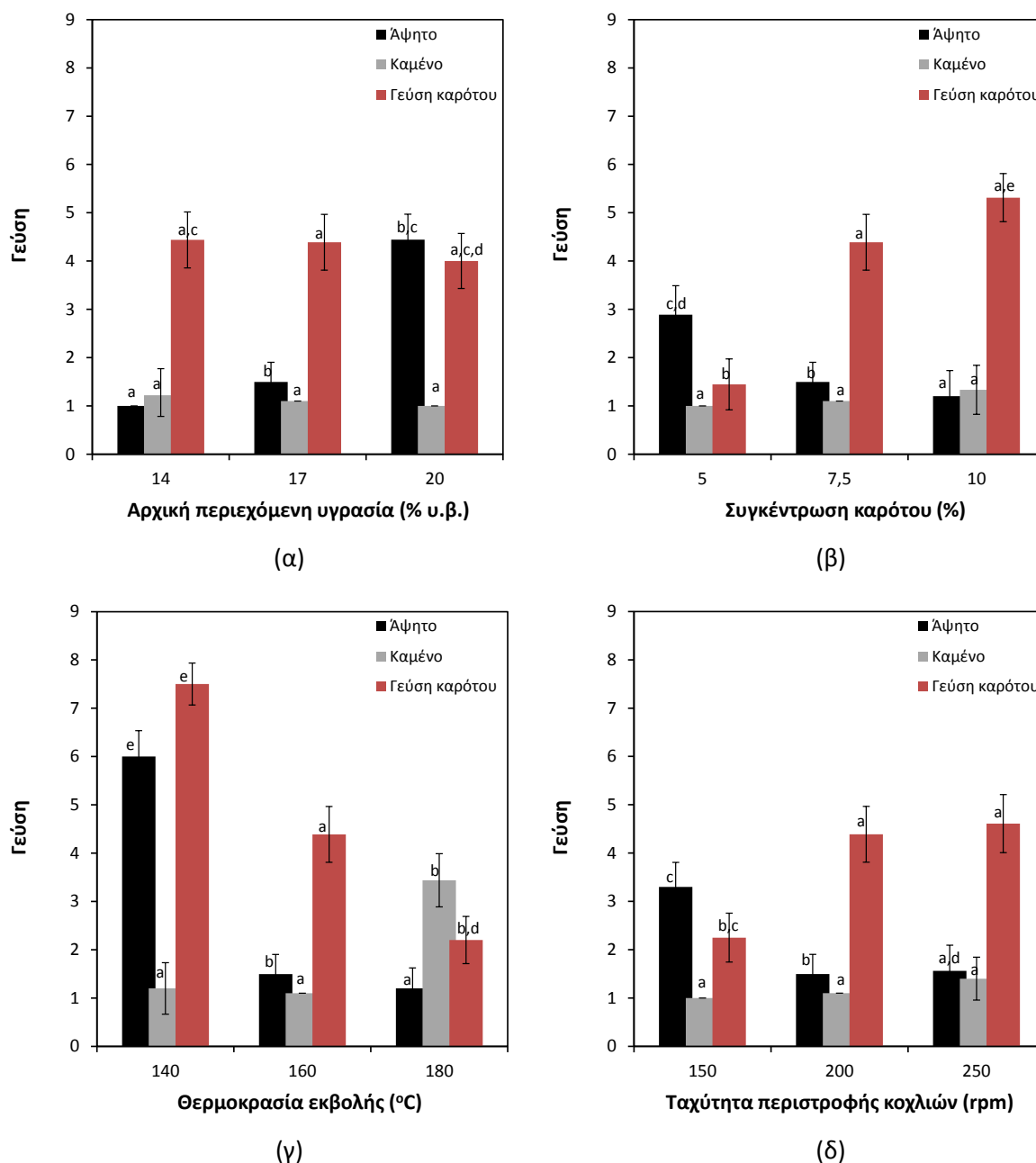
## ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



**Σχήμα 7. 1.** Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην εμφάνιση των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).

Η γεύση των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε επίσης, από τις συνθήκες παραγωγής τους και τη σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας (Σχήμα 7. 2). Όπως γενικά παρατηρήθηκε, τα δείγματα συγκέντρωσαν χαμηλές βαθμολογίες ως προς την αίσθηση του καμένου ή του άψητου χαρακτηριστικού, γεγονός που ενισχύει την αποδοχή των καταναλωτών στα προϊόντα αυτά. Η αίσθηση του καμένου ήταν πιο έντονη στα δείγματα που παρήχθησαν σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής κοχλιών, περιείχαν υψηλότερη συγκέντρωση καρότου και χαμηλότερη αρχική υγρασία. Αντίθετη επίδραση είχαν οι παράμετροι της διεργασίας στην αίσθηση

της άψητης γεύσης των προϊόντων. Η αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας οδηγεί σε μείωση του βαθμού ψησίματος, αυξάνοντας την αίσθηση της άψητης γεύσης των προϊόντων. Παράλληλα, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής οδηγεί σε αύξηση του βαθμού μαγειρέματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της αίσθησης του καμένου (Drago et al., 2007). Η εντονότερη αίσθηση του καμένου στα δείγματα που παρήχθησαν σε υψηλότερες ταχύτητες κοχλιών παρατηρήθηκε και από τους Anderson et al. (1981).



Σχήμα 7. 2. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στη γεύση των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).

## ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Επίσης, η αίσθηση της γεύσης του καρότου ήταν πιο έντονη στα δείγματα που περιείχαν υψηλή συγκέντρωση καρότου και παρήχθησαν σε χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα. Η χαμηλή θερμοκρασία και η υψηλή ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών, η οποία μειώνει το χρόνο παραμονής στο εσωτερικό του εκβολέα, οδηγούν στη μείωση του βαθμού μαγειρέματος, διατηρώντας τα αρωματικά χαρακτηριστικά των υλικών. Η αρχική περιεχόμενη υγρασία δεν επηρέασε σημαντικά την αίσθηση της γεύσης του καρότου στα δείγματα.

Τέλος, η υφή των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε σημαντικά από τις συνθήκες της διεργασίας. Τα προϊόντα που παρήχθησαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εκβολής, ταχύτετες περιστροφής κοχλιών και περιείχαν χαμηλότερες συγκεντρώσεις καρότου και υψηλότερη αρχική υγρασία, εμφάνισαν αυξημένη σκληρότητα. Οι Cheng et al (2007) αναφέρουν την αύξηση της οργανοληπτικής σκληρότητας με αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας των προϊόντων εκβολής. Η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας οδηγεί σε αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων των προϊόντων εκβολής, η οποία οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητάς τους. Η μεταβολή της σκληρότητας των προϊόντων εκβολής με την επίδραση των διαφόρων συνθηκών επεξεργασίας και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών μπορεί να αποδοθεί στα δομικά χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των προϊόντων. Προϊόντα με υψηλή αρχική περιεχόμενη υγρασία τα οποία παρήχθησαν σε χαμηλές θερμοκρασίες και ταχύτετες περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα, παρουσίασαν μειωμένο πορώδες με περιορισμένο όγκο κενών. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα προϊόντα χαρακτηρίστηκαν πιο σκληρά από τους δοκιμαστές (Barrett & Kaletunc, 1998). Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδήγησε σε προϊόντα με μεγαλύτερο πορώδες με αποτέλεσμα τη μειωμένη σκληρότητα. Η μείωση της οργανοληπτικής σκληρότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής, πιθανώς λόγω του αυξημένου πορώδους, αναφέρεται και από τους Brncic et al. (2006). Αξίζει να σημειωθεί ότι, με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οργανοληπτική σκληρότητα συσχετίστηκε αρνητικά με την αντικειμενικά μετρούμενη σκληρότητα. Το γεγονός αυτό αναφέρεται και από τους Altan et al. (2008a).

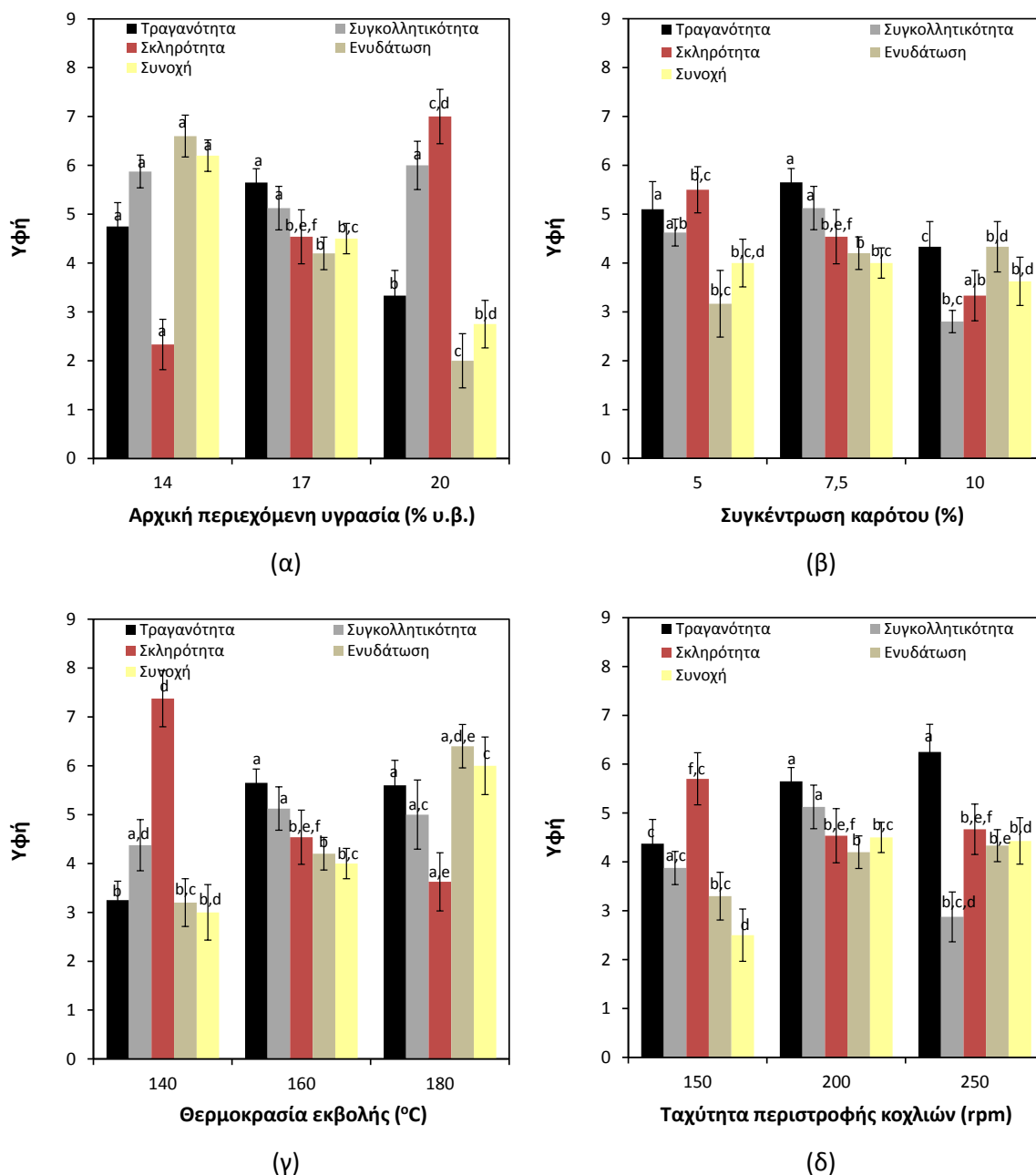
Η τραγανότητα των προϊόντων εκβολής μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας και της συγκέντρωσης καρότου στο μίγμα, ενώ αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών. Τα προϊόντα που περιείχαν μικρότερο ποσοστό καρότου προτιμήθηκαν ως προς την τραγανότητα. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Yagci & Gogus (2009) κατά την προσθήκη αλεύρου φουντουκιών. Τα δείγματα τα οποία παρήχθησαν σε χαμηλές υγρασίες και υψηλές θερμοκρασίες και χαρακτηρίστηκαν από υψηλότερο πορώδες, παρουσίασαν μεγαλύτερη τραγανότητα.

Παράλληλα, η ενυδάτωση των προϊόντων κατά τη μάσηση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής (Βαθμολογία: από 3,2 στο 6,4), της συγκέντρωσης του καρότου (Βαθμολογία: από 3,2 στο 4,3) και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (Βαθμολογία: από 3,3 στο 4,3), ενώ αντίθετα, μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας (Βαθμολογία: από 6,5 στο 2,0). Οι υψηλές θερμοκρασίες εκβολής αυξάνουν το βαθμό ζελατινοποίησης του αμύλου, αυξάνοντας την ταχύτητα ενυδάτωσης των προϊόντων (Solomon, 2008). Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών και η μείωση της υγρασίας τροφοδοσίας οδήγησαν στην παραγωγή προϊόντων με υψηλό πορώδες, με αποτέλεσμα την αυξημένη ενυδάτωση κατά τη μάσηση.

Η συγκολλητικότητα των προϊόντων αυξήθηκε με την αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας και της θερμοκρασίας εκβολής. Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδήγησε σε μειωμένη συγκολλητικότητα. Παράλληλα, τα προϊόντα που παρήχθησαν σε



υψηλές ταχύτητες περιστροφής κοχλιών εμφάνισαν αυξημένη συνοχή κατά τη μάσηση. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και από άλλους ερευνητές (Liu et al., 2000). Η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας προκάλεσε τη μείωση της συνοχής, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου δεν προκάλεσε σημαντικές επιδράσεις.

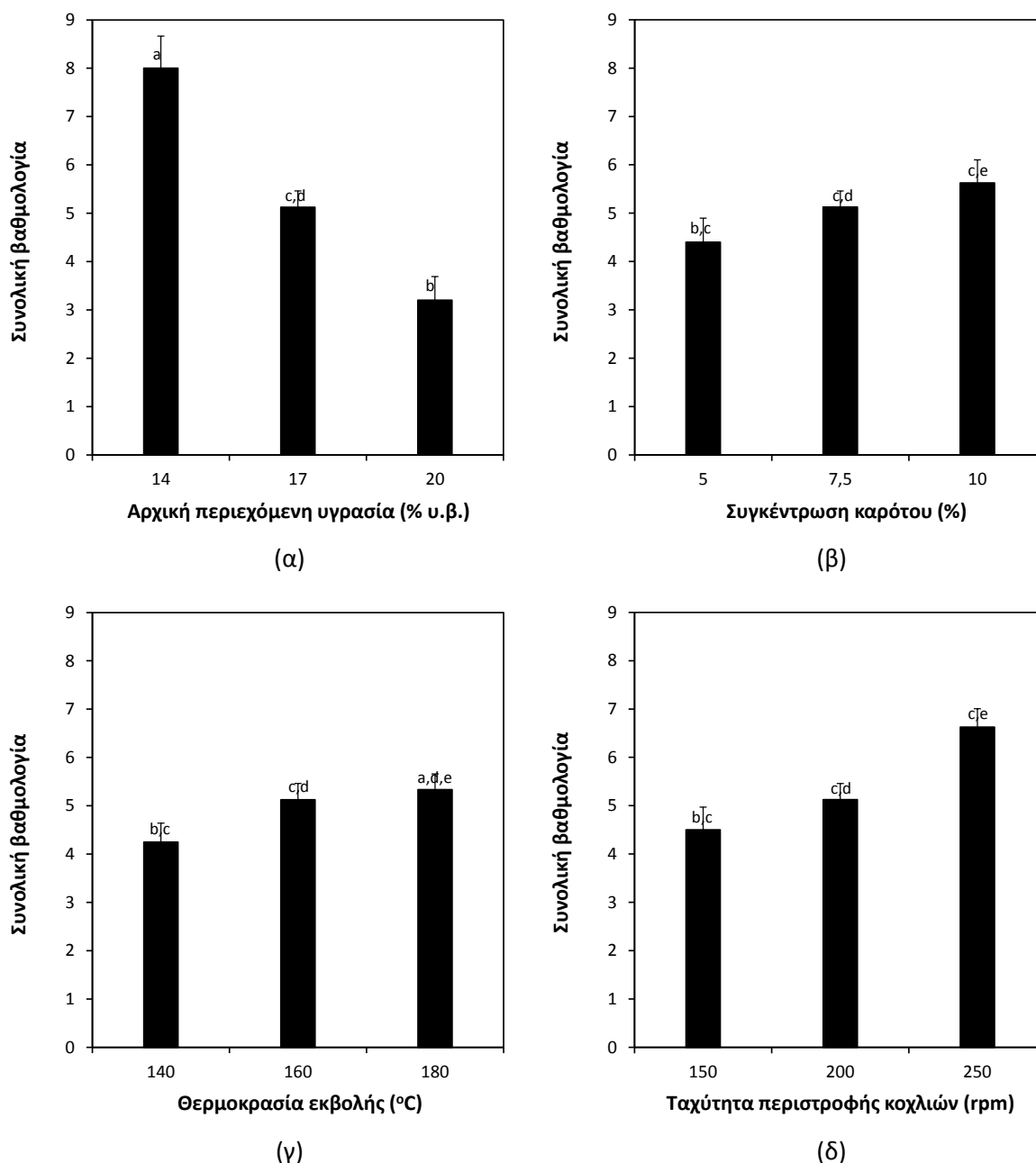


Σχήμα 7. 3. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  rpm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στην υφή των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).

Οι δοκιμαστές βαθμολόγησαν επίσης, συνολικά τα δείγματα και τα αποτελέσματα του οργανοληπτικού ελέγχου παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα. Όπως παρατηρείται, η βαθμολογία των προϊόντων εκβολής ήταν μεγαλύτερη στα προϊόντα που παρήχθησαν σε υψηλές θερμοκρασίες

## ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

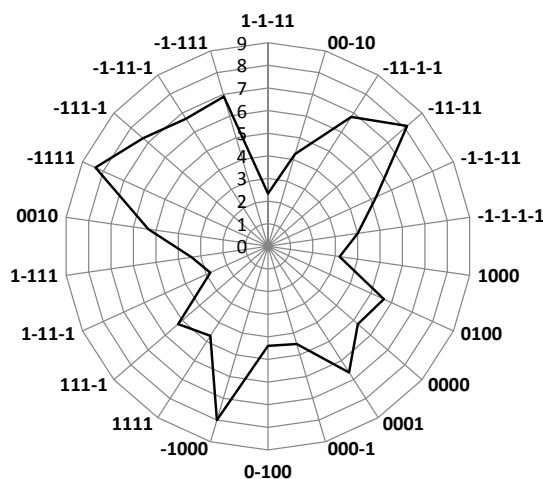
και ταχύτητες περιστροφής κοχλιών και περιείχαν χαμηλότερη αρχική υγρασία και περισσότερη ποσότητα καρότου στο αρχικό μίγμα.



Σχήμα 7. 4. Επίδραση (α) της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας ( $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  grm), (β) της συγκέντρωσης του καρότου ( $X=17\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  grm), (γ) της θερμοκρασίας εκβολής ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $N=200$  grm) και (δ) της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών ( $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ,  $T=160^{\circ}\text{C}$ ) στη συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής (οι στήλες που δεν έχουν τον ίδιο εκθέτη (για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά) είναι σημαντικά διαφορετικές ( $p<0,05$ )).

Τέλος, στο Σχήμα 7. 5 παρουσιάζεται η συνολική βαθμολογία όλων των προϊόντων εκβολής. Όπως παρατηρείται, τα προϊόντα που περιείχαν χαμηλή συγκέντρωση καρότου δεν ήταν ιδιαίτερα αρεστά, με εξαίρεση τα προϊόντα που περιείχαν 14% υγρασία και παρήχθησαν στους 180°C και στα 150 και 250 rpm, αντίστοιχα. Υψηλή βαθμολογία έλαβαν τα προϊόντα που περιείχαν χαμηλή υγρασία και υψηλή συγκέντρωση καρότου, τα οποία επεξεργάστηκαν σε εύρος θερμοκρασιών και ταχυτήτων

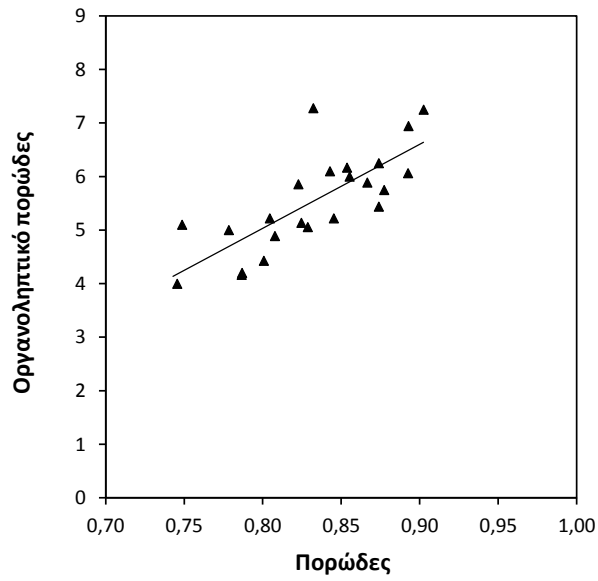
περιστροφής κοχλιών. Γενικά, όλα τα προϊόντα τα οποία περιείχαν 14% υγρασία στο αρχικό μίγμα παρουσίασαν υψηλή βαθμολογία, με εξαίρεση τα προϊόντα που περιείχαν χαμηλή συγκέντρωση καρότου (5%) και παρήχθησαν σε χαμηλές θερμοκρασίες εκβολής (140°C). Τα προϊόντα τα οποία περιείχαν 14% υγρασία χαρακτηρίστηκαν από υψηλό πορώδες και εμφανίσθηκαν ιδιαίτερα τραγανά και μαλακά. Η υψηλή και μεσαία υγρασία της τροφοδοσίας οδήγησε σε προϊόντα χαμηλής βαθμολογίας ανεξάρτητα των υπόλοιπων παραμέτρων της διεργασίας, με εξαίρεση το δείγμα που περιείχε 17% υγρασία, 7,5% συγκέντρωση καρότου και επεξεργάστηκε στους 160°C και στα 250 rpm.



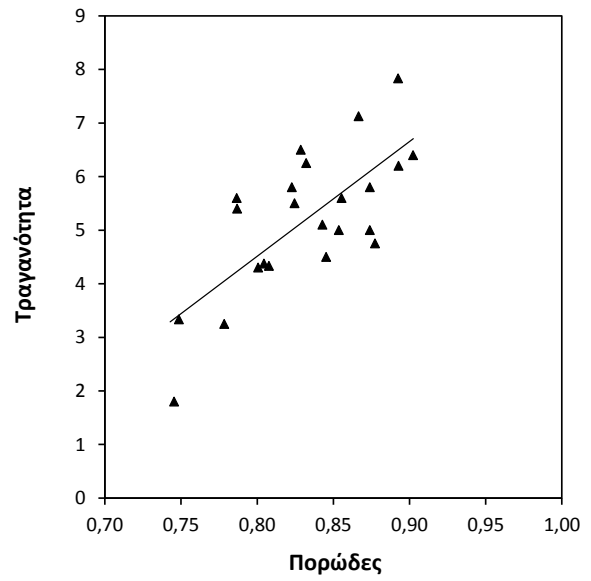
Σχήμα 7. 5. Συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής.

Επομένως, οι συνθήκες παραγωγής των προϊόντων εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών έχουν σημαντική επίδραση στις οργανοληπτικές τους ιδιότητες, όπως παρατηρήθηκε στην παραπάνω ανάλυση. Ταυτόχρονα, οι διαφορετικές παράμετροι παραγωγής των εκβαλλόμενων προϊόντων οδηγούν σε σημαντικές μεταβολές και στα αντικειμενικά τους χαρακτηριστικά. Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 7. 6) παρουσιάζεται η συσχέτιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών με το αντικειμενικό πορώδες των προϊόντων. Όπως παρατηρείται, το πορώδες επιδρά σημαντικά στην οργανοληπτική αντίληψη των δοκιμαστών. Η αύξηση του πορώδους επηρέασε θετικά την τραγανότητα των προϊόντων, καθώς επίσης, τη συνοχή και την ενυδάτωσή τους κατά τη μάσηση. Τα προϊόντα τα οποία χαρακτηρίστηκαν από υψηλό πορώδες εμφάνισαν συνολικά μειωμένη οργανοληπτική σκληρότητα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι προϊόντα μειωμένου πορώδους είχαν έντονο το χαρακτηριστικό της άψητης γεύσης, ενώ στα προϊόντα με μεγάλο πορώδες η αίσθηση της άψητης γεύσης ήταν μειωμένη.

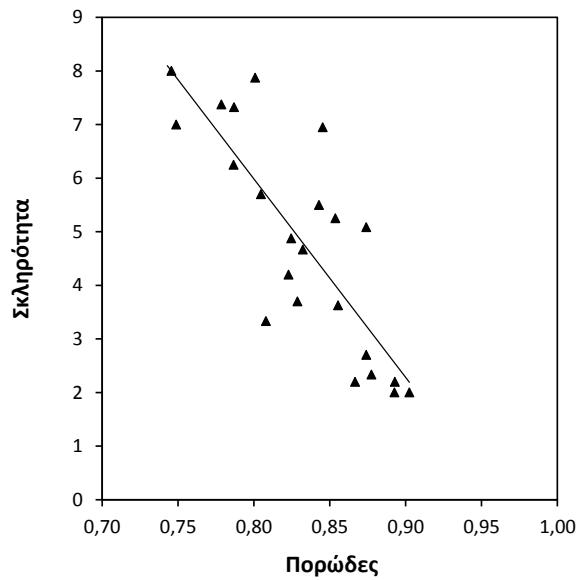
# ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ



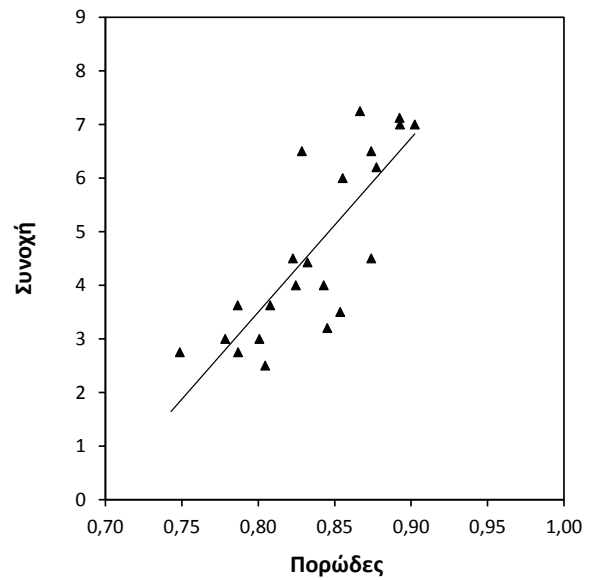
(α)



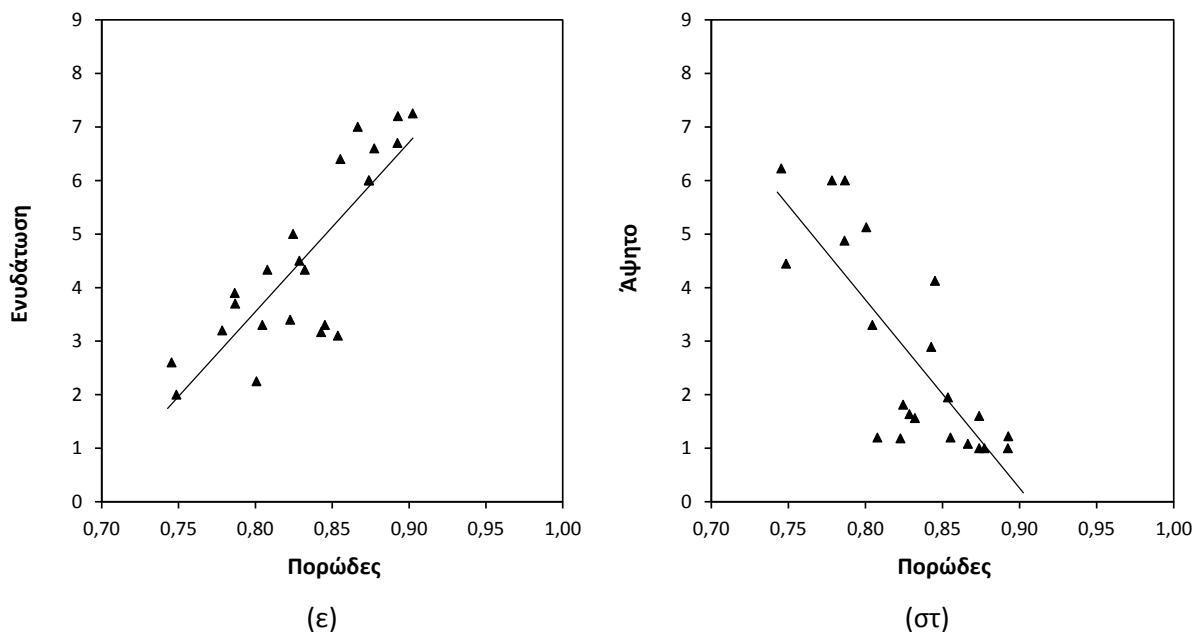
(β)



(γ)



(δ)

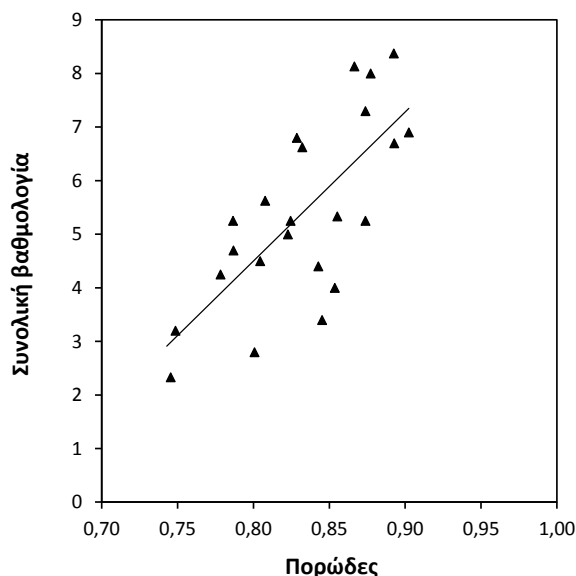


Σχήμα 7. 6. Επίδραση του πορώδους στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής.

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά συσχετίστηκαν με το πορώδες των εκβαλλόμενων προϊόντων μέσω απλών γραμμικών εξισώσεων. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι χρησιμοποιούμενες εξισώσεις περιγράφουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα, δίνοντας τη δυνατότητα σχετικά καλής πρόβλεψης των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών με βάση το αντικειμενικό πορώδες. Οι σταθερές των εξισώσεων που προκύπτουν από τη συσχέτιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών με το αντικειμενικό πορώδες των προϊόντων εκβολής παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα (Πίνακας 7. 2). Παράλληλα, τα προϊόντα με υψηλό πορώδες τα οποία χαρακτηρίστηκαν περισσότερο τραγανά και λιγότερο σκληρά συγκέντρωσαν την υψηλότερη συνολική βαθμολογία από τους δοκιμαστές (Σχήμα 7. 7).

Πίνακας 7. 2. Παράμετροι συσχέτισης των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών με το πορώδες των προϊόντων.

| Ιδιότητα    |            |         |           |         |         |        | Συνολική Βαθμολογία |
|-------------|------------|---------|-----------|---------|---------|--------|---------------------|
| Τραγανότητα | Σκληρότητα | Συνοχή  | Ενυδάτωση | Άψητο   | Πορώδες |        |                     |
| <b>α</b>    | 21,438     | -37,025 | 32,481    | 31,652  | -35,195 | 15,671 | 27,808              |
| <b>β</b>    | -12,638    | 35,607  | -22,484   | -21,770 | 31,929  | -7,504 | -17,749             |



Σχήμα 7. 7. Επίδραση του πορώδους στη συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής.

## 7.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των τροφίμων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Η εμφάνιση των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε από τις παραμέτρους της διεργασίας (συνθήκες παραγωγής (θερμοκρασία εκβολής (140-180°C) και ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών (150-250 rpm))) και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (υγρασία της τροφοδοσίας (14-20%) και συγκέντρωση καρότου (5-10%)). Η ομοιομορφία των προϊόντων μειώθηκε με την αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας (βαθμολογία από 8,0 στο 4,8), ενώ αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου (βαθμολογία από 5,3 στο 6,5) και της θερμοκρασίας εκβολής (βαθμολογία από 3,5 στο 6,0). Η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών δεν είχε σαφή επίδραση στην ομοιομορφία των προϊόντων. Η διόγκωση μειώθηκε με την αύξηση της αρχικής υγρασίας (βαθμολογία από 5,9 στο 3,6), της συγκέντρωσης του καρότου (βαθμολογία από 7,6 στο 3,4) και της θερμοκρασίας εκβολής (βαθμολογία από 7,0 στο 4,4), ενώ αυξήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα (βαθμολογία από 3,8 στο 7,5). Επίσης, το χρώμα των προϊόντων εκβολής παρουσιάστηκε πιο σκούρο με τη μείωση της υγρασίας (βαθμολογία από 4,2 στο 7,1), την αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου (βαθμολογία από 3,2 στο 4,2), την αύξηση της θερμοκρασίας (βαθμολογία από 1,4 στο 5,4) και τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (βαθμολογία από 3,3 στο 4,8). Η γεύση των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε από τις συνθήκες παραγωγής και τη σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας. Τα δείγματα συγκέντρωσαν χαμηλές βαθμολογίες ως προς την αίσθηση του καμένου χαρακτηριστικού (βαθμολογία από 1,0 έως 4,0), γεγονός που ενισχύει την αποδοχή των καταναλωτών στα προϊόντα αυτά.

Επίσης, η υφή των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκε σημαντικά από τις συνθήκες της διεργασίας. Τα προϊόντα που παρήχθησαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εκβολής και ταχύτητες περιστροφής κοχλιών και περιείχαν χαμηλότερες συγκεντρώσεις καρότου και υψηλότερη αρχική υγρασία, εμφάνισαν αυξημένη σκληρότητα. Η τραγανότητα των προϊόντων εκβολής μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας (βαθμολογία από 4,8 στο 3,3) και της συγκέντρωσης καρότου στο μίγμα (βαθμολογία από 5,1 στο 4,3), ενώ αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής (βαθμολογία από 3,2 στο

5,6) και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (βαθμολογία από 4,4 στο 6,2). Η ενυδάτωση των προϊόντων κατά τη μάσηση αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής (βαθμολογία από 3,2 στο 6,4), της συγκέντρωσης του καρότου (βαθμολογία από 3,2 στο 4,3) και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (βαθμολογία από 3,3 στο 4,3), ενώ μειώθηκε με την αύξηση της υγρασίας (βαθμολογία από 6,6 στο 2,0). Η συγκολλητικότητα των προϊόντων αυξήθηκε με την αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας (βαθμολογία από 5,8 στο 6,0) και της θερμοκρασίας εκβολής (βαθμολογία από 4,3 στο 5,0). Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου και της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών οδήγησε σε μειωμένη συγκολλητικότητα (βαθμολογία από 4,6 στο 2,8 και από 3,8 στο 2,8, αντίστοιχα). Παράλληλα, τα προϊόντα που παρήχθησαν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής κοχλιών εμφάνισαν αυξημένη συνοχή κατά τη μάσηση σε σχέση με τα προϊόντα που παρήχθησαν σε χαμηλές ταχύτητες (βαθμολογία από 4,4 στο 2,5). Η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας προκάλεσε τη μείωση της συνοχής (βαθμολογία από 6,2 στο 2,8).

Η συνολική βαθμολογία των προϊόντων εκβολής ήταν μεγαλύτερη στα προϊόντα που παρήχθησαν σε υψηλές θερμοκρασίες (180°C) και ταχύτητες περιστροφής κοχλιών (250 rpm) και περιείχαν χαμηλότερη αρχική υγρασία (14%) και περισσότερη ποσότητα καρότου. Ιδιαίτερα υψηλές βαθμολογίες παρουσίασαν τα προϊόντα που περιείχαν χαμηλή υγρασία (14%) και υψηλή συγκέντρωση καρότου (10%) τα οποία παρήχθησαν σε εύρος θερμοκρασιών (140-180°C) και ταχυτήτων περιστροφής κοχλιών (150-250 rpm). Τα προϊόντα αυτά χαρακτηρίστηκαν από υψηλό πορώδες και εμφανίσθηκαν ιδιαίτερα τραγανά και μαλακά.

Η συσχέτιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών με το αντικειμενικό πορώδες των προϊόντων φανέρωσε τη σημαντική επίδρασή του στην οργανοληπτική αντίληψη των δοκιμαστών. Η αύξηση του πορώδους επηρέασε θετικά την τραγανότητα των προϊόντων, τη συνοχή και την ενυδάτωσή τους κατά τη μάσηση. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα προϊόντα με υψηλό πορώδες συγκέντρωσαν την υψηλότερη βαθμολογία από τους δοκιμαστές.





# 8.

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

Αντικείμενο και στόχοι

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πειραματική διαδικασία

Μαθηματικό πρότυπο

Αποτελέσματα - Συζήτηση αποτελεσμάτων

Συμπεράσματα



## 8.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η θεμελιώδης κατανόηση της συμπεριφοράς διαφόρων τροφίμων σε περιβάλλοντα που προσομοιάζουν τον ανθρώπινο οργανισμό είναι υψίστης σημασίας. Η αποδέσμευση σε υδατικά διαλύματα κάποιων συστατικών που περιέχονται στα τρόφιμα, όπως είναι τα σάκχαρα και το αλάτι, είναι μεγάλης σπουδαιότητας και επηρεάζεται από τη διαμόρφωση της δομής τους. Επιπλέον, η μελέτη της απελευθέρωσης των συστατικών αυτών σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο βοηθά στην κατανόηση της διαθεσιμότητάς τους στον ανθρώπινο οργανισμό.

Η συσχέτιση της δομής των τροφίμων με ιδιότητες, όπως είναι η διάχυση και η μεταφορά μάζας, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των διεργασιών και στην ανάπτυξη νέων προϊόντων. Η ταχύτητα αποσύνθεσης των τροφίμων στο ανθρώπινο στομάχι εξαρτάται από τη δομή και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους, όπως επίσης, το μέγεθος των φυσικών δυνάμεων και των χημικών αντιδραστηρίων που υπάρχουν στο στομάχι. Η γνώση της αποδέσμευσης σωματιδίων των τροφίμων στο ανθρώπινο στομάχι είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας των συστατικών στον οργανισμό και επιτρέπει τη βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας για την παροχή θρεπτικών συστατικών. Το γεγονός αυτό συμβάλλει, ιδιαίτερα, στην ανάπτυξη λειτουργικών τροφίμων και συμπληρωμάτων που διασφαλίζουν την ελεγχόμενη απελευθέρωση θρεπτικών ουσιών στον ανθρώπινο οργανισμό (Kong & Singh, 2008b).

Στόχο του συγκεκριμένου κεφαλαίου αποτελεί η μελέτη φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά την κατανάλωση διαφόρων τροφίμων, από την ανάμιξη με τη σίελο έως την πέψη τους στο στομάχι. Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η απελευθέρωση σωματιδίων σακχάρων και αλατιού αφυδατωμένων γεωργικών προϊόντων, σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο.

## 8.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 8.2.1 Λειτουργία της μάσησης

Η διαδικασία που πραγματοποιείται στο στόμα περιλαμβάνει τρία στάδια (Heath & Prinz, 1991; Malone et al., 2003). Στο πρώτο στάδιο, οι σιελογόνοι αδένες διεγείρονται οδηγώντας στην παραγωγή σάλιου. Τα τρόφιμα αναμινύονται με το σάλιο και, ανάλογα με την αρχική τους δομή, σπάνε σε μικρά κομμάτια εξαιτίας της μάσησης. Το στάδιο αυτό για υγρά προϊόντα είναι σχετικά σύντομο (διαρκεί περίπου 2 s) (Ertekin & Aydogdu, 2003). Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και η λίπανση των σωματιδίων αυτών από το σάλιο και από χυμούς που απελευθερώνονται από τα τρόφιμα. Το δεύτερο στάδιο είναι η στοματική προώθηση, η οποία περιλαμβάνει την κίνηση της γλώσσας προς τον ουρανίσκο, συμπιέζοντας και προωθώντας την τροφή προς το πίσω μέρος του στόματος και το τελικό στάδιο είναι η κατάποση (Drago et al., 2011; Mills et al., 2011).

Το σάλιο αποτελείται κυρίως από νερό (99,5%) και περιέχει μεγάλο αριθμό ανόργανων συστατικών (ηλεκτρολυτών) (νάτριο, ασβέστιο, κάλιο, μαγνήσιο, όξινο ανθρακικό νάτριο και φωσφορικά ιόντα), χαμηλού μοριακού βάρους οργανικές ενώσεις (ουρία, ουρικό οξύ, κρεατινίνη, γλυκόζη, κτλ.) και πρωτεΐνες, όπως ένζυμα (αμυλάση, λιπάση, καρβονική ανυδράση), γλυκοπρωτεΐνες (βλεννίνη),

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

ανοσοσφαιρίνες, και ένα ευρύ φάσμα πεπτιδίων με αντιμικροβιακή δράση και σημαντικές βιολογικές λειτουργίες (Gibson & Beeley, 1994; Humphrey & Williamson, 2001; Schipper et al., 2007; Smet & Contreras, 2005; Van Nieuw Amerongen A et al., 2004). Υψηλού μοριακού βάρους βλεννίνες συνεισφέρουν στο ιξώδες του σάλιου (Van Ruth & Roozen, 2000). Μεταξύ των ενζύμων του σάλιου, η αμυλάση είναι το κυρίαρχο ένζυμο (Drago et al., 2011; Schipper et al., 2007). Η α-αμυλάση μειώνει το ιξώδες των τροφίμων (Engelen et al., 2007) και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κατάρρευση της δομής τους (Janssen et al., 2009), επηρεάζοντας την αντίληψη της γεύσης στο στόμα. Η σύσταση του ανθρώπινου σάλιου εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι ο ρυθμός ροής και ο κερκαδικός ρυθμός, το είδος και το μέγεθος του σιελογόνου αδένου, η διατροφή, τα φάρμακα, η ηλικία, το φύλο και ο τύπος του αίματος (Schipper et al., 2007).

Τα τελευταία χρόνια, οι μελέτες που αφορούν στο σάλιο έχουν αυξηθεί, εξαιτίας της ανάπτυξης νέων τεχνικών που περιγράφουν τις βιοχημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του σάλιου, αναδεικνύοντας το ρόλο που διαδραματίζει στην ομιλία, τη λίπανση της τροφής, την πέψη της, καθώς και τη διατήρηση της στοματικής υγείας (Schipper et al., 2007). Η παρασκευή συνθετικού διαλύματος σιέλου με ακριβείς φυσικές και χημικές ιδιότητες είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Πολλές μελέτες αναφέρουν και συγκρίνουν τις ιδιότητες συνθετικών διαλυμάτων σιέλου (Preetha & Banerjee, 2005; Rabe et al., 2004; Takahashi et al., 2009). Τα υποκατάστατα του σάλιου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, αυτά που περιέχουν καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη και αυτά που περιέχουν φυσικές βλεννίνες. Ως γλυκαντικές ουσίες προστίθενται κυρίως σορβιτόλη ή ξυλιτόλη. Προστίθενται επίσης, ηλεκτρολύτες, ανόργανα συστατικά, όπως ασβέστιο, φωσφόρος και φθόριο, καθώς και συντηρητικά συστατικά, χρωστικές και αρωματικές ουσίες (Gibson & Beeley, 1994).

Κατά την κατανάλωση των τροφίμων διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την αντίληψη της γεύσης. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν την κατάρρευση της δομής κατά τη μάσηση και την ανάμιξη με το σάλιο (Koliandris et al., 2008). Σε πολλά τρόφιμα, κατά τη διάρκεια της μάσησης πραγματοποιούνται σημαντικές φυσικοχημικές αλλαγές, οι οποίες επηρεάζουν την απελευθέρωση των πτητικών ενώσεων από τα τρόφιμα. Η μάσηση αυξάνει την επιφάνεια η οποία είναι εκτεθειμένη στο στόμα, αυξάνοντας την απελευθέρωση των πτητικών (Van Ruth et al., 1994). Το σάλιο δρα για τη διαλυτοποίηση της τροφής με στόχο την αλληλεπίδραση με τους υποδοχείς γεύσης (Gibson & Beeley, 1994). Το σάλιο, αλληλεπιδρώντας με τα τρόφιμα, μπορεί να επηρεάσει την απελευθέρωση της γεύσης και της αντίληψης (Drago et al., 2011).

Ο τρόπος απελευθέρωσης διαφόρων συστατικών από τα τρόφιμα μπορεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην αντίληψη από τον καταναλωτή. Παραδείγματος χάριν, υγρά υψηλού ιξώδους που περιέχουν το ίδιο άλας με υγρά χαμηλού ιξώδους γίνονται αντιληπτά ως λιγότερο αλμυρά. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διαφορές στην ανάμιξη. Ένα υγρό υψηλότερου ιξώδους χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να αναμιχθεί με το σάλιο, με αποτέλεσμα λιγότερο υλικό να έρχεται σε επαφή με τις επιφάνειες οι οποίες αντιλαμβάνονται τη γεύση (perceiving surfaces) (Ferry et al., 2006). Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες οι οποίες προσπαθούν να συνδέσουν την αισθητηριακή αντίληψη με τις ιδιότητες του προϊόντος. Πρόσφατα, κάποιες έρευνες προσπαθούν να εξηγήσουν την κατάρρευση των τροφίμων στο στόμα και να τη συνδέσουν με τα οργανοληπτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά (Chen, 2009). Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για τη διερεύνηση της επίδρασης της υψής υδροκολλοειδών gels στην απελευθέρωση της γεύσης. Οι Malone et al. (2003) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων λίπανσης υδροκολλοειδών και γαλακτωμάτων.

Οι Baek et al. (1999) αναφέρουν ότι μαλακότερα gels ζελατίνης απελευθερώνουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μίας πτητικής ένωσης σε σχέση με σκληρότερα gels. Οι Boland et al. (2004) μελέτησαν gels ζελατίνης, αμύλου και πηκτίνης και παρατήρησαν ότι η απελευθέρωση του αρώματος επηρεάστηκε σημαντικά από την υφή των προϊόντων. Το πήκτωμα ζελατίνης που εμφάνισε το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας έδειξε τη χαμηλότερη απελευθέρωση αρώματος. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται από τους Guinard & Marty (1995).

Ο Morris (1994) συσχέτισε τη γλυκύτητα και τη γεύση με τη ρεολογία των gels και παρατήρησε ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ της δύναμης που απαιτείται κατά τη μάσηση και της αντίληψης. Ο μηχανισμός που προτάθηκε ήταν η επιταχυνόμενη απελευθέρωση των συστατικών, ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης έκθεσης των επιφανειών που προκαλούνται από τη θραύση των gels κατά το μάσημα, στα πιο εύθραυστα πηκτώματα. Ο μηχανισμός αυτός προτάθηκε, επίσης, από τους Bayarri et al. (2001), οι οποίοι μελέτησαν τη διάχυση της σακχαρόζης και της ασπαρτάμης σε gels κ-καραγεννάνης και γελάνης και βρήκαν ότι, για κάθε gel, ο ρυθμός διάχυσης μειώθηκε με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά τη μάσηση των τροφών αναπτύσσονται *in vitro* μοντέλα που περιγράφουν το σύστημα του στόματος. Κάποια μοντέλα περιλαμβάνουν μηχανική μάσηση των στερεών τροφών. Οι Xu et al. (2005) μελέτησαν την ανάπτυξη μίας μηχανικής γνάθου, προσπαθώντας να μιμηθούν τους κύκλους μασήματος ενός ατόμου, εστιάζοντας στην κίνηση της γνάθου. Οι Prinz et al. (2007) προσπάθησαν να μιμηθούν τις συνθήκες που παράγονται από την κίνηση της γλώσσας. Για υγρά προϊόντα, η έρευνα εστιάζεται στην απελευθέρωση της γεύσης. Οι Koliandris et al. (2008) μελέτησαν την απελευθέρωση του άλατος και του βουτυρικού αιθυλεστέρα (που χρησιμοποιείται ως μια τεχνητή γεύση) σε νερό, από gels ζελατίνης κόμμεως χαρουπιών ή από μείγματα κ-καραγεννάνης/κόμμεως χαρουπιών. Η απελευθέρωση καταγράφηκε μετά από 20 s με τη χρήση ενός ανιχνευτή ιόντων νατρίου. Οι Mills et al. (2011) ανέπτυξαν επίσης, ένα *in vitro* μοντέλο για τη μελέτη της απελευθέρωσης άλατος από gels.

## **8.2.2 Λειτουργία της πέψης**

Η πέψη είναι η χημική διάσπαση των τροφίμων σε μικρότερα μόρια. Τα τρόφιμα πρώτα χωνεύονται σε μία γαστροαγγειακή κοιλότητα με εξωκυτταρική πέψη και στη συνέχεια, απορροφώνται από μεμονωμένα κύτταρα. Κατά την πέψη συμμετέχουν τέσσερις ομάδες μορίων, οι οποίες διασπώνται από ειδικά ένζυμα: το άμυλο διασπάται σε μόρια γλυκόζης, οι πρωτεΐνες σε αμινοξέα, τα λίπη (ή λιπίδια) σε γλυκερόλη και λιπαρά οξέα και τα νουκλεϊκά οξέα σε νουκλεοτίδια. Κατά τη διάρκεια της πέψης πραγματοποιούνται ταυτόχρονα πολύπλοκα φαινόμενα. Το γαστρικό υγρό αναμιγνύεται με την τροφή και προκαλεί ενζυματική αποικοδόμηση και όξινη υδρόλυση. Η τροφή επίσης, διασπάται εξαιτίας της μηχανικής κίνησης των τοιχωμάτων του στομαχίου. Η διαδικασία της διάλυσης, διάβρωσης και αποσύνθεσης πραγματοποιείται στο στομάχι μέχρις ότου το μέγεθος της τροφής να μειωθεί τόσο ώστε να διέλθει μέσω του πυλωρού στο λεπτό έντερο. Πιο αναλυτικά, το γαστρεντερικό σύστημα χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα (Chen, 2009; Kong & Singh, 2008a; Kong & Singh, 2010; Tharakan et al., 2010):

- Το στόμα, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μάσηση της τροφής και την ανάμιξη με τα ένζυμα. Η μάσηση μειώνει το μέγεθος των τροφών και αυξάνει την ενεργή επιφάνεια στην οποία δρουν τα ένζυμα. Στο στόμα παρατηρείται η απελευθέρωση της γεύσης και των πτητικών συστατικών.

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

- Το στομάχι, το οποίο εκκρίνει το γαστρικό υγρό και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των τροφών, τη μηχανική επεξεργασία τους και την ανάμιξή τους με υδρολυτικά ένζυμα, τη μείωση του pH και τη λειτουργία της πέψης. Η περισταλτική συστολή στο στομάχι αναμιγνύει τα τρόφιμα με το γαστρικό υγρό και ωθεί το μίγμα στον πυθμένα του στομάχου. Στο στομάχι πραγματοποιείται: (α) φυσική διάσπαση των τροφών σε μικρότερα τμήματα, όπου το υδροχλωρικό οξύ προκαλεί μετουσίωση των πρωτεϊνών και χαλαρώνει τους δεσμούς μεταξύ των κυττάρων του τροφίμου, και (β) χημική διάσπαση, όπου οι πρωτεΐνες διασπώνται χημικά με τη βοήθεια του ενζύμου πεψίνη. Στη συνέχεια, το υλικό μεταφέρεται στο δωδεκαδάκτυλο.
- Το δωδεκαδάκτυλο, όπου το υλικό αναμιγνύεται με τις εκκρίσεις της χολής και του παγκρέατος και μεταφέρεται στο λεπτό έντερο, στο οποίο πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις διάσπασης και η απορρόφηση του νερού και των θρεπτικών συστατικών. Θεωρείται το κέντρο της πέψης στο οποίο γίνεται η κύρια πέψη πρωτεΐνης, αμύλου και λίπους.  
Οι κινήσεις του δωδεκαδάκτυλου και των μικρών εντερικών τοιχωμάτων είναι υπεύθυνες για την ανάμιξη του υλικού με τα πεπτικά ένζυμα και διακρίνονται σε τμηματικές συσπάσεις, οι οποίες συμβαίνουν όταν ένα τμήμα του λεπτού εντέρου γεμίζει με το υλικό, και στην περίσταση, η οποία είναι υπεύθυνη για την προώθηση του υλικού μέσω του λεπτού εντέρου.
- Το παχύ έντερο, το οποίο απορροφά το εναπομείναν νερό από την πέψη των τροφίμων, το αποθηκεύει και το αποβάλλει από το σώμα.

Η μελέτη των διεργασιών της πέψης πραγματοποιείται με *in vivo* και *in vitro* μοντέλα. Η συσχέτιση των *in vitro* και *in vivo* μοντέλων είναι εξαιρετικά σημαντική. Τα *in vivo* μοντέλα παρέχουν συνήθως πιο ακριβή αποτελέσματα, αλλά είναι χρονοβόρα και δαπανηρά. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μεγάλη έρευνα στην ανάπτυξη *in vitro* διαδικασιών, οι οποίες δίνουν αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα (Boisen & Eggum, 1991; Hur et al., 2011). Οι *in vitro* διαδικασίες δε μπορούν να επιτύχουν την ακρίβεια των *in vivo* διαδικασιών (Coles et al., 2005) και για το λόγο αυτό απαιτείται συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας και της ευκολίας χρήσης του οποιουδήποτε *in vitro* πεπτικού μοντέλου (Hur et al., 2011). Τα *in vitro* μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή στη βιομηχανία τροφίμων και την ιατρική έρευνα λόγω των πλεονεκτημάτων τους στην εξοικονόμηση χρόνου και κόστους, καθώς και στην αναπαραγωγισιμότητα σε σύγκριση με τις *in vivo* μελέτες (Kong & Singh, 2008a, b).

Τα *in vitro* μοντέλα πέψης χρησιμοποιούνται ευρέως για να μελετήσουν τις δομικές αλλαγές, την πεπτικότητα και την απελευθέρωση των συστατικών τροφίμων σε προσομοιωμένες συνθήκες του γαστρεντερικού συστήματος. Τα τελευταία χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες που ασχολούνται με τα *in vitro* μοντέλα πέψης σε ποικίλα προϊόντα, όπως άμυλο, τσάι, ρύζι, κρέας, γαλακτώματα, κτλ. Τα μοντέλα αυτά διαφέρουν ως προς τον αριθμό και το είδος των βημάτων κατά τη λειτουργία της πέψης (στόμα, στομάχι, λεπτό και παχύ έντερο), τη σύνθεση των πεπτικών υγρών που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο (ένζυμα, άλατα, ρυθμιστικά διαλύματα, κτλ.) και τις μηχανικές καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της πέψης. Τα χαρακτηριστικά του δείγματος, η δραστηριότητα των ενζύμων, η ιοντική σύνθεση, οι μηχανικές καταπονήσεις και ο χρόνος πέψης έχουν σημαντικές επιδράσεις στα αποτελέσματα των *in vitro* μοντέλων. Επιπλέον, στα διάφορα μοντέλα πέψης χρησιμοποιούνται διαφορετικές παράμετροι (χημικές μεταβολές (υδρόλυση λιπιδίων, πρωτεϊνών, πολυσακχαριτών) και δομικές αλλαγές (κατάρρευση δομών, συσσωμάτωση, κτλ.)) (Hur et al., 2011). Ο πιο σημαντικός παράγοντας σε ένα *in vitro* μοντέλο είναι τα χαρακτηριστικά των ενζύμων. Στα *in vitro* μοντέλα πέψης χρησιμοποιούνται ένζυμα και άλλα βιολογικά μόρια, όπως είναι η πεψίνη, η

παγκρεατίνη, η τρυψίνη, η χυμοτρυψίνη, η πεπτιδάση, η  $\alpha$ -αμυλάση, η λιπάση, το χολικό άλας και η βλεννίνη (Brandon et al., 2006; Hur et al., 2009; Savage & Catherwood, 2007; Xing et al., 2008). Διάφοροι παράγοντες, όπως είναι η συγκέντρωση, η θερμοκρασία, το pH, κτλ. επηρεάζουν τη δραστηριότητα των ενζύμων (Boisen & Eggum, 1991). Ο χρόνος πέψης είναι σημαντικός παράγοντας κατά το σχεδιασμό ενός *in vitro* μοντέλου πέψης. *In vivo*, ο χρόνος πέψης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του καταναλωτή (ηλικία, φύλο, κατάσταση υγείας, ψυχική κατάσταση) και των τροφίμων (ποσότητα, σύνθεση, μέγεθος σωματιδίων) (McClements et al., 2008).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, οι επιστήμονες έχουν χρησιμοποιήσει πολλά *in vitro* μοντέλα πέψης για να μελετήσουν τις δομικές και χημικές αλλαγές που συμβαίνουν σε διάφορα τρόφιμα, αλλά καμία από αυτές τις μεθόδους δεν έχει γίνει ακόμη ευρέως αποδεκτή (Hur et al., 2011). Πολλές *in vitro* προσεγγίσεις μιμούνται τη γαστρική πέψη με ανάμιξη των τροφίμων με το γαστρικό υγρό χρησιμοποιώντας ένα λουτρό ανακίνησης (Muir & O'Dea, 1992) ή μαγνητικό αναδευτήρα (De Boever et al., 2001). Οι Kong & Singh (2010) μελέτησαν την ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου του στομάχου (Human Gastric Simulator (HGS)), το οποίο σχεδιάστηκε για να παράγει τις συνεχείς περισταλτικές κινήσεις των τοιχωμάτων του στομάχου, για να προσομοιάσει τις *in vivo* κινήσεις και την πέψη των τροφών. Οι Tharakan et al. (2010) μελέτησαν την ανάπτυξη ενός πειραματικού μοντέλου, το οποίο μιμείται τις κινήσεις που συμβαίνουν στο λεπτό έντερο, με σκοπό τη μελέτη των φαινομένων μεταφοράς μάζας που πραγματοποιούνται. Επίσης, οι Pal et al. (2004) μοντελοποίησαν τη ροή στο στομάχι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Lattice-Boltzmann και δεδομένα από μαγνητική τομογραφία σε ένα ανθρώπινο στομάχι.

Επίσης, η αποσύνθεση διαφόρων τροφίμων στο στομάχι έχει μελετηθεί από κάποιους ερευνητές (Tharakan et al., 2010). Οι ερευνητές αυτοί ανέπτυξαν ένα *in vitro* μοντέλο για την ανάλυση των φαινομένων που συμβαίνουν στο γαστρεντερικό σωλήνα. Κάποιοι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να κατανοήσουν τα *in vivo* φαινόμενα χρησιμοποιώντας μαγνητική τομογραφία (fMRI) (Hoad et al., 2009; Marciani et al., 2006). Επίσης, έχουν αναπτυχθεί *in vitro* μοντέλα για την πρόβλεψη της απορρόφησης των θρεπτικών συστατικών στο στομάχι (Blanquet et al., 2001; Mercuri et al., 2009). Οι Macagno et al. (1982) χρησιμοποίησαν έναν εύκαμπτο σωλήνα διαπίδυσης βυθισμένο στο νερό για να προσομοιώσουν τις σχετικές κινήσεις των τοιχωμάτων του εντέρου. Χρησιμοποιώντας διαλύματα τα οποία προσομοιώνουν τα υγρά του ανθρώπινου οργανισμού είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση της διαμόρφωσης των γαλακτωμάτων στους μηχανισμούς της πέψης των πρωτεϊνών και των λιπιδίων (Chu et al., 2009; Macierzanka et al., 2009).

Κατά την πέψη, τόσο το βιοχημικό περιβάλλον όσο και οι ιδιότητες των τροφίμων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διάσπασή τους (Bornhorst & Singh, 2013). Οι Singh et al. (2010) και Dartois et al. (2010) αναφέρουν ότι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ενζυμική πεπτικότητα του αμύλου είναι το ιξώδες της μήτρας των τροφίμων. Η υφή των τροφίμων μπορεί να επηρεάσει την πέψη των συστατικών και την απορρόφηση των προϊόντων της υδρόλυσης. Οι Bordoloi et al. (2012) μελέτησαν *in vitro* την πεπτικότητα του αμύλου διαφορετικών ποικιλιών πατάτας και την αλλαγή της μικροδομής που πραγματοποιείται κατά τη υποβολή τους σε *in vitro* μοντέλα πέψης. Οι Paramera et al. (2011) μελέτησαν την *in vitro* απομάκρυνση κουρκουμίνης σε διαλύματα που προσομοιώνουν το γαστρικό και το πανγκρεατικό υγρό.

Επίσης, η ενζυμική δραστηριότητα στο έντερο περιορίζεται από το ιξώδες και τη διαπερατότητα της μικροπορώδους μήτρας των τροφίμων. Όσον αφορά στο άμυλο, ο έλεγχος των ιδιοτήτων της μήτρας του επεξεργασμένου αμύλου μπορεί να μειώσει την πεπτικότητα του αμύλου, διατηρώντας έτσι

## **ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ**

χαμηλά επίπεδα σακχάρου στο αίμα, που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον έλεγχο του διαβήτη. Περαιτέρω μελέτες πρέπει να πραγματοποιηθούν για να διαπιστωθεί πώς η δομή των επεξεργασμένων τροφίμων επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών (Aguilera, 2005). Οι θεμελιώδεις γνώσεις της δυναμικής των ρευστών του γαστρικού υγρού είναι κρίσιμες για την κατανόηση και την προτυποποίηση της διάσπασης των τροφίμων και την επακόλουθη απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών κατά τη διάρκεια της πέψης (Ferrua et al., 2011).

### **8.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

#### **8.3.1 Παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων**

Ωσμωτικά αφυδατωμένες πατάτες και μπανάνες, οι οποίες υπέστησαν ξήρανση υπό κατάψυξη, υπό κενό και σε ρεύμα αέρα, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης των συνθηκών επεξεργασίας και της δομής στην αποδέσμευση σακχάρων και αλατιού σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Τα προϊόντα παρήχθησαν σύμφωνα με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.3 και αφυδατώθηκαν μέχρι ξηρού. Οι διαστάσεις των δειγμάτων ήταν 15x5 mm για τις πατάτες και 15x8 mm για τις μπανάνες.

#### **8.3.2 Εμβάπτιση σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό και το σάλιο**

Τα αφυδατωμένα προϊόντα πατάτας και μπανάνας εμβάπτιστηκαν σε συνθετικά διαλύματα σάλιου και γαστρικού υγρού.

##### ***8.3.2.1 Παρασκευή συνθετικών διαλυμάτων***

Το συνθετικό γαστρικό υγρό παρασκευάστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται από τους Paramera et al. (2008a) και περιείχε τα ακόλουθα συστατικά: glucose (0,4 g/L), yeast extract (3,0 g/L), bacto-peptone (1,0 g/L), porcine mucin (4,0 g/L), cysteine (0,5 g/L), NaCl (0,08 g/L), NaHCO<sub>3</sub> (0,4 g/L), K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (0,04 g/L), KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (0,04 g/L), CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (0,008 g/L), MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (0,008 g/L), xylan (1,0 g/L), soluble starch (3,0 g/L), pancreatin (0,05 g/L). Επίσης, προστέθηκαν 2,0 g/L pectin και 1 mL/L Tween 80. Το pH του διαλύματος προσαρμόστηκε στην τιμή 2,0 προσθέτοντας πυκνό HCl (12 M) και το διάλυμα αποστειρώθηκε σε κλίβανο. Στη συνέχεια, το pH διορθώθηκε με προσθήκη πυκνού HCl (12 M) ή NaOH (10 M) και προστέθηκαν 3,0 g/L pepsin.

Το συνθετικό σάλιο παρασκευάστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται από τους Takahashi et al. (2009) και Blackburn et al. (1984) και αποτελείται από τα εξής συστατικά: mucin (2,8 g/L), lysozyme (0,11 g/L), α-amylase (0,5 g/L), glucose (0,01 g/L), urea (0,13 g/L), uric acid (0,03 g/L), K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (0,68 g/L), KCl (0,94 g/L), CaCl<sub>2</sub> (0,16 g/L), NaCl (0,75 g/L) και NaHCO<sub>3</sub> (1,09 g/L). Το pH του διαλύματος προσαρμόστηκε μεταξύ των τιμών 6,8 και 7,0 χρησιμοποιώντας NaOH (10 M) ή πυκνό HCl (12 M).

Τα αντιδραστήρια προμηθεύτηκαν από τις εταιρίες Sigma, Fisher, Panreac, Acros Organics, Carlo Erba, και Lachner.

##### ***8.3.2.2 Αύξηση βάρους των δειγμάτων***

Τα αφυδατωμένα δείγματα εμβάπτιστηκαν σε δοχεία που περιείχαν διάλυμα γαστρικού υγρού και τοποθετήθηκαν σε κλίβανο στους 37°C. Τα δείγματα ζυγίζονταν σε τακτά χρονικά διαστήματα (0, 10,



20, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 300 min). Η αύξηση του βάρους των δειγμάτων υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$AB = \frac{M - M_0}{M_0} \quad 8.1$$

όπου,  $AB$  είναι η αύξηση βάρους,  $M$  (g) είναι η μάζα των δειγμάτων σε χρόνο  $t$  και  $M_0$  (g) είναι η αρχική μάζα των δειγμάτων.

### 8.3.2.3 Μέτρηση συγκέντρωσης σακχάρων

Τα δείγματα μπανάνας εμβαπτίστηκαν στα συνθετικά διαλύματα γαστρικού υγρού σε κλίβανο υπό σταθερή θερμοκρασία 37°C και αναδευόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε προκαθορισμένα διαστήματα (0, 20, 40, 60, 90, 120, 180, 240 min) λαμβανόταν 1 mL διαλύματος από το κάθε δείγμα. Η μέτρηση των σακχάρων στο γαστρικό διάλυμα πραγματοποιήθηκε με διαθλασίμετρο, όπου μετρήθηκαν ο δείκτης διάθλασης και οι βαθμοί Brix (Kambiranda et al., 2011). Ένας βαθμός Brix αντιστοιχεί σε 1 g σακχάρου/100 g διαλύματος.

### 8.3.2.4 Μέτρηση συγκέντρωσης άλατος

Ο προσδιορισμός της αποδέσμευσης άλατος στα διαλύματα γαστρικού υγρού και σάλιου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια τριών μεθόδων, (α) αναλυτικά με τιτλοδότηση με νιτρικό άργυρο, (β) με μέτρηση της αγωγιμότητας του διαλύματος και (γ) με ηλεκτροχημική εμπέδηση.

#### Αναλυτική μέθοδος

Τα δείγματα πατάτας εμβαπτίστηκαν στα συνθετικά διαλύματα γαστρικού υγρού ή σάλιου σε κλίβανο υπό σταθερή θερμοκρασία 37°C και αναδευόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε προκαθορισμένα διαστήματα (0, 30, 60, 120, 240 min για το γαστρικό υγρό και 0, 5, 10, 20, 30 min για το σάλιο) λαμβάνονταν 10 mL διαλύματος από το κάθε δείγμα. Για να αποφευχθεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλύματος κατά τη διάρκεια του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά δείγματα για κάθε χρονικό διάστημα, τα οποία τοποθετούνταν σε διαφορετικά δοχεία. Στη συνέχεια, η ποσότητα του άλατος στο συνθετικό γαστρικό υγρό και το σάλιο προσδιορίστηκε με τιτλοδότηση.

10 mL διαλύματος τοποθετήθηκαν σε κωνική φιάλη και προστέθηκαν μερικές σταγόνες χρωμικού καλίου περιεκτικότητας 5% (w/v). Η τιτλοδότηση πραγματοποιήθηκε με διάλυμα νιτρικού αργύρου ( $AgNO_3$ ) μοριακότητας 0,1 M, έως ότου το διάλυμα λάβει ένα βαθύ κόκκινο χρώμα.

Η ποσότητα του άλατος στο διάλυμα υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

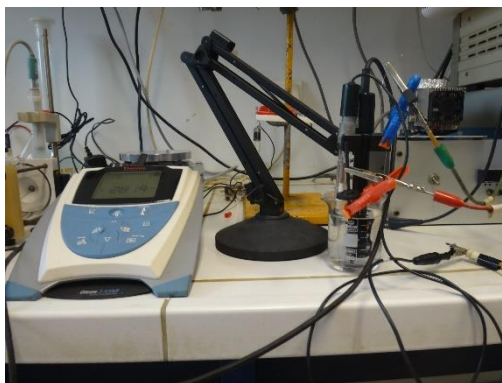
$$m_{NaCl} = \frac{M_{AgNO_3} \cdot MB_{NaCl} \cdot V_{AgNO_3}}{1000} \quad 8.2$$

όπου,  $m_{NaCl}$  (g) είναι η μάζα του άλατος,  $M_{AgNO_3}$  (0,1 M) είναι η μοριακότητα του νιτρικού αργύρου,  $MB_{NaCl}$  (g/mol) είναι το μοριακό βάρος του άλατος και  $V_{AgNO_3}$  (mL) είναι ο όγκος του νιτρικού αργύρου που χρειάστηκε για την τιτλοδότηση.

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

### Μέτρηση αγωγιμότητας

Η αποδέσμευση του άλατος στο συνθετικό γαστρικό υγρό και το σάλιο προσδιορίστηκε επίσης, με μέτρηση της αγωγιμότητας του διαλύματος. Δείγματα πατάτας τοποθετήθηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού ή σάλιου, θερμοκρασίας 37°C. Η αγωγιμότητα του διαλύματος μετρήθηκε ανά τακτά χρονικά διαστήματα (κάθε 5 min) με αγωγιμόμετρο (Thermoscientific, USA) (Εικόνα 8. 1).



Εικόνα 8. 1. Αγωγιμόμετρο (Thermoscientific, USA).

### Μέτρηση ηλεκτροχημικής εμπέδησης

Η πειραματική μεθοδολογία (Εικόνα 8. 2, Εικόνα 8. 3) που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ηλεκτροχημικής εμπέδησης αποτελεί αυτοσχέδια διάταξη. Η διάταξη αποτελείται από ένα ηλεκτροχημικό κελί στο οποίο προσαρμόζονται τρία (3) ηλεκτρόδια:

1. Ένα σύρμα λευκόχρυσου, το οποίο περιβάλλεται από το δείγμα και αποτελεί το ηλεκτρόδιο εργασίας
2. Ένα ηλεκτρόδιο καλομέλανα (SCE), το οποίο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο αναφοράς
3. Ένα ηλεκτρόδιο άνθρακα, το οποίο χρησιμοποιείται ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν ως προς δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (0,098V) χρησιμοποιώντας ποτενσιοστάτη (Princeton applied research model 263A Potentiostat) συνδεδεμένο με αναλυτή συχνοτήτων (Solartron 1260 Gain-Phase Analyzer). Η διέγερση δυναμικού ήταν  $\pm 10\text{mV}$ , ενώ το εύρος των συχνοτήτων σάρωσης ήταν 100000-0,1Hz. Η συσκευή είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο γίνεται η καταγραφή των δεδομένων, μέσω του προγράμματος ZPLOT/ZVIEW.



Εικόνα 8. 2. Ηλεκτροχημικό κελί.



Εικόνα 8. 3. Ποτενσιοστάτης (Princeton Potentiostat, model 263A) και αναλυτής συχνότητας (Solartron 1260 Gain-Phase Analyzer).

## 8.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

### 8.4.1 Αύξηση βάρους των δειγμάτων που εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό

Το πρότυπο που περιγράφει την αύξηση βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό δίνεται από την εξίσωση:

$$AB = AB_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)) \quad 8.3$$

όπου  $AB$  είναι η αύξηση βάρους,  $t$  (min) είναι ο χρόνος εμβάπτισης στο γαστρικό διάλυμα,  $AB_0$  και  $k$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό.

### 8.4.2 Αποδέσμευση άλατος και σακχάρων των δειγμάτων που εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα που προσομοιάζουν το γαστρικό υγρό και το σάλιο

Το πρότυπο που περιγράφει την αποδέσμευση άλατος και σακχάρων δειγμάτων που εμβαπτίστηκαν σε γαστρικό υγρό και σάλιο, δίνεται από την εξίσωση:

$$A = A_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)) \quad 8.4$$

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

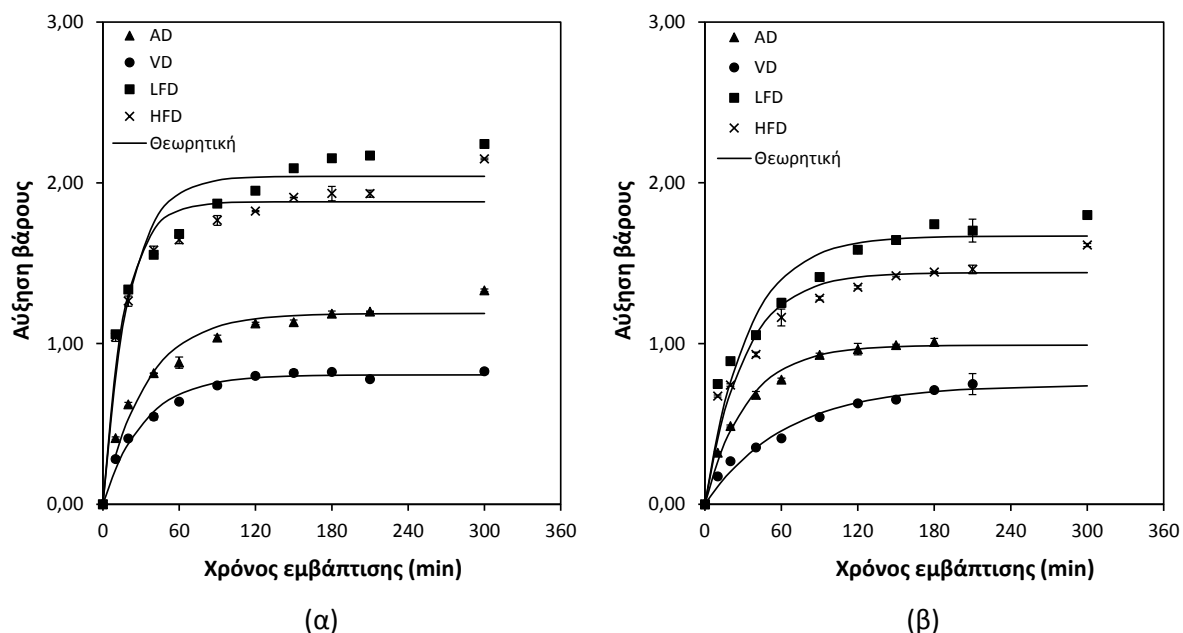
όπου  $A$  είναι η αποδέσμευση άλατος ή σακχάρων,  $A_0$ ,  $k$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό και το διάλυμα,  $t$  (min) είναι ο χρόνος εμβάπτισης στα διαλύματα.

### 8.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 8.5.1 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στην αύξηση βάρους δειγμάτων που εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού

Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 8. 1) παρουσιάζεται η αύξηση βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας και μπανάνας μετά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό. Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται αύξηση του βάρους συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης στο γαστρικό διάλυμα και για τα δύο υλικά. Οι συνεχείς γραμμές παρουσιάζουν τις προβλεπόμενες από το πρότυπο τιμές της κινητικής αύξησης βάρους. Οι τιμές των παραμέτρων του μαθηματικού προτύπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. 1. Η τιμή της σταθεράς  $AB_0$  είναι περίπου ίση με τη τιμή της αύξησης του βάρους στην ισορροπία.

Ο βαθμός και ο ρυθμός προσρόφησης εξαρτάται σημαντικά από το υλικό και τις ιδιότητές του. Η μέθοδος ξήρανσης επηρέασε σημαντικά την αύξηση του βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων. Τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη ρόφησαν μεγαλύτερη ποσότητα γαστρικού υγρού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγάλο πορώδες και τον αυξημένο κενό χώρο στο εσωτερικό τους. Μεταξύ των δειγμάτων που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη, μεγαλύτερη αύξηση βάρους παρουσιάστηκε στα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε χαμηλές πιέσεις (μεγαλύτερο πορώδες), ακολουθούμενα από τα δείγματα που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη σε υψηλές πιέσεις. Επιπλέον, τα δείγματα πατάτας προσρόφησαν μεγαλύτερη ποσότητα γαστρικού υγρού, πιθανώς εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους, σε σύγκριση με τα δείγματα μπανάνας.



Σχήμα 8. 1. Αύξηση βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων (α) πατάτας και (β) μπανάνας, κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό (LFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις, HFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε υψηλές πιέσεις, VD: ξήρανση υπό κενό, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα).

Πίνακας 8. 1. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για την αύξηση βάρους των αφυδατωμένων δειγμάτων κατά την εμφάνισή τους σε διάλυμα γαστρικού υγρού.

|                       | Αύξηση βάρους |       |       |       |         |       |       |       |
|-----------------------|---------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
|                       | Πατάτα        |       |       |       | Μπανάνα |       |       |       |
|                       | AD*           | VD*   | LFD*  | HFD*  | AD      | VD    | LFD   | HFD   |
| <b>AB<sub>0</sub></b> | 1,187         | 0,805 | 2,040 | 1,882 | 0,990   | 0,743 | 1,669 | 1,441 |
| <i>p-value</i>        | 0,000         | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| <b>k</b>              | 0,030         | 0,031 | 0,049 | 0,059 | 0,031   | 0,016 | 0,030 | 0,033 |
| <i>p-value</i>        | 0,000         | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| <b>R<sup>2</sup></b>  | 0,963         | 0,985 | 0,936 | 0,949 | 0,990   | 0,973 | 0,933 | 0,939 |

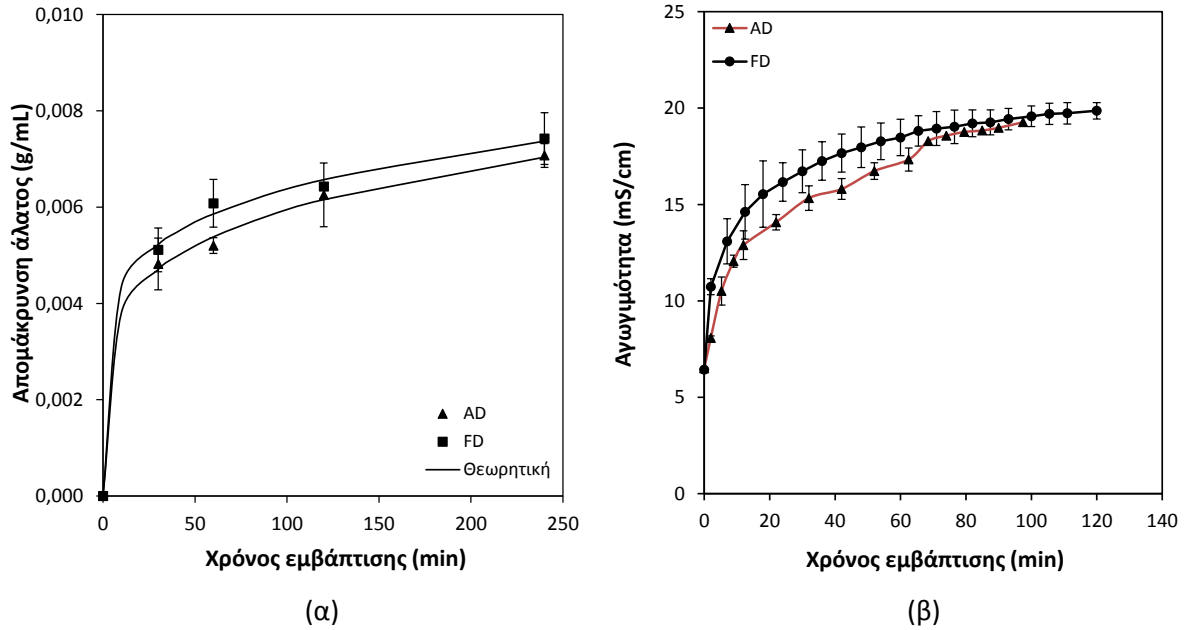
\*LFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις, HFD: ξήρανση υπό κατάψυξη σε υψηλές πιέσεις, VD: ξήρανση υπό κενό, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα

### 8.5.2 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στην αποδέσμευση άλατος δειγμάτων πατάτας που εμφάνιστηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού και σάλιου

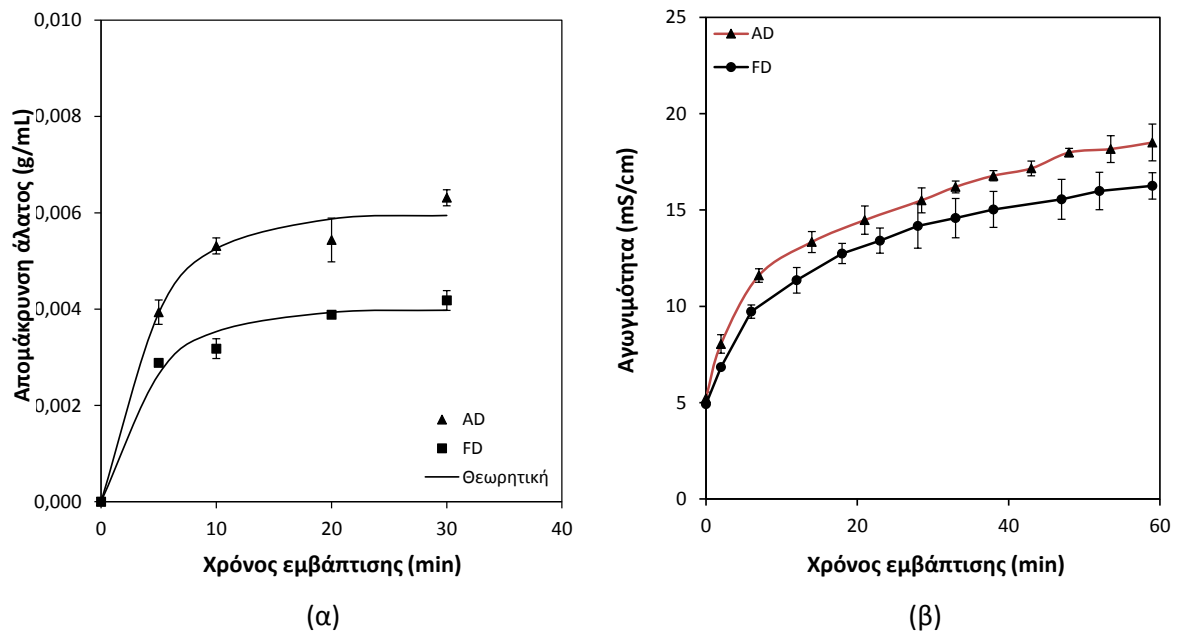
Τα δείγματα πατάτας που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη και σε ρεύμα αέρα εμφάνιστηκαν σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Η αποδέσμευση άλατος κατά την εμφάνιση των δειγμάτων παρουσιάζεται στα παρακάτω Σχήματα και προσδιορίστηκε με τρεις μεθόδους, (α) αναλυτικά με τιτλοδότηση με νιτρικό άργυρο, (β) με μέτρηση της αγωγιμότητας των διαλυμάτων και (γ) με μέτρηση της αντίστασης των διαλυμάτων μέσω ηλεκτροχημικής εμπέδησης. Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι η αποδέσμευση άλατος αυξάνεται κατά τη διάρκεια της εμφάνισης και για τις δύο μεθόδους ξήρανσης.

Στο Σχήμα 8. 2 παρουσιάζεται η ποσότητα άλατος που απομακρύνεται κατά την εμφάνιση των δειγμάτων σε διάλυμα γαστρικού υγρού, όπως προσδιορίστηκε με τιτλοδότηση και με μέτρηση της αγωγιμότητας του διαλύματος. Ο άξονας χ στα Σχήματα 8.2α και 8.3α παρουσιάζει τη διαφορά της αποδέσμευσης άλατος σε χρόνο  $t$  και σε χρόνο  $t=0$ . Τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη αποδέσμευσαν μεγαλύτερη ποσότητα άλατος και παρουσίασαν πιο γρήγορη κινητική. Στο Σχήμα 8. 3 παρουσιάζεται η αποδέσμευση άλατος σε διάλυμα σάλιου, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, παρατηρείται αντίθετη τάση σε σχέση με τα διαλύματα γαστρικού υγρού και τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα αποδέσμευσαν περισσότερο αλάτι κατά τη διάρκεια της εμφάνισής τους.

**ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ**



**Σχήμα 8. 2.** Αποδέσμευση άλατος των αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας, κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). (α) Αναλυτική μέθοδος και (β) Μέτρηση αγωγιμότητας διαλύματος.



**Σχήμα 8. 3.** Αποδέσμευση άλατος των αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας, κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο σάλιο (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). (α) Αναλυτική μέθοδος και (β) Μέτρηση αγωγιμότητας διαλύματος.

Στον Πίνακα 8. 2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του προτύπου.

**Πίνακας 8. 2.** Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για την αποδέσμευση του άλατος αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας κατά την εμφύσησή τους σε διάλυμα γαστρικού υγρού και σάλιου.

|                         | <b>Αποδέσμευση άλατος</b> |            |              |           |
|-------------------------|---------------------------|------------|--------------|-----------|
|                         | <b>Γαστρικό υγρό</b>      |            | <b>Σάλιο</b> |           |
|                         | <b>AD*</b>                | <b>FD*</b> | <b>AD</b>    | <b>FD</b> |
| <b><math>A_0</math></b> | 0,006                     | 0,007      | 0,006        | 0,004     |
| <i>p-value</i>          | 0,000                     | 0,000      | 0,000        | 0,000     |
| <b><math>k</math></b>   | 0,040                     | 0,045      | 0,214        | 0,218     |
| <i>p-value</i>          | 0,003                     | 0,000      | 0,000        | 0,000     |
| <b><math>R^2</math></b> | 0,965                     | 0,981      | 0,980        | 0,976     |

\*FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα

Τα παραπάνω αποτελέσματα ενισχύθηκαν μέσω των μετρήσεων ηλεκτροχημικής εμπέδησης. Στο Σχήμα 8. 4 παρουσιάζεται η καμπύλη που λαμβάνεται κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων και αναφέρεται στη σύνθετη αντίσταση του συστήματος συναρτήσει της συχνότητας σάρωσης.

Το σύστημα διαλύματος-τροφίμου αποτελείται από μία σύνθετη αντίσταση (διαλύματος και τροφίμου) και μία χωρητικότητα (τροφίμου) σε σειρά, καθώς το υλικό δρα ως διηλεκτρικό. Η εμπέδηση ισούται με το άθροισμα των εμπεδήσεων των δύο στοιχείων (Καραντώνης, 2009).

$$Z = R + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} \quad 8.5$$

όπου  $Z$  (ohm) είναι η εμπέδηση,  $R$  (ohm) είναι η αντίσταση,  $C$  είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή και  $\omega$  (Hz) είναι η συχνότητα.

Το μέτρο της αντίστασης είναι:

$$|Z|^2 = R^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2} \quad 8.6$$

Όταν  $\omega \rightarrow 0$ , τότε

$$|Z|^2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2} \Rightarrow |Z| = \frac{1}{\omega \cdot C} \Rightarrow \ln|Z| = -\ln C - \ln \omega \quad 8.7$$

και σε λογαριθμικό διάγραμμα η κλίση της ευθείας είναι -1.

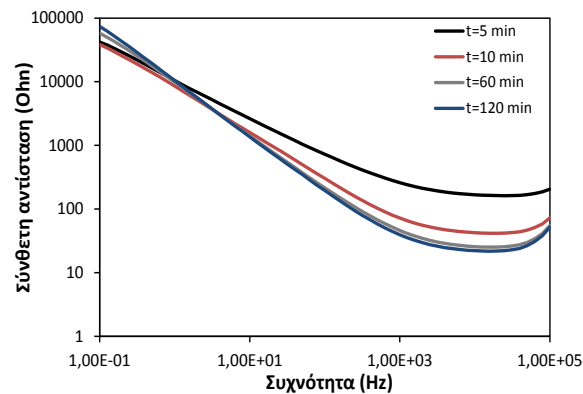
Όταν  $\omega \rightarrow \infty$ , τότε

$$|Z|^2 = R^2 \Rightarrow |Z| = R \quad 8.8$$

και η αντίσταση είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

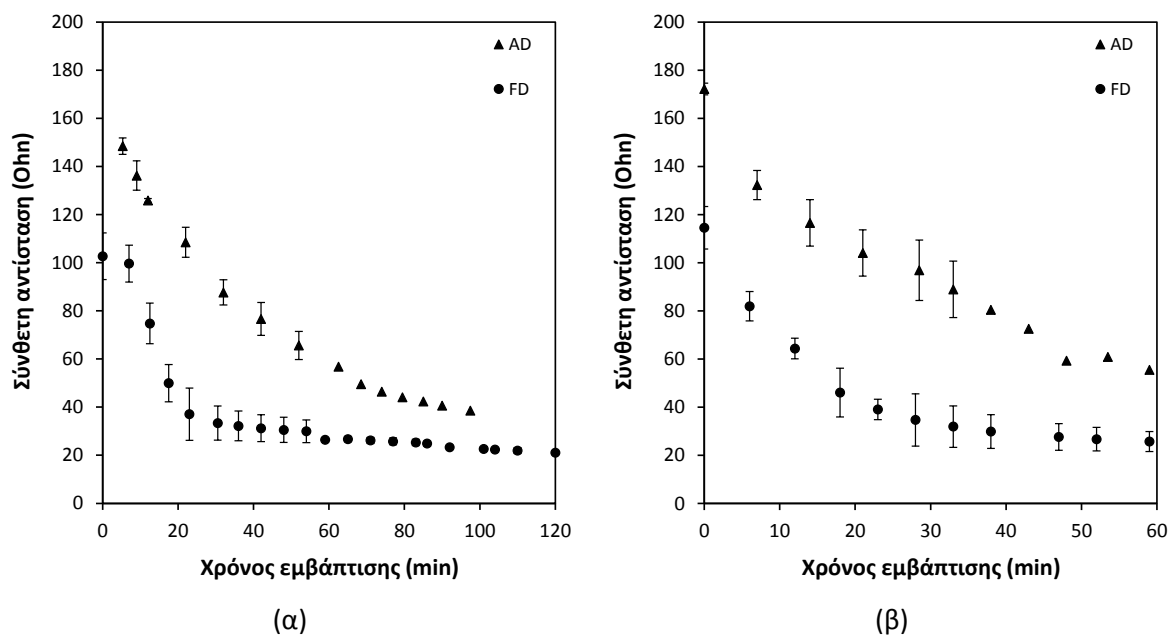
Η τιμή που αντιστοιχεί στο πλατώ της καμπύλης αναφέρεται στο άθροισμα της αντίστασης του διαλύματος και του υλικού. Όπως παρατηρείται, η αντίσταση του συστήματος μειώνεται με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητάς του.

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ



Σχήμα 8. 4. Τυπικές καμπύλες σύνθετης αντίστασης του συστήματος, όπως μετριέται μέσω ηλεκτροχημικής εμπέδησης, συναρτήσει της συχνότητας σάρωσης, για διάφορους χρόνους εμβάπτισης.

Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 8. 5) παρουσιάζεται η αντίσταση του συστήματος συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης στο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Η αντίσταση αναφέρεται στη σύνθετη αντίσταση του διαλύματος και του υλικού. Όπως μπορεί να φανεί, η αντίσταση μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και για τις δύο μεθόδους ξήρανσης. Παρατηρείται ότι τα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα παρουσίασαν αρκετά μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση σε σχέση με τα λυοφιλιωμένα δείγματα, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στη μεγαλύτερη αντίσταση του υλικού εξαιτίας του χαμηλότερου πορώδους και του μεγαλύτερου ιξώδους του.

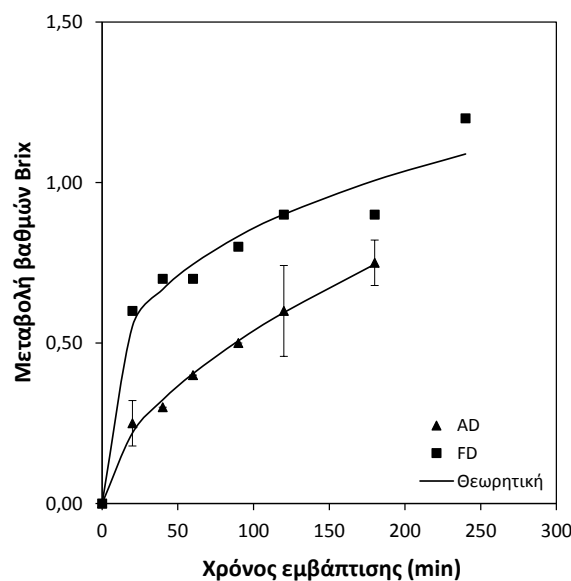


Σχήμα 8. 5. Σύνθετη αντίσταση του συστήματος, όπως μετριέται μέσω ηλεκτροχημικής εμπέδησης, κατά την εμβάπτιση δειγμάτων πατάτας σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο (α) γαστρικό υγρό και (β) σάλιο (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα).



### 8.5.3 Επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στην αποδέσμευση σακχάρων δειγμάτων μπανάνας που εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα γαστρικού υγρού

Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 8. 6) παρουσιάζεται η αποδέσμευση σακχάρων κατά την εμβάπτιση δειγμάτων μπανάνας τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη σε χαμηλές πιέσεις και σε ρεύμα αέρα, σε διαλύματα γαστρικού υγρού. Σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, μετρήθηκε η μεταβολή των βαθμών Brix των διαλυμάτων στα οποία εμβάπτιστηκαν τα δείγματα. Ο άξονας χ παρουσιάζει τη διαφορά των βαθμών Brix σε χρόνο  $t$  και σε χρόνο  $t=0$ . Όπως παρατηρείται, οι βαθμοί Brix του γαστρικού διαλύματος αυξάνονται κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης και για τις δύο μεθόδους ξήρανσης. Τα δείγματα μπανάνας που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη παρουσίασαν μεγαλύτερη μεταβολή των βαθμών Brix, που μεταφράζεται σε μεγαλύτερη αποδέσμευση σακχάρων στο διάλυμα. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στο μεγαλύτερο πορώδες και το χαμηλότερο ιξώδες των δειγμάτων που αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο (9.4.2). Οι Singh et al. (2010) και Dartois et al. (2010) αναφέρουν ότι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ενζυμική πεπτικότητα του αμύλου είναι το ιξώδες της μήτρας των τροφίμων. Η υφή των τροφίμων μπορεί να επηρεάσει την πέψη των συστατικών. Η δομή ελέγχει τη διάχυση διαφόρων συστατικών στο γαστρικό υγρό, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό.



Σχήμα 8. 6. Αποδέσμευση σακχάρων κατά την εμβάπτιση αφυδατωμένων δειγμάτων μπανάνας σε διάλυμα που προσομοιάζει το ανθρώπινο γαστρικό υγρό (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα). Μεταβολή των βαθμών Brix.

Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 8. 3) παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του μαθηματικού προτύπου. Όπως παρατηρείται, το προτεινόμενο πρότυπο περιγράφει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα.

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

Πίνακας 8. 3. Εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου για την αποδέσμευση σακχάρων αφυδατωμένων δειγμάτων μπανάνας κατά την εμβάπτισή τους σε διάλυμα γαστρικού υγρού.

|                | Αποδέσμευση σακχάρων |       |
|----------------|----------------------|-------|
|                | Γαστρικό υγρό        |       |
|                | AD*                  | FD*   |
| $A_0$          | 0,836                | 0,972 |
| <i>p-value</i> | 0,000                | 0,000 |
| $k$            | 0,011                | 0,030 |
| <i>p-value</i> | 0,001                | 0,000 |
| $R^2$          | 0,937                | 0,915 |

\*FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα

### 8.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, αφυδατωμένα δείγματα πατάτας και μπανάνας εμβάπτιστηκαν σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιήθηκε με στόχο τη μελέτη της αποδέσμευσης συστατικών αρχικά στο σάλιο, η οποία μπορεί προσεγγιστικά να συνδεθεί με την αντίληψη της γεύσης, και μετέπειτα στο γαστρικό υγρό, η οποία μπορεί να συνδεθεί με τη διαθεσιμότητα συστατικών στον ανθρώπινο οργανισμό. Κατά την εμβάπτιση στο γαστρικό υγρό παρατηρήθηκε αύξηση του βάρους των δειγμάτων συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης και για τα δύο υλικά. Η μέθοδος ξήρανσης επηρέασε την ταχύτητα προσρόφησης διαλύματος, καθώς και τη μέγιστη ποσότητα του διαλύματος που προσροφήθηκε και για τα δύο υλικά. Τα λυοφιλιωμένα δείγματα, εξαιτίας του υψηλού πορώδους, προσρόφησαν περισσότερη ποσότητα διαλύματος και παρουσίασαν υψηλότερη ταχύτητα προσρόφησης. Οι πατάτες προσρόφησαν επίσης, μεγαλύτερη ποσότητα διαλύματος, σε σύγκριση με τις μπανάνες.

Επιπρόσθετα, στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η αποδέσμευση άλατος από τα δείγματα πατάτας και σακχάρων από τα δείγματα μπανάνας κατά την εμβάπτισή τους στα διαλύματα γαστρικού υγρού και σάλιου. Η αποδέσμευση των σακχάρων και του άλατος από τα δείγματα αυξήθηκε με το χρόνο εμβάπτισης στο γαστρικό διάλυμα και στο σάλιο. Όσον αφορά στα δείγματα μπανάνας, μετρήθηκε η μεταβολή των βαθμών Brix των διαλυμάτων σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αύξηση των βαθμών Brix στα λυοφιλιωμένα δείγματα σε σχέση με τα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα, πιθανώς εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους τους. Όσον αφορά στα δείγματα πατάτας, η αποδέσμευση άλατος σε διάλυμα γαστρικού υγρού, που μετρήθηκε με τιτλοδότηση και με μέτρηση της αγωγιμότητας του διαλύματος, ήταν εντονότερη για τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη σε σχέση με τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα. Αντίθετη τάση παρατηρήθηκε κατά την εμβάπτιση σε διάλυμα σάλιου. Η ηλεκτροχημική εμπέδηση έδειξε ότι τα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα παρουσίασαν αρκετά μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση σε σχέση με τα λυοφιλιωμένα δείγματα, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στη μεγαλύτερη αντίσταση του υλικού εξαιτίας του χαμηλότερου πορώδους του.

# 9.

## ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Αντικείμενο και στόχοι

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πειραματική διαδικασία

Αποτελέσματα - Συζήτηση αποτελεσμάτων

Συμπεράσματα



## 9.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Τα διάφορα τρόφιμα θεωρούνται ως σύνθετα πολυμερή τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε διαφορετικές ιξωδοελαστικές περιοχές: στην υαλώδη περιοχή, όπου το υλικό είναι άκαμπτο και εύθραυστο και το μέτρο ελαστικότητας είναι υψηλό, στην περιοχή υαλώδους μετάπτωσης, όπου ο συντελεστής αποθήκευσης μειώνεται αξιοσημείωτα, στην ελαστική περιοχή, όπου το υλικό παρουσιάζει ελαστικές ιδιότητες και στην περιοχή όπου το υλικό ρέει σαν υγρό. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και το εύρος της παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη δομή των άμορφων συστατικών των τροφίμων. Η αλλαγή της θερμοκρασίας και του ιξώδους με το χρόνο είναι ζωτικής σημασίας για την επεξεργασία, την αποθήκευση και την τελική χρήση των υλικών. Η Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό των μηχανικών, θερμικών και ρεολογικών ιδιοτήτων πολλών υλικών (Li et al., 2010). Προκειμένου να προσδιοριστεί η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των τροφίμων, χρησιμοποιούνται παροδικές ή δυναμικές δοκιμές. Οι πιο χαρακτηριστικές δοκιμές είναι δοκιμές ερπυσμού (creep-recovery) και χαλάρωσης (stress relaxation) (Del Nobile et al., 2007).

Η Δυναμική Μηχανική Θερμική Ανάλυση δίνει πληροφορίες για τις διάφορες μεταπτώσεις που πραγματοποιούνται με αλλαγή της θερμοκρασίας. Οι θερμικές μεταπτώσεις των πολυμερών μπορούν να εξηγηθούν από τη θεωρία του ελεύθερου όγκου. Εκτός από τον ελεύθερο όγκο, τα μόρια του νερού επηρεάζουν, επίσης, τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των υλικών. Το νερό δρα ως πλαστικοποιητής και οι διαφορετικές ποσότητες νερού επηρεάζουν τις ιδιότητες των υλικών (Champion et al., 2000; Li et al., 2010; Lievonen & Roos, 2002).

Ο προσδιορισμός των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των τροφίμων είναι ιδιαίτερης σημασίας σε πολυάριθμες εφαρμογές, όπως στη συγκομιδή, τη διακίνηση και την επεξεργασία. Οι ρεολογικές δοκιμές είναι σημαντικές στο σχεδιασμό των διεργασιών τροφίμων, στην κατανόηση της δομής των τροφίμων και στην αξιολόγηση της υφής τους (Bourne, 1992). Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου επομένως, είναι η μελέτη της επίδρασης των διαφόρων μεθόδων ξήρανσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά γεωργικών προϊόντων. Η επεξεργασία των τροφίμων επηρεάζει σημαντικά τη δομή, την υφή, τη γεύση και την εμφάνιση του τελικού προϊόντος. Η ρεολογική μελέτη των τροφίμων επιτρέπει την εκτίμηση της δομής τους, της λειτουργικότητάς τους και της κατάστασής τους (μετουσίωση πρωτεϊνών, ζελατινοποίηση αμύλου, κτλ.).

## 9.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ξήρανση επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες των τροφίμων. Οι ρεολογικές ιδιότητες σχετίζονται με το μοριακό βάρος και την έκταση της πλαστικοποίησης εξαιτίας του περιεχόμενου νερού. Τα νωπά προϊόντα είναι ιξωδοελαστικά· καθώς όμως μειώνεται η υγρασία τους γίνονται εύθραυστα με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι ρεολογικές τους ιδιότητες (Gabas et al., 2002; Krokida et al., 2000b).

Οι Boudhrioua et al. (2002) μελέτησαν την επίδραση ξήρανσης σε ρεύμα αέρα στη μεταβολή των ρεολογικών ιδιοτήτων δειγμάτων μπανάνας. Οι μεταβολές στις ρεολογικές ιδιότητες εξαρτήθηκαν από το βαθμό ωριμότητας των υλικών και από τη θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Μετά από 4, 6 και 8 h ξήρανσης στους 80°C, παρατηρήθηκε ένας διαχωρισμός στη

ρεολογική συμπεριφορά των υλικών, ο οποίος συσχετίστηκε με αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης.

Οι Anglea et al. (1993a) μελέτησαν τις μεταπτώσεις φάσης σε φρέσκα και ωσμητικά αφυδατωμένα υλικά χρησιμοποιώντας Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης και Μηχανική Φασματομετρία. Η θερμική ανάλυση έδειξε ότι οι υαλώδεις μεταπτώσεις της μη παγωμένης φάσης σε ωσμητικά αφυδατωμένα δείγματα πατάτας ποικίλουν ανάλογα με την ποσότητα της συγκέντρωσης της παγωμένης φάσης. Οι Georget et al. (2004) μελέτησαν τις θερμικές μεταπτώσεις ωσμητικά επεξεργασμένων δειγμάτων καρότου με τις μεθόδους DMTA και DSC. Σαν ωσμητικό μέσο χρησιμοποιήθηκε μαννιτόλη. Η μαννιτόλη έδρασε ως πλαστικοποιητής και οδήγησε στη μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης προεπεξεργασμένων λυοφιλιωμένων δειγμάτων.

Οι Martínez et al. (2005) και Garcia Loredó et al. (2013) μελέτησαν τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες ωσμητικά αφυδατωμένων φρούτων και αναφέρουν μία μείωση στο μέτρο αποθήκευσης των αφυδατωμένων δειγμάτων σε σχέση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Οι Mayor et al. (2007) επίσης, παρατήρησαν μια μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε ωσμητικά αφυδατωμένα ακτινίδια και μάνγκο, σε σύγκριση με τα φρέσκα προϊόντα.

Οι Georget et al. (1998) χρησιμοποίησαν τη δυναμική μηχανική θερμική ανάλυση (DMTA) και τη διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC) για τον προσδιορισμό των μεταπτώσεων φάσεων σε επεξεργασμένα δείγματα καρότου σε χαμηλή υγρασία (0-20% υ.β.). Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και η θερμοκρασία κατά την οποία αρχίζει να μειώνεται το μέτρο αποθήκευσης μετατοπίστηκαν προς χαμηλότερες τιμές με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό. Στο  $T_g$  παρατηρήθηκε ένα μέγιστο κορυφής, όπου το ύψος και το πλάτος αυτής της κορυφής έγινε μικρότερο και ευρύτερο με την ελάττωση της περιεκτικότητας σε νερό. Οι δύο τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίασαν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Οι Blahovec et al. (2012) και Blahovec & Lahodová (2011) χρησιμοποίησαν τη Δυναμική Μηχανική Ανάλυση σε δείγματα πατάτας. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τους 70°C παρατηρήθηκαν κορυφές στα μέτρα αποθήκευσης και απωλειών, υποδεικνύοντας τη ζελατινοποίηση του αμύλου. Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας του αμύλου, οι σημαντικότερες αλλαγές συνδέονται με τη ζελατινοποίηση και την υποβάθμισή του (Donald, 2004; Ratnayake & Jackson, 2008). Αυτές οι δομικές αλλαγές ανιχνεύονται εύκολα με τη βοήθεια θερμικής ανάλυσης, καθώς επίσης και από τις αλλαγές στις ρεολογικές ιδιότητες του αμύλου. Οι αλλαγές του αμύλου κατά τη διάρκεια της θέρμανσής του είναι συνδεδεμένες είτε με τις δομικές ιδιότητες των κόκκων αμύλου ή τις διαστάσεις τους και τη σύνθεσή τους (Kaur et al., 2002).

Οι Li et al. (2010) μελέτησαν τη συμπεριφορά δειγμάτων γλυκοπατάτας κατά την υποβολή τους σε δοκιμές ερπυσμού και χαλάρωσης με σάρωση της θερμοκρασίας και της συχνότητας σε συσκευή DMA. Η ανάλυση παλινδρόμησης των δοκιμών χαλάρωσης έδειξε ότι η συμπεριφορά χαλάρωσης των δειγμάτων μπορεί να παρασταθεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο Maxwell πέντε (5) στοιχείων. Η ζελατινοποίηση του αμύλου των δειγμάτων γλυκοπατάτας ανιχνεύθηκε σε θερμοκρασία 84-91°C, κατά τη σάρωση με αύξηση της θερμοκρασίας με ρυθμό 2°C/min. Σε χαμηλές συχνότητες, τα υλικά είχαν το χρόνο να χαλαρώσουν και να αντιδράσουν στις μεταβολές και παρουσίασαν χαμηλό συντελεστή, ενώ στις υψηλές συχνότητες, τα υλικά δεν είχαν το χρόνο να χαλαρώσουν και παρουσίασαν συγκριτικά υψηλό συντελεστή.

## 9.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 9.3.1 Παραγωγή προϊόντων

Δείγματα πατάτας χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης των συνθηκών επεξεργασίας και της δομής στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Τα δείγματα τεμαχίστηκαν σε ορθογώνιες λωρίδες διαστάσεων 50x10x2 mm. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων:

- α) Τα προϊόντα αφυδατώθηκαν με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.3, ενώ δείγματα λαμβάνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Τα διαστήματα διέφεραν για κάθε μέθοδο ξήρανσης, ούτως ώστε τα δείγματα που λαμβάνονταν να περιέχουν το ίδιο ποσοστό υγρασίας (50%).
- β) Τα προϊόντα αφυδατώθηκαν με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.3 μέχρι ξηρού. Στη συνέχεια, εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα σάλιου για 30 min.

### 9.3.2 Μέτρηση ρεολογικών ιδιοτήτων

Τα δείγματα τυλίχθηκαν με μεμβράνη για την αποφυγή απομάκρυνσης της υγρασίας κατά τη διάρκεια των δοκιμών (Zhou et al., 2009) και τοποθετήθηκαν στη διάταξη δυναμικής μηχανικής θερμικής ανάλυσης τύπου Physica MCR 301, Anton Paar, Austria (Εικόνα 9. 1). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η επικάλυψη με μεμβράνη δε μεταβάλλει σημαντικά το μέγεθος των μηχανικών παραμέτρων. Ο χειρισμός της συσκευής γίνεται από μονάδα ηλεκτρονικού υπολογιστή, εφοδιασμένη με ειδικό λογισμικό ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων (Rheoplus/32 V3.40). Πριν την έναρξη του κάθε πειράματος, οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου μετρήθηκαν με χρήση ψηφιακού παχύμετρου. Η συσκευή περιλαμβάνει δύο βραχίονες, όπου ο κάτω βραχίονας είναι σταθερός, ενώ ο πάνω βραχίονας, στον οποίο τοποθετείται το δείγμα, συνδέεται με κινητήρα και κινείται κατακόρυφα μέχρι τον κάτω δειγματοφορέα. Ο πάνω βραχίονας κινείται με σταθερό πλάτος και συχνότητα. Η απόσταση μεταξύ των βραχιόνων είναι ρυθμιζόμενη για τη μέτρηση ενός ευρέως φάσματος δειγμάτων με ποικίλα μήκη. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού διατίθεται μια ποικιλία από δειγματοφορείς. Η απόκριση του δείγματος στην εφαρμοζόμενη τάση μετριέται και υπολογίζεται ο συντελεστής και οι ιδιότητες απόσβεσης του υλικού.

Οι δοκιμές στα δείγματα πατάτας πραγματοποιήθηκαν σε σταθερή συχνότητα 0,5 Hz και σταθερή παραμόρφωση 0,33%, ενώ η θερμοκρασία μεταβλήθηκε από τους -60°C έως τους 100°C με ρυθμό 2°C/min. Η ψύξη επιτεύχθηκε με χρήση υγρού αζώτου. Οι ιδιότητες που καταγράφηκαν αφορούν στο μέτρο απωλειών, στο μέτρο αποθήκευσης, στο συντελεστή απωλειών και στο ιξώδες. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης προσδιορίστηκε από την κορυφή του γραφήματος του συντελεστή απωλειών (Georget et al., 1998).



Εικόνα 9. 1. Συσκευή Δυναμικής Μηχανικής Θερμικής Ανάλυσης (Physica MCR 301, Anton Paar).

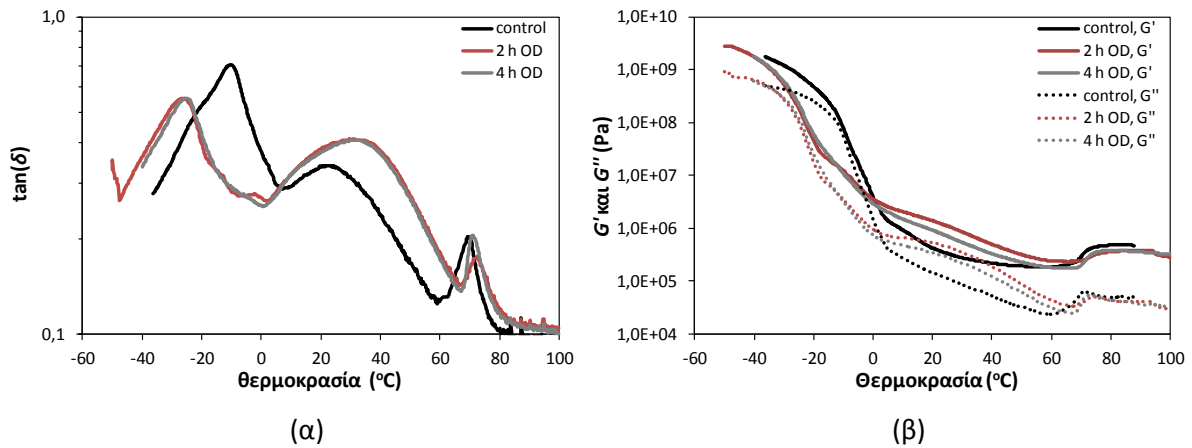
## 9.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 9.4.1 Ξήρανση προϊόντων με ποικίλες μεθόδους

Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν την επίδραση των διαφόρων μεθόδων ξήρανσης και επεξεργασίας στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων πατάτας. Οι ξηράνσεις που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν σε ωσμωτική αφυδάτωση (OD), ξήρανση υπό κατάψυξη (FD), ξήρανση υπό κενό (VD) και ξήρανση σε ρεύμα αέρα (AD), καθώς και σε συνδυασμό της ωσμωτικής αφυδάτωσης με τις υπόλοιπες μεθόδους ξήρανσης.

Το Σχήμα 9. 1 παρουσιάζει την επίδραση της διάρκειας της ώσμωσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Καταρχάς, το μέτρο αποθήκευσης, το μέτρο απωλειών και ο παράγοντας απωλειών μεταβάλλονται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όπως παρατηρείται, η διάρκεια της ώσμωσης δεν επηρεάζει σημαντικά τις ρεολογικές ιδιότητες. Αντίθετα, οι ωσμωτικά αφυδατωμένες πατάτες παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαμηλότερες θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης, σε σχέση με το φρέσκο (control) δείγμα. Οι τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. 1. Το εισερχόμενο αλάτι δρα ως πλαστικοποιητής. Επιπλέον, η μείωση του  $T_g$  σχετίζεται με τον εμποτισμό της στερεάς μήτρας με μία διαλυμένη ουσία χαμηλότερου μοριακού βάρους. Οι Baroni et al. (2002) μελέτησαν τις θερμικές μεταπτώσεις ωσμωτικά αφυδατωμένων δειγμάτων τομάτας και παρατήρησαν επίσης, τη μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης με αύξηση της ποσότητας του χλωριούχου νατρίου στο ωσμωτικό διάλυμα. Οι Farahnaky et al. (2009) μελέτησαν επίσης, την επίδραση της προσθήκης χλωριούχου νατρίου στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης δειγμάτων αμύλου πατάτας και κασσάβας (cassava) και παρατήρησαν ότι η προσθήκη του άλατος προκάλεσε μία αξιοσημείωτη μείωση στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και για τα δύο είδη αμύλου.





Σχήμα 9. 1. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας, (α) παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) και (β) μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) και μέτρο απωλειών ( $G''$ ) (OD: ωσμωτική αφυδάτωση, control: φρέσκο δείγμα).

Πίνακας 9. 1. Εκτίμηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, με χρήση Δυναμικής Μηχανικής Θερμικής Ανάλυσης.

| Δείγμα   | Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ (°C)) | Παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) |
|----------|---|--|
| Control* | -10.80  | 0.710                                  |
| OD* 2 h  | -26.22  | 0.555                                  |
| OD 4 h   | -25.22  | 0.554                                  |
| AD*      | -5.89   | 0.686                                  |
| VD*      | -6.44   | 0.672                                  |
| FD *     | -6.65   | 0.635                                  |
| OD+VD    | -27.00  | 0.460                                  |
| OD+FD    | -25.64  | 0.534                                  |

\*OD: ωσμωτική αφυδάτωση, FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό, control: φρέσκο δείγμα

Το μέτρο απωλειών ( $G''$ ) και το μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) των φρέσκων και ωσμωτικά αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας παρουσιάζεται στο Σχήμα 9. 1β. Όπως παρατηρείται, το μέτρο αποθήκευσης ξεκινά από τιμές της τάξεως των  $10^9$  Pa στη θερμοκρασία των  $-60^\circ\text{C}$  και μειώνεται σημαντικά καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει τους  $0^\circ\text{C}$ . Το μέτρο ελαστικότητας, καθώς μειώνεται, δίνει μια ένδειξη της ακαμψίας και ο παράγοντας απωλειών ( $\tan\delta$ ) δείχνει το σημείο στο οποίο το υλικό γίνεται πιο ιξώδες και λιγότερο ελαστικό. Στα φρέσκα δείγματα πατάτας η μείωση είναι ακόμα πιο έντονη. Οι τιμές αυτές οφείλονται στην παρουσία του πάγου μέσα στη μήτρα του αμύλου, ο οποίος αποτελεί ένα μεγάλο μέρος της μήτρας στα φρέσκα λαχανικά. Αυτή η παρατήρηση ενισχύεται από το γεγονός ότι το μέτρο απωλειών ( $G''$ ) και το μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) μειώνονται κατά την τήξη του πάγου. Όμως, εκτός από τον πάγο, και τα υπόλοιπα συστατικά συνεισφέρουν στο μέτρο. Με αύξηση της θερμοκρασίας το μέτρο αποθήκευσης μειώνεται, και μετά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υφίσταται μια ακόμη μεγαλύτερη μείωση (Anglea et al., 1993a), εξαιτίας της αυξανόμενης κίνησης των πολυμερικών αλυσίδων. Τα μέτρα  $G'$  και  $G''$  μειώνονται κατά περίπου 4 τάξεις μεγέθους, γεγονός που είναι σύμφωνο με τη βιβλιογραφία (Anglea et al., 1993a). Σε κάποιες περιπτώσεις, το μέτρο

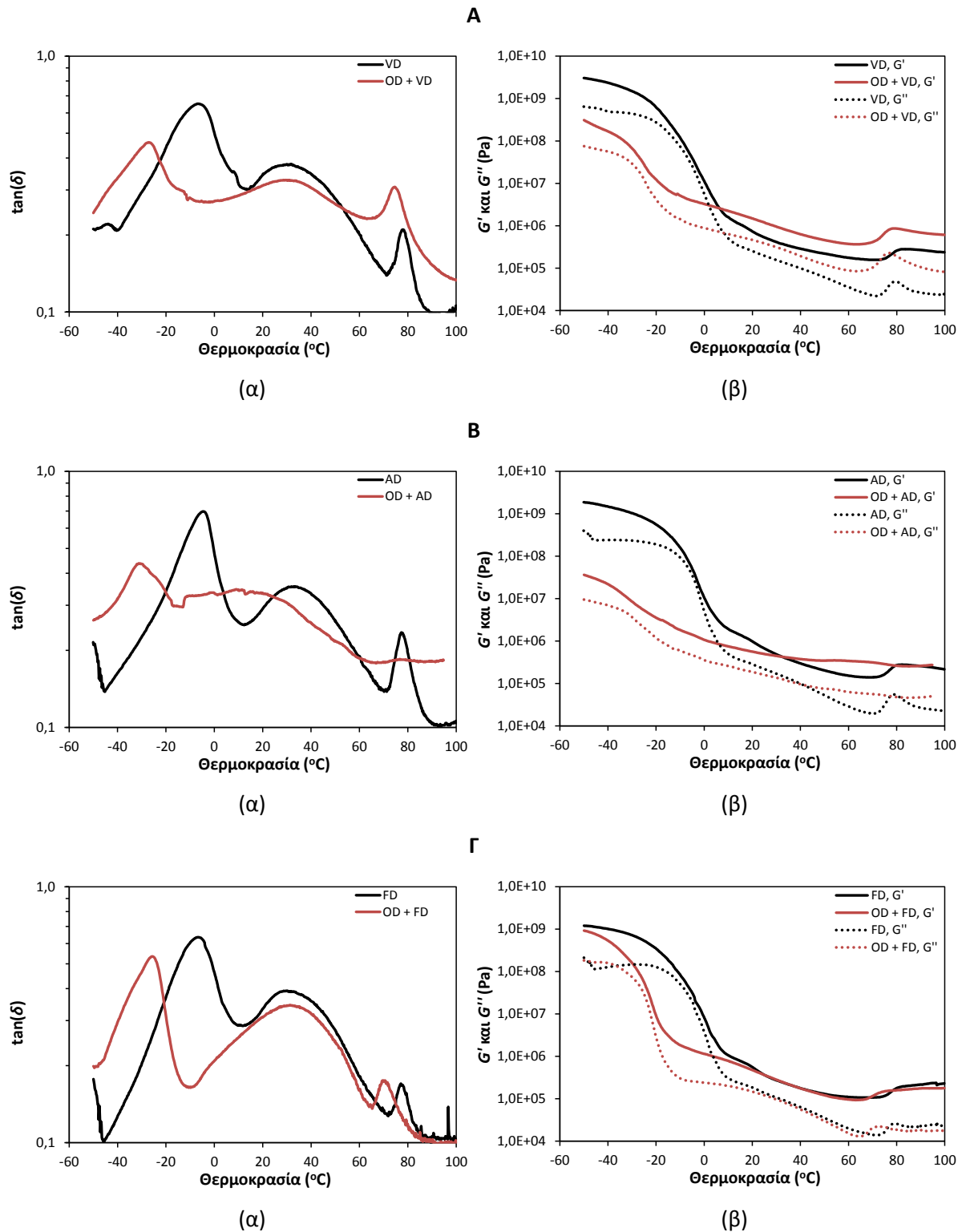
## ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

απωλειών μπορεί να εμφανίζει ένα μέγιστο στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, φτάνει σε ένα μέγιστο πλατώ και στη συνέχεια μειώνεται.

Το μέτρο αποθήκευσης σχετίζεται με την ακαμψία των υλικών και το μέτρο απωλειών δείχνει την ικανότητα απόσβεσής τους. Τα μέτρα αποθήκευσης και απωλειών σε ιξωδοελαστικά υλικά μετρούν την αποθηκευμένη ενέργεια που αντιπροσωπεύει το ελαστικό τμήμα, και την ενέργεια που διασκορπίζεται σε θερμότητα που αντιπροσωπεύει το ιξώδες τμήμα, αντίστοιχα (Meyers & Chawla, 1999). Στα δείγματα που μελετήθηκαν, το μέτρο αποθήκευσης είναι μεγαλύτερο από το μέτρο απωλειών, επομένως η ελαστική συμπεριφορά κυριαρχεί έναντι της ιξώδους. Τα ωσμωτικά αφυδατωμένα δείγματα τα οποία εμφάνισαν μικρότερες τιμές θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές μέτρου αποθήκευσης και απωλειών. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν από τους Martínez et al. (2005) και Garcia Loredo et al. (2013) για ωσμωτικά αφυδατωμένα δείγματα πεπονιού και μήλου, αντίστοιχα. Το μέτρο αποθήκευσης παρουσιάστηκε μεγαλύτερο από το μέτρο απωλειών για όλα τα δείγματα, ενώ παρατηρήθηκε ότι η ωσμωτική αφυδάτωση (σε ατμοσφαιρική πίεση ή υπό κενό) προκάλεσε μία μείωση στο μέτρο αποθήκευσης των δειγμάτων σε σχέση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Η ελάττωση των τιμών του μέτρου αποθήκευσης αποδόθηκε σε μία μείωση της πίεσης σπαργής και σε μία μείωση των ενδοκυτταρικών χώρων του αέρα, η οποία θα μπορούσε να μειώσει την ακαμψία του κυτταρικού τοιχώματος και τη μηχανική υποστήριξη για τη διατήρηση του σχήματος των κυττάρων και των ιστών. Οι Mayor et al. (2007) επίσης, παρατήρησαν μία μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε ωσμωτικά αφυδατωμένα ακτινίδια και μάνγκο, σε σύγκριση με τα φρέσκα προϊόντα.

Επίσης, στην περιοχή μεταξύ των 70 και 90°C, παρατηρείται ένα μέγιστο στο διάγραμμα του παράγοντα απωλειών, το οποίο ονομάζεται θερμοκρασία κορυφής (Blahonovc & Lahodoná, 2011). Η πιθανή αιτία της παρατηρούμενης κορυφής είναι η διόγκωση του αμύλου των δειγμάτων στη θερμοκρασία αυτή. Η διόγκωση του αμύλου εξαρτάται μη μονοτονικά από τη θερμοκρασία. Επίσης, το μέτρο αποθήκευσης χαρακτηρίζεται από μία κορυφή στο θερμοκρασιακό αυτό εύρος. Καθώς στην περιοχή αυτή παρατηρείται η θερμοκρασία ζελατινοποίησης, η κορυφή αυτή πιθανό να οφείλεται στη ζελατινοποίηση του αμύλου των δειγμάτων πατάτας (Li et al., 2010).

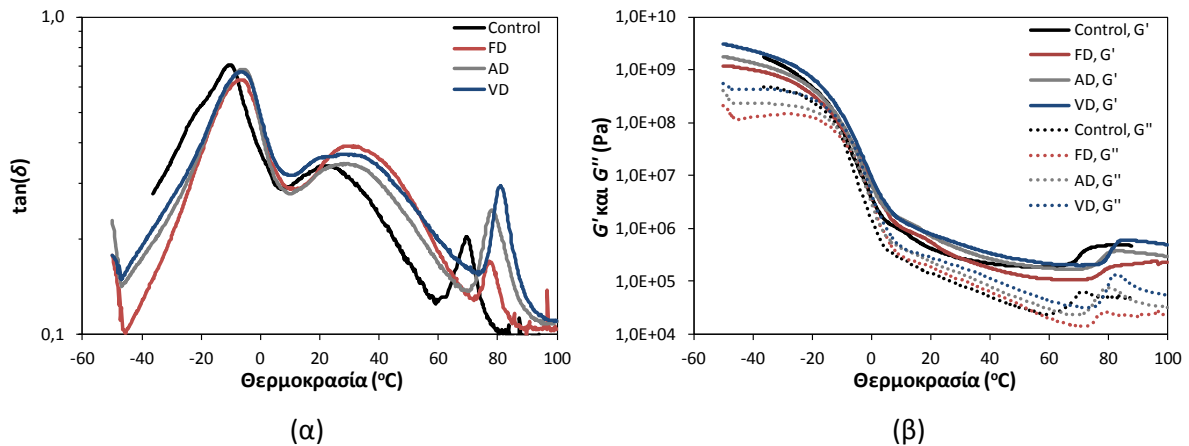
Το Σχήμα 9. 2 παρουσιάζει την επίδραση της ωσμωτικής προ-επεξεργασίας στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τρεις μεθόδους. Όπως παρατηρείται, παρά το γεγονός ότι τα δείγματα τα οποία έχουν υποστεί προ-επεξεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης περιέχουν μικρότερη ποσότητα υγρασίας, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στην παρουσία του χλωριούχου νατρίου στη μήτρα τους. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και για τις τρεις μεθόδους ξήρανσης (AD, VD και FD).



Σχήμα 9. 2. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης (OD) στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τρεις μεθόδους (Α. Ξήρανση υπό κενό (VD), Β. Ξήρανση σε ρεύμα αέρα (AD), Γ. Ξήρανση υπό κατάψυξη (FD)), (α) παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) και (β) μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) και μέτρο απωλειών ( $G''$ ).

## ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

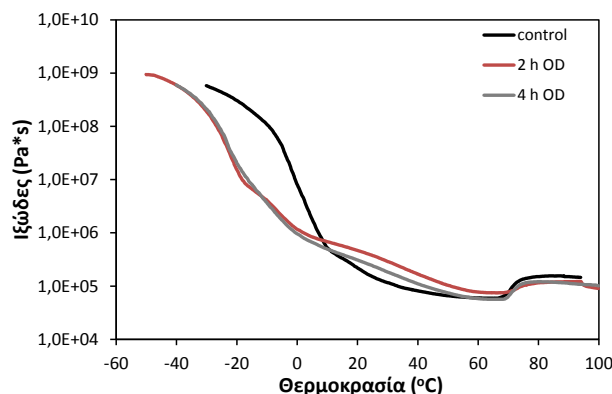
Επίσης, στο Σχήμα 9. 3 παρουσιάζεται η επίδραση της μεθόδου ξήρανσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας. Παρατηρείται ότι το φρέσκο δείγμα εμφανίζει μικρότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, εξαιτίας της αυξημένης ποσότητας νερού που περιέχει. Παράλληλα, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη μέθοδο ξήρανσης. Επίσης, τα δείγματα τα οποία παρήχθησαν υπό κενό και σε ρεύμα αέρα εμφάνισαν μεγαλύτερη ακαμψία σε σχέση με τα λυοφιλωμένα δείγματα.



**Σχήμα 9. 3. Επίδραση της διεργασίας ξήρανσης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό, control: φρέσκο δείγμα), (α) παράγοντας απωλειών ( $\tan(\delta)$ ) και (β) μέτρο αποθήκευσης ( $G'$ ) και μέτρο απωλειών ( $G''$ ).**

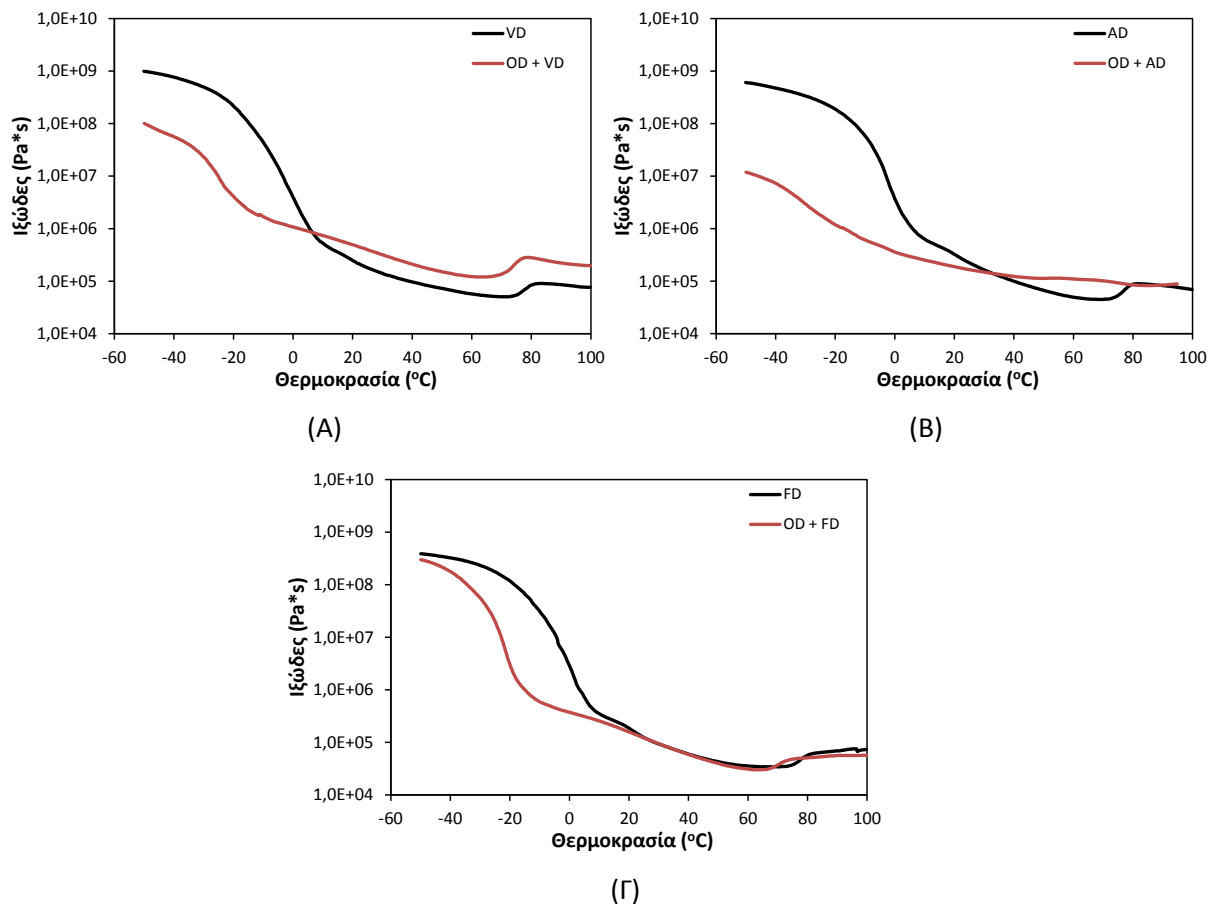
Τα Σχήματα 9. 4 - 9. 6 παρουσιάζουν την επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας στο ιξώδες των προϊόντων. Το ιξώδες των δειγμάτων πατάτας είναι της τάξεως των  $10^9$  Pa·s στη θερμοκρασία των  $-60^\circ\text{C}$  και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 4 περίπου τάξεις μεγέθους. Τα δείγματα τα οποία είχαν προ-επεξεργαστεί με ωσμωτική αφυδάτωση παρουσίασαν χαμηλότερο σύνθετο ιξώδες από ότι τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Η διάρκεια της διαδικασίας ωσμωτικής αφυδάτωσης δεν επηρέασε σημαντικά τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Η κατάρρευση της δομής παρατηρείται όταν το ιξώδες των άμορφων συστατικών είναι στην περιοχή των  $10^4$  με  $10^7$  Pa·s (Anglea et al., 1993a), σε σχέση με το ιξώδες της υαλώδους κατάστασης (περίπου  $10^{10}$  Pa·s).

Επίσης, παρατηρείται ότι στις θερμοκρασίες κοντά στους  $80-90^\circ\text{C}$ , το ιξώδες αυξάνει απότομα και στη συνέχεια μειώνεται σχηματίζοντας χαρακτηριστική κορυφή ή κορυφές (Blahovec et al., 2012).



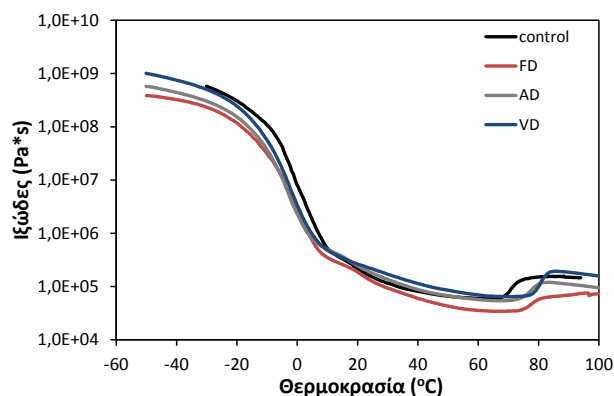
**Σχήμα 9. 4. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας (OD: ωσμωτική αφυδάτωση, control: φρέσκο δείγμα).**

Ομοίως, το Σχήμα 9. 5 παρουσιάζει την επίδραση της ωσμωτικής προ-επεξεργασίας στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τις τρεις μεθόδους. Η ωσμωτική αφυδάτωση οδηγεί στη μείωση του ιξώδους των δειγμάτων και στη δημιουργία περισσότερο μαλακής δομής.



**Σχήμα 9. 5. Επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης (OD) στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τρεις μεθόδους (Α. Ξήρανση υπό κενό (VD), Β. Ξήρανση σε ρεύμα αέρα (AD), Γ. Ξήρανση υπό κατάψυξη (FD)) συναρτήσει της θερμοκρασίας.**

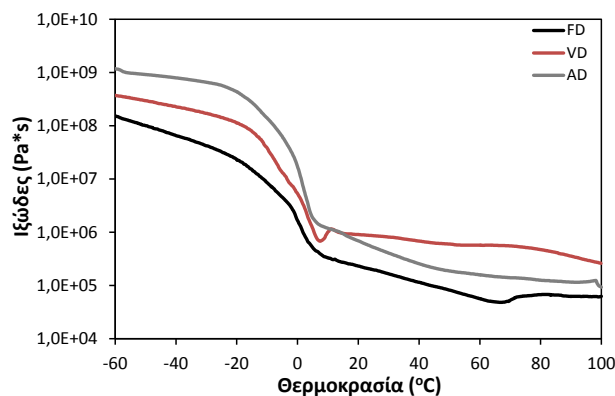
Επιπλέον, τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη παρουσίασαν χαμηλότερο ιξώδες σε σχέση με αυτά που αφυδατώθηκαν σε αέρα ή υπό κενό (Σχήμα 9. 6), υποδεικνύοντας τη μαλακότερη υφή τους. Επίσης, η μείωση του ιξώδους των λυοφιλιωμένων δειγμάτων οφείλεται στο υψηλότερο πορώδες τους.



Σχήμα 9. 6. Επίδραση της διεργασίας ξήρανσης στο ιξώδες δειγμάτων πατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό, control: φρέσκο δείγμα).

#### 9.4.2 Εμβάπτιση σε διαλύματα σάλιου

Στο Σχήμα 9. 7 καταγράφονται οι καμπύλες ιξώδους – θερμοκρασίας για δείγματα πατάτας τα οποία αφυδατώθηκαν με διαφορετικές μεθόδους ξήρανσης και εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα σάλιου για 30 min. Στη θερμοκρασία των 37°C, το μικρότερο ιξώδες παρατηρείται για τα λυοφιλωμένα δείγματα, ακολουθούν τα αφυδατωμένα υπό κενό δείγματα, ενώ το μεγαλύτερο ιξώδες παρατηρείται για τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα. Η ξήρανση υπό κατάψυξη οδηγεί στην παραγωγή πιο μαλακών προϊόντων, λόγω της πορώδους δομής τους και της ικανότητάς τους να προσροφούν μεγαλύτερη ποσότητα διαλύματος.



Σχήμα 9. 7. Μεταβολή του ιξώδους αφυδατωμένων δειγμάτων πατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας, μετά από την εμβάπτισή τους σε διάλυμα σάλιου για 30 min (FD: ξήρανση υπό κατάψυξη, AD: ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: ξήρανση υπό κενό).

### 9.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή μελετήθηκε η επίδραση των διαφόρων μεθόδων ξήρανσης (ωσμωτική αφυδάτωση, ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση υπό κενό, ξήρανση σε ρεύμα αέρα και συνδυασμός τους) στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων πατάτας. Το μέτρο αποθήκευσης, το μέτρο απωλειών, ο παράγοντας απωλειών και το ιξώδες μεταβάλλονται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι ωσμωτικά αφυδατωμένες πατάτες παρουσιάζουν χαμηλές θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης, σε σχέση με το φρέσκο δείγμα. Το μέτρο αποθήκευσης και το μέτρο

απωλειών μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 4 τάξεις μεγέθους. Ιδιαίτερα, μετά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, υφίστανται μία ακόμη μεγαλύτερη μείωση. Επίσης, στην περιοχή μεταξύ των 70 και 90°C παρατηρείται ένα μέγιστο στο διάγραμμα του παράγοντα απωλειών, το οποίο πιθανό να οφείλεται στη ζελατινοποίηση του αμύλου των δειγμάτων πατάτας. Η επίδραση της διεργασίας ξήρανσης δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ωσμωτικά προεπεξεργασμένων δειγμάτων, ενώ η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης δε φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από τη μέθοδο ξήρανσης.

Το ιξώδες των δειγμάτων πατάτας είναι της τάξεως των  $10^9$  Pa·s στη θερμοκρασία των -60°C και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 4 περίπου τάξεις μεγέθους. Τα δείγματα τα οποία είχαν προ-επεξεργαστεί με ωσμωτική αφυδάτωση παρουσίασαν χαμηλότερο σύνθετο ιξώδες από ότι τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Η διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης δεν επηρέασε σημαντικά τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Επίσης, παρατηρείται ότι σε θερμοκρασίες κοντά στους 80-90°C το ιξώδες αυξάνει απότομα και στη συνέχεια μειώνεται σχηματίζοντας χαρακτηριστική κορυφή. Παράλληλα, η ωσμωτική αφυδάτωση οδήγησε στη μείωση του ιξώδους των δειγμάτων. Τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη παρουσίασαν χαμηλότερο ιξώδες ( $1,85 \times 10^5$  στους 20°C), σε σχέση με αυτά που αφυδατώθηκαν σε αέρα ή υπό κενό ( $2,42 \times 10^5$  και  $2,63 \times 10^5$  στους 20°C, αντίστοιχα), υποδεικνύοντας τη μαλακότερη υφή τους.





# 10.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Παραδείγματα σχεδιασμού τελικών προϊόντων  
Ανάπτυξη προσομοιωτή



## 10.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Η παραγωγή προϊόντων με ανώτερα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και υψηλή διατροφική αξία είναι υψίστης προτεραιότητας για τις βιομηχανίες τροφίμων και την αποδοχή των προϊόντων από τους καταναλωτές. Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε η παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων και προϊόντων εκβολής και η μελέτη των συνθηκών επεξεργασίας στις τελικές τους ιδιότητες. Μελετήθηκαν κρίσιμες ιδιότητες ποιότητας, όπως είναι τα δομικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες υφής και η ρεολογία, οι ιδιότητες προσρόφησης ύδατος και οι θερμικές μεταπτώσεις οι οποίες σχετίζονται με τη διατηρησιμότητα των προϊόντων, τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και η αποδέσμευση συστατικών σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο. Ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες μεθόδους και συνθήκες επεξεργασίας, τόσο των αφυδατωμένων προϊόντων όσο και των προϊόντων εκβολής, τα τελικά προϊόντα χαρακτηρίζονται από ποικίλες ιδιότητες. Η τελική χρήση των παραχθέντων προϊόντων και οι προτιμήσεις των καταναλωτών (τραγανότητα, ενυδάτωση, διατροφικά χαρακτηριστικά, κτλ.) καθορίζουν τις εκάστοτε εφαρμοζόμενες συνθήκες και μεθόδους.

Παρακάτω δίνονται κάποια χαρακτηριστικά σενάρια (case studies):

### A) Προϊόντα εκβολής

Τα προϊόντα εκβολής τα οποία παράγονται βιομηχανικά χαρακτηρίζονται από υψηλό πορώδες και χαμηλή σκληρότητα. Στη συγκεκριμένη μελέτη, προϊόντα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά παρήχθησαν σε χαμηλές υγρασίες του μίγματος τροφοδοσίας (14%), χαμηλές συγκεντρώσεις του προστιθέμενου συστατικού (5%), χαμηλές θερμοκρασίες εκβολής (140°C) και υψηλές ταχύτητες περιστροφής των κοχλιών (250 rpm). Κατά την οργανοληπτική αξιολόγηση, τα προϊόντα που χαρακτηρίστηκαν από υψηλή τραγανότητα ήταν ιδιαίτερα αρεστά στους δοκιμαστές. Επίσης, κύριο παράγοντα αρέσκειας αποτέλεσε η ποσότητα του προστιθέμενου συστατικού, καθώς τα προϊόντα τα οποία χαρακτηρίστηκαν από υψηλή περιεχόμενη συγκέντρωση καρότου παρουσίασαν ιδιαίτερα υψηλή βαθμολογία, ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά.

Στον Πίνακα 10. 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μετρούμενες ιδιότητες των προϊόντων εκβολής για ενδεικτικές συνθήκες παραγωγής και χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Με βάση τα όρια που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 10. 1), οι ιδιότητες έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις κλάσεις (X: χαμηλή τιμή, M: μεσαία τιμή, Y: υψηλή τιμή).

Πίνακας 10. 1. Καθορισμός ορίων για τις ιδιότητες των προϊόντων εκβολής.

|          | Όρια        |           |                    |                              |
|----------|-------------|-----------|--------------------|------------------------------|
|          | Πορώδες     | Διόγκωση  | Τάση θραύσης (KPa) | Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά |
| <b>X</b> | < 0,70      | < 2,0     | < 150              | < 5,0                        |
| <b>M</b> | 0,70 – 0,83 | 2,0 – 2,3 | 150 – 200          | 5,0 – 6,5                    |
| <b>Y</b> | > 0,83      | > 2,3     | > 200              | > 6,5                        |

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

Πίνακας 10. 2. Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων επιλεγμένων προϊόντων εκβολής.

| Δομικά χαρακτηριστικά |          | Ιδιότητες υφής |             | Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά |          |             |            |           | Κωδικός             |          |
|-----------------------|----------|----------------|-------------|------------------------------|----------|-------------|------------|-----------|---------------------|----------|
| Πορώδες               | Διόγκωση | Τάση θραύσης   | Ομοιομορφία | Πορώδες                      | Διόγκωση | Τραγανότητα | Σκληρότητα | Ενυδάτωση | Συνολική βαθμολογία |          |
| M*                    | Y        | X*             | X           | M                            | M        | X           | Y          | X         | M                   | 00-10    |
| Y                     | Y        | X              | M           | M                            | Y        | Y           | X          | Y         | Y                   | -11-11   |
| Y                     | Y        | X              | X           | M                            | Y        | X           | X          | X         | X                   | -1-1-1-1 |
| M                     | M        | Y              | X           | M                            | X        | X           | Y          | X         | X                   | 1000     |
| M                     | M        | Y              | M           | M                            | X        | X           | X          | M         | M                   | 0100     |
| M                     | M        | M              | M           | M                            | M        | Y           | X          | M         | Y                   | 0000     |
| Y                     | Y        | M              | Y           | Y                            | Y        | Y           | X          | X         | Y                   | 0001     |
| M                     | M        | Y              | Y           | M                            | X        | X           | M          | X         | M                   | 000-1    |
| Y                     | Y        | M              | M           | Y                            | Y        | M           | M          | X         | M                   | 0-100    |
| Y                     | Y        | M              | Y           | M                            | M        | X           | X          | Y         | Y                   | -1000    |
| M                     | X        | Y              | Y           | X                            | M        | X           | Y          | X         | X                   | 1111     |
| M                     | X        | Y              | Y           | M                            | M        | X           | Y          | X         | X                   | 1-11-1   |
| Y                     | M        | Y              | Y           | Y                            | M        | X           | Y          | X         | X                   | 1-111    |
| Y                     | M        | Y              | Y           | M                            | M        | Y           | X          | Y         | M                   | 0010     |
| Y                     | X        | Y              | Y           | M                            | X        | Y           | X          | Y         | Y                   | -111-1   |
| Y                     | Y        | M              | Y           | Y                            | Y        | Y           | X          | Y         | M                   | -1-111   |

\*(X: χαμηλή τιμή, M: μεσαία τιμή, Y: υψηλή τιμή)

Ο Πίνακας 10. 2 παρουσιάζει τις υπολογιζόμενες, από τα μαθηματικά πρότυπα, τιμές των δομικών και μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων εκβολής. Με βάση τον Πίνακα αυτό, επιλέγοντας τα εκάστοτε επιθυμητά χαρακτηριστικά των προϊόντων, μπορούν να προσδιοριστούν οι απαιτούμενες συνθήκες εκβολής και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών. Παραδείγματος χάριν, εάν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι υψηλή διόγκωση και πορώδες, χαμηλή σκληρότητα και υψηλή τραγανότητα, οι βέλτιστοι συνδυασμοί συνθηκών είναι οι -11-11, 0001, -111-1.

Επίσης, με βάση τα χρησιμοποιούμενα μαθηματικά πρότυπα, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των αντικειμενικών ιδιοτήτων ποιότητας των προϊόντων σε οποιεσδήποτε συνθήκες θερμοκρασίας εκβολής, ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών του εκβολέα, περιεχόμενης υγρασίας του αρχικού μίγματος και συγκέντρωσης καρότου στο αρχικό μίγμα, στα όρια που έχουν μελετηθεί στην παρούσα διατριβή. Με βάση την Εξίσωση 7. 1, και γνωρίζοντας από την Εξίσωση 5. 5 την τιμή του πορώδους που προκύπτει από συνδυασμούς συνθηκών οι οποίοι δεν έχουν εξεταστεί στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, μπορεί να δοθεί μία πρώτη εικόνα για τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Το υπολογιζόμενο αποτέλεσμα (X, M, Y) θα καθορίσει καταρχάς, την ανάγκη ή μη παραγωγής των προϊόντων εκβολής για τη διεξαγωγή περαιτέρω οργανοληπτικών δοκιμών και αποδοχής των δειγμάτων. Παραδείγματος χάριν, εάν το αποτέλεσμα δεν είναι επιθυμητό δεν ενδείκνυται η παραγωγή προϊόντων για τη διεξαγωγή πειραμάτων οργανοληπτικής αξιολόγησης. Στην αντίθετη περίπτωση, επιθυμητά αποτελέσματα θα οδηγήσουν στην παραγωγή προϊόντων στις μελετώμενες συνθήκες, στην οργανοληπτική τους αξιολόγηση και στην επιλογή των βέλτιστων προϊόντων. Οι οργανοληπτικές δοκιμές μπορούν επίσης, να περιοριστούν με βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης. Τα προϊόντα που περιείχαν χαμηλή συγκέντρωση καρότου δεν ήταν ιδιαίτερα αρεστά στους δοκιμαστές. Αρεστά παρουσιάστηκαν τα προϊόντα που περιείχαν χαμηλή υγρασία (14%) και υψηλή συγκέντρωση καρότου (10%) τα οποία εξεργάστηκαν σε εύρος θερμοκρασιών και ταχυτήτων περιστροφής κοχλιών. Επίσης, για όλα τα μελετώμενα δείγματα ενδείκνυται η συσκευασία και αποθήκευσή τους σε περιβάλλοντα χαμηλής σχετικής υγρασίας ( $\alpha_w < 0,53$ ) σε συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς σε υψηλότερες σχετικές υγρασίες, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης πλησιάζει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

#### B) Αφυδατωμένα προϊόντα

Τα αφυδατωμένα προϊόντα χαρακτηρίζονται, κυρίως, από τα δομικά τους χαρακτηριστικά, τα οποία καθορίζουν πλήθος άλλων ιδιοτήτων, όπως είναι οι ιδιότητες υφής, η ταχύτητα ενυδάτωσης, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και η αποδέσμευση συστατικών στον ανθρώπινο οργανισμό. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων και η τελική τους χρήση θα καθορίσει τις απαιτούμενες ιδιότητές τους και συνεπώς, τις συνθήκες παραγωγής τους. Η απαίτηση για προϊόντα με υψηλό πορώδες, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και γρήγορη ενυδάτωση, επιβάλλει τη χρήση ξήρανσης υπό κατάψυξη. Αντίθετα, για την παραγωγή προϊόντων με χαμηλότερο ρυθμό ενυδάτωσης, ενδείκνυται άλλες μέθοδοι ξήρανσης, όπως είναι η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση σε ρεύμα αέρα.

Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 10. 3) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ιδιότητες αφυδατωμένων προϊόντων που έχουν υποστεί προ-επεξεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης. Για την ανάπτυξη λειτουργικών τροφίμων και συμπληρωμάτων και τη διασφάλιση της ορθής απελευθέρωσης θρεπτικών ουσιών σε επιθυμητές τιμές στο σώμα είναι απαραίτητος ο έλεγχος των δομικών τους χαρακτηριστικών.

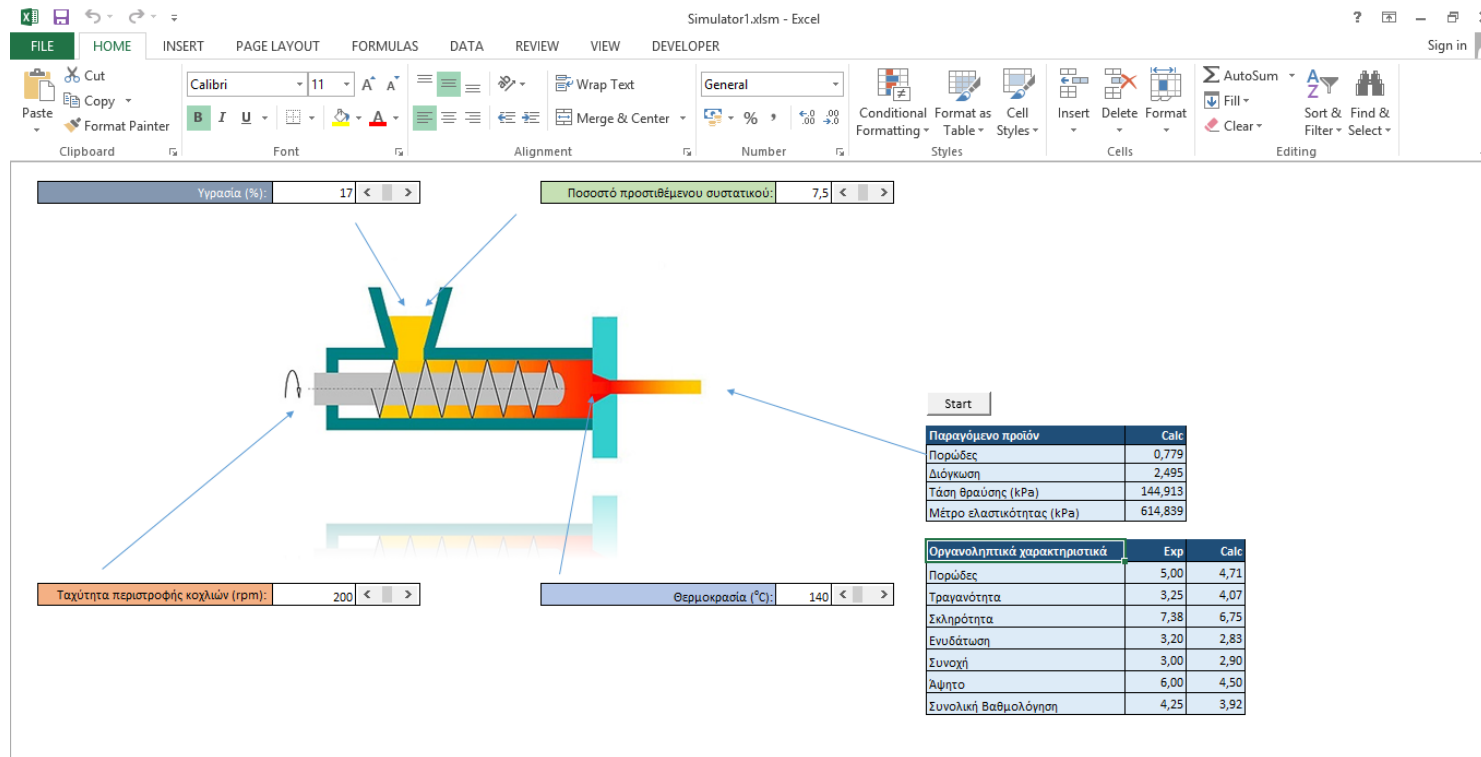
Πίνακας 10. 3. Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων αφυδατωμένων προϊόντων.

| Υλικό   | Μέθοδος ξήρανσης | Δομικά χαρακτηριστικά (πορώδες) | Αποδέσμευση σε γαστρικό υγρό |
|---------|------------------|---------------------------------|------------------------------|
|         | AD**             | Χ*                              | Χ                            |
| Πατάτα  | VD**             | Χ                               | -                            |
|         | FD**             | Υ*                              | Υ                            |
|         | AD               | Χ                               | Χ                            |
| Μπανάνα | VD               | Χ                               | -                            |
|         | FD               | Υ                               | Υ                            |

\*(Χ: χαμηλή τιμή, Μ: μεσαία τιμή, Υ: υψηλή τιμή), \*\* AD: Ξήρανση σε ρεύμα αέρα, VD: Ξήρανση υπό κενό, FD: Ξήρανση υπό κατάψυξη

## 10.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παραγωγή τελικών προϊόντων με τα επιθυμητά κάθε φορά χαρακτηριστικά βασίζεται στην επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας και χαρακτηριστικών των πρώτων υλών. Για τη διευκόλυνση της επιλογής των παραμέτρων αυτών, αναπτύχθηκε κατάλληλος προσομοιωτής, στη γλώσσα Visual basic for Applications (VBA) του excel, ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 10. 1. Περιβάλλον προσομοιωτή για τη διεργασία της εκβολής.

Ο προσομοιωτής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. 1 αφορά στη διεργασία της εκβολής. Εισερχόμενα δεδομένα αποτελούν οι συνθήκες επεξεργασίας (ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών και θερμοκρασία εκβολής) και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών (αρχική περιεχόμενη υγρασία και συγκέντρωση του προστιθέμενου συστατικού). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών κυμαίνονται στα όρια που έχουν μελετηθεί στην παρούσα διατριβή, υπάρχει όμως η δυνατότητα εισαγωγής ενδιάμεσων τιμών πέραν των μελετώμενων. Ως εξερχόμενα δεδομένα υπολογίζονται οι δομικές και μηχανικές ιδιότητες, καθώς και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, με βάση τα πρότυπα που έχουν εφαρμοστεί στις ενότητες 5.4.3, 6.4.1 και 7.4.1 και τις εκτιμώμενες παραμέτρους αυτών, μέσω κατάλληλου κώδικα που αναπτύχθηκε στη γλώσσα VBA του excel. Όσον αφορά στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, στην πρώτη στήλη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την οργανοληπτική αξιολόγηση για τους συνδυασμούς παραμέτρων που έχουν μελετηθεί στην παρούσα διατριβή με βάση το σχεδιασμό κεντρικού σημείου (CCD). Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς παρουσιάζεται η ένδειξη «n.a.». Στη δεύτερη στήλη παρουσιάζονται οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης 7. 1, οι οποίες βρίσκονται αρκετά κοντά με τα πειραματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή της προσομοίωσης μπορούν να αποτελέσουν στοιχεία για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών με στόχο την παραγωγή επιθυμητών προϊόντων.

Το περιβάλλον του προσομοιωτή μπορεί να εξελιχθεί περαιτέρω, για να υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης οποιωνδήποτε άλλων επιθυμητών χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων, καθώς και η δυνατότητα μελέτης διαφορετικών πρώτων υλών, εφόσον έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα πρότυπα που συνδέουν τις παραμέτρους επεξεργασίας με τις τελικές ιδιότητες. Επίσης, αντίστοιχος προσομοιωτής μπορεί να αναπτυχθεί για τα αφυδατωμένα προϊόντα, συνδέοντας τις συνθήκες επεξεργασίας με τις τελικές ιδιότητες ποιότητας των προϊόντων.



# 11.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ

Συμπεράσματα  
Μελλοντικές ενέργειες



## 11.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι απαιτήσεις των σύγχρονων καταναλωτών για την ανάπτυξη προϊόντων τα οποία χρειάζονται μικρό χρόνο παραγωγής, αλλά ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από υψηλή διατροφική αξία και αυξημένη διάρκεια ζωής, έχει οδηγήσει τη βιομηχανία τροφίμων στην παραγωγή λειτουργικών, τυποποιημένων τροφίμων τα οποία χαρακτηρίζονται από καθορισμένες και βέλτιστες ιδιότητες ποιότητας. Τα αφυδατωμένα φρούτα και λαχανικά, καθώς και τα σνακς τα οποία περιέχουν συστατικά υψηλής διατροφικής αξίας αποτελούν παραδείγματα τέτοιων τροφίμων. Η αποδοχή των συγκεκριμένων προϊόντων από τους καταναλωτές εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι η εμφάνιση, η γεύση και οι ιδιότητές τους. Μεταξύ των ιδιοτήτων, οι δομικές ιδιότητες είναι κρίσιμες για το χαρακτηρισμό των υλικών και την αποδοχή τους από τους καταναλωτές, καθώς καθορίζουν την ποιότητα των προϊόντων, ελέγχουν τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά και επηρεάζουν άλλες ιδιότητες, όπως είναι οι θερμικές ιδιότητες, οι ιδιότητες υφής, κτλ.

Η συγκεκριμένη διατριβή είχε, επομένως, ως αντικείμενο την παραγωγή καινοτόμων προϊόντων καθορισμένης δομής, και τη συσχέτιση των δομικών χαρακτηριστικών τους με τις θερμοφυσικές και οργανοληπτικές ιδιότητές τους. Μελετήθηκαν οι δύο βασικότερες διεργασίες ανάπτυξης πορώδους δομής, η ξήρανση και η εκβολή. Οι μέθοδοι ξήρανσης που επιλέχθηκαν είναι η ξήρανση υπό κατάψυξη, η ξήρανση σε ρεύμα αέρα, η ξήρανση υπό κενό και η προ-επεξεργασία με ωσμωτική αφυδάτωση, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ανήκουν στις τρεις κύριες κατηγορίες τροφίμων (φρούτα, λαχανικά και δημητριακά) και αποτελούν βασικά συστατικά της σύγχρονης διατροφής. Όσον αφορά στην εκβολή, χρησιμοποιήθηκε εκβολέα διπλού κοχλίου, ενώ ως παράμετροι της διεργασίας επιλέχθηκαν η θερμοκρασία εκβολής, η ταχύτητα περιστροφής των κοχλίων, η υγρασία της τροφοδοσίας και η αναλογία των συστατικών στο αρχικό μίγμα. Το αρχικό μίγμα αποτελούνταν από αλεύρο ρυζιού και ξηρή σκόνη καρότου σε διάφορες αναλογίες.

Τα παραχθέντα προϊόντα αξιολογήθηκαν ως προς τα δομικά τους χαρακτηριστικά και άλλες βασικές ποιοτικές και οργανοληπτικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες που εξετάστηκαν ήταν οι μηχανικές, οι θερμικές, οι ρεολογικές, οι ιδιότητες προσρόφησης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (εμφάνιση, γεύση και υφή). Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη (0,04-1,50 mbar) και του χρόνου βρασίματος (4-24 min) στα δομικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες προσρόφησης και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης προϊόντων ρυζιού. Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση της πίεσης ξήρανσης υπό κατάψυξη στα δομικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες υφής, τις ιδιότητες προσρόφησης και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης των υπόλοιπων γεωργικών προϊόντων. Εξετάστηκε ακόμα, η επίδραση των συνθηκών επεξεργασίας (ξήρανση υπό κατάψυξη, ξήρανση σε ρεύμα αέρα, ξήρανση υπό κενό) στις ρεολογικές ιδιότητες, καθώς και την αποδέσμευση ορισμένων συστατικών σε διαλύματα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο γαστρικό υγρό και το σάλιο, σε αφυδατωμένα προϊόντα τα οποία είχαν υποστεί προ-επεξεργασία ωσμωτικής αφυδάτωσης. Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας (θερμοκρασία εκβολής (140-180°C), ταχύτητα περιστροφής των κοχλίων (150-250 rpm), υγρασία της τροφοδοσίας (14-20%) και συγκέντρωση καρότου 5-10%) στις δομικές, μηχανικές, θερμικές ιδιότητες, τις ιδιότητες προσρόφησης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Τέλος, βασικός στόχος ήταν η ανάπτυξη ή εφαρμογή μαθηματικών

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ

προτύπων βάσει των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη των ιδιοτήτων από τις συνθήκες παραγωγής των προϊόντων, καθώς και συσχέτιση των ιδιοτήτων μεταξύ τους.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διατριβή παρατίθενται στη συνέχεια:

### ΔΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- ✚ Η ξήρανση υπό κατάψυξη οδήγησε στην παραγωγή προϊόντων μεγάλου πορώδους, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλους πόρους. Η αύξηση της πίεσης λειτουργίας οδήγησε στη μείωση του πορώδους των αφυδατωμένων προϊόντων, εξαιτίας της κατάρρευσης της δομής τους. Όσον αφορά στα προϊόντα ρυζιού που έβρασαν για 20 min πριν την ξήρανσή τους, η αύξηση της πίεσης ξήρανσης από 0,04 mbar σε 1,25 mbar οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,65 σε 0,60. Όσον αφορά στα υπόλοιπα γεωργικά προϊόντα (πατάτα, μανιτάρι, φράουλα) η μείωση της πίεσης από 1,50 mbar σε 0,06 mbar οδήγησε σε αύξηση του πορώδους κατά 5 με 10%.
- ✚ Η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση σε ρεύμα αέρα οδήγησαν στην ανάπτυξη δομών με μικρούς πόρους.
- ✚ Οι παράμετροι της διεργασίας εκβολής (αρχική υγρασία του μίγματος τροφοδοσίας, συγκέντρωση καρότου, θερμοκρασία εκβολής, ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών) επηρέασαν σημαντικά την πυκνότητα, το πορώδες και το συντελεστή διόγκωσης των εκβαλλόμενων προϊόντων. Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας και της συγκέντρωσης καρότου οδήγησε στην παραγωγή σνακ με χαμηλή διόγκωση και πορώδες. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών αύξησε τη διόγκωση και μείωσε τη φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων, ενώ η αυξημένη θερμοκρασία εκβολής παρήγαγε προϊόντα με υψηλό πορώδες, αλλά ταυτόχρονα οδήγησε σε μειωμένη διόγκωση. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας από 140 σε 180°C ( $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,78 σε 0,86 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,10. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε αύξηση του πορώδους από 0,80 σε 0,83 και αύξηση του συντελεστή διόγκωσης από 2,15 σε 2,35. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας από 14 σε 20% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ ) οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,88 σε 0,75 και μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,20, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου από 5 σε 10% ( $T=160^\circ\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ) οδήγησε σε μείωση του πορώδους από 0,85 σε 0,80 και σε μείωση του συντελεστή διόγκωσης από 2,40 σε 2,05. Τα προϊόντα εκβολής που εμφάνισαν το υψηλότερο πορώδες και βαθμό διόγκωσης παρήχθησαν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής των κοχλιών, ενώ το μίγμα τροφοδοσίας περιείχε χαμηλή υγρασία και χαμηλή συγκέντρωση καρότου.

### ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

- ✚ Οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάστηκαν σημαντικά ( $p<0,05$ ) από τις συνθήκες επεξεργασίας και συσχετίστηκαν με τα δομικά χαρακτηριστικά των προϊόντων.
- ✚ Η τάση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας των λυοφιλιωμένων γεωργικών προϊόντων παρουσίασαν σημαντική μείωση με τη μείωση της πίεσης λειτουργίας και επομένως με την αύξηση του πορώδους. Στα αφυδατωμένα προϊόντα, αύξηση του πορώδους κατά περίπου 10% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 30%. Οι πατάτες, οι οποίες ανέπτυξαν τη λιγότερο πορώδη δομή, παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές τάσης θραύσης και μέτρου ελαστικότητας.

- ✚ Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, της συγκέντρωσης καρότου και της θερμοκρασίας εκβολής οδήγησε στην παραγωγή σνακ με αυξημένη σκληρότητα, ενώ η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών είχε το αντίθετο αποτέλεσμα. Η υφή των προϊόντων εκβολής ελέγχεται από την πυκνότητα, τη διόγκωση, την κατανομή του μεγέθους των πόρων, καθώς και το πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων. Τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η τάση θραύσης μειώθηκαν με την αύξηση της διόγκωσης. Η αύξηση του συντελεστή διόγκωσης των προϊόντων εκβολής κατά 70% οδήγησε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 1100 σε 400 kPa.

### **ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ**

- ✚ Η αύξηση της ενεργότητας ύδατος οδήγησε σε αύξηση της προσρόφησης νερού.
- ✚ Το χρησιμοποιούμενο πρότυπο GAB προσαρμόστηκε καλά στα πειραματικά δεδομένα, ενώ οι ισόθερμες ρόφησης ακολούθησαν τον τύπο II, με εξαίρεση τις φράουλες που ακολούθησαν τον τύπο III.

### **ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

- ✚ Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης μειώθηκε σημαντικά με την αύξηση της υγρασίας, εξαιτίας της πλαστικοποιητικής ικανότητας του νερού.
- ✚ Όσον αφορά στα γεωργικά προϊόντα, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης παρουσίασε μειωμένες τιμές με την αύξηση του πορώδους για τα προϊόντα ρυζιού, ενώ δεν επηρεάστηκε από τα δομικά χαρακτηριστικά για τα γεωργικά προϊόντα.
- ✚ Όσον αφορά στα προϊόντα εκβολής, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης κυμάνθηκε μεταξύ των 130 και 18°C, για ενεργότητες ύδατος από 0,11 έως 0,94, αντίστοιχα. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης αυξήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών και της θερμοκρασίας εκβολής, ενώ μειώθηκε με την αύξηση της αρχικής υγρασίας της τροφοδοσίας και της συγκέντρωσης του καρότου στο αρχικό μίγμα. Η μεταβολή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης είναι πιο έντονη για τη χαμηλή ενεργότητα νερού. Στην ενεργότητα 0,11, η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής από τους 140 στους 180°C οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120 στους 130°C. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών από 150 σε 250 rpm οδήγησε σε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 120 στους 124°C. Αντίθετα, η αύξηση της υγρασίας της τροφοδοσίας από 14 σε 20% οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 130 στους 90°C, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης καρότου από 5 σε 10% οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης από τους 125 στους 98°C.

### **ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

- ✚ Η εμφάνιση, η γεύση και η υφή των προϊόντων εκβολής επηρεάστηκαν από τις παραμέτρους της διεργασίας. Αύξηση της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας (από 14 σε 20%) οδήγησε σε μείωση της ομοιομορφίας (Βαθμολογία: από 8,0 στο 4,8), της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 6,0 στο 3,5), της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 6,5 στο 2,0) και της συνοχής (Βαθμολογία: από 6,2 στο 2,8) και σε αύξηση της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 2,3 στο 7,0) για τιμές  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $C=7,5\%$ . Η αύξηση της συγκέντρωσης του καρότου (από 5 σε 10%) οδήγησε στη μείωση της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 7,6 στο 3,4), της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 5,5 στο 3,3) και της συγκολλητικότητας (Βαθμολογία: από 4,6 στο 2,8) και στην αύξηση της ομοιομορφίας (Βαθμολογία: από 5,3 στο 6,5) και της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 3,2 στο 4,3) για τιμές

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ

$T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ . Η αύξηση της θερμοκρασίας εκβολής (από 140 στους 180°C) οδήγησε στη μείωση της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 7,0 στο 4,4) και της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 7,4 στο 3,6) και στην αύξηση της ομοιομορφίας (Βαθμολογία: από 3,5 στο 6,0), της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 3,2 στο 6,4) και της συγκολλητικότητας (Βαθμολογία: από 4,4 στο 5,0) για τιμές  $N=200$  rpm,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ . Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των κοχλιών (από 150 σε 250 rpm) οδήγησε στη μείωση της σκληρότητας (Βαθμολογία: από 5,7 στο 4,7) και στην αύξηση της διόγκωσης (Βαθμολογία: από 3,9 στο 7,5), της ενυδάτωσης (Βαθμολογία: από 3,3 στο 4,3) και της συνοχής (Βαθμολογία: από 2,5 στο 4,4) για τιμές  $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $X=17\%$ ,  $C=7,5\%$ .

- ✚ Η αύξηση του πορώδους επηρέασε θετικά την τραγανότητα των προϊόντων, καθώς επίσης, τη συνοχή και την ενυδάτωσή τους κατά τη μάζηση. Τα προϊόντα με υψηλό πορώδες (>0,80) συγκέντρωσαν την υψηλότερη συνολική βαθμολογία από τους καταναλωτές.
- ✚ Τα προϊόντα με την υψηλότερη βαθμολογία χαρακτηρίστηκαν από υψηλή διόγκωση και χαμηλή οργανοληπτική σκληρότητα και παρήχθησαν σε χαμηλές θερμοκρασίες (140°C), υψηλές ταχύτητες περιστροφής κοχλιών (250 rpm) και χαμηλή αρχική περιεχόμενη υγρασία (14%).

## ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΓΑΣΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΑΛΙΟ

- ✚ Τα δείγματα τα οποία παρουσίασαν μεγαλύτερο πορώδες (λυοφιλιωμένα δείγματα) παρουσίασαν μεγαλύτερη προσρόφηση διαλύματος γαστρικού υγρού, η οποία έφτασε πιο γρήγορα στην ισορροπία.
- ✚ Τα αφυδατωμένα υπό κατάψυξη δείγματα μπανάνας εμφάνισαν πιο έντονη αποδέσμευση σακχάρων σε σχέση με τα δείγματα που αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα, πιθανώς εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους τους. Όσον αφορά στα δείγματα πατάτας, η αποδέσμευση άλατος σε διάλυμα γαστρικού υγρού ήταν εντονότερη για τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη σε σχέση με τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν σε ρεύμα αέρα. Αντίθετη τάση παρατηρήθηκε κατά την εμβάπτιση σε διάλυμα σάλιου.

## ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

- ✚ Οι ωσμωτικά αφυδατωμένες πατάτες παρουσίασαν χαμηλότερες θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης, σε σχέση με τα φρέσκα δείγματα.
- ✚ Το μέτρο αποθήκευσης και το μέτρο απωλειών μειώθηκαν με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 4 τάξεις μεγέθους, και μετά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υπέστησαν ακόμη μεγαλύτερη μείωση.
- ✚ Η επίδραση της διεργασίας ξήρανσης δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντική στα μέτρα αποθήκευσης και απωλειών των δειγμάτων.
- ✚ Το ιξώδες των δειγμάτων μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα δείγματα τα οποία είχαν προ-επεξεργαστεί με ωσμωτική αφυδάτωση παρουσίασαν χαμηλότερο ιξώδες από ό, τι τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Τα δείγματα τα οποία αφυδατώθηκαν υπό κατάψυξη παρουσίασαν χαμηλότερο ιξώδες ( $1,85 \times 10^5$  Pa·s στους 20°C) σε σχέση με αυτά που αφυδατώθηκαν σε αέρα ή υπό κενό ( $2,42 \times 10^5$  Pa·s και  $2,63 \times 10^5$  Pa·s στους 20°C, αντίστοιχα), εξαιτίας της μαλακότερης υφής τους.

Συγκεντρωτικά, η επίδραση των συνθηκών και μεθόδων επεξεργασίας στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των αφυδατωμένων προϊόντων και των προϊόντων εκβολής παρουσιάζεται στους ακόλουθους Πίνακες (Πίνακας 11. 1, Πίνακας 11. 2 και Πίνακας 11. 3).

**Πίνακας 11. 1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα λυοφιλωμένα προϊόντα.**

| Ιδιότητες                       | Παράμετροι ξήρανσης υπό κατάψυξη |                    |                             |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|
|                                 | Ρύζι                             |                    | Πατάτα / Μανιτάρι / Φράουλα |
|                                 | Πίεση ξήρανσης (P)               | Χρόνος βρασμού (t) | Πίεση ξήρανσης (P)          |
| Φαινόμενη πυκνότητα             | ↕                                | ↓                  | ↕                           |
| Πορώδες                         | ↕                                | ↑                  | ↕                           |
| Τάση θραύσης                    | —                                | —                  | ↑                           |
| Μέτρο ελαστικότητας             | —                                | —                  | ↑                           |
| Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης | ↓                                | —                  | —                           |

**Πίνακας 11. 2. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα προϊόντα που αφυδατώθηκαν με διάφορες μεθόδους.**

| Ιδιότητες                    | Μέθοδοι επεξεργασίας |                  |                       |
|------------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|
|                              | Ξήρανση υπό κατάψυξη | Ξήρανση υπό κενό | Ξήρανση σε ρεύμα αέρα |
| Πορώδες                      | ↑                    | ↓                | ↓                     |
| Αποδέσμευση σε γαστρικό υγρό | ↑                    | —                | ↓                     |
| Ιξώδες                       | ↓                    | ↑                | ↑                     |

Πίνακας 11. 3. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα προϊόντα εκβολής.

| Ιδιότητες                       | Παράμετροι διεργασίας   |                         |                         |                                  |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                                 | Υγρασία τροφοδοσίας (X) | Συγκέντρωση καρότου (C) | Θερμοκρασία εκβολής (T) | Ταχύτητα περιστροφής κοχλιών (N) |
| Φαινόμενη πυκνότητα             | ↑↓                      | ↑↓                      | ↓                       | ↓                                |
| Πορώδες                         | ↓                       | ↓                       | ↑                       | ↑                                |
| Συντελεστής διόγκωσης           | ↓                       | ↓                       | ↓                       | ↑                                |
| Τάση θραύσης                    | ↑                       | ↑                       | ↑                       | ↓                                |
| Μέτρο ελαστικότητας             | ↑                       | ↑                       | ↑                       | ↓                                |
| Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης | ↓                       | ↓                       | ↑                       | ↑                                |
| Οργανοληπτικό πορώδες           | ↓                       | ↓                       | ↑                       | ↑                                |
| Οργανοληπτική διόγκωση          | ↓                       | ↓                       | ↓                       | ↑                                |
| Ομοιομορφία                     | ↓                       | ↑                       | ↑                       | —                                |
| Ενυδάτωση                       | ↓                       | ↑                       | ↑                       | ↑                                |
| Σκληρότητα                      | ↑                       | ↓                       | ↓                       | ↓                                |
| Τραγανότητα                     | ↓                       | ↓                       | ↑                       |                                  |
| Συνοχή                          | ↓                       | —                       | ↑                       | ↑                                |
| Συγκολλητικότητα                | ↑                       | ↓                       | ↑                       | ↓                                |

### **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΤΗ**

✚ Για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας και χαρακτηριστικών των πρώτων υλών που οδηγούν στην παραγωγή τελικών προϊόντων εκβολής με τα επιθυμητά κάθε φορά χαρακτηριστικά αναπτύχθηκε κατάλληλος προσομοιωτής, στη γλώσσα Visual basic for Applications (VBA) του excel.

Η γνώση της επίδρασης των μεθόδων ξήρανσης και εκβολής στα χαρακτηριστικά των προϊόντων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη προϊόντων υψηλής ποιότητας τα οποία γίνονται ευρέως αποδεκτά από τους καταναλωτές. Ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες των προϊόντων ως τελικά ή ενδιάμεσα τρόφιμα, οι κατάλληλες συνθήκες ξήρανσης και εκβολής μπορούν να επιλεγούν. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των διαδικασιών ξήρανσης και εκβολής, ως προς τις τελικές δομικές ιδιότητες των διαφόρων προϊόντων, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις βιομηχανίες τροφίμων και μπορεί να καλύψει τις απαιτητικές ανάγκες των καταναλωτών για την κατανάλωση υγιεινών, υψηλής αξίας τροφίμων.



## 11.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ

Οι μελλοντικές ενέργειες οι οποίες θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν είναι:

- ✚ Δημιουργία δυναμικής βάσης δεδομένων με στόχο την αριστοποίηση και το σχεδιασμό των μελετώμενων διεργασιών
- ✚ Μελέτη της επίδρασης της δομής στις ιδιότητες μικρογαλακτωμάτων
- ✚ Μελέτη της επίδρασης του ρυθμού κατάψυξης στα δομικά χαρακτηριστικά λυοφιλωμένων προϊόντων
- ✚ Προσδιορισμός του πορώδους και της κατανομής πόρων με χρήση επεξεργασίας εικόνας (image analysis). Η ανάλυση εικόνας βασίζεται στην αναγνώριση, διαφοροποίηση και ποσοτικοποίηση των εικόνων. Σε πρώτο επίπεδο, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν βασικές εργασίες, όπως είναι η επεξεργασία εικόνας, η επιλογή των πόρων και του υλικού και η μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για την αναγνώριση των σχημάτων και την ταξινόμηση των αντικειμένων σε κλάσεις.
- ✚ Προσδιορισμός του συντελεστή διάχυσης υγρασίας ή συστατικών με τη χρήση επεξεργασίας εικόνας και υπολογιστικών μεθόδων
- ✚ Ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου του στομάχου που θα προσομοιάζει τις *in vivo* κινήσεις και την πέψη των τροφών, μέσω συνεχών περισταλτικών κινήσεων
- ✚ Μελέτη του ρυθμού απελευθέρωσης άλλων διατροφικών συστατικών και συσχέτισής του με τα δομικά χαρακτηριστικά των προϊόντων
- ✚ Μελέτη της επίδρασης διαφορετικών μητρών εξόδου στον εκβολέα στα δομικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων εκβολής
- ✚ Εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε προϊόντα αρτοποιίας (baked products)
- ✚ Μελέτη της διατηρησιμότητας των προϊόντων, ως προς τα θρεπτικά και οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά και συσχέτισής της με τις δομικές τους ιδιότητες



# **12.**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**



- Abbott, J.A., (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 15(3), 207-225.
- Abiad, M.G., Campanella, O.H., Carvajal, M.T., (2010). Assessment of thermal transitions by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) using a novel disposable powder holder. *Pharmaceutics* 2(2), 78-90.
- Adler, P., (1992). *Porous Media: Geometry and Transports*.
- 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.
- Agnieszka, C., Andrzej, L., (2010). Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. *Journal of Food Engineering* 97(2), 267-274.
- Aguilera, J.M., (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering* 67(1-2), 3-11.
- Aguilera, J.M., Stanley, D.W., (1999). *Microstructural Principles in Food Processing and Engineering*. Aspen Publishers, Gaithersburg, MD.
- Aktas, T., Fujii, S., Kawano, Y., Yamamoto, S., (2007). Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying characteristics and quality of dried products. *Food and Bioprocess Processing* 85(3), 178-183.
- Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A., (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and Bioprocess Processing* 80(2), 118-128.
- Alam, M.M., Islam, M.N., Islam, M.N., (2013). Effect of process parameters on the effectiveness of osmotic dehydration of summer onion. *International Food Research Journal* 20(1), 391-396.
- Albena, G.D., Nikolay, D.M., (2004). Moisture sorption characteristics of rice flour. *Nahrung/Food* 48(2), 137-140.
- Alemrajabi, A.A., Rezaee, F., Mirhosseini, M., Esehaghbeygi, A., (2012). Comparative evaluation of the effects of electrohydrodynamic, oven, and ambient air on carrot cylindrical slices during drying process. *Drying Technology* 30(1), 88-96.
- Ali, Y., Hanna, M.A., Chinnaswamy, R., (1996). Expansion characteristics of extruded corn grits. *LWT - Food Science and Technology* 29(8), 702-707.
- Altan, A., McCarthy, K.L., Maskan, M., (2008a). Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88(9), 1648-1659.
- Altan, A., McCarthy, K.L., Maskan, M., (2008b). Twin-screw extrusion of barley-grape pomace blends: Extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions. *Journal of Food Engineering* 89(1), 24-32.
- Anderson, Y., Hedlund, B., Jonsson, L., Svensson, S., (1981). Extrusion cooking of a high-fiber cereal product with crispbread character. *Cereal Chemistry* 58(5), 370-374.
- Anglea, S.A., Karathanos, V., Karel, M., (1993a). Low-temperature transitions in fresh and osmotically dehydrated plant materials. *Biotechnology Progress* 9(2), 204-209.
- Anglea, S.A., Wang, J., Karel, M. (1993b). Quality changes of eggplant due to drying regime In *Proceedings of the Conference Name* |, Conference Location|.
- Antal, T., Figiel, A., Kerekes, B., Sikolya, L., (2011). Effect of drying methods on the quality of the essential oil of spearmint leaves (*Mentha spicata* L.). *Drying Technology* 29(15), 1836-1844.
- 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. *Ciencia y Tecnologia Alimentaria* 5(4), 245-251.
- Arévalo-Pinedo, A., Murr, F.E.X., (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering* 76(4), 562-567.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ashby, M.F., Medalist, R.F.M., (1983). The mechanical properties of cellular solids. *Metallurgical Transactions A* 14(9), 1755-1769.
- Attenburrow, G.E., Goodband, R.M., Taylor, L.J., Lillford, P.J., (1989). Structure, mechanics and texture of a food sponge. *Journal of Cereal Science* 9(1), 61-70, IN61.
- Azarpazhooh, E., Ramaswamy, H.S., (2010). Osmotic Dehydration, in: Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, A.S. (Eds.), *Drying of Foods, Vegetables and Fruits, Volume 1*, Singapore, pp. 83-110.
- Baek, I., Linforth, R.S.T., Blake, A., Taylor, A.J., (1999). Sensory perception is related to the rate of change of volatile concentration in-nose during eating of model gels. *Chemical Senses* 24(2), 155-160.
- Barbosa-Cánovas, G.V., Juliano, P., Peleg, M., (2005). Engineering Properties of Foods, in: Barbosa-Cánovas, G.V. (Ed.), *Food Engineering. Encyclopedia of Life Support Sciences*. EOLSS Publishers/UNESCO, Paris, pp. 25-43.
- Barbosa-Canovas, G.V., Vega-Mercado, H., (1996). *Dehydration of Foods*. International Thomson Publishing (ITP), New York, USA.
- Baroni, A.F., Sereno, A.M., Hubinger, M., (2002). Thermal transitions of osmotically dehydrated tomato by modulated temperature differential scanning calorimetry. *Thermochimica Acta* 395(1-2), 237-249.
- Barresi, A.A., Ghio, S., Fissore, D., Pisano, R., (2009). Freeze drying of pharmaceutical excipients close to collapse temperature: Influence of the process conditions on process time and product quality. *Drying Technology* 27(6), 805-816.
- Barrett, A.H., Cardello, A.V., Leshner, L.L., Taub, I.A., (1994). Cellularity, mechanical failure, and textural perception of corn meal extrudates. *Journal of Texture Studies* 25(1), 77-95.
- Barrett, A.H., Kaletunc, G., (1998). Quantitative description of fracturability changes in puffed corn extrudates affected by sorption of low levels of moisture. *Cereal Chemistry Journal* 75(5), 695-698.
- Basu, S., Shivhare, U.S., Mujumdar, A.S., (2006). Models for sorption isotherms for foods: A review. *Drying Technology* 24(8), 917-930.
- Basunia, M.A., Abe, T., (1999). Moisture adsorption isotherms of rough rice. *Journal of Food Engineering* 42(4), 235-242.
- Bayarri, S., Rivas, I., Costell, E., Durán, L., (2001). Diffusion of sucrose and aspartame in kappa-carrageenan and gellan gum gels. *Food Hydrocolloids* 15(1), 67-73.
- Bhandari, B.R., Howes, T., (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering* 40(1-2), 71-79.
- Bhattacharya, S., (1997). Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: Extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering* 32(1), 83-99.
- Biliaderis, C.G., Maurice, T.J., Vose, J.R., (1980). Starch gelatinization phenomena studied by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Food Science* 45(6), 1669-1674.
- 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.
- Blackburn, N.A., Redfern, J.S., Jarjis, H., Holgate, A.M., Hanning, I., Scarpello, J.H., Johnson, I.T., Read, N.W., (1984). The mechanism of action of guar gum in improving glucose tolerance in man. *Clinical science (London, England : 1979)* 66(3), 329-336.
- Blahovec, J., Lahodová, M., (2011). DMA peaks in potato cork tissue of different mealiness. *Journal of Food Engineering* 103, 273-278.
- Blahovec, J., Lahodová, M., Zámečník, J., (2012). Potato tuber dynamic mechanical analysis at temperatures of starch gelatinization. *Food and Bioprocess Technology* 5(3), 929-938.
- Blanche, S., Sun, X., (2004). Physical characterization of starch extrudates as a function of melting transitions and extrusion conditions. *Advances in Polymer Technology* 23(4), 277-290.
- Blanquet, S., Marol-Bonnin, S., Beyssac, E., Pompon, D., Renaud, M., Alric, M., (2001). The 'biodrug' concept: an innovative approach to therapy. *Trends in Biotechnology* 19(10), 393-400.
- Boisen, S., Eggum, B.O., (1991). Critical evaluation of *in vitro* methods for estimating digestibility in simple-stomach animals. *Nutrition Research Reviews* 4(01), 141-162.

Boland, A.B., Buhr, K., Giannouli, P., van Ruth, S.M., (2004). Influence of gelatin, starch, pectin and artificial saliva on the release of 11 flavour compounds from model gel systems. *Food Chemistry* 86(3), 401-411.

Bonazzi, C., Dumoulin, E., (2011). Quality changes in food materials as influenced by drying processes, *Modern Drying Technology, Volume 3: Product Quality and Formulation*, Tsotsas, E. and Mujumdar, A. S. ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 1-20.

Bondaruk, J., Markowski, M., Blaszcak, W., (2007). Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering* 81(2), 306-312.

Bordoloi, A., Singh, J., Kaur, L., (2012). *In vitro* digestibility of starch in cooked potatoes as affected by guar gum: Microstructural and rheological characteristics. *Food Chemistry* 133(4), 1206-1213.

Bornhorst, G.M., Singh, R.P., (2013). Kinetics of *in vitro* bread bolus digestion with varying oral and gastric digestion parameters. *Food Biophysics* 8, 50-59.

Botha, G.E., Oliveira, J.C., Ahrne, L., (2012). Quality optimization of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission. *Food and Bioprocess Processing* 90(2), 171-179.

Boudhrioua, N., Michon, C., Cuvelier, G., Bonazzi, C., (2002). Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. *Journal of Food Engineering* 55(2), 115-121.

Boukouvalas, C.J., Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (2006). Density and porosity: Literature data compilation for foodstuffs. *International Journal of Food Properties* 9(4), 715-746.

Bourne, M.C., (1992). Calibration of rheological techniques used for foods. *Journal of Food Engineering* 16(1-2), 151-163.

Brandon, E.F.A., Oomen, A.G., Rempelberg, C.J.M., Versantvoort, C.H.M., van Engelen, J.G.M., Sips, A.J.A.M., (2006). Consumer product *in vitro* digestion model: Bioaccessibility of contaminants and its application in risk assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 44(2), 161-171.

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.

Brcic, M., Tripalo, B., Jezek, D., Semenski, D., Drvar, N., Ukrainczyk, M., (2006). Effect of twin-screw extrusion parameters on mechanical hardness of direct-expanded extrudates. *Sadhana* 31(5), 527-536.

Bruin, S., Luyben, K.C.A.M., (1980). Drying of food materials: A review of recent developments, in: Mujumdar, A.S. (Ed.), *Advances in Drying*. Hemisphere Publishing Co., New York, p. 155.

Burtea, O., (2002). Snack food from formers and high shear extruders, in: W., L.E., W., R.L. (Eds.), *Snack Food Processing*. CRC Press,, pp. 310-328.

Camire, M.E., Camire, A., Krumhar, K., (1990). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition* 29, 35-57.

Cao, H., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Du, W.-h., Sun, J.-c., (2006). Optimization of osmotic dehydration of kiwifruit. *Drying Technology* 24(1), 89-94.

Cao, W., Nishiyama, Y., Koide, S., (2004). Physicochemical, mechanical and thermal properties of brown rice grain with various moisture contents. *International Journal of Food Science and Technology* 39, 899-906.

Carvalho, C.W.P., Mitchell, J.R., (2000). Effect of sugar on the extrusion of maize grits and wheat flour. *International Journal of Food Science and Technology* 35, 569-576.

Castells, M., Marin, S., Sanchis, V., Ramos, A.J., (2005). Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: a review. *Food Additives and Contamination* 22, 150-157.

Caurie, M., (1970). A practical approach to water sorption isotherms and the basis for the determination of optimum moisture levels of dehydrated foods. *Journal of Food Technology* 6, 85-93.

Chafer, M., Perez, S., Vargas, M., Chiralt, A., (2008). Stability and quality of minimally processed orange slices. *Journal of Food Processing and Preservation* 32(2), 319-334.

Chakraborty, R., Mukhopadhyay, P., Bera, M., Suman, S., (2011). Infrared-Assisted freeze drying of tiger prawn: Parameter optimization and quality assessment. *Drying Technology* 29(5), 508-519.

## BIBΛIOΓPAΦIA

Chakraborty, S.K., Singh, D.S., Kumbhar, B.K., Singh, D., (2009). Process parameter optimization for textural properties of ready-to-eat extruded snack food from millet and legume pieces blends. *Journal of Texture Studies* 40(6), 710-726.

Champion, D., Le Meste, M., Simatos, D., (2000). Towards an improved understanding of glass transition and relaxations in foods: molecular mobility in the glass transition range. *Trends in Food Science & Technology* 11(2), 41-55.

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.

Chaughule, V.A., Thorat, B.N., (2011). Food Extrusion: Emerging Technology for Food Processing in 21st Century, in: Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, A.S. (Eds.), *Drying of Foods, Vegetables and Fruits, Volume III*, Singapore, pp. 39-62.

Chen, C.-M., Yeh, A.-I., (2001). Effect of amylose content on expansion of extruded rice pellet. *Cereal Chemistry* 78(3), 261-266.

Chen, C.M., Yeh, A.I., (2000). Expansion of rice pellets: Examination of glass transition and expansion temperature. *Journal of Cereal Science* 32(2), 137-145.

Chen, J., (2009). Food oral processing: a review. *Food Hydrocolloids* 23(1), 1-25.

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.

Chinnaswamy, R., Hanna, M.A., (1988). Relationship between amylase content and extrusion-expansion properties of corn starches. *Cereal Chemistry* 65, 138-143.

Chirife, J., Timmermann, E.O., Iglesias, H.A., Boqueta, R., (1992). Some features of the parameter k of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials. *Journal of Food Engineering* 15(1), 75–82.

Chiu, H.-W., Peng, J.-C., Tsai, S.-J., Tsay, J.-R., Lui, W.-B., (2012). Process optimization by response surface methodology and characteristics investigation of corn extrudate fortified with yam (*Dioscorea alata* L.). *Food and Bioprocess Technology*, 1-11.

Chu, B.-S., Rich, G.T., Ridout, M.J., Faulks, R.M., Wickham, M.S.J., Wilde, P.J., (2009). Modulating pancreatic lipase activity with galactolipids: Effects of emulsion interfacial composition. *Langmuir* 25(16), 9352-9360.

Cnossen, A.G., Siebenmorgen, T.J., Yang, W., Bautista, R.C., (2001). An application of glass transition temperature to explain rice kernel fissure occurrence during the drying process. *Drying Technology: An International Journal* 19(8), 1661-1682.

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 (1978-present)* 35(2), 257-270.

Coles, L.T., Moughan, P.J., Darragh, A.J., (2005). *In vitro* digestion and fermentation methods, including gas production techniques, as applied to nutritive evaluation of foods in the hindgut of humans and other simplestomached animals. *Animal Food Science and Technology* 123-124, 421-444.

Colonna, P., Tayeb, J., Mercier, C., (1989). Extrusion cooking of starch and starchy products, in: Mercier, C., Linko, P., Harper, J.M. (Eds.), *Extrusion Cooking*. American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, USA, pp. 247-319.

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.

Cuq, B., Icard-Vernière, C., (2001). Characterisation of glass transition of durum wheat semolina using modulated Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Cereal Science* 33(2), 213-221.

D'Acunzo, F., Del Cimmuto, A., Marinelli, L., Aurigemma, C., De Giusti, M., (2012). Ready-to-eat vegetables production with low-level water chlorination. An evaluation of water quality and of its impact on end products. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita* 48(2), 151-160.

Dartois, A., Singh, J., Kaur, L., Singh, H., (2010). Influence of guar gum on the *in vitro* starch digestibility—Rheological and microstructural characteristics. *Food Biophysics* 5(3), 149-160.



- De Boever, P., Wouters, R., Vermeirssen, V., Boon, N., Verstraete, W., (2001). Development of a six-stage culture system for simulating the gastrointestinal microbiota of weaned infants. *Microbial Ecology in Health and Disease* 13, 111-123.
- Del Nobile, M.A., Chillo, S., Mentana, A., Baiano, A., (2007). Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods. *Journal of Food Engineering* 78(3), 978-983.
- del Valle, J.M., Cuadros, T.R.M., Aguilera, J.M., (1998). Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International* 31(3), 191-204.
- Dev, S.R.S., Raghavan, V.G.S., (2012). Advancements in drying techniques for food, fiber, and fuel. *Drying Technology* 30(11-12), 1147-1159.
- 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.
- Donald, A.M., (2004). Understanding starch structure and functionality, in: Eliasson, A.-C. (Ed.), *Starch in food. Structure, functions and applications*. Woodhead and CRC, Oxford, pp. 156-184.
- 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.
- Drago, S.R., Panouillé, M., Saint-Eve, A., Neyraud, E., Feron, G., Souchon, I., (2011). Relationships between saliva and food bolus properties from model dairy products. *Food Hydrocolloids* 25, 659-667.
- Drouzas, A.E., Tsami, E., Saravacos, G.D., (1999). Microwave/vacuum drying of model fruit gel. *Journal of Food Engineering* 39 117-122.
- Du, C.-J., Sun, D.-W., (2006). Automatic measurement of pores and porosity in pork ham and their correlations with processing time, water content and texture. *Meat Science* 72(2), 294-302.
- Duan, X., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Wang, R., (2010). Trends in microwave-assisted freeze drying of foods. *Drying Technology* 28(4), 444-453.
- Duizer, L.M., Campanella, O.H., Barnes, G.R.G., (1998). Sensory, instrumental and acoustic characteristics of extruded snack food products. *Journal of Texture Studies* 29 397-411.
- Dullien, F.A.L., (1979). *Porous media: Fluid transport and pore structure* (2nd ed). Academic Press, USA.
- Dutta, B., Raghavan, G.S.V., Dev, S.R.S., Liplap, P., Murugesan, R., Anekella, K., Kaushal, T., (2012). A comparative study on the effects of microwave and high electric field pretreatments on drying kinetics and quality of mushrooms. *Drying Technology* 30(8), 891-897.
- Engelen, L., van den Keybus, P.A.M., de Wijk, R.A., Veerman, E.C.I., Amerongen, A.V.N., Bosman, F., (2007). The effect of saliva composition on texture perception of semi-solids. *Archives of Oral Biology* 52, 518-525.
- Ertekin, C., Aydogdu, I., (2003). Neurophysiology of swallowing. *Clinical Neurophysiology* 114(12), 2226-2244.
- Ertugay, M.F., Certel, M., (2000). Moisture sorption isotherms of cereals at different temperatures. *Nahrung/Food* 44(2), 107-109.
- Fagerlund, G., (1973). Determination of specific surface by the BET method. *Matériaux et Construction* 6(3), 239-245.
- Fan, J., Mitchell, J.R., Blanshard, J.M.V., (1996). The effect of sugars on the extrusion of maize grits: I. The role of the glass transition in determining product density and shape. *International Journal of Food Science and Technology* 31, 55-65.
- Farahnaky, A., Farhat, I.A., Mitchell, J.R., Hill, S.E., (2009). The effect of sodium chloride on the glass transition of potato and cassava starches at low moisture contents. *Food Hydrocolloids* 23(6), 1483-1487.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ferrari, C.C., Germer, S.P.M., De Aguirre, J.M., (2012). Effects of spray-drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. *Drying Technology* 30(2), 154-163.
- Ferrua, M.J., Kong, F., Singh, R.P., (2011). Computational modeling of gastric digestion and the role of food material properties. *Trends in Food Science & Technology* 22(9), 480-491.
- Ferry, A.L., Hort, J., Mitchell, J.R., Cook, D.J., Lagarrigue, S., Valles Pamies, B., (2006). Viscosity and flavour perception: Why is starch different from hydrocolloids? *Food Hydrocolloids* 20(6), 855-862.
- Flink, J.M., (1977). Energy analysis in dehydration processes. *Food Technology* 31(3), 76-83.
- Fortes, M., Okos, M.R., (1980). Drying theories: Their bases and limitations as applied to foods and grains, in: Mujumdar, A.S. (Ed.), *Advances in Drying*. Hemisphere Publishing Co., New York, p. 119.
- Gabas, A.L., Menegalli, F.C., Ferrari, F., Telis-Romero, J., (2002). Influence of drying conditions on the rheological properties of prunes. *Drying Technology* 20(7), 1485-1502.
- Garcia Loreda, A.B., Guerrero, S.N., Gomez, P.L., Alzamora, S.M., (2013). Relationships between rheological properties, texture and structure of apple (*Granny Smith var.*) affected by blanching and/or osmotic dehydration. *Food and Bioprocess Technology* 6(2), 475-488.
- Georget, D.M.R., Smith, A.C., Waldron, K.W., (1998). Low moisture thermo-mechanical properties of carrot cell wall components. *Thermochimica Acta* 315(1), 51-60.
- Georget, D.M.R., Smith, A.C., Waldron, K.W., (1999). Thermal transitions in freeze-dried carrot and its cell wall components. *Thermochimica Acta* 332(2), 203-210.
- Georget, D.M.R., Smith, A.C., Waldron, K.W., (2004). The role of mannitol in affecting the thermal transitions in carrot tissue. *Thermochimica Acta* 417(2), 245-249.
- Gibson, J., Beeley, J.A., (1994). Natural and synthetic saliva: A stimulating subject. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews* 12(1), 39-62.
- Gibson, L.G., Ashby, M.F., (1997). *Cellular solids*. University Press, Cambridge.
- Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., Chiralt, A., (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering* 58(1), 33-43.
- Gogoi, B.K., Alavi, S.H., Rizvi, S.S.H., (2000). Mechanical properties of protein-stabilized starch-based supercritical fluid extrudates. *International Journal of Food Properties* 3(1), 37-58.
- Gogus, F., Maskan, M., Kaya, A., (1998). Sorption isotherms of Turkish delight. *Journal of Food Processing and Preservation* 22(5), 345-357.
- Gong, Z., Zhang, M., Sun, J., (2007). Physico-chemical properties of cabbage powder as affected by drying methods. *Drying Technology* 25(5), 913-916.
- Gordon, M., Taylor, J.S., (1952). Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. i. non-crystalline copolymers. *Journal of Applied Chemistry* 2(9), 493-500.
- Gray, D.R., Chinnaswamy, R., (1995). Role of extrusion in food processing, in: Gaonkar, A.G. (Ed.), *Food processing: Recent developments*. ELSEVIER, Glenview, IL, pp. 241-268.
- Gregg, S.J., Sing, K.S.W., (1991). *Adsorption, surface area, and porosity*. Academic Press.
- Grochowicz, Sobczak, (2007). Influence of vegetable-herbal mixture composition and moisture content on strength properties of produced extrudates. *polish journal of food and nutrition sciences* 57, 71-74.
- Guinard, J.X., Marty, C., (1995). Time-intensity measurement of flavor release from a model gel system: Effect of gelling agent type and concentration. *Journal of Food Science* 60(4), 727-730.
- Guraya, H.S., Toledo, R.T., (1996). Microstructural characteristics and compression resistance as indices of sensory texture in a crunchy snack product. *Journal of Texture Studies* 27, 687-701.
- Guyton, A.C., Hall, J.E., (2005). *Textbook of medical physiology* (11 th ed). Saunders.
- Guzman-Tello, R., Cheftel, J.C., (1987). Thiamine destruction during extrusion cooking as an indicator of the intensity of thermal processing. *International Journal of Food Science and Technology* 22, 549-562.
- Hagenimana, A., Ding, X., Fang, T., (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science* 43(1), 38-46.
- Hammami, C., Reni, F., (1997). Determination of freeze-drying process variables for strawberries. *Journal of Food Engineering* 32(2), 133-154.

- Harper, J.M., Tribelhorn, R.E., (1988). Expansion of native cereal starch extrudates, in: Kokini, J.L., Ho, C.-T., Karwe, M.V. (Eds.), *Food Extrusion Science and Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 653-667.
- Hartel, R.W., Shastry, A.V., (1991). Sugar crystallization in food products. *Critical Review, Food Science and Nutrition* 30, 49-112.
- Hawkes, J., Flink, J.M., (1978). Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation* 2(4), 265-284.
- Hayter, A.L., Smith, A.C., (1988). The mechanical properties of extruded food foams. *Journal of Materials Science* 23(2), 736-743.
- Heath, M.R., Prinz, J.F., (1991). *Processing of foods and the sensory evaluation of texture*. Chapman and Hall, Oxford.
- Hoad, C.L., Rayment, P., Cox, E., Wright, P., Butler, M., Spiller, R., Gowland, P., (2009). Investigation of alginate beads for gastro-intestinal functionality, Part 2: *In vivo* characterisation. *Food Hydrocolloid* 23, 833-839.
- Hsieh, F., Huff, H.E., (1994). Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt, and sugar. *Cereal Chemistry* 71(3).
- Hsu, C.-L., Heldman, D.R., (2005). Influence of glass transition temperature on rate of rice starch retrogradation during low-temperature storage. *Journal of Food Process Engineering* 28(5), 506-525.
- Huang, C.T., Clayton, J.T., (1990). Relationships between mechanical properties and microstructure of porous foods: Part I. A review, in: Spiess, W.E.L., Schubert, H. (Eds.), *Engineering and Food, Vol. I. Physical Properties and Process Control*, London, pp. 352-360.
- Huang, L.-I., Zhang, M., (2012). Trends in development of dried vegetable products as snacks. *Drying Technology* 30(5), 448-461.
- Huang, L.-I., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Lim, R.-x., (2011). Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips. *Journal of Food Engineering* 103(3), 279-284.
- Huang, L.-I., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Sun, D.-f., Tan, G.-w., Tang, S., (2009). Studies on decreasing energy consumption for a freeze-drying process of apple slices. *Drying Technology* 27(9), 938-946.
- Huber, G.R., (2000). Twin-Screw Extruders, in: Co., P.T.P. (Ed.), *Extruders in Food Applications*, Lancaster.
- Humphrey, S.P., Williamson, R.T., (2001). A review of saliva: Normal composition, flow, and function. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 85(2), 162-169.
- Hur, S.J., Decker, E.A., McClements, D.J., (2009). Influence of initial emulsifier type on microstructural changes occurring in emulsified lipids during *in vitro* digestion. *Food Chemistry* 114(1), 253-262.
- Hur, S.J., Lim, B.O., Decker, E.A., McClements, D.J., (2011). *In vitro* human digestion models for food applications. *Food Chemistry* 125, 1-12.
- Hutchinson, R.J., Siodlak, G.D.E., Smith, A.C., (1987). Influence of processing variables on the mechanical properties of extruded maize. *Journal of Materials Science* 22(11), 3956-3962.
- Icoz, D.Z., Kokini, J.L., (2008). State diagrams of foods, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Ilo, S., Schoenlechner, R., Berghofe, E., (2000). Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites* 51(1-2), 97-110.
- Islam, M.N., Flink, J.N., (1982). Dehydration of potato II. Osmotic concentration and its effect on air drying behaviour. *International Journal of Food Science and Technology* 17(3), 387-403.
- İspir, A., Toğrul, İ.T., (2009). Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering Research and Design* 87(2), 166-180.
- Iturriaga, L., Lopez, B., Añon, M.a., (2004). Thermal and physicochemical characterization of seven argentine rice flours and starches. *Food Research International* 37(5), 439-447.
- Iwaniw, D.C., Mittal, G.S., (1990). Process optimization of freeze-dried strawberries. *Canadian Agricultural Engineering* 32(2), 323-328.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Jamroz, J., Hajnos, M., Sokolowska, Z., (1999). Application of the mercury porosimetry to the porosity study of wheat flour extrudates. *Institute of Agrophysics* 13, 445-449.
- Jangam, S.V., (2011). An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. *Drying Technology* 29(12), 1343-1357.
- Jangam, S.V., Mujumdar, A.S., (2010). Basic Concepts and Definitions, in: Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, A.S. (Eds.), *Drying of Foods, Vegetables and Fruits, Volume I*, Singapore, pp. 3-29.
- Janssen, A.M., van de Pijpekampa, A.M., Labiausse, D., (2009). Differential saliva induced breakdown of starch filled protein gels in relation to sensory perception. *Food Hydrocolloids* 23, 795-805.
- Jaros, D., Rohm, H., Strobl, M., (2000). Appearance Properties—A Significant Contribution to Sensory Food Quality? *LWT - Food Science and Technology* 33(4), 320-326.
- Jaya, S., Das, H., (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology* 21(7), 1215-1234.
- Jayaraman, K.S., Das Gupta, D.K., (1992). Dehydration of fruits and vegetables - Recent developments in principles and techniques. *Drying Technology* 10(1), 1-50.
- Jayaraman, K.S., Gupta, D.K.D., Rao, N.B., (1990). Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. *International Journal of Food Science & Technology* 25(1), 47-60.
- Jin, Z., Hsieh, F., Huff, H.E., (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *Journal of Cereal Science* 22, 185-194.
- Johari, G.P., Hallbrucker, A., Mayer, E., (1987). The glass-liquid transition of hyperquenched water. *Nature* 330(6148), 552-553.
- Jouppila, K., Roos, Y.H., (1997). The physical state of amorphous corn starch and its impact on crystallization. *Carbohydrate Polymers* 32(2), 95-104.
- Jouppila, K., Roos, Y.H., (2008). Crystallization: Measurements, Data, and Prediction, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Jozinovic, A., Šubaric, D., Ackar, D., Babic, J., Planinic, M., Pavokovic, M., Blažic, M., (2012). Effect of screw configuration, moisture content and particle size of corn grits on properties of extrudates. *Croatian Journal of Food Science and Technology* 4(2), 95-101.
- Jyothi, A.N., Sheriff, J.T., Sajeev, M.S., (2009). Physical and functional properties of arrowroot starch extrudates. *Journal of Food Science* 74(2), E97-E104.
- Kadan, R.S., Bryant, R.J., Pepperman, A.B., (2003). Functional properties of extruded rice flours. *Journal of Food Science* 68(5), 1669-1672.
- Kalab, M., Allan-Wojtas, P., Miller, S.S., (1995). Microscopy and other imaging techniques in food structure analysis. *Trends in Food Science and Technology* 6, 177-186.
- 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.
- 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.
- Kambiranda, D., Vasanthaiah, H., Basha, S.M., (2011). Relationship between acid invertase activity and sugar content in grape species. *Journal of Food Biochemistry* 35(6), 1646-1652.
- Kamst, G.F., Bonazzi, C., Vasseur, J., Bimbenet, J.J., (2002). Effect of deformation rate and moisture content on the mechanical properties of rice grains. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 45(1), 145-151.
- Kapsalis, J.G., (1987). Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms, in: Rockland, L.B., Beuchat, L.R. (Eds.), *Water Activity: Theory and Applications to Food*. (Marcel Dekker Inc, New York, USA, pp. 173-213.
- Karathanos, V., Anglea, S., Karel, M., (1993). Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technology: An International Journal* 11(5), 1005-1023.
- Karathanos, V.T., Anglea, S.A., Karel, M., (1996a). Structural collapse of plant materials during freeze-drying. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 47(5), 1451-1461.

- Karathanos, V.T., Kanellopoulos, N.K., Belessiotis, V.G., (1996b). Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. *Journal of Food Engineering* 29(2), 167-183.
- Karathanos, V.T., Kostaropoulos, A.E., Saravacos, D.G., (1995). Air drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology* 13, 1503-1521.
- Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., Saravacos, D.G., (1996c). Hygrothermal and quality properties applicable to drying. Data sources and measurement techniques. *Drying Technology: An International Journal* 14(6), 1403 - 1418.
- Karathanos, V.T., Saravacos, G.D., (1993). Porosity and pore size distribution of starch materials. *Journal of Food Engineering* 18(3), 259-280.
- Karel, M., (1999). Food research tasks at the beginning of the new Millennium-a personal vision, in: Roos, Y.H., Leslie, R.B., and Lillford, P.J. (Ed.), *Water Management in the Design and Distribution of Quality of Foods*. Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania, pp. 535-559.
- Karkle, E.L., Alavi, S., Dogan, H., (2012). Cellular architecture and its relationship with mechanical properties in expanded extrudates containing apple pomace. *Food Research International* 46(1), 10-21.
- Katsavou, I.D., Krokida, M., Ziomas, I., (2011). Investigation of the dependence of structural and mechanical properties of cement-bonded bauxite refractories on their process conditions. *International Journal of Materials Research* 102, 1303-1311.
- Kaur, L., Singh, N., Sodhi, N.S., (2002). Some properties of potatoes and their starches II. Morphological, thermal and rheological properties of starches. *Food Chemistry* 79(2), 183-192.
- Kaya, A., Aydin, O., Demirtas, C., (2007). Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering* 96(4), 517-524.
- Kaymak-Ertekin, F., Gedik, A., (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *LWT - Food Science and Technology* 37(4), 429-438.
- Keetels, C.J.A.M., Visser, K.A., van Vliet, T., Jurgens, A., Walstra, P., (1996). Structure and mechanics of starch bread. *Journal of Cereal Science* 24(1), 15-26.
- Kemp, S.E., Hollowood, T., Hort, J., (2009). *Sensory evaluation. A practical Handbook*. Wiley-Blackwell, Singapore.
- Kerdpi boon, S., Devahastin, S., (2007). Fractal characterization of some physical properties of a food product under various drying conditions. *Drying Technology* 25, 135-146.
- Kerdpi boon, S., Devahastin, S., Kerr, W.L., (2007). Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying. *Journal of Food Engineering* 83(4), 570-580.
- Khalloufi, S., Almeida-Rivera, C., Bongers, P., (2009). A theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function of shrinkage and collapse phenomena during drying. *Food Research International* 42(8), 1122-1130.
- Khalloufi, S., Giasson, J., Ratti, C., (2000). Water activity of freeze dried mushrooms and berries. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada* 42(1), 51-56.
- Khanal, R.C., Howard, L.R., Prior, R.L., (2009). Procyanidin content of grape seed and pomace, and total anthocyanin content of grape pomace as affected by extrusion processing. *Journal of Food Science* 74(6), H174-H182.
- Khin, M.M., Zhou, W., Perera, C.O., (2006). A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. *Journal of Food Engineering* 77(1), 84-95.
- Khraisheh, M.A.M., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A., (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International* 37(5), 497-503.
- Kiileit, U., (1994). Vitamin retention in extrusion cooking. *Food Chemistry* 49, 149-155.
- Kiranoudis, C.T., Tsami, E., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 20, 55-74.
- Koc, B., Eren, I., Kaymak Ertekin, F., (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering* 85(3), 340-349.
- Koliandris, A., Lee, A., Ferry, A.-L., Hill, S., Mitchell, J., (2008). Relationship between structure of hydrocolloid gels and solutions and flavour release. *Food Hydrocolloids* 22(4), 623-630.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Kong, F., Singh, R.P., (2008a). Disintegration of solid foods in human stomach. *Journal of Food Science* 73(5), R67-R80.
- Kong, F., Singh, R.P., (2008b). A model stomach system to investigate disintegration kinetics of solid foods during gastric digestion. *Journal of Food Science* 73(5), E202-E210.
- Kong, F., Singh, R.P., (2010). A human gastric simulator (HGS) to study food digestion in human stomach. *Journal of Food Science* 75(9), E627-E635.
- Kramer, A., (1973). Food texture - Definition, measurement and relation to other food quality attributes, in: Kramer, A., Szczesniak, A.S. (Eds.), *Texture Measurements of Foods*. D. Reidel Publishing Company, Netherlands.
- Krokida, M.K., Foundoukidis, E., Maroulis, Z., (2004). Drying constant: Literature data compilation for foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 61, 321-330.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., (1998a). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering* 35(4), 369-380.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., (2000a). Compression analysis of dehydrated agricultural products. *Drying Technology: An International Journal* 18(1), 395 - 408.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., (2000b). Effect of osmotic dehydration on viscoelastic properties of apple and banana. *Drying Technology: An International Journal* 18(4), 951 - 966.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (2003). Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59(4), 391-403.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (2000c). Drying related properties of apple. *Drying Technology* 18(6), 1251 - 1267.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (2000d). Effect of pretreatment on color of dehydrated products. *Drying Technology* 18(6), 1239 - 1250.
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology* 15(10), 2441-2458.
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., (2000). Quality changes during drying of food materials, in: Mujumdar, A.S. (Ed.), *Drying technology in agriculture and food sciences* Enfield, NH: Science. .
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (1998b). Viscoelastic behavior of dehydrated carrot and potato. *Drying Technology: An International Journal* 16(3), 687 - 703.
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science & Technology* 36(1), 53-59.
- Kumar, N., Sarkar, B.C., Sharma, H.K., (2010). Development and characterization of extruded product using carrot pomace and rice flour. *International Journal of Food Engineering* 6(3).
- Labuza, T.P., Kaanane, A., Chen, J.Y., (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science* 50(2), 385-392.
- 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.
- Lawless, H.T., Heymann, H., (2010). *Sensory Evaluation of Food, Principles and Practices*. Springer, USA.
- Lazarides, H.N., Katsanidis, E., Nickolaidis, A., (1995). Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering* 25, 151-166.
- Lazarides, H.N., Mavroudis, N.E., (1995). Freeze/thaw effects on mass transfer rates during osmotic dehydration. *Journal of Food Science* 60(4), 826-857.
- Lazou, A., Krokida, M., (2010). 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.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.
- LeBail, A., Boillereaux, L., Davenel, A., Hayert, M., Lucas, T., Monteau, J.Y., (2003). Phase transition in foods: effect of pressure and methods to assess or control phase transition. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4, 15-24.
- Lee, S.-W., Rhee, C., (2007). Effect of heating condition and starch concentration on the structure and properties of freeze-dried rice starch paste. *Food Research International* 40(2), 215-223.
- Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Grau, A.A., Briones, V., Villalobos, R., Vega-Galvez, A., (2009). Effect of osmotic pretreatment on hot air drying kinetics and quality of chilean papaya (*Carica pubescens*). *Drying Technology* 27(10), 1105-1115.
- Lenart, A., Dbrowska, R., (1999). Kinetics of osmotic dehydration of apples with pectin coatings. *Drying Technology* 17(7), 1359-1373.
- Lenart, A., Flink, J.M., (1984). Osmotic concentration of potato. *International Journal of Food Science & Technology* 19(1), 65-89.
- Levine, H., Slade, L., (1989). Influence of the glassy and rubbery state of the thermal, mechanical, and structural properties of doughs and baked products, in: Faubion, H.F.J.M. (Ed.), *Dough Rheology and Baked Product Texture, Theory and Practice*, New York, pp. 157–330.
- Lewicki, P.P., (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology* 17(4), 153-163.
- Lewicki, P.P., (2008). Data and models of water activity II: Solid foods, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Lewicki, P.P., Lenart, A., (1995). Osmotic dehydration of fruits and vegetables, in: Mujumdar, A.S. (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, New York, pp. 691-713.
- Lewicki, P.P., Lukaszuk, A., (2000). Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Engineering* 45, 119-126.
- Lewicki, P.P., Pawlak, G., (2003). Effect of drying on microstructure of plant tissue. *Drying Technology* 21(4), 657-683.
- Li, Q., Li, D., Wang, L.-j., Özkan, N., Mao, Z.-h., (2010). Dynamic viscoelastic properties of sweet potato studied by dynamic mechanical analyzer. *Carbohydrate Polymers* 79(3), 520-525.
- Lievonen, S.M., Roos, Y.H., (2002). Water sorption of food models for studies of glass transition and reaction kinetics. *Journal of Food Science* 67(5), 1758-1766.
- Liu-ping, F., Zhang, M., Mujumdar, A.S., (2007). Storage stability of carrot chips. *Drying Technology* 25(9), 1537-1543.
- Liu, Q., Charlet, G., Yelle, S., Arul, J., (2002). Phase transition in potato starch-water system. I. Starch gelatinization at high moisture level. *Food Research International* 35, 397-407.
- 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.
- Lomauro, C.J., Bakshi, A.S., Labuza, T.P., (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I. Fruit, vegetable and meat products. *LWT - Food Science and Technology* 18, 111-117.
- Lozano, J.E., Rotstein, E., Urbicain, M.J., (1980). Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. *Journal of Food Science* 45(5), 1403-1407.
- Lozano, J.E., Rotstein, E., Urbicain, M.J., (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science* 48(5), 1497-1502.
- Lue, S., Huff, H.E., (1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: Effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chemistry* 68(3), 227-234.
- Luyet, B., Rasmussen, D., (1968). Study by Differential Thermal Analysis of the temperatures of instability of rapidly cooled solutions of glycerol, ethylene glycol, sucrose and glucose. *Biodynamica* 10, 167-191.

## BIBLIOΓΡΑΦΙΑ

- Macagno, E.O., Christensen, J., Lee, C.L., (1982). Modeling the effect of wall movement on absorption in the intestine. *American Journal of Physiology - Gastrointestinal and Liver Physiology* 243, G541-550.
- Macierzanka, A., Sancho, A.I., Mills, E.N.C., Rigby, N.M., Mackie, A.R., (2009). Emulsification alters simulated gastrointestinal proteolysis of [small beta]-casein and [small beta]-lactoglobulin. *Soft Matter* 5(3), 538-550.
- Malone, M.E., Appelqvist, I.A.M., Norton, I.T., (2003). Oral behaviour of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations. *Food Hydrocolloids* 17(6), 763-773.
- Marciani, L., Wickham, M.S.J., Bush, D., Faulks, R., Wright, J., Fillery-Travis, A.J., Spiller, R.C., Gowland, P.A., (2006). Magnetic resonance imaging of the behaviour of oil-in-water emulsions in the gastric lumen of man. *British Journal of Nutrition* 95(02), 331-339.
- Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., (2001). *Transport Properties of Foods* (1st ed). Marcel Dekker, New York, USA.
- Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., (2003). *Food Process Design* (1st ed). Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
- 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.
- Marques, L.G., Ferreira, M.C., Freire, J.T., (2007). Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 46(5), 451-457.
- Marques, L.G., Freire, J.T., (2005). Analysis of freeze-drying of tropical fruits. *Drying Technology: An International Journal* 23(9), 2169 - 2184.
- Marques, L.G., Silveira, A.M., Freire, J., (2006). Freeze-drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology* 24(4), 457-463.
- Martínez, V.Y., Nieto, A.B., Viollaz, P.E., Alzamora, S.M., (2005). Viscoelastic behavior of melon tissue as influenced by blanching and osmotic dehydration. *Journal of Food Science* 70(1), E12-E18.
- Martynenko, A., (2008). The system of correlations between moisture, shrinkage, density, and porosity. *Drying Technology* 26(12), 1497-1500.
- Mayor, L., Cunha, R.L., Sereno, A.M., (2007). Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin. *Food Research International* 40(4), 448-460.
- Mayor, L., Moreira, R., Chenlo, F., Sereno, A.M., (2006). Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. *Journal of Food Engineering* 74, 253-262.
- Mayor, L., Moreira, R., Sereno, A.M., (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering* 103(1), 29-37.
- 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.
- McClements, D.J., Decker, E.A., Park, Y., (2008). Controlling lipid bioavailability through physicochemical and structural approaches. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 49(1), 48-67.
- McLaughlin, C.P., Magee, T.R.A., (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering* 35, 267-280.
- Medeni, M., Aylin, A., (2012). *Advances in food extrusion technology* CRC Press, Boca Raton, FL.
- Meilgaard, M., Civille, G.V., Carr, B.T., (1999). *Sensory evaluation techniques, 3rd edition*. CRC Press, Boca Raton, New York.
- Mercuri, A., Faulks, R., Craig, D., Barker, S., M., W., (2009). Assessing drug release and dissolution in the stomach by means of dynamic gastric model: A biorelevant approach. *Journal of Pharmacy and Pharmacology* 61.
- Methakhup, S., Chiewchan, N., Devahastin, S., (2005). Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. *LWT - Food Science and Technology* 38(6), 579-587.
- Meyers, M.A., Chawla, K.K., (1999). *Mechanical Behavior of Materials. Chapter 2*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, USA.



- Mezger, T.G., (2006). *The Rheology Handbook* (2nd ed). Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover, Germany.
- Michailidis, P.A., Krokida, M.K., Bisharat, G.I., Marinos-Kouris, D., Rahman, M.S., (2008a). Measurement of density, shrinkage, and porosity, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Michailidis, P.A., Krokida, M.K., Rahman, M.S., (2008b). Data and models of density, shrinkage, and porosity, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Mills, T., Spyropoulos, F., Norton, I.T., Bakalis, S., (2011). Development of an *in-vitro* mouth model to quantify salt release from gels. *Food Hydrocolloids* 25(1), 107-113.
- Mohsenin, N., (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials, Structure, Physical Characteristics, and Mechanical Properties*. Gordon and Breach Science, New York.
- Monsalve-Gonzalez, A., Barbosa-Canovas, G.V., Cavalieri, R.P., (1993). Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods. *Journal of Food Science* 58(5), 1118-1124.
- Moraga, G., Martvnez-Navarrete, N., Chiralt, A., (2004). Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment. *Journal of Food Engineering* 62(4), 315-321.
- 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.
- Moreno, J., Simpson, R., Baeza, A., Morales, J., Munoz, C., Sastry, S., Almonacid, S., (2012). Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries (cv. *Camarosa*). *LWT - Food Science and Technology* 45(2), 148-154.
- Morris, E.R., (1994). Rheological and organoleptic properties of food hydrocolloids, in: Doi, E. (Ed.), *Food hydrocolloids structures, properties, and functions*. Plenum Press, New York, pp. 201-210.
- Mounir, S., Allaf, T., Mujumdar, A.S., Allaf, K., (2012). Swell drying: Coupling Instant Controlled Pressure Drop DIC to standard convection drying processes to intensify transfer phenomena and improve quality-An overview. *Drying Technology* 30(14), 1508-1531.
- Muir, J.G., O'Dea, K., (1992). Measurement of resistant starch: factors affecting the amount of starch escaping digestion *in vitro*. *The American Journal of Clinical Nutrition* 56(1), 123-127.
- Mulet, A., Garcia-Reverter, J., Bon, J., Berna, A., (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology* 18(6), 1201-1219.
- Nor, N.M., Carr, A., Hardacre, A., Brennan, C.S., (2013). The development of expanded snack product made from pumpkin flour-corn grits: Effect of extrusion conditions and formulations on physical characteristics and microstructure. *Foods, Open access* 2, 160-169.
- Normand, F.L., Marshall, W.E., (1989). Differential Scanning Calorimetry of whole grain milled rice and milled rice flour. *Cereal Chemistry* 66(4), 317-320.
- Obatolu, V.A., Skonberg, D.I., Camire, M.E., Dougherty, M.P., (2005). Effect of moisture content and screw speed on the physical chemical properties of an extruded crab-based snack. *Food Science and Technology International* 11(2), 121-127.
- Obatolu Veronica, A., Omueti Olusola, O., Adebowale, E.A., (2006). Qualities of extruded puffed snacks from maize/soybean mixture. *Journal of Food Process Engineering* 29(2), 149-161.
- Ogeeka, D., (2000-2006). The use of innovative technologies and improved vocational training for the production and marketing of fresh fruits and vegetables.
- Oikonomopoulou, V.P., Krokida, M.K., (2012). Structural properties of dried potatoes, mushrooms, and strawberries as a function of freeze-drying pressure. *Drying Technology* 30(4), 351-361.
- Oikonomopoulou, V.P., Krokida, M.K., Karathanos, V.T., (2011). Structural properties of freeze-dried rice. *Journal of Food Engineering* 107(3-4), 326-333.
- Olku, J., Rha, C., (1978). Gelatinization of starch and wheat flour starch-a review. *Food Chemistry* 3, 293-311.
- Onwulata, C.I., Konstance, R.P., Smith, P.W., Holsinger, V.H., (2001). Co-extrusion of dietary fiber and milk proteins in expanded corn products. *LWT - Food Science and Technology* 34(7), 424-429.
- Ormerod, A.P., Ralfs, J.D., Jackson, R., Milne, J., Gidley, M.J., (2004). The influence of tissue porosity on the material properties of model plant tissues. *Journal of Materials Science* 39(2), 529-538.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Pagano, A.M., Mascheroni, R.H., (2005). Sorption isotherms for amaranth grains. *Journal of Food Engineering* 67(4), 441-450.
- Pal, A., Indireskumar, K., Schwizer, W., Abrahamsson, B., Fried, M., Brasseur, J.G., (2004). Gastric flow and mixing studied using computer simulation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 271(1557), 2587-2594.
- Palipane, K.B., Driscoll, R.H., (1993). Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. *Journal of Food Engineering* 18(1), 63-76.
- Panagiotou, N.M., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., (1998). Mass transfer modelling of the osmotic dehydration of some fruits. *International Journal of Food Science & Technology* 33(3), 267-284.
- Panagiotou, N.M., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., (1999). Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology* 17(1), 175-189.
- Paramera, E.I., Konteles, S.J., Karathanos, V.T., (2011). Stability and release properties of curcumin encapsulated in *Saccharomyces cerevisiae*,  $\beta$ -cyclodextrin and modified starch. *Food Chemistry* 125(3), 913-922.
- Pastor-Cavada, E., Drago, S.R., Gonzalez, R.J., Juan, R., Pastor, J.E., Alaiz, M., Vioque, J., (2011). Effects of the addition of wild legumes (*Lathyrus annuus* and *Lathyrus clymenum*) on the physical and nutritional properties of extruded products based on whole corn and brown rice. *Food Chemistry* 128(4), 961-967.
- Perdon, A., Siebenmorgen, T.J., Mauromoustakos, A., (2000). Glassy state transition and rice drying: Development of a brown rice state diagram. *Cereal Chemistry* 77(6), 708-713.
- Pereira, L.M., Carmello-Guerreiro, S.M., Hubinger, M.D., (2009). Microscopic features, mechanical and thermal properties of osmotically dehydrated guavas. *LWT - Food Science and Technology* 42(1), 378-384.
- Piotrowski, D., Lenart, A., (1998). The influence of constant and variable conditions on the drying kinetics of apples. *Drying Technology* 16(3-5), 761-778.
- Praveen Kumar, D.G., Umesh Hebbar, H., Sukumar, D., Ramesh, M.N., (2005). Infrared and hot-air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation* 29(2), 132-150.
- Preetha, A., Banerjee, R., (2005). Comparison of artificial saliva substitutes. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs* 18(2).
- Prinz, J.F., Janssen, A.M., de Wijk, R.A., (2007). *In vitro* simulation of the oral processing of semi-solid foods. *Food Hydrocolloids* 21(3), 397-401.
- Puspitowati, S., Driscoll, R.H., (2007). Effect of degree of gelatinisation on the rheology and rehydration kinetics of instant rice produced by freeze drying. *International Journal of Food Properties* 10(3), 445 - 453.
- Rabe, S., Krings, U., Berger, R.G., (2004). *In vitro* study of the influence of physiological parameters on dynamic in-mouth flavour release from liquids. *Chemical Senses* 29(2), 153-162.
- Rahman, M.S., (2001). Toward prediction of porosity in foods during drying: A brief review. *Drying Technology* 19(1), 1-13.
- Rahman, M.S., (2003). A theoretical model to predict the formation of pores in foods during drying. *International Journal of Food Properties* 6(1), 61 - 72.
- Rahman, M.S., (2005). Dried food properties: Challenges ahead. *Drying Technology* 23(4), 695-715.
- Rahman, M.S., (2006). State diagram of foods: Its potential use in food processing and product stability. *Trends in Food Science & Technology* 17, 129-141.
- Rahman, M.S., (2008a). Food Properties: An Overview, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Rahman, M.S., (2008b). Glass transition data and models of foods, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Rahman, M.S., Al-Amri, O.S., Al-Bulushi, I.M., (2002). Pores and physico-chemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying. *Journal of Food Engineering* 53(4), 301-313.
- Rahman, M.S., McCarthy, O.J., (1999). A classification of food properties. *International Journal of Food Properties* 2(2), 93-99.

- Rahman, M.S., Perera, C.O., (1999). Drying and food preservation, *Handbook of Food Preservation*. Marcel Dekker, New York, pp. 173-216.
- Rahman, M.S., Sablani, S.S., (2003). Structural characteristics of freeze-dried abalone: Porosimetry and puncture test. *Food and Bioproducts Processing* 81(4), 309-315.
- Rahman, M.S., Sablani, S.S., (2008). Water activity measurement methods of foods, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Rahman, S., Potluri, L., (1990). Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering* 12(2), 133-143.
- Ramesh, M.N., (2003). Moisture transfer properties of cooked rice during drying. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 36(2), 245-255.
- Ramírez Ortiz, M.E., San Martín-Martínez, E., Martínez Padilla, L.P., (2008). Rheological and thermal properties of extruded mixtures of rice starch and isolated soy protein. *Starch - Stärke* 60(10), 577-587.
- Ramos, I.N., Silva, C.L.M., Sereno, A.M., Aguilera, J.M., (2004). Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. *Journal of Food Engineering* 62(2), 159-164.
- Rampersad, R., Badrie, N., Comissiong, E., (2003). Physico-chemical and sensory characteristics of flavored snacks from extruded cassava/pigeonpea flour. *Journal of Food Science* 68(1), 363-367.
- Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., (1995). *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker Inc, New York, USA.
- Rao, V.N.M., (1992). Classification, description and measurements of viscoelastic properties of solid food, in: Rao, M.A., Steffe, J.F. (Eds.), *Viscoelastic properties of foods* Elsevier, London, pp. 3-76.
- Raoult-Wack, A.-L., Guilbert, S., Maguer, M.L., Rios, G., (1991). Simultaneous water and solute transport in shrinking media - Part 1. Application to dewatering and impregnation soaking process analysis (Osmotic Dehydration). *Drying Technology* 9(3), 589-612.
- Ratnayake, W.S., Jackson, D.S., (2008). Chapter 5 Starch gelatinization, in: Steve, L.T. (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press, pp. 221-268.
- Ratti, C., (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 23(1), 91-105.
- Ratti, C., (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering* 49(4), 311-319.
- Reddy, B.S., Chakraverty, A., (2004). Equilibrium moisture characteristics of raw and parboiled paddy, brown rice, and bran. *Drying Technology: An International Journal* 22(4), 837 - 851.
- Rewthong, O., Soponronnarit, S., Taechapiroj, C., Tungtrakul, P., Prachayawarakorn, S., (2011). Effects of cooking, drying and pretreatment methods on texture and starch digestibility of instant rice. *Journal of Food Engineering* 103(3), 258-264.
- Rhim, J.-W., Koh, S., Kim, J.-M., (2011). Effect of freezing temperature on rehydration and water vapor adsorption characteristics of freeze-dried rice porridge. *Journal of Food Engineering* 104(4), 484-491.
- Riaz, M.N., (2000). Introduction to extruders and their principles, in: Co., P.T.P. (Ed.), *Extruders in Food Applications*, Lancaster.
- Risvi, S.S.H., (1995). Thermodynamic properties of foods in dehydration, in: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H. (Eds.), *Engineering properties of foods*, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 223-309.
- Riva, M., Campolongo, S., Leva, A.A., Maestrelli, A., Torreggiani, D., (2005). Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International* 38(5), 533-542.
- Riva, M., Masi, P., (1988). The influence of the blanching procedure on the quality and shelf-life of dried apples, *Progress in food preservation processes* Brussels: CERIA, pp. 31-38.
- Robin, F., Schuchmann, H.P., Palzer, S., (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology* 28(1), 23-32.
- Rocha-Guzman, N.E., Gallegos-Infante, J.A., Gorzalez-Laredo, R.F., Castillo-Antonio, P.A., Delgado-Licon, E., Ibarra-Perez, F., (2004). Functional properties of three common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars stored under accelerated conditions followed by extrusion. *LWT - Food Science and Technology* 39, 6-10.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Roos, Y., Karel, M., (1990). Differential Scanning Calorimetry study of phase transitions affecting the quality of dehydrated materials. *Biotechnology Progress* 6(2), 159-163.
- Roos, Y., Karel, M., (1991). Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. *Journal of Food Science* 56(1), 38-43.
- Roos, Y.H., (1987). Effect of moisture on the thermal behavior of strawberries studied using Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Food Science* 52(1), 146-149.
- Roos, Y.H., (1995). *Phase Transitions in Foods* (1st ed). Academic Press, London, UK.
- Ross, K.A., Campanella, O.H., Okos, M.R., (2002). The effect of porosity on glass transition measurement. *International Journal of Food Properties* 5(3), 611-628.
- Rossen, J.L., Miller, R.C., (1973). Food extrusion. *Food Technology* 27(8), 46-53.
- Rowland, S.P., (1980). *Water in polymers*, Washington DC, USA.
- 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/Starke* 53, 147-154.
- Sa, M.M., Sereno, A.M., (1994). Glass transitions and state diagrams for typical natural fruits and vegetables. *Thermochimica Acta* 246(2), 285-297.
- Sablani, S.S., (2008). Gelatinization of starch, in: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*. Taylor & Francis Group, New York.
- Sablani, S.S., Bruno, L., Kasapis, S., Symaladevi, R.M., (2009). Thermal transitions of rice: Development of a state diagram. *Journal of Food Engineering* 90(1), 110-118.
- Sablani, S.S., Kasapis, S., Rahman, M.S., (2007a). Evaluating water activity and glass transition concepts for food stability. *Journal of Food Engineering* 78(1), 266-271.
- Sablani, S.S., Rahman, M.S., Al-Kuseibi, M.K., Al-Habsi, N.A., Al-Belushi, R.H., Al-Marhubi, I., Al-Amri, I.S., (2007b). Influence of shelf temperature on pore formation in garlic during freeze-drying. *Journal of Food Engineering* 80(1), 68-79.
- Sablani, S.S., Shrestha, A.K., Bhandari, B.R., (2008). A new method of producing date powder granules: Physicochemical characteristics of powder. *Journal of Food Engineering* 87(3), 416-421.
- 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.
- Saduikov, R.A., Migunov, V.V., Karpov, A.M., Golubev, L.G., Pobedimsky, D.G., (1985). Study and theoretical modelling of the drying of the aminoacids – The products of microbial synthesis. *Acta Biotechnologica* 5(4), 363-373.
- Saeleaw, M., Durrschmid, K., Schleining, G., (2012). The effect of extrusion conditions on mechanical-sound and sensory evaluation of rye expanded snack. *Journal of Food Engineering* 110(4), 532-540.
- Sahin, S., Sumnu, S.G., (2006). *Physical Properties of Foods*, San Marcos, California.
- San Marin, M.B., Fernandez, T., Mate, J., Virseda, P., (2001). Adsorption equilibrium moisture characteristics of rough rice. *Drying Technology* 19(3&4), 681-690.
- Sandoval, A.J., Nuñez, M., Müller, 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.
- Sansiribhan, S., Devahastin, S., Soponronnarit, S., (2012). Generalized microstructural change and structure-quality indicators of a food product undergoing different drying methods and conditions. *Journal of Food Engineering* 109, 148-154.
- Sant'Ana, H.M.P., Stringheta, P.C., Brandão, S.C.C., Cordeiro de Azeredo, R.M., (1998). Carotenoid retention and vitamin A value in carrot (*Daucus carota L.*) prepared by food service. *Food Chemistry* 61(1-2), 145-151.
- Saravacos, G.D., (1967). Effect of the drying method on the water sorption of dehydrated apple and potato. *Journal of Food Science* 32(1), 81-84.
- Sarkar, P., Setia, N., Choudhury, G.S., (2011). Extrusion processing of cactus pear. *Advance Journal of Food Science and Technology* 3(2), 102-110.

- Savage, G.P., Catherwood, D.J., (2007). Determination of oxalates in Japanese taro corms using an in vitro digestion assay. *Food Chemistry* 105(1), 383-388.
- Schenz, T.W., (1995). Glass transitions and product stability--An overview. *Food Hydrocolloids* 9(4), 307-315.
- Schipper, R.G., Silletti, E., Vingerhoeds, M.H., (2007). Saliva as research material: Biochemical, physicochemical and practical aspects. *Archives of Oral Biology* 52, 1114-1135.
- Sharma, K., Karki, S., Thakur, N., Attri, S., (2012). Chemical composition, functional properties and processing of carrot-A review. *Journal of Food Science and Technology* 49(1), 22-32.
- Shi, J., Maguer, M.L., (2002). Osmotic dehydration of foods: Mass transfer and modeling aspects. *Food Reviews International* 18(4), 305-335.
- Singh, B., Panesar, P.S., Nanda, V., (2008). Osmotic dehydration kinetics of carrot cubes in sodium chloride solution. *International Journal of Food Science & Technology* 43(8), 1361-1370.
- Singh, B., Sekhon, K.S., Singh, N., (2007a). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry* 100(1), 198-202.
- Singh, J., Dartois, A., Kaur, L., (2010). Starch digestibility in food matrix: A review. *Trends in Food Science & Technology* 21(4), 168-180.
- Singh, S., Gamlath, S., Wakeling, L., (2007b). Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 916-929.
- Siripatrawan, U., Jantawat, P., (2006). Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models. *Food Science and Technology International* 12(6), 459-465.
- Smet, K., Contreras, R., (2005). Human antimicrobial peptides: Defensins, cathelicidins and histatins. *Biotechnology Letters* 27(18), 1337-1347.
- Solomon, W.K., (2008). Effect of barrel temperature on rehydration kinetics of direct-expanded tef flour breakfast cereal. *Journal of Food Process Engineering* 31(4), 469-487.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A., Taechapairoj, C., (2006). Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering* 75(3), 423-432.
- Sreekala, M.S., Kumaran, M.G., Thomas, S., (2002). Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33(6), 763-777.
- Stanley, D.W., DeMan, J.M., (1978). Structural and mechanical properties of textured proteins. *Journal of Texture Studies* 9, 59-76.
- Steel, C.J., Vernaza Leoro, M.G., Schmiele, M., Ferreira, R.E., Chang, Y.K., (2012). Thermoplastic extrusion in food processing, in: El-Sonbati, A.Z. (Ed.), *Thermoplastic Elastomers*. InTech, pp. 265-290.
- Sturm, B., Hofacker, W.C., Hensel, O., (2012). Optimizing the drying parameters for hot-air-dried apples. *Drying Technology* 30(14), 1570-1582.
- Sun, Z., Yang, W., Siebenmorgen, T., Stelwagen, A., Clossen, A., (2002). Thermomechanical transitions of rice kernels. *Cereal Chemistry* 79(3), 349-353.
- Syamaladevi, R.M., Sablani, S.S., Tang, J., Powers, J., Swanson, B.G., (2010). Water sorption and glass transition temperatures in red raspberry (*Rubus idaeus*). *Thermochimica Acta* 503-504, 90-96.
- Szczesniak, A.S., (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference* 13, 215-225.
- Tabtiang, S., Prachayawarakon, S., Soponronnarit, S., (2012). Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. *Drying Technology* 30(1), 20-28.
- Takahashi, T., Yokawa, T., Ishihara, N., Okubo, T., Chu, D.-C., Nishigaki, E., Kawada, Y., Kato, M., Raj Juneja, L., (2009). Hydrolyzed guar gum decreases postprandial blood glucose and glucose absorption in the rat small intestine. *Nutrition Research* 29(6), 419-425.
- Tharakan, A., Norton, I.T., Fryer, P.J., Bakalis, S., (2010). Mass transfer and nutrient absorption in a simulated model of small intestine. *Journal of Food Science* 75(6), E339-E346.
- 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.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Torreggiani, D., (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International* 26(1), 59–68.
- Tortoe, C., Orchard, J., Beezer, A., (2009). Effect of agitation and antagonism between sucrose and sodium chloride on mass transfer during osmo-dehydration in plant materials. *International Food Research Journal* 16, 521-530.
- Van Arsdel, W.B., Copley, M.J., (1964). *Food Dehydration* (1st ed). AVI Publishing, Westport, Connecticut.
- Van Brakel, J., (1979). The choice and design of dryers - A personal view. *The Chemical Engineer*, 493-495.
- Van Hook, A., (1961). *Crystallization. Theory and Practice*, Reinhold, New York.
- Van Nieuw Amerongen A, Bolscher JGM, ECI., V., (2004). Salivary proteins: protective and diagnostic value in cariology? . *Caries Research* 38, 247-253.
- Van Ruth, S.M., Roozen, J.P., (2000). Influence of mastication and saliva on aroma release in a model mouth system. *Food Chemistry* 71(3), 339-345.
- Van Ruth, S.M., Roozen, J.P., Cozijnsen, J.L., (1994). Comparison of dynamic headspace mouth model systems for flavour release from rehydrated bell pepper cuttings, in: Maarse, H., van der Heij, D.G. (Eds.), *Trends in flavour research*. Elsevier, Amsterdam.
- Vincent, J.F.V., (1998). The quantification of crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 78(2), 162-168.
- Wang, N., Brennan, J.G., (1991). Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering* 14(4), 269-287.
- Wang, N., Brennan, J.G., (1995). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering* 24(1), 61-76.
- Wang, Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S., (2011). Trends in processing technologies for dried aquatic products. *Drying Technology* 29(4), 382-394.
- Watts, B.M., Ylimaki, G.L., Jeffery, L.E., Elias, L.G., (1989). *Basic sensory methods for food evaluation*. International Development Research Centre, Ottawa, Ontario, Canada.
- White, G.W., Cakebread, S.H., (1966). The glassy state in certain sugar-containing food products. *Journal of Food Technology* 1, 73-82.
- White, K.L., Bell, L.N., (1999). Glucose loss and Maillard browning in solids as affected by porosity and collapse. *Journal of Food Science* 64(6), 1010-1014.
- Willis, B., Okos, M., Campanella, O., (1999). Effects of glass transition on stress development during drying of a shrinking food system, *Proceedings of the sixth conference of food engineering (CoFE099)*, Dallas, TX., pp. 451-496.
- Woo, M.W., Mujumdar, A.S., (2010). Effects of electric and magnetic field on freezing and possible relevance in freeze drying. *Drying Technology* 28(4), 433-443.
- Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., Tagawa, A., (2007). Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal of Food Engineering* 83(3), 422–429.
- Xing, G.H., Yang, Y., Yan Chan, J.K., Tao, S., Wong, M.H., (2008). Bioaccessibility of polychlorinated biphenyls in different foods using an *in vitro* digestion method. *Environmental Pollution* 156(3), 1218-1226.
- Xu, H., Zhang, M., Duan, X., Mujumdar, A.S., Sun, J., (2009). Effect of power ultrasound pretreatment on edamame prior to freeze drying. *Drying Technology* 27(2), 186-193.
- Xu, W.L., Bronlund, J., Kieser, J., (2005). Choosing new ways to chew: A robotic model of the human masticatory system for reproducing chewing behaviors. *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 12(2), 90-100.
- Yagci, S., Gogus, F., (2009). Development of extruded snack from food by-products: A response surface analysis. *Journal of Food Process Engineering* 32(4), 565-586.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., Oliveira, F.A.R., (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering* 84(3), 430-440.

- Yu, K.C., Chen, C.C., Wu, P.C., (2011). Research on application and rehydration rate of vacuum freeze drying of rice. *Journal of Applied Sciences* 11(3), 535-541.
- Yu, L., Ramaswamy, H.S., Boye, J., (2013). Protein rich extruded products prepared from soy protein isolate-corn flour blends. *LWT - Food Science and Technology* 50(1), 279-289.
- Zhang, M., Jiang, H., Lim, R.-X., (2010). Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products-Drying kinetics and quality considerations. *Drying Technology* 28(11), 1307-1316.
- Zhong, Z., Sun, X.S., (2005). Thermal characterisation and phase behaviour of cornstarch studied by differential scanning calorimetry. *Journal of Food Engineering* 69, 453-459.
- Zhou, Y.-g., Wang, L.-j., Li, D., Yan, P.-y., Li, Y., Shi, J., Chen, X.D., Mao, Z.-h., (2009). Effect of sucrose on dynamic mechanical characteristics of maize and potato starch films. *Carbohydrate Polymers* 76(2), 239-243.
- Zhu, W., Dong, T., Cao, C., Li, D., (2004). Fractal modeling and simulation of the developing process of stress cracks in corn kernel. *Drying Technology* 22, 59-69.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., Marinou-Kouris, D., (1994). Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology* 12(7), 1653-1666.
- Αναστασοπούλου, Ι., Δημοτικάλη, Δ., Ζουμπουλάκης, Λ., Καραγιάννη, Χ., Κουή, Μ., Μοροπούλου, Α., Μπατής, Γ., Σμιτζής, Ι., Υφαντής, Δ., (2006). Εργαστηριακές Ασκήσεις, *Υλικά 7ου Εξαμήνου Χ-Μ ΕΜΠ*. ΕΜΠ, Αθήνα, pp. 3-12.
- Ζουμπούλης, Α., Καραπάντσιος, Θ., Μάτης, Κ., Μαύρος, Π., (2009). *Στοιχεία φυσικών διεργασιών*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Θύμη, Σ.Ι., (2008). Φυσικές ιδιότητες προϊόντων εκβολής, *Σχολή Χημικών Μηχανικών*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Καραντώνης, Α., (2009). *Ηλεκτροχημική Εμπέδηση στη Χημική Μηχανική, Σημειώσεις*.
- Κουσουδά, Χ., Τσιλικής, Κ., (2011). Μηχανικές ιδιότητες ωσμωτικά αφυδατωμένης πατάτας σε διαλύματα ζαχαρόζης, χλωριούχου νατρίου και μειγμάτων τους, *Σχολή Τεχνολογίας Τροφίμων και Διατροφής*. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Κροκίδα, Μ., (1999). Επίδραση της μεθόδου ξήρανσης στις ιδιότητες των αφυδατωμένων προϊόντων, *Σχολή Χημικών Μηχανικών*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κωστάκης, Μ., (2009). Πειραματική μελέτη της θερμομηχανικής συμπεριφοράς πολυμερικών νανοσυνθετικών υλικών, *ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Αθήνα.
- Λαζαρίδης, Χ.Ν., (2000). *Μηχανική Τροφίμων*. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.
- Λάζος, Ε.Σ., (2002). *Επεξεργασία Τροφίμων II* (3η Έκδοση ed). Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, ΤΕΙ Αθηνών, Αθήνα.
- Μοροπούλου, Α., (2007). Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών, μεθοδολογία ενόργανων & μη καταστρεπτικών τεχνικών, *Φθορά και Προστασία Υλικών 9ου Εξαμήνου Χ-Μ ΕΜΠ*. ΕΜΠ, Αθήνα, pp. 195-198, 271.
- Ταούκης, Π., (1997). *Επιστήμη και Τεχνική των Τροφίμων, Αρχές Κινητικής, Ρεολογίας και Μηχανικών Διεργασιών στα Τρόφιμα*. ΕΜΠ, Αθήνα
- Ταούκης, Π., Ωραιοπούλου, Β., (2006). *Εφαρμοσμένη μικροβιολογία, χημεία και μηχανική διεργασιών τροφίμων*, Αθήνα.
- Τζιά, Κ., (1999). *Επιστήμη και Τεχνική των Τροφίμων, Στοιχεία Χημείας Τροφίμων, Ποιότητα Τροφίμων, Σημειώσεις 7ου εξαμήνου*. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Τζιά, Κ., Ταούκης, Π., Ωραιοπούλου, Β., (2007). *Επιστήμη και μηχανική τροφίμων: Συστατικά-Ιδιότητες-Ρεολογία-Μικροβιολογία-Ποιότητα-Συσκευασία*.

