



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Επίδραση του πορώδους στην ποιότητα των τροφίμων*

English Title

*Effect of porosity on food quality*

**Όνοματεπώνυμο: ΓΚΙΚΑ ΣΟΦΙΑ (ΑΜ:16176)**

**Name of Student: GΚΙΚΑ SOFIA(RN:16176)**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Λ. ΑΣΗΜΟΜΥΤΗΣ**

**Supervisor : ΝΙΚΟΛΑΟΣ L. ASSIMOMYTIS**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024**

**Έγινε δεκτή**

**Οι υπογράφοντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη πτυχιακή εργασία με τίτλο  
‘Επίδραση του πορώδους στην ποιότητα των τροφίμων’ που παρουσιάστηκε από την  
Γκίκα Σοφία και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

<b>A/A</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
<b>1</b>	<b>ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΑΣΗΜΟΜΥΤΗΣ</b>	<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΣ ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ / ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ</b>	
<b>2</b>	<b>ΕΥΤΥΧΙΑ ΚΡΙΤΣΗ</b>	<b>ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ / ΜΕΛΟΣ</b>	
<b>3</b>	<b>ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΜΠΡΑΤΑΚΟΣ</b>	<b>Ε.ΔΙ.Π. / ΜΕΛΟΣ</b>	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Γκίκα Σοφία του Σωτηρ, με αριθμό μητρώου 16176 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επιστήμης Τροφίμων του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου»

Η Δηλούσα



ΓΚΙΚΑ ΣΟΦΙΑ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τρόφιμα θεωρούνται υλικά με δομική πολυπλοκότητα η οποία απορρέει από την ετερογενή προέλευσή τους. Αυτή η δομική πολυπλοκότητα είναι συνυφασμένη με διαφορετικές δομικές ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν όχι μόνο τις μηχανικές ιδιότητες, αλλά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην έκφραση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών τα οποία συνοδεύουν και χαρακτηρίζουν το τρόφιμο. Για το λόγο αυτό η ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι σε άμεση συσχέτιση με τη γενικότερη μικροδομή. Στα πλαίσια αυτά η δυνατότητα πρόβλεψης των επιπτώσεων που επιφέρουν στη μικροδομή και στις δομικές ιδιότητες, οι φυσικοχημικές διεργασίες που επιτελούνται στα διάφορα στάδια επεξεργασίας, κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική για την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και απομάκρυνσης ύδατος, όπως η ξήρανση, το ψήσιμο ή το τηγάνισμα, επιδρούν ποικιλοτρόπως σε συγκεκριμένα δομικά χαρακτηριστικά του τροφίμου και για το λόγο αυτό αποτελούν αντικείμενα συγκριτικής μελέτης στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία.

Μία δομική παράμετρος η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με τη γενικότερη ποιότητα ενός τροφίμου είναι το πορώδες αυτού. Η μελέτη και πρόβλεψη της εξέλιξης του πορώδους σε ένα τρόφιμο, από την προεπεξεργασία μέχρι την κατανάλωσή του, μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη και προώθηση μιας σειράς προϊόντων για τα οποία κοινό γνώρισμα είναι το αυξανόμενο ενδιαφέρον από το καταναλωτικό κοινό. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν για παράδειγμα, τα αποξηραμένα προϊόντα (φρούτα, λαχανικά, όσπρια) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τρόφιμα με μικρούς ή μηδενικούς χρόνους επεξεργασίας (σούπες, δημητριακά ή σνακς).

Στα πλαίσια αυτά στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται μέθοδοι μέτρησης και πρόβλεψης του πορώδους ενώ καταγράφονται μερικά από τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα των πειραματικών παρατηρήσεων όπως αυτά έχουν παρουσιασθεί στη διεθνή βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια.

Αναφορικά με τις μεθόδους πρόβλεψης, ο μεγάλος αριθμός των πειραμάτων που πολλές φορές απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση των διεργασιών κατά την ανάπτυξη ενός προϊόντος οφείλεται στο ότι δεν διαθέτουμε την απαραίτητη κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν τη δομή του τροφίμου στις διάφορες διεργασίες. Έτσι πολλές φορές καθίσταται αναγκαίο να δαπανηθεί πρόσθετος χρόνος αλλά και να γίνει

χρήση αυξημένων οικονομικών πόρων για την ανάπτυξη αποτελεσματικών διεργασιών στις διάφορες κατηγορίες τροφίμων. Η ανάπτυξη μοντέλων, που να είναι σε θέση να προβλέπουν την επίδραση των διαφόρων διαδικασιών σε δομικές ιδιότητες για διευρυμένες ομάδες τροφίμων, θα μπορούσε να ελαττώσει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης ενός προϊόντος αλλά και να βελτιστοποιήσει τις συνθήκες της όλης διαδικασίας. Με γνώμονα τα παραπάνω η παρούσα εργασία επιχειρεί να πραγματοποιήσει μία εισαγωγή στην ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων τουλάχιστον όσον αφορά τη δυνατότητα πρόβλεψης του πορώδους.

## ABSTRACT

Foods are considered materials with structural complexity that derives from their heterogeneous origin. This structural complexity is intertwined with different structural ones that affect not only the mechanical services, but play an important role in the expression of the organoleptic characteristics that accompany and characterize the food. For this reason, the quality of the final product is directly related to the general microstructure. In this context, the ability to predict the effects that the physico-chemical processes that are carried out in the various stages of processing have on the structural properties is considered particularly important for the quality of the final product. Processes of heat transfer and water removal, such as drying, baking or frying, affect in different ways specific structural characteristics of the food and for this reason are objects of comparative study in this thesis.

A structural parameter that is closely related to the general quality of a food is its porosity. The study and prediction of the evolution of porosity in a food, from pre-processing to its consumption, can help to develop and promote a series of products for which the common feature is the growing interest from the consumer public. This category includes, for example, dried products (fruits, vegetables, legumes) which can be used in foods with little or no processing time (soups, cereals or snacks).

In this context, the present paper presents methods for measuring and predicting porosity while recording some of the most interesting results of experimental observations as they have been presented in the international literature in recent years.

Regarding predictive methods, the large number of experiments that are often required to optimize processes during product development is due to the fact that we do not have the necessary understanding of the mechanisms that affect the structure of the food in the various processes. Thus many times it becomes necessary to spend additional time but also to use increased financial resources to develop efficient processes in various food categories. The development of models, which are able to predict the effect of various processes on structural properties for extended food groups could significantly reduce the cost of developing a product and also optimize the conditions of the entire process. Based on the above, this paper attempts to make an introduction to the development of such models, at least in terms of the possibility of predicting porosity.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Εισαγωγή .....	9
1 Πορώδη Υλικά.....	12
1.1 Διαχωρισμός Πορωδών Υλικών .....	13
1.2 Εφαρμογές Πορωδών Υλικών .....	14
1.3 Περιγραφή και Ιδιότητες Πορώδους Δομής .....	15
1.4 Μέτρηση Πορώδους Δομής.....	16
1.4.1 Άμεση Μέθοδος.....	16
1.4.2 Ποροσιμετρία Υδραργύρου.....	16
1.4.3 Χαρακτηρισμός Μορφολογίας Υλικών με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης...17	
1.5 Μοντέλα πρόβλεψης του πορώδους.....	18
1.5.1 Όροι και Έννοιες στα Μοντέλα Ανάπτυξης του Πορώδους.....	19
1.5.2 Εμπειρικά Μοντέλα.....	21
1.5.3 Μαθηματικά Μοντέλα.....	22
2 Ιδιότητες Τροφίμων .....	25
2.1 Μηχανικές Ιδιότητες.....	27
2.2 Ρεολογικές Ιδιότητες.....	27
2.3 Ενεργότητα Υδατος.....	27
2.4 Μεταπτώσεις Φάσεων.....	29
2.5 Πορώδες και Φυσικοχημικά Φαινόμενα.....	31
2.5.1 Διαπερατότητα σε Νερό και Αμούς.....	32
2.5.2 Συντελεστής Διάχυσης.....	32
2.5.3 Συντελεστής Τριχοειδούς Διάχυσης.....	34
3 Διεργασίες Τροφίμων και Αναπύξη του Πορώδους.....	34

3.1 Διεργασίες Προεπεξεργασίας και Πορώδες.....	35
3.1.1 Προεπεξεργασία με Χρήση Διαλυμάτων.....	35
3.1.2 Blanching.....	36
3.1.3 Γενικά Συμπεράσματα στις Διεργασίες Προεπεξεργασίας.....	37
4 Μέθοδοι Επεξεργασίας Τροφίμων και Πορώδες.....	37
4.1 Γενικά περί Ξήρανσης.....	38
4.2 Ξήρανση σε Ρεύμα Αέρα.....	42
4.3 Λυοφιλοποίηση .....	43
4.4 Ωσμωτική Αφυδάτωση.....	47
4.5 Ξήρανση με Μικροκύματα.....	49
4.6 Ξήρανση υπό Κενό.....	50
5. Πορώδες και Τελική Κατεργασία τροφίμων.....	51
5.1 Βαθύ Τηγάνισμα (Deep-Frying).....	51
5.2 Διαδικασία Ψησίματος.....	52
6 Συμπεράσματα.....	53
Βιβλιογραφία.....	55



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

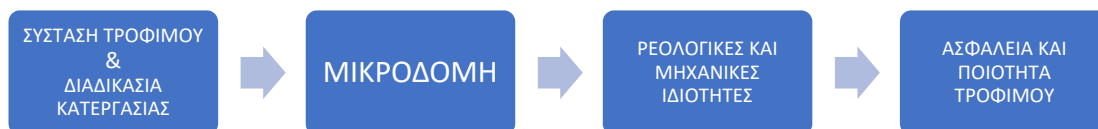
Οι φυσικές διεργασίες στις οποίες μετέχει ένα τρόφιμο επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη μικροδομή ενός τροφίμου. Η προστασία της αρχικής μικροδομής σε όλη τη διάρκεια των παραπάνω διεργασιών, αποτελεί όπως θα δούμε και στις επόμενες ενότητες, έναν σημαντικό στόχο για τη διατήρηση και ει δυνατόν βελτίωση της ποιότητας του τροφίμου.

Πριν όμως προχωρήσουμε στην παρουσίαση των φυσικών διεργασιών και της επίδρασης που μπορεί να έχουν στη γενικότερη μικροδομή αλλά και σε συγκεκριμένες ιδιότητες των τροφίμων, είναι καλό να ορίσουμε τι εννοούμε ως μικροδομή. Αν και στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι ορισμοί, στην παρούσα εργασία ως μικροδομή ορίζουμε τη διευθέτηση στο χώρο των κυττάρων και του μεσοκυττάριου χώρου ενός τροφίμου (Aguilera και συν. 2000, Aguilera 2000 και Aguilera 2005).

Ποιες όμως είναι οι φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τη μικροδομή ενός τροφίμου; Η μικροδομή ενός τροφίμου θα λέγαμε ότι επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις διαδικασίες μεταφοράς μάζας και θερμότητας οι οποίες μπορεί με τη σειρά τους να οδηγήσουν σε σημαντικές μεταβολές των θρεπτικών και οργανοληπτικών στοιχείων που χαρακτηρίζουν το τρόφιμο. Ένα απλό παράδειγμα αποτελεί η απομάκρυνση της υγρασίας η οποία επιτελείται κατά τις διαδικασίες ξήρανσης και η οποία υπό προϋποθέσεις οδηγεί σε συρρίκνωση του προϊόντος. Η συρρίκνωση όμως με κατάρρευση της μικροδομής σε ένα αποξηραμένο τρόφιμο, επηρεάζει αρνητικά τόσο την ικανότητα επανυδάτωσης όσο και τον ρυθμό επανυδάτωσης (Karathanos και συν. 1993). Αυτό έχει ως συνέπεια την παραλαβή ενός τροφίμου με τουλάχιστον προβληματικά ποιοτικά χαρακτηριστικά, που επηρεάζουν αρνητικά την κατανάλωσή του.

Εάν θα θέλαμε τώρα να δώσουμε μια γενική εικόνα για το ποιες ιδιότητες ενός τροφίμου συνδέονται με την μικροδομή του τροφίμου θα λέγαμε ότι σε αυτές περιλαμβάνονται οι μηχανικές ιδιότητες, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, η θερμική αγωγιμότητα, οι συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας, η ενυδάτωση κλπ. (Aguilera και συν. 2000). Στο **Σχ. 1** το οποίο ακολουθεί παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση

της μικροδομής του τροφίμου και των παραγόντων που την επηρεάζουν και επηρεάζονται από αυτήν.



**Σχήμα 1:** Αλληλεπίδραση της μικροδομής και ιδιοτήτων τροφίμων.

Τόσο όμως οι θερμικές ιδιότητες όσο και η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά επηρεάζονται από μια κατηγορία ιδιοτήτων του τροφίμου οι οποίες είναι γνωστές ως **δομικές ιδιότητες τροφίμου**. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν η πυκνότητα το πορώδες το μέγεθος των πόρων του τροφίμου και η κατανομή των πόρων.

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με το πορώδες το οποίο θεωρείται, ίσως, ως η σημαντικότερη από τις δομικές ιδιότητες επηρεάζοντας μια σειρά άλλων φυσικών ιδιοτήτων, όπως ο συντελεστής διάχυσης μάζας, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμική διάχυση (Joardder και συν. 2017, Rahman 2001). Ως αποτέλεσμα όλων αυτών και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω το πορώδες είναι σε άμεση σύνδεση με τη γενικότερη μικροδομή του τροφίμου.

Στα πλαίσια αυτά στις επόμενες ενότητες θα γίνει μια αναφορά στη σχέση του πορώδους με τις παραπάνω παραμέτρους ενώ ταυτόχρονα θα ασχοληθούμε με την μεταβολή του πορώδους κατά τη διαδικασία της απομάκρυνσης ύδατος όπως συμβαίνει στις διεργασίες της ξήρανσης και τελικής επεξεργασίας όπως π.χ. είναι αυτή του τηγανίσματος (deep frying).

Τι ορίζουμε όμως ως πορώδες σε ένα τρόφιμο; Είναι γνωστό ότι τα τρόφιμα αποτελούνται από ένα συνδυασμό αέριας, στερεής και υγρής φάσης. Σαν πορώδες ( $\epsilon$ ) σε ένα τρόφιμο ορίζουμε το λόγο του όγκου των πόρων ( $V_{\text{κενό}}$ ) προς το συνολικό όγκο του τροφίμου ( $V_{\text{ολικό}}$ ) στον οποίο περιλαμβάνονται ο όγκος του στερεού ( $V_s$ ) του υγρού ( $V_w$ ) και του αέρα ( $V_g$ ). Εναλλακτικά ο κενός όγκος των πόρων ουσιαστικά αντικατοπτρίζει τον όγκο που αντιστοιχεί στην αέρια φάση και οι εξισώσεις που περιγράφουν το πορώδες είναι:

$$\epsilon = \frac{V_{\text{κενό}}}{V_{\text{ολικό}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_g + V_s + V_w} = 1 - \frac{V_s + V_w}{V_{ολικό}} \quad (2)$$

Αν τώρα θα θέλαμε να δώσουμε μία εικόνα για την επίδραση του πορώδους σε ένα τρόφιμο θα λέγαμε ότι σε γενικές γραμμές ο σχηματισμός πόρων επηρεάζει θετικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αποξηραμένων τροφίμων. Τα χαρακτηριστικά του σχηματισμού των πόρων εξαρτώνται από τις παραμέτρους της διαδικασίας ξήρανσης, τις ιδιότητες του προϊόντος και τον χρόνο επεξεργασίας. Στο **Σχ. 2** το οποίο ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το σχηματισμό του πορώδους και θα αναλυθούν στις επιμέρους ενότητες.



**Σχήμα 2 :** Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες

Όπως προκύπτει και από το γράφημα οι μέθοδοι και οι συνθήκες ξήρανσης είναι σε άμεση σύνδεση με το πορώδες του τελικού προϊόντος. Έτσι, η ίδια πρώτη ύλη μπορεί να καταλήξει με διαφορετικά χαρακτηριστικά πόρων όταν τροποποιήσουμε τη διαδικασία ξήρανσης.

Με βάση τα παραπάνω και τη διαπίστωση ότι η δυνατότητα διάχυσης της αέριας φάσης είναι ευθέως ανάλογη με το πορώδες υλικών και τροφίμων, η κατανόηση της θεμελιώδους διαδικασίας σχηματισμού και εξέλιξης των πόρων μπορεί να βοηθήσει στην

πρόβλεψη της κινητικής της ξήρανσης και στη μοντελοποίηση της ξήρανσης αποξηραμένων τροφίμων (Karunasen και συν, 2014). Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση οικονομικών πόρων αλλά και σε διεργασίες οι οποίες σχεδιάζονται και λειτουργούν ώστε να αποδίδουν τελικά, προϊόντα με υψηλές προδιαγραφές σε όλο το φάσμα των δομικών, οργανοληπτικών, μηχανικών ιδιοτήτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από σχετικά νωρίς αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει μοντέλα για την πρόβλεψη του πορώδους των τροφίμων κατά την ξήρανση. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά είτε επειδή είναι πολύ απλοϊκά είτε επειδή είναι εμπειρικά στη φύση τους, δεν μπόρεσαν να λάβουν υπόψη σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες.

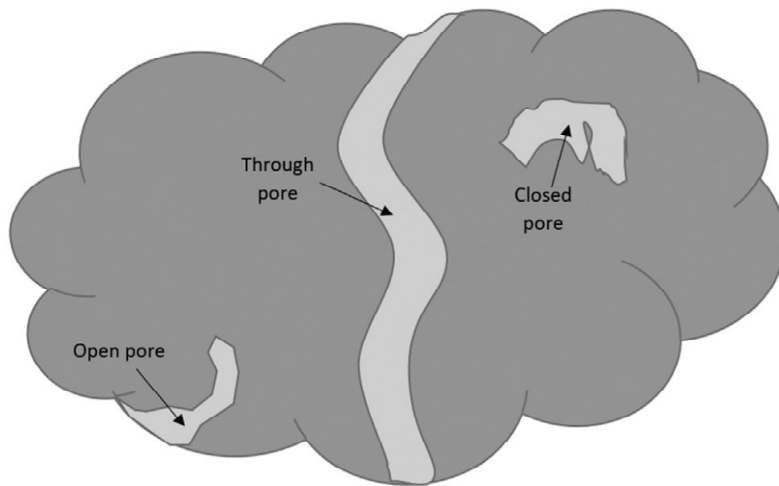
## 1. ΠΟΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ

Οι κυριότερες κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται τα υλικά με βάση τη δομή τους είναι τα κρυσταλλικά, τα άμορφα και τα πορώδη υλικά.

Τα πορώδη υλικά είναι ένας μοναδικός τύπος σύνθετων υλικών που εμφανίζονται σε πολλές διεργασίες που είναι σημαντικές για την τεχνολογία και την επιστήμη. Πρόκειται για ετερογενή, πολυφασικά υλικά που έχουν την ικανότητα να υποστηρίζουν εντός του πλαισίου τους την προσρόφηση ρευστών, τη ροή, τη μεταφορά μάζας και τις αλλαγές φάσεων. Έχει καθοριστεί ότι μια ουσία θεωρείται διαπερατή εάν διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Περιλαμβάνει τουλάχιστον μία ρευστή φάση (υγρό ή αέριο) και τουλάχιστον μία στερεή φάση που εξαπλώνεται σε όλο το πεδίο και χώρο που γεμίζει το πορώδες υλικό.
- Τα διάκενα στη στερεή φάση, η οποία περιέχει τη ρευστή φάση, έχουν διαστάσεις της τάξης των μm ή μικρότερες. Τα διάκενα ονομάζονται πόροι.
- Για να εξασφαλίζεται η διέλευση του ρευστού από το πορώδες υλικό, ορισμένοι από τους πόρους είναι συνδεδεμένοι. Ωστόσο, υπάρχουν και απομονωμένοι πόροι (γνωστοί και ως "τυφλοί πόροι") (Karunasena et al., 2014).

Στο **Σχ. 3** το οποίο ακολουθεί παρουσιάζεται μια εικόνα από την μορφή που έχουν οι πόροι σε ένα πορώδες υλικό



**Σχήμα. 3:** Απεικόνιση πόρων σε πορώδη υλικό (Teffera 2014)

### 1.1 Διαχωρισμός Πορωδών Υλικών

Σύμφωνα με το χαρακτηριστικό μέγεθος των πόρων τους, τα πορώδη υλικά χωρίζονται συνήθως σε τρεις κατηγορίες: α) τα μικροπορώδη, β) τα μεσοπορώδη και γ) τα μακροπορώδη

Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε κατηγορία μεγέθους παρουσιάζει μοναδικές ιδιότητες κατά την προσρόφηση αερίου, οδηγώντας σε διακριτή φυσικοχημική συμπεριφορά. Λόγω της εγγύτητας των τοιχωμάτων σε μικροπορώδη υλικά, το δυναμικό αλληλεπίδρασης μεταξύ των μορίων αερίου και στερεού είναι αισθητά υψηλότερο, οδηγώντας σε γρήγορη πλήρωση. Στα μεσοπορώδη υλικά εμφανίζεται το φαινόμενο της τριχοειδούς συμπύκνωσης συνοδευόμενη από τον χαρακτηριστικό βρόχο υστέρησης που διακρίνεται σε ισόθερμες προσροφήσεις. Τέλος, λόγω του τεράστιου μεγέθους τους, οι πόροι σε μακροπορώδη υλικά γεμίζουν σε σχετικές πιέσεις που είναι αρκετά κοντά στη μονάδα. (Karunasena και συν. 2014).

Πολλές φορές για την ταξινόμηση των φυσικών πορωδών υλικών χρησιμοποιείται και η προέλευση αυτών. Η προέλευση αυτή μπορεί να είναι γεωλογική ή βιολογική. Τα πορώδη πετρώματα που περιέχουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακα κ.λπ. θεωρούνται γεωλογικά. Οι γεωλογικοί αυτοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν συνήθως τεράστιες εκτάσεις και είναι ετερογενείς. Οι βιοχημικές διεργασίες δημιουργούν βιολογικά πορώδη υλικά, τα οποία συναντώνται συνήθως σε πολύ μικρότερες κλίμακες. Ανάμεσα στα παραδείγματα περιλαμβάνονται διάφορα είδη φυτών, φρούτων ακόμη και μέρη ενός οργανισμού όπως

πνεύμονες, ιστοί και μεμβράνες. Επιπλέον, για φυσικούς διαχωρισμούς δημιουργούνται και παράγονται συνθετικά πορώδη υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται και σε διαδικασίες χημικών αντιδράσεων (Karunasena και συν. 2014).

## 1.2 Εφαρμογές Πορώδων Υλικών

Τα πορώδη υλικά χρησιμοποιούνται ως φίλτρα σε ιατρικές και φαρμακευτικές εφαρμογές, στη βιομηχανία τροφίμων, σε χημικές βιομηχανίες κλπ. (Dullien 1979)

Η παραγωγή φυσικών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, σε ρηγματώδες πορώδες υπέδαφος συνδέεται με τα πορώδη υλικά. Η απομάκρυνση επιβλαβών ρύπων εδάφους και η χρησιμοποίησή τους σε διεργασίες για την απορρύπανση του εδάφους είναι παραδείγματα σύγχρονων εφαρμογών για τα πορώδη υλικά. Οι διεργασίες ξήρανσης, η τριχοειδής μεταφορά νερού στα φυτά και η αντικατάσταση διοξειδίου του άνθρακα με οξυγόνο στην επιφάνεια των πνευμόνων θεωρούνται εφαρμογές όπου συμμετέχουν βιολογικά πορώδη υλικά.

Στο σχεδιασμό ετερογενών αντιδραστήρων, όταν απαιτείται μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια όπως για παράδειγμα σε διαδικασίες διαχωρισμού και καθαρισμού χρησιμοποιούνται συνθετικά πορώδη υλικά. Τα τελευταία χρόνια μικροπορώδη υλικά, όπως οι κεραμικές μεμβράνες, έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιούνται συχνά σε φυσικούς διαχωρισμούς.

Στο χώρο των τροφίμων τώρα, η παραγωγή νέων προϊόντων με καθορισμένες δομές, είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός τομέας τον οποίο θεωρούμε ότι συμπεριλαμβάνεται στον ευρύτερο χώρο στον οποίο εντάσσονται και τα πορώδη υλικά. Η ικανότητα παραγωγής τροφίμων με προκαθορισμένες δομικές ιδιότητες αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πεδίο έρευνας, αφού αυτές οι ιδιότητες είναι σε άμεση σύνδεση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με τον σχεδιασμό και τη διεξαγωγή διαφόρων διεργασιών τροφίμων και κατά επέκταση με την ποιότητα των προϊόντων. Έτσι επηρεάζουν τη γεύση και την εμφάνισή τους και έχουν σημαντικό αντίκτυπο σε μια σειρά άλλων ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των θερμικών ιδιοτήτων, των μηχανικών ιδιοτήτων, της διάχυσης μάζας και της ικανότητας αφομοίωσης θρεπτικών συστατικών κατά τη διαδικασία της πέψης (Khan και συν. 2017)

### 1.3 Περιγραφή και Ιδιότητες Πορώδους Δομής

Τα γενικότερα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός πορώδους υλικού όπως για παράδειγμα η πυκνότητα, η ειδική αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά και τα οποία προσδιορίζονται μέσω κατάλληλων δοκιμών, εξαρτώνται από τη μικροσκοπική δομή του υλικού αλλά και τη σύνθεσή του (Khan και συν. 2017). Τα πορώδη υλικά έχουν δομικά χαρακτηριστικά που καθορίζονται αποκλειστικά από την τοπολογία και τη γεωμετρία των πόρων τους και όχι από άλλα χαρακτηριστικά της ουσίας, όπως η χημική της σύσταση. Τα περισσότερα πορώδη υλικά δεν έχουν πόρους που είναι ορατοί με γυμνό μάτι. Στα πλαίσια αυτά, δείγμα από κάθε υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται ως πορώδης, χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή πειραμάτων από τα οποία εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη φύση και τις ιδιότητές του υλικού.

Σε γενικές γραμμές τα πειράματα στα οποία αναδεικνύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μακροσκοπικές ιδιότητες του μέσου σχετίζονται με τη μικροσκοπική εξέταση των πόρων του υλικού. Ορισμένα χαρακτηριστικά της μικροσκοπικής δομής ενός πορώδους μέσου περιλαμβάνουν τη γεωμετρία της επιφάνειας των πόρων και την κατανομή του μεγέθους των πόρων. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ερευνητικές προσπάθειες αντικείμενο των οποίων είναι η δημιουργία μοντέλων τα οποία, με δεδομένη τη γνώση των μικροσκοπικών πτυχών της δομής ενός υλικού, να είναι σε θέση να προβλέψουν τις μακροσκοπικές ιδιότητες των πορώδων υλικών. Όμως παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί αναφορικά με την αναβάθμιση των μεθοδολογιών, είναι ανέφικτο να περιγραφεί η πορώδης δομή ενός υλικού στο σύνολό της και με κάθε λεπτομέρεια. Ως εκ τούτου, ο στόχος μιας τέτοιας διαδικασίας δεν είναι μια γενική χαρτογράφηση του πορώδους χώρου, αλλά μάλλον μια προσέγγισή αυτού, που να επιτρέπει την εξαγωγή μιας μαθηματικής περιγραφής των φαινομένων που συμβαίνουν στους πόρους (Khan et al., 2017).

Με άλλα λόγια, η προσπάθεια κατανόησης των διεργασιών, όπως για παράδειγμα η μονοφασική ή διφασική ροή και η διάχυση, οι οποίες λαμβάνουν χώρα εντός του πορώδους μέσου αλλά και η αξιολόγηση της πρακτικής χρησιμότητας, επιχειρείται να συνδεθεί με τον προσδιορισμό των γενικότερων δομικών παραμέτρων του πορώδους μέσου.

Η ανάλυση της διαδικασίας εξέτασης ενός νέου πορώδους υλικού αποτελεί ένα σύνθετο εγχείρημα το οποίο συναντά δυσκολίες που προέρχονται από το ίδιο το υλικό. Αυτό γιατί αντίθετα με ότι πιστεύει κανείς κάθε νέο υλικό που συντίθεται δεν είναι ούτε

ομοιογενές ούτε ισότροπο. Η συνολική διαδικασία για την εξέταση της πορώδους δομής ενός υλικού περιλαμβάνει:

1. Τη μεθοδολογία ή τις μεθόδους για τη μέτρηση των φυσικών μεταβλητών που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τα δομικά χαρακτηριστικά ενός πορώδους μέσου.

2. Τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου που αναπαριστά, κατά προσέγγιση, τη μελετώμενη πορώδη δομή και χαρακτηρίζεται φυσικά από ένα σύνολο παραμέτρων.

3. Μια θεωρητική διαδικασία για τη χρήση κατάλληλης επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου.

Στις παρακάτω ενότητες αναλύονται τα σημαντικότερα στοιχεία τα οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε και να αξιοποιήσουμε προκειμένου να μετρήσουμε να προσδιορίσουμε και να προβλέψουμε το πορώδες σε υλικά και τρόφιμα.

Πριν από όλα αυτά όμως θα πρέπει να εξετάσουμε τόσο τους τρόπους μέτρησης του πορώδους όσο και στο πως ορίζονται οι διάφοροι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην έκφραση του πορώδους αλλά και στα προτεινόμενα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη του πορώδους.

## 1.4 Μέτρηση Πορώδους

### 1.4.1 Άμεση Μέθοδος

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη μέτρηση του φαινομενικού όγκου ενός δείγματος πορώδους υλικού, το οποίο στη συνέχεια θρυμματίζεται για να εξαλειφθούν όλες οι κοιλότητές του. Ο όγκος του αλεσμένου υλικού μετράται και η διαφορά μεταξύ των δύο μετρούμενων όγκων δίνει πληροφορίες για το πορώδες. Εάν δεν υπάρχει απωθητική ή ελκτική δύναμη που δρα μεταξύ των επιφανειών των στερεών σωματιδίων, η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολύ μαλακά υλικά (Paudel και συν. 2016)

### 1.4.2 Ποροσιμετρία Υδραργύρου

Η ποροσιμετρία υδραργύρου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των πόρων και της κατανομής μεγέθους εκτός από το πορώδες. Με πιέσεις



μεγαλύτερες από 414 MPa, η σύγχρονη ποροσιμετρία υδραργύρου μπορεί να μετρήσει πόρους τόσο μικρούς όσο 0,003 nm. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται σε αυτή την τεχνική είναι η δημιουργία μιας ισόθερμης πίεσης σε σχέση με τον όγκο εισόδου. Αυτές οι ισόθερμες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού των ανοικτών πόρων, των ιδιοτήτων των πόρων και της κατανομής μεγέθους. Για να εισέλθει ο υδράργυρος στα ανοίγματα των πορωδών στερεών θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αύξηση της πίεσης. Αφαιρώντας και μετρώντας τον υδράργυρο από ένα δείγμα με γνωστό όγκο, μπορεί να υπολογιστεί ο φαινόμενος όγκος του δείγματος (Paudel και συν. 2016).

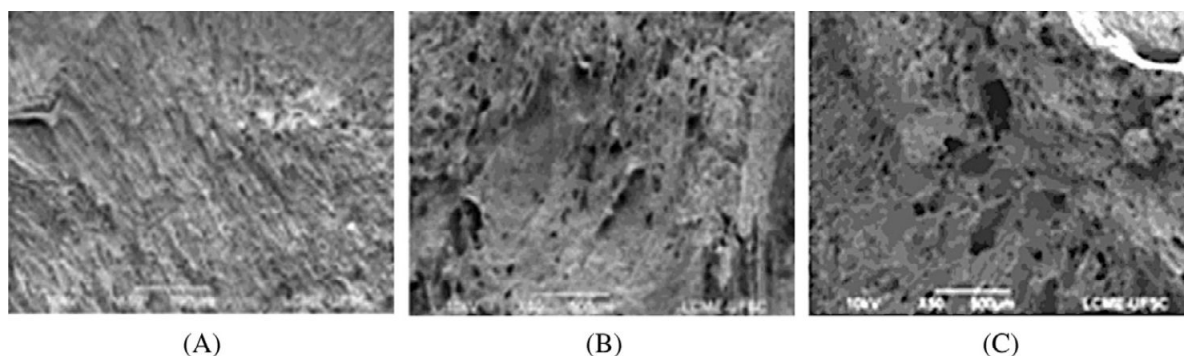
#### 1.4.3 Χαρακτηρισμός Μορφολογίας Υλικών με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Ένα από τα πιο σημαντικά μέσα για την εξέταση της μικροδομής μιας ποικιλίας στερεών υλικών είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), όπως αυτό που παρουσιάζεται στην Εικ. 1 η οποία ακολουθεί. Η αλληλεπίδραση μεταξύ μιας προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων και του υπό εξέταση δείγματος αποτελεί τη βάση της διαδικασίας. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτει μια σειρά σημάτων όπως δευτερογενή ηλεκτρόνια, ηλεκτρόνια ανάκλασης, ακτίνες X αλλά και φως. Η καταγραφή αυτών των σημάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας σειράς αισθητήρων και λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το σημείο πρόσπτωσης. Οι πληροφορίες αυτές σχετίζονται με την τοπογραφία, τη σύνθεση και άλλα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα η ηλεκτρική αγωγιμότητα.



**Εικόνα 1:** Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Jeol 634DP  
Ηλεκτρονική Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>

Η μεγάλη ανάλυση που προσφέρει, (έως και 1-5 nm), σε συνδυασμό με το ευρύ φάσμα μεγέθυνσης (από 25x έως 250000x), είναι τα κύρια πλεονεκτήματα του SEM έναντι άλλων μεθόδων διερεύνησης της μικροδομής, όπως η οπτική μικροσκοπία (Khalloufi και συν. 2015).



**Εικόνα 2 :** Εικόνα από Μικροσκοπία Ηλεκτρονικής Σάρωσης (SEM) τεμαχιδίων μπανάνας. (A) φρέσκο προϊόν (B) προϊόν ύστερα από ξήρανση με θερμό και ξηρό αέρα (C) προϊόν ύστερα από ξήρανση υπό κενό (Porcioncula και συν. 2016).

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η εμφάνιση τρισδιάστατης εικόνας λόγω του μεγάλου βάθους εστίασης της μεθόδου και του φαινομένου σκίασης των δευτερογενών και ανακλώμενων ηλεκτρονίων.

Με βάση την μέχρι τώρα εμπειρία με υλικά που κατά βάση έχουν συγκρίσιμη δομή, για τον προσδιορισμό του εύρους των πόρων του υπό εξέταση υλικού οι πειραματικές μέθοδοι και τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι: α). η ποροσιμετρία υδραργύρου, β) η απορρόφηση-εκρόφηση αζώτου και γ) η μικροσκοπική ανάλυση τυχαίων ή διαδοχικών επίπεδων τομών πορώδων δειγμάτων (Khan και συν. 2017).

### 1.5 Μοντέλα Πρόβλεψης του Πορώδους

Έχει ήδη επισημανθεί σε προηγούμενες παραγράφους η διαφοροποίηση της πορώδους δομής ενός τροφίμου ανάλογα με την μέθοδο ξήρανσης και η επίδραση που έχει στην τελική ποιότητα του τροφίμου. Συνεπώς η πρόβλεψη της εξέλιξης του πορώδους μπορεί να αποτελέσει ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη διαδικασιών που θα αποδώσουν προϊόντα υψηλής αποδοχής από το καταναλωτικό κοινό.

Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν προταθεί μια σειρά μοντέλων τα οποία στοχεύουν στο να δώσουν μια επαρκή εικόνα για την ανάπτυξη του πορώδους ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Αυτές περιλαμβάνουν τα εμπειρικά μοντέλα και τα θεωρητικά μοντέλα, Συμπληρωματικά τα τελευταία 25 χρόνια έχουν αναπτυχθεί τα υβριδικά νευρωνικού δικτύου μοντέλα (Artificial Neural Network) τα οποία προσφέρουν μια υψηλής ακρίβειας πρόβλεψη για την ανάπτυξη του πορώδους όταν όμως υπάρχει μια όσο το δυνατόν πιο πλήρη βάση δεδομένων.

Αν και στην παρούσα εργασία δε θα εστιάσουμε στην εμβάθυνση της ανάπτυξης και αξιοποίησης των παραπάνω μοντέλων θεωρούμε ότι είναι καλό να αναφερθούμε σε μια σειρά από όρους οι οποίοι όχι μόνο παρουσιάζονται και χρησιμοποιούνται στα παραπάνω μοντέλα, αλλά ταυτόχρονα είναι χρήσιμοι και στην γενικότερη μελέτη εξέλιξης του πορώδους.

### 1.5.1 Όροι και Έννοιες στα Μοντέλα Μελέτης Ανάπτυξης του Πορώδους

#### ➤ Περιεχόμενη Υγρασία

Ουσιαστικά εκφράζεται με δύο τρόπους ανάλογα αν αναφερόμαστε έχοντας ως βάση τη ξηρή μάζα του τροφίμου ή τη μάζα του τροφίμου μαζί με την υγρασία. Στην πρώτη περίπτωση η περιεχόμενη υγρασία ορίζεται ως:

$$X = \frac{m_w}{m_s} \quad (3)$$

όπου  $(X)$  η περιεχόμενη υγρασία,  $(m_w)$  η μάζα του ύδατος και  $(m_s)$  η μάζα του ξηρού τροφίμου.

Η περιεχόμενη τώρα υγρασία στην περίπτωση όπου έχουμε ως βάση το νωπό τρόφιμο συμβολίζεται συνήθως ως  $(w)$  και εκφράζεται όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (4) που ακολουθεί ως:

$$w = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (4)$$

Μετασχηματίζοντας την εξίσωση (4) και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (3) προκύπτει τελικά η εξίσωση (5) :

$$\frac{1}{w} = \frac{m_w}{m_w} + \frac{m_s}{m_w} \rightarrow \frac{1}{w} = 1 + \frac{m_s}{m_w} \rightarrow \frac{1}{w} = 1 + \frac{1}{X} \rightarrow \frac{1}{w} = \frac{X+1}{X} \rightarrow w = \frac{X}{X+1} \quad (5)$$

➤ **Πυκνότητα Υποστρώματος ή Υλικού (Substance Density  $\rho_s$  ή  $\rho_m$ )**

Κατά τα γνωστά εκφράζεται από την εξίσωση (6) που ακολουθεί:

$$\rho_m = \rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (6)$$

όπου ( $m_s$ ) και ( $V_s$ ) η μάζα και ο όγκος του ξηρού υλικού.

➤ **Πραγματική Πυκνότητα (Particle Density  $\rho_p$ )**

Στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίζετε ως πραγματική πυκνότητα ( $\rho_p$ ) ο λόγος της ολικής μάζας του δείγματος ( $m_{ολ}$ ) προς τον πραγματικό του όγκο ( $V_{ολ}$ ). Η ολική μάζα του δείγματος προκύπτει από το άθροισμα μαζών του ξηρού υλικού ( $m_s$ ), και της υγρασίας ( $m_w$ ), ενώ ο ολικός όγκος ( $V_{ολ}$ ) προκύπτει αθροίζοντας τον όγκο του στερεού ( $V_s$ ) και του υγρού ( $V_w$ ).

$$\rho_p = \frac{m_s+m_w}{V_s+V_w} = \frac{m_{ολ}}{V_{ολ}} \quad (7)$$

➤ **Φαινόμενη πυκνότητα ή πυκνότητα κλίνης υλικού (bulk density  $\rho_b$ )**

Ουσιαστικά είναι ο λόγος της ολικής μάζας του πορώδους υλικού προς τον ολικό όγκο συμπεριλαμβανομένου και του όγκου των πόρων του αέρα ( $V_a$ ).

$$\rho_b = \frac{m_s+m_w}{V_s+V_w+V_a} \quad (8)$$

➤ **Πορώδες ( $\varepsilon$ ) και αρχικό πορώδες ( $\varepsilon_0$ )**

Για το πορώδες οι σχετικοί ορισμοί έχουν δοθεί στην ενότητα της εισαγωγής. Συμπληρωματικά θα επισημαίναμε ότι με βάση τη φαινόμενη πυκνότητα και την πραγματική πυκνότητα το πορώδες μπορεί να ορισθεί και ως :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (9)$$

Με δεδομένο ότι ειδικά όλα τα φυτικής προέλευσης υλικά και φυσικά τα τρόφιμα περιέχουν περιοχές με κενό όγκο ειδικά όταν είναι νωπά ή φρέσκα ορίζουμε ως **αρχικό πορώδες** ( $\varepsilon_o$ ) αυτόν ακριβώς τον κενό όγκο και η εξίσωση από την οποία μπορεί να υπολογισθεί είναι:

$$\varepsilon_o = 1 - \frac{\rho_{bo}}{\rho_{po}} = 1 - \frac{V_s + V_w}{V_o} \quad (10)$$

### ➤ Συρρίκνωση (S)

Με τον όρο συρρίκνωση αναφερόμαστε στην μεταβολή του όγκου ενός τροφίμου μετά από μια διεργασία όπως αυτή της ξήρανσης η οποία συνοδεύεται από σχηματισμό ή όχι πόρων (Barbosa-Canovas και συν. 2005). Στην εξίσωση (11) η οποία ακολουθεί δίδεται η μαθηματική σχέση με την οποία περιγράφεται η συρρίκνωση.

$$S = \frac{V_b}{V_{b0}} \quad (11)$$

Όπου ( $V_b$ ) είναι ο φαινόμενος όγκος του τροφίμου για δεδομένη υγρασία και ( $V_{b0}$ ) ο αρχικός φαινόμενος όγκος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της ξήρανσης η συρρίκνωση ενός τροφίμου μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- α) ισότροπα όπου έχουμε μια ομοιόμορφη μεταβολή του όγκου σε όλες τις διαστάσεις του χώρου (παρατηρείται σε φρούτα και λαχανικά).
- β) ανισότροπα όταν η συρρίκνωση είναι ανομοιόμορφη (παρατηρείται σε ζωικούς ιστούς όπως τα ψάρια).

### 1.5.2 Εμπειρικά Μοντέλα

Σε γενικές γραμμές τα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται στην συσχέτιση ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως το περιεχόμενο νερό στα τρόφιμα, με το πορώδες. Η προσαρμογή αυτή βασίζεται σε μαθηματικές εξισώσεις που στην πιο απλή τους μορφή είναι γραμμικές ενώ μπορεί να γίνουν και πιο σύνθετες όπως εκθετικές ή πολυωνυμικές. Με δεδομένο το ότι η ανάπτυξη ενός εμπειρικού μοντέλου μπορεί με απλές σχετικά μετρήσεις να συνεισφέρει

στην πρόβλεψη της ανάπτυξης του πορώδους αναπτύχθηκαν αρκετά και σημαντικά μοντέλα.

Έτσι το πορώδες σε μια διαδικασία ξήρανσης για σπόρους κολοκύθας η οποία έγινε στους 47 °C συνδέεται με την περιεχόμενη υγρασία με τη σχέση  $\epsilon = a + bX$  (12) (Joshi και συν. 1993). Προς την ίδια κατεύθυνση ο Madamba και συν. το 1994 πρότειναν την εξίσωση  $\epsilon = a + bW + cW^2$  (13) για την πρόβλεψη της ανάπτυξης του πορώδους στην περίπτωση της ξήρανσης του σκόρδου στον αέρα σε 70 °C, ενώ η εξίσωση  $\epsilon = a + bW + cW^3$  (14) προτάθηκε από τον Rapuzas και συν. το 1995 και αφορούσε τεμάχια κρεμμυδιού στις ίδιες συνθήκες Το ( $W$ ) και στις δύο περιπτώσεις συμβολίζει το βάρος του νερού. Τέλος οι Magge και συν. το 1997 για την περίπτωση της ξήρανσης πατάτας σε διάφορες θερμοκρασίες πρότειναν την εξίσωση  $\epsilon = a + b \exp[X/c]$  (15). Η ξήρανση έγινε με τη βοήθεια αέρα ταχύτητας 3 m/sec. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις οι σταθερές ( $a$ ), ( $b$ ) και ( $c$ ) εξαρτώνται από τις πειραματικές παραμέτρους και προφανώς διαφοροποιούνται με αλλαγή αυτών.

Αν θα θέλαμε να αξιολογήσουμε τα εμπειρικά μοντέλα θα λέγαμε ότι παρά τη χρησιμότητά τους παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Έτσι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η εφαρμογή τους περιορίζεται σε συγκεκριμένα προϊόντα και διαδικασίες αφού ακόμα και μικρές αλλαγές στις πειραματικές συνθήκες τροποποιούν πλήρως το τελικό αποτέλεσμα. Το γεγονός αυτό εμποδίζει τη χρησιμοποίησή τους ως μέσο πρόβλεψης του πορώδους σε μεγάλο εύρος προϊόντων.

### 1.5.3 Θεωρητικά Μοντέλα

Τα θεωρητικά μοντέλα όπως και τα εμπειρικά ανήκουν στα γενικότερα μαθηματικά μοντέλα. Στα θεωρητικά μοντέλα οι αρχικές μελέτες πρόβλεψης του πορώδους βασίσθηκαν στην λογική της ιδανικής συρρίκνωσης των προϊόντων κατά την οποία, ο όγκος του νερού που απομακρύνεται είναι ίσος με την παρατηρούμενη μεταβολή του όγκου του τροφίμου κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας.

Στα πλαίσια αυτά το 1955 ο Kilpatric και οι συνεργάτες του παρουσίασαν μια εξίσωση η οποία συνδέει το πορώδες με την φαινόμενη πυκνότητα ( $\rho_b$  bulk density) και την πυκνότητα του ξηρού στερεού ( $\rho_s$ ).

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (16)$$

Στην ίδια λογική ο Lozano και οι συνεργάτες του το 1983 παρουσίασαν μια γραμμική σχέση ανάμεσα στο πορώδες και την περιεχόμενη υγρασία. Η εξίσωση (17) η οποία παρουσιάζεται παρακάτω έχει προκύψει μελετώντας τη διαδικασία της ξήρανσης σε συγκεκριμένα τρόφιμα όπως πατάτα, γλυκοπατάτα και σκόρδο. Με ( $X_0$ ) ορίζουμε την αρχική υγρασία και ( $\rho_{b0}$ ) την αρχική φαινόμενη πυκνότητα

$$\varepsilon = \frac{(X+1) \rho_{b0}}{(X_0+1) \rho_b} \quad (17)$$

Η παραπάνω εξίσωση όπως και κάθε σχεδόν παρόμοια παρουσιάζει πολύ πτωχά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται για τρόφιμα με διαφοροποιημένη περιεκτικότητα σε υγρασία όπως είναι για παράδειγμα τα καρότα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι η συρρίκνωση ενός τροφίμου δεν μεταβάλλεται πάντα γραμμικά σε σχέση με την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία οπότε και η μεταβολή στον όγκο του τροφίμου δεν συνδέεται γραμμικά με τον όγκο του ύδατος που απομακρύνεται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης.

Με την πάροδο του χρόνου παρουσιάστηκαν μια σειρά μαθηματικών μοντέλων τα οποία αρχίζουν και λαμβάνουν υπόψη αυτήν ακριβώς την παρατήρηση. Ανάμεσα σε αυτά το σημαντικότερο ίσως παρουσιάστηκε από τον Ζόγκζα και τους συνεργάτες του το 1994. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται ένας συντελεστής συρρίκνωσης όγκου ( $\beta$ ) και η εξίσωση (18) η οποία ακολουθεί αποδίδει τη μαθηματική σχέση που εκφράζει το μοντέλο αυτό. Στην συγκεκριμένη εξίσωση ως ( $\rho_{b0}$ ) ορίζεται η αρχική φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) ως  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα του ξηρού στερεού, ( $\rho_w$ ) είναι η πυκνότητα του περιεχόμενου ύδατος και ( $X$ ) η περιεχόμενη υγρασία .

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{b0}[\rho_w + X\rho_s]}{\rho_w\rho_s[1 + \beta X]} \quad (18)$$

Με βάση το παραπάνω μοντέλο πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω μελέτες για τη μεταβολή του πορώδους σε μια σειρά τροφίμων από διάφορους ερευνητές. Παρά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο γενικό μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις εντούτοις σε πάρα πολλές άλλες περιπτώσεις η ακρίβεια της πρόβλεψης επηρεάζεται από το είδος του προϊόντος και τη διαδικασία της ξήρανσης. Το γεγονός αυτό κατέδειξαν οι Krokida & Maroylis το 1997, σε ερευνητικές μελέτες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε μια σειρά τροφίμων η ξήρανση των οποίων πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικές συνθήκες.

Η ιδανική ή η μη ιδανική συρρίκνωση των τροφίμων αποτέλεσε παράγοντα μελέτης για πιο σύνθετα μοντέλα τα οποία παρουσιάστηκαν μεταγενέστερα. Σε αυτά επεκτείνονται και τροποποιούνται οι παράμετροι οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη και νέες παράμετροι υπεισέρχονται όπως για παράδειγμα οι τριχοειδείς δυνάμεις οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν και θεωρείται ότι αποτελούν τη βασικότερη αιτία κατάρρευσης των πόρων και συρρίκνωσης των τροφίμων (Rahman 2003).

Σε γενικές γραμμές παρά το γεγονός ότι τα θεωρητικά μοντέλα αναπτύχθηκαν με βάση την κατανόηση της επίδρασης θεμελιωδών φαινομένων και μηχανισμών που συνδέονται με τη δημιουργία πόρων, υπάρχουν σειρά παραμέτρων η επίδραση των οποίων δεν λαμβάνεται υπόψη. Αυτό έχει αποτέλεσμα την ελλιπή κατανόηση της όλης διαδικασίας ανάπτυξης πορώδους και το σχετικά περιορισμένο πάλι πεδίο εφαρμογής των μοντέλων.

Για την αναπαράσταση της πορώδους δομής με ένα μαθηματικό μοντέλο γίνονται ορισμένες δομικές παραδοχές σχετικά με το πορώδες υλικό. Στα πλαίσια αυτά, θεωρείται ότι οι πόροι έχουν ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα, μια καθορισμένη οργάνωση και μια συγκεκριμένη μέθοδο σύνδεσης. Στα πιο πρόσφατα μοντέλα προτείνεται ότι οι πόροι είναι παράλληλοι, ισαπέχοντες, ευθύγραμμοι σωλήνες χωρίς συνδέσεις μεταξύ τους, με μεγέθη που ακολουθούν μια άγνωστη συνάρτηση κατανομής. Μια τέτοια άποψη βέβαια, αγνοεί το εύρος των μορφών των πόρων καθώς και τις συνδέσεις τους, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για κάθε διαδικασία μεταφοράς μάζας και ρευστών μέσω πορωδών υλικών. Η συνοχή των πόρων λαμβάνεται επίσης υπόψη σε πιο ακριβή μαθηματικά μοντέλα, τα οποία θεωρούν το πορώδες μέσο ως ένα δίκτυο συνδεδεμένων πόρων δομημένων με συγκεκριμένη χωρική διάταξη (Rahman & Joardder, 2016).

Η πολυπλοκότητα του μαθηματικού μοντέλου συσχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με το βαθμό δυσκολίας που απαιτείται για τον καθορισμό των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Επομένως, η λήψη της καμπύλης ρόφησης υδραργύρου (ποροσιμετρία) ή της καμπύλης εκρόφησης αζώτου είναι αρκετή για να διαπιστωθεί η κατανομή των διαμέτρων ή ακτίνων των πόρων με βάση το μοντέλο "δέσμης σωλήνων". Είναι αυτονόητο ότι η χρησιμοποίηση πιο εξελιγμένων μοντέλων καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη μαθηματικών διαδικασιών που ενσωματώνουν περισσότερες πτυχές της σχετικής πειραματικής διαδικασίας, ενώ παράλληλα κάνουν ορισμένες παραδοχές και απλουστεύσεις για τη θεωρητική προσέγγιση της φυσικής διαδικασίας. Με τις λιγότερες δυνατές υποθέσεις και παραδοχές, πολλές πειραματικές



τεχνικές μπορούν να είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό διαφόρων δομικών ιδιοτήτων ενός πορώδους υλικού. Από αυτή την άποψη, ο πρωταρχικός στόχος κάθε σύγχρονης προσπάθειας για την εξακρίβωση των βασικών δομικών χαρακτηριστικών των πορωδών υλικών είναι η δημιουργία βελτιωμένων μαθηματικών μοντέλων και μεθόδων ερμηνείας των πειραματικών δεδομένων, που προκύπτουν από τη συνδυασμένη χρήση πολλών πειραματικών τεχνικών. Επιπλέον, έχουν δημιουργηθεί σύγχρονες μαθηματικές αναλυτικές τεχνικές για την αντιμετώπιση των διαφόρων μικροδομικών χαρακτηριστικών των ανισότροπων και ανομοιογενών υλικών (Rahman & Joardder, 2016).

## **2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

Με τον όρο ιδιότητα ενός τροφίμου αναφερόμαστε στη μέτρηση και τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς του τροφίμου είτε υπό το πρίσμα της ύλης, είτε με βάση την ενέργεια που το χαρακτηρίζει, είτε ως προς την αλληλεπίδραση με τις ανθρώπινες αισθήσεις, είτε ως προς την συνεισφορά του στην ανθρώπινη υγεία και ευεξία. (ASHRAE 1993, McCurthy 1997). Εστιάζοντας στον παραπάνω ορισμό θα λέγαμε ότι σε αυτές τις ιδιότητες περιλαμβάνονται φαινόμενα μεταφοράς μάζας, μηχανικές ιδιότητες, ιατρικές ιδιότητες, ιδιότητες που σχετίζονται με τη μικροβιακής ανάπτυξη, οπτικές ιδιότητες, φυσικοχημικές σταθερές, ρεολογικές ιδιότητες, θερμικές ιδιότητες, θερμοδυναμικές ιδιότητες, μηχανικές ιδιότητες και φυσικά οι δομικές ιδιότητες για τις οποίες έχουμε ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους. Αναλύοντας λίγο παραπάνω τις ιδιότητες αυτές, θα λέγαμε ότι οι οπτικές ιδιότητες έχουν να κάνουν με το χρώμα του τροφίμου και πως αυτό μεταβάλλεται σε μια διεργασία, οι θερμικές ιδιότητες σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας σε ένα τρόφιμο, οι μηχανικές ιδιότητες συνδέονται με τη συμπεριφορά των τροφίμων ύστερα από την εφαρμογή σε αυτά κάποιας δύναμης, οι θερμοδυναμικές ιδιότητες εστιάζονται στις μετατροπές των φάσεων που λαμβάνουν χώρα σε ένα τρόφιμο ενώ οι ρεολογικές ιδιότητες εστιάζονται στον τρόπο ροής ρευστών αλλά και στερεών προϊόντων. Εάν θα θέλαμε να κατηγοριοποιήσουμε το σύνολο των ιδιοτήτων ενός τροφίμου τότε θα δημιουργούσαμε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει φυσικές και φυσικοχημικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες ορίζονται εκφράζονται και μετρούνται με φυσικούς και φυσικοχημικούς όρους και μεθόδους. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει κινητικές σταθερές και ουσιαστικά αποτελεί ένα μέτρο αποτύπωσης των μεταβολών που μπορεί να υποστεί ένα τρόφιμο (βιοχημικές, χημικές, φυσικοχημικές καθώς και μεταβολές που

αφορούν την ανάπτυξη μικροοργανισμών). Η τρίτη κατηγορία που αναφέρεται σε αισθητηριακές ιδιότητες (χρώμα, άρωμα, γεύση, αφή) όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από τα αισθητήρια όργανα του ανθρώπου όπως τα μάτια οι υποδοχείς γεύσης τα δάχτυλα κλπ. Η τέταρτη τέλος κατηγορία περιλαμβάνει ιδιότητες που σχετίζονται με την επίδραση των τροφίμων στην ανθρώπινη υγεία. Στον Πίν. 1 που ακολουθεί παρουσιάζεται αυτή η ομαδοποίηση, δίνοντας για κάθε γενική κατηγορία χαρακτηριστικά παραδείγματα ιδιοτήτων που περιλαμβάνεται σε αυτήν.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις ο σαφής διαχωρισμός και κατάταξη κάποιων ιδιοτήτων δεν είναι απόλυτα εφικτός. Εντούτοις ο προτεινόμενος διαχωρισμός βοηθάει σε μεγάλο βαθμό τη συστηματική μελέτη της γενικότερης συμπεριφοράς ενός τροφίμου.

**Πίνακας 1:**Κατηγοριοποίηση Ιδιοτήτων Τροφίμων

<b>Γενική Κατηγορία Ιδιοτήτων</b>	<b>Παραδείγματα Προσδιοριζόμενων Ιδιοτήτων</b>
<b>Φυσικές και Φυσικοχημικές Ιδιότητες</b>	Μηχανικές Ιδιότητες
	Θερμικές Ιδιότητες
	Θερμοδυναμικές Ιδιότητες
	Ιδιότητες Μεταφοράς Μάζας
	Φυσικοχημικές Σταθερές
	Δομικές Ιδιότητες
<b>Κινητικές Ιδιότητες</b>	Κινητικές Σταθερές για Ποιοτικά Χαρακτηριστικά του Τροφίμου
	Κινητικές Μικροβιακής Ανάπτυξης
<b>Αισθητηριακές Ιδιότητες</b>	Χρώμα & Εμφάνιση
	Άρωμα & Γεύση
<b>Φαρμακευτικές &amp; Ιατρικές Ιδιότητες</b>	Θετικές (Διατροφική σύσταση και λειτουργικά συστατικά) & Αρνητικές Ιδιότητες (Τοξικότητα)

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε σε διάφορα φυσικά και φυσικοχημικά φαινόμενα καθώς και σε ιδιότητες και μετρούμενα μεγέθη τα οποία συνδέονται με τα παραπάνω και εμπλέκονται λιγότερο ή περισσότερο στις διαδικασίες σχηματισμού πορώδους.

## 2.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες εξετάζουν τη συμπεριφορά ενός τροφίμου όταν σε αυτό ασκηθεί κάποια παραμορφωτική δύναμη. Ουσιαστικά σχετίζονται με την υφή του προϊόντος που θεωρείται ως ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας ποιότητας ενός τροφίμου.

## 2.2 Ρεολογικές Ιδιότητες

Οι ρεολογικές ιδιότητες δεν αφορούν μόνο τα προϊόντα σε υγρή μορφή αλλά και σε στερεή. Σε γενικές γραμμές τα διαφορά προϊόντα χαρακτηρίζονται από ελαστική, πλαστική και ιξώδη συμπεριφορά. Τα ιδανικά στερεά, όταν σε αυτά ασκηθεί μια παραμορφωτική δύναμη, ακολουθούν το νόμο του Hook επιδεικνύοντας μια ελαστική συμπεριφορά. Στην περίπτωση των ιδανικών ρευστών, αυτά θεωρούνται Νευτωνικά συστήματα στα οποία η τάση διάτμησης μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα διάτμησης. Η εξίσωση (19) είναι και αυτή που αποδίδει την παραπάνω σχέση.

$$\frac{F}{A} = n \frac{dv}{dr} \quad (19)$$

Στην παραπάνω σχέση με  $(F/A)$  χαρακτηρίζουμε τη δύναμη που πρέπει να ασκηθεί ανα μονάδα επιφανείας για να προκληθεί ροή (τάση διάτμησης) ενώ ο λόγος  $(dv/dr)$  είναι το μέτρο της ταχύτητας με την οποία η μία στοιβάδα του ρευστού κινείται ως προς την άλλη. Αυτός ο λόγος ονομάζεται ταχύτητα διάτμησης. Στην εξίσωση (19) ο συντελεστής  $(n)$  είναι ο συντελεστής ιξώδους που αναφέρεται συνήθως ως ιξώδες και εκφράζει το μέτρο της αντίστασης στη ροή.

Στην πραγματικότητα όλα τα πραγματικά υλικά (συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων) επιδεικνύουν μια συμπεριφορά που αποτελεί ένα συνδυασμό ιξώδους και ελαστικής συμπεριφοράς και είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο ιξωδοελαστικότητα.

## 2.3 Ενεργότητα Ύδατος

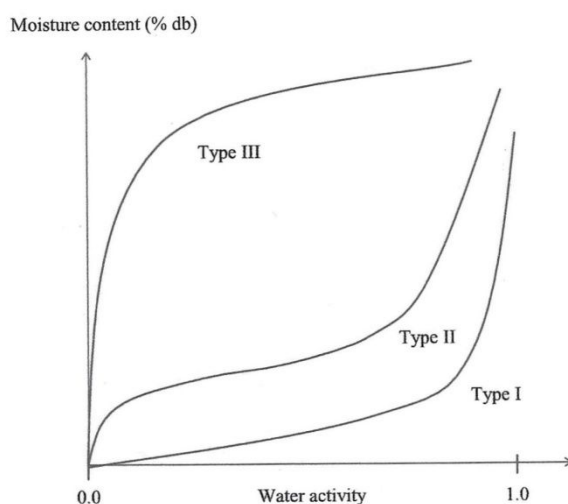
Η ενεργότητα ύδατος ( $a_w$ ) αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος η οποία συνδέεται τόσο με την σταθερότητα όσο και με τη διάρκεια ζωής ενός τροφίμου και αυτό γιατί τόσο οι περισσότερες από τις χημικές μεταβολές όσο και η μικροβιακή δράση συνδέονται με την ενεργότητα ύδατος.

Η σχέση από την οποία ορίζεται η ενεργότητα ύδατος ( $a_w$ ) παρουσιάζεται στην εξίσωση (20) όπου ( $P_w$ ) είναι η τάση ατμών του νερού στο περιβάλλον του τροφίμου και ( $P_w^0$ ) η τάση ατμών του καθαρού νερού. Κάτω από αυτό το πρίσμα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίση με τη σχετική υγρασία του αέρα (**RH**) ο οποίος περιβάλλει το τρόφιμο.

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^0} \quad (20)$$

Είναι γνωστό ότι οι συνθήκες φύλαξης και αποθήκευσης των τροφίμων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις φυσικοχημικές μεταβολές που πραγματοποιούνται σε ένα τρόφιμο και κατ' επέκταση στο χρόνο ζωής του τροφίμου. Σε σχέση με την ενεργότητα ύδατος η αποθήκευση του τροφίμου σε χώρους υψηλής υγρασίας όπου η τάση νερού στο περιβάλλον είναι μεγαλύτερη από αυτήν του τροφίμου έχει ως αποτέλεσμα την προσρόφηση υγρασίας (ρόφηση). Αρχικά δημιουργείται ένα μονομοριακό στρώμα ύδατος στην επιφάνεια του τροφίμου και ακολούθως η ποσότητα του νερού στο τρόφιμο αυξάνεται δημιουργώντας πολλαπλές στιβάδες.

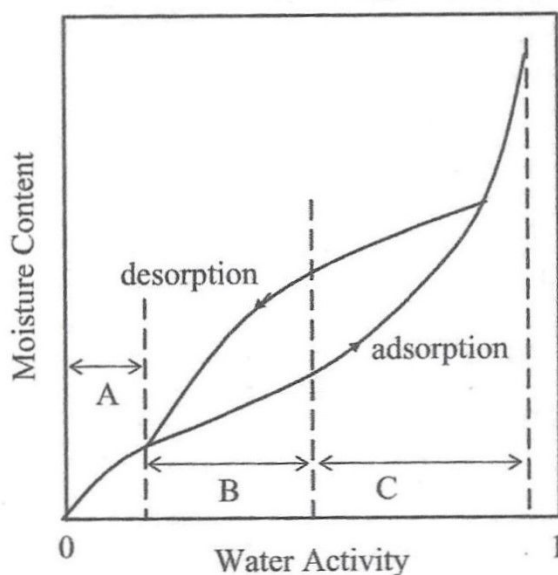
Η πειραματική έρευνα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων μεθόδων προσδιορισμού της προσρόφησης έδειξε ότι ανάλογα με τη δομή του προϊόντος και τον τρόπο προσρόφησης του ύδατος υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τύποι ρόφησης που περιγράφονται από αντίστοιχες ισόθερμες. (Jungam & Muhundar 2010) Η κατασκευή των καμπυλών αυτών γίνεται εξετάζοντας την προσρόφηση που παρουσιάζει ένα τρόφιμο ξεκινώντας από την απόλυτη ξηρή κατάσταση όπου η ενεργότητα είναι ίση με το μηδέν. Στο **Σχ. 4** που ακολουθεί παρουσιάζονται τρεις από αυτές τις ισόθερμες (Sehim & Sumnu 2006).



**Σχήμα 4:** Ισόθερμες ρόφησης (Sehim & Sumnu 2006)

Τα τρόφιμα ακολουθούν συνήθως, ισόθερμες οι οποίες προσομοιάζουν στον τύπο ρόφησης II (σιγμοειδείς καμπύλες).

Κατά αντιστοιχία με τις ισόθερμες ρόφησης υπάρχουν και οι ισόθερμες εκρόφησης όπου η κατασκευή τους γίνεται αντιστρόφως με παραπάνω, δηλαδή ξεκινώντας από ενεργότητα τροφίμου ίση με τη μονάδα. Εξετάζοντας τις ισόθερμες ρόφησης και εκρόφησης παρατηρούμε ότι δεν ταυτίζονται εμφανίζοντας έτσι το φαινόμενο της υστέρησης (Σχ. 5). Για την ερμηνεία αυτής της υστέρησης έχουν προταθεί μια σειρά από θεωρίες οι οποίες βασίζονται εν πολλοίς, στη φύση του τροφίμου. Ειδικά για πορώδη τρόφιμα όπως τα φρούτα αυτή η υστέρηση αποδίδεται στο φαινόμενο της τριχοειδούς συμπίκνωσης.



**Σχήμα 5:** Ισόθερμες ρόφησης και φαινόμενο υστέρησης (Sehim & Sumnu 2006)

#### 2.4 Μεταπτώσεις Φάσεων

Οι μεταπτώσεις φάσεων παρατηρούνται σε πολλά στάδια της επεξεργασίας ενός τροφίμου ενώ μπορεί να λαμβάνουν χώρα κατά τη φύλαξη ή αποθήκευση αυτού. Με δεδομένη την ετερογένεια των τροφίμων οι φυσικές και χημικές μεταβολές μπορεί να προκαλέσουν μετατροπή φάσεων όχι μόνο στα υγρά συστατικά του τροφίμου (π.χ. νερό) αλλά και στα στερεά (π.χ. πρωτεΐνες και μετουσίωση αυτών). Σαν αποτέλεσμα της πραγματοποίησης της μετατροπής των φάσεων έχουμε την αλλαγή στη μικροδομή του τροφίμου και προφανώς τη μεταβολή των δομικών ιδιοτήτων αυτού.

Οι κυριότερες μεταπτώσεις φάσεων είναι η κρυστάλλωση, η τήξη, η ζελατινοποίηση και η υαλώδης μετάπτωση άμορφων υλικών.

Η κρυστάλλωση θεωρείται ως μια πολύ σημαντική μετάπτωση φάσης και μπορεί να είναι επιθυμητή σε ένα τρόφιμο μπορεί όμως και όχι. Πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις που περιλαμβάνουν την πυρήνωση, την ανάπτυξη των κρυστάλλων και την ωρίμανση (Roos 1995). Κατά την πυρήνωση έχουμε το σχηματισμό σταθερών πυρήνων οι οποίοι δημιουργούνται ομοιογενώς ή ετερογενώς. Στην ομοιογενή πυρήνωση και σε συνθήκες υπερκορεσμού, δημιουργούνται, από τη σύγκρουση απλών μορίων, συστάδες, οι οποίες αναπτύσσονται και οδηγούν σε πυρήνες. Στην ετερογενή πυρήνωση η διαδικασία υποβοηθείται από την παρουσία ξένων σωμάτων τα οποία θα λειτουργήσουν ώστε να δημιουργηθούν τοπικά οι πρώτοι πυρήνες οι οποίοι στη συνέχεια θα αναπτυχθούν. Κατά το δεύτερο στάδιο, αυτό της ανάπτυξης των κρυστάλλων, τα μόρια διαχέονται στην αναπτυσσόμενη κρυσταλλική επιφάνεια ενσωματώνονται κατά διατεταγμένο τρόπο και το μέγεθος της κρυσταλλικής δομής αυξάνει. Τέλος η ωρίμανση είναι μια διαδικασία βελτιστοποίησης της ποιότητας των κρυστάλλων η οποία επιτυγχάνεται συνήθως με ανακρυστάλλωση.

Η τήξη είναι κατά τα γνωστά η μετατροπή της στερεής κατάστασης σε υγρή κάτι το οποίο επιτυγχάνεται συνήθως με προσφορά θερμότητας σε ένα σύστημα. Η θερμοκρασία για τη μετάβαση αυτή είναι χαρακτηριστική για το κάθε στερεό και είναι γνωστή ως σημείο τήξεως. Σε γενικές γραμμές η θερμότητα που εκλύεται κατά την κρυστάλλωση είναι ίδια με αυτήν που απαιτείται για την τήξη του στερεού και στα κρυσταλλικά πολυμερή όταν το τήγμα υπερψυχθεί λαμβάνουμε είτε ένα στερεό με ιξωδοελαστικά ρεολογικά χαρακτηριστικά είτε ένα υαλώδους μορφής στερεό.

Η υαλώδης μετάπτωση θεωρείται ως ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα στον χώρο των τροφίμων και συνδέεται τόσο με κινητικές ιδιότητες (ταχύτητα ανάπτυξης μικροοργανισμών και χημικών αντιδράσεων) όσο και με φυσικές ιδιότητες (ιδιότητες υφής). Συνεπώς βρίσκεται σε άμεση σύνδεση με το χρόνο ζωής και την ποιότητα του τροφίμου. Εξετάζοντας την υαλώδη μετάπτωση σε υπερψυχθέν τρόφιμο στο οποίο ανεβάζουμε σταδιακά τη θερμοκρασία θα παρατηρήσουμε ότι μια άμορφη περιοχή του τροφίμου, μετατρέπεται από μία σκληρή και εύθραυστη φάση σε μια τετηγμένη ελαστική κατάσταση (τήγμα σε κατάσταση υποψύξεως). Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην αυξημένη πλέον κινητικότητα την οποία αποκτούν οι μεγαλομοριακές αλυσίδες των συστατικών των

τροφίμων. Η θερμοκρασία που πραγματοποιείται η υαλώδης μετάπτωση ονομάζεται θερμοκρασία υάλου και συμβολίζεται με ( $T_g$ ), είναι χαμηλότερη του σημείου τήξεως και αποτελεί φυσική παράμετρο του τροφίμου ή του υλικού. Τα τρόφιμα που βρίσκονται σε υαλώδη κατάσταση είναι σταθερά, χωρίς να είναι εφικτό να υποστούν χημικές ή βιολογικές μεταβολές που αλλοιώνουν την ποιότητά τους (Liu-ring και συν. 2007). Σε ένα τρόφιμο η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό μειώνει γενικά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτήν την περίπτωση η κινητικότητα των μακρομοριακών αλυσίδων αυξάνει σημαντικά, ακριβώς λόγω της δυνατότητας του νερού να αυξάνει τον ελεύθερο όγκο. Η μείωση της θερμοκρασίας της υαλώδους μετάπτωσης, κάτω από την ίδια λογική, παρατηρείται και όταν των μέγεθος των μακρομοριακών αλυσίδων ελαττώνεται, ενώ και ο ρυθμός θέρμανσης επηρεάζει επίσης τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία της υαλώδους μετάπτωσης είναι περίπου 100°C μικρότερη από το σημείο τήξης των συστατικών ενός τροφίμου (Roos 1995).

Η ζελατινοποίηση αποτελεί μια περίπτωση μετάπτωσης φάσεων η οποία συναντάται σε περιπτώσεις τροφίμων τα οποία περιέχουν άμυλο (Biliaderis και συν. 1980). Η ζελατινοποίηση προκαλείται όταν το τρόφιμο που περιέχει άμυλο θερμανθεί παρουσία ποσότητας νερού. Να τονίσουμε ότι το άμυλο σε κρύο νερό είναι αδιάλυτο. Η αύξηση της θερμοκρασίας βοηθάει ώστε το νερό να μπορεί να υπεισέλθει στο εσωτερικό των κόκκων του αμύλου, διασπώντας την εξωτερική μεμβράνη, η οποία σχηματίζεται με τη βοήθεια δεσμών υδρογόνου που αναπτύσσονται μεταξύ τμημάτων της αμυλοπηκτίνης. Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα μέσω διαδοχικών σταδίων τα οποία οδηγούν τελικά στην διόγκωση και αύξηση του ιξώδους του προϊόντος και τη μετατροπή του αιωρήματος σε γέλη. Αυτή η μετάπτωση φάσεως ονομάζεται ζελατινοποίηση και διερευνάται με διαφορεική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC), φασματοσκοπία μαγνητικού πυρηνικού συντονισμού (NMR), περίθλαση ακτίνων X και άλλες μεθόδους.

## **2.5 Πορώδες και Φυσικοχημικά Φαινόμενα**

Όπως είδαμε και στην εισαγωγή η ανάπτυξη του πορώδους συνδέεται με μια σειρά φαινομένων που σχετίζονται με τη ροή και τη μεταφορά μάζας. Στην πρώτη περίπτωση ανήκουν συντελεστές και παράμετροι που αναφέρονται και σχετίζονται με τη διαπερατότητα που παρουσιάζει ένα τρόφιμο (permeability) ενώ στη δεύτερη περίπτωση με τη διάχυση (diffusion).

### 2.5.1 Διαπερατότητα σε Νερό και Ατμούς

Τα τρόφιμα ως πορώδη υλικά μπορεί να παρουσιάζουν μια πολυεπίπεδη δομή, με τη πίεση στην επιφάνεια να διαφοροποιείται από αυτήν στο εσωτερικό του τροφίμου. Με τον όρο διαπερατότητα αναφερόμαστε στην αντίσταση που επιδεικνύει ένα στερεό υπόστρωμα (στην περίπτωσή μας το τρόφιμο) ως προς την ροή εντός αυτού είτε νερού είτε ατμών. Σε αντίθεση με τον συντελεστή διάχυσης η μόνη ωθούσα δύναμη, για αυτήν τη ροή, θεωρείται ότι είναι η μεταβολή της πίεσης. Είναι προφανές ότι η διαπερατότητα συνδέεται τόσο με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός τροφίμου όσο και με τους τρόπους επεξεργασίας και αποθήκευσης αυτού. Στο χώρο των τροφίμων υπάρχει μια σειρά διαδικασιών όπου ο ρόλος τον οποίο διαδραματίζει η διαπερατότητα είναι χαρακτηριστικός. Για παράδειγμα στην περίπτωση ξήρανσης ή ψησίματος όπου η θέρμανση που εφαρμόζεται δημιουργεί λόγω εξάτμισης μια αυξημένη πίεση προς το εξωτερικό του τροφίμου. Ένα άλλο παράδειγμα αφορά την περίπτωση παραλαβής συστατικών από ένα τρόφιμο όπως στην περίπτωση παραλαβής προϊόντων από λαχανικά με μηχανικό τρόπο. Οι ασκούμενες υψηλές πιέσεις έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση ρευστών συστατικών από το στρώμα των λαχανικών σε μια διαδικασία που προσομοιάζει με την εκχύλιση (Datta A.K., 2006).

Η διαπερατότητα εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του στερεού υποστρώματος (μέγεθος πόρων, σχήμα πορώδεις) όσο και από του ρευστού (ιξώδες, πυκνότητα) και για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy της εξίσωσης (21).

$$\frac{Q}{\Delta P} = K \frac{A}{l\mu} \quad (21)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με  $(Q)$  συμβολίζουμε τη ροή, ως  $(\Delta P)$  συμβολίζουμε τη μεταβολή της πίεσης,  $(A)$  είναι η επιφάνεια του τροφίμου,  $(l)$  το μήκος,  $(\mu)$  το ιξώδες και  $(K)$  είναι η διαπερατότητα.

### 2.5.2 Συντελεστής Διάχυσης

Με τον όρο διάχυση αναφερόμαστε στον μηχανισμό μεταφοράς μάζας εντός ενός υλικού ο οποίος οφείλεται σε τυχαίες κινήσεις των μορίων. Ο παραπάνω ορισμός διατυπώθηκε από τον Crank το 1975 και είναι προφανές ότι κατανοώντας το μηχανισμό διάχυσης κατανοούμε καλύτερα και τις παραμέτρους που επηρεάζουν και ελέγχουν αυτήν



την μεταφορά. Ο συντελεστής διάχυσης κατά αναλογία με τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, συνδέεται με το πόσο εύκολα ή δύσκολα , μπορεί να μετακινηθεί μια ουσία εντός ενός συγκεκριμένου υλικού. Στην περίπτωση των τροφίμων είναι συνδεδεμένος, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, με την μετακίνηση της υγρασίας μία διαδικασία που επηρεάζει ως γνωστό την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η όλη διαδικασία έχει περιγραφεί σε πολλές εργασίες ως μια διαφασική διεργασία διάχυσης μορίων νερού σε ένα άλλο μέσο ή φάση. Ως εκ τούτου η πορώδης δομή του υλικού διαδραματίζει και σε αυτήν την περίπτωση βασικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου.

Η διάχυση της υγρασίας στα τρόφιμα συναντάται σε μια σειρά διεργασιών με προεξάρχουσα αυτήν της ξήρανσης. Ως εκ τούτου ο προσδιορισμός του παραπάνω συντελεστή θα αποτελούσε σημαντική παράμετρο βοήθειας στην βελτιστοποίηση των πειραματικών συνθηκών κατά την πραγματοποίηση της διεργασίας. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι και τόσο εύκολο να πραγματοποιηθεί αφού η μέθοδος προσδιορισμού που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πρέπει να εφαρμόζεται και να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα κάτω όλες τις πειραματικές συνθήκες. Έτσι κατά καιρούς έχουν εμφανισθεί τρόποι υπολογισμού οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές παραμέτρους και κατά διαφορετικό τρόπο. Η πιο κοινή ίσως εξίσωση που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης παρουσιάζεται στην εξίσωση (15) η οποία ακολουθεί.

$$D_{AB} = \frac{0.0011858T^{2/3}(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B})}{P\sigma_{AB}^2\Omega_{D,AB}} \quad (22)$$

Στην εξίσωση αυτή ( $M_A$ ) και ( $M_B$ ) είναι τα μοριακά βάρη των συστατικών **A** και **B** αντίστοιχα, (**T**) και (**P**) η απόλυτη θερμοκρασία και πίεση, ( $\sigma_{AB}$ ) είναι η διάμετρος σύγκρουσης και τέλος ( $\Omega_{AB}$ ) είναι μια αδιάστατη συνάρτηση της θερμοκρασίας με το διαμοριακό δυναμικό (Dadmohammadi Y. & Datta K. 2020).

Αντίστοιχα και για τα αέρια η πιο χρησιμοποιούμενη ίσως εξίσωση η οποία δίνει τον συντελεστή διάχυσης αερίου εντός ενός τροφίμου είναι η εξίσωση (16) η οποία ακολουθεί .

$$D_{\text{eff},g} = \frac{2.13}{P} (T/273)^{1.8} \quad (23)$$

Στην παραπάνω εξίσωση (**T**) και (**P**) η απόλυτη θερμοκρασία και πίεση (Dadmohammadi Y. & Datta K. 2020).

### 2.5.3 Συντελεστής Τριχοειδούς Διάχυσης

Η τριχοειδής ροή συμβαίνει σε πορώδη υλικά όπως τα τρόφιμα, μόνο όταν αυτά έχουν υψηλό ποσοστό υγρασίας. Σε αυτήν την περίπτωση τα τριχοειδή είναι γεμάτα με νερό και οι τριχοειδείς δυνάμεις συντελούν στην μεταφορά του νερού στους πόρους. Ο συντελεστής τριχοειδούς διάχυσης αποτελεί μια ακόμη παράμετρος που συνδέεται με το πορώδες και ουσιαστικά περιγράφει την ευκολία ή το αντίθετο τη δυσκολία με την οποία μπορεί να μετακινηθεί ένα ρευστό μέσα στο πορώδες σύστημα υπό την επίδραση της βαθμιδωτής μεταβολής της πίεσης εντός του τριχοειδούς. Όσο περισσότερο είναι το ποσοστό της υγρασίας τόσο ευκολότερη γίνεται η τριχοειδής διάχυση και τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τριχοειδούς διάχυσης για το νερό. Ουσιαστικά ο συντελεστής τριχοειδούς διάχυσης εκτός από την περιεχόμενη υγρασία εξαρτάται και από τη θερμοκρασία και στην περίπτωση των τροφίμων όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία μπορεί να υπολογισθεί από άλλες παραμέτρους του πορώδους υλικού όπως η πυκνότητα και η διαπερατότητα. Η εξίσωση (19) μας δίνει μια εικόνα για την εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς διάχυσης για το νερό.

$$D_{w,cw} = \frac{\partial h}{\partial c} \frac{\rho_w^2 g K_I}{\mu_w} \quad (24)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με ( $D_{w,cw}$ ) συμβολίζουμε τον συντελεστή τριχοειδούς διάχυσης, ( $\rho_w$ ) την πυκνότητα του νερού, ( $K_I$ ) είναι η διαπερατότητα του υλικού ( $g$ ) ο συντελεστής επιτάχυνσης της βαρύτητας, ( $\mu_w$ ) το ιξώδες του νερού και ( $h$ ) το ποσοστό του νερού που είναι συνδεδεμένο σε ένα υπόστρωμα (τρόφιμο) με δεσμούς υδρογόνου (matric potential).

## 3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες τη στενή αλληλεπίδραση ανάμεσα στη μικροδομή ενός τροφίμου και των συνθηκών των διεργασιών στις οποίες αυτό μετέχει. Με δεδομένη την πολυπλοκότητα της δομής των τροφίμων ακόμη και μικρές αλλαγές στο περιβάλλον προκαλούν σημαντικές μεταβολές στις ιδιότητες, στην ποιότητά και ασφάλεια του τελικού προϊόντος.

Στα πλαίσια αυτά στην παρούσα ενότητα θα επικεντρωθούμε στην μελέτη της ανάπτυξης του πορώδους κατά τις σημαντικότερες διεργασίες στις οποίες συμμετέχει ένα τρόφιμο.

Το πορώδες, σημαντική δομική ιδιότητα, σε βασικά στάδια επεξεργασίας ενός τροφίμου, μπορεί να υποστεί μεταβολές που επηρεάζουν τις οργανοληπτικές ιδιότητες και την ποιότητα ενός τροφίμου. Πριν ξεκινήσουμε όμως να αναλύουμε την μεταβολή του πορώδους ας δούμε συνοπτικά ποιες είναι αυτές οι διεργασίες στις οποίες ένα τρόφιμο μπορεί να συμμετέχει. Αρχίζοντας από την προ-επεξεργασία του τροφίμου, η ξήρανση, η εκβολή, το μαγείρεμα, το τηγάνισμα, το ψήσιμο αποτελούν σημαντικά στάδια στην αλυσίδα των διεργασιών. Ανάμεσα σε όλες τις παραπάνω διαδικασίες, η ξήρανση αποτελεί ίσως την πιο σημαντική και για το λόγο αυτό θα εστιάσουμε λίγο περισσότερο στην επίδραση που έχει ο τρόπος ξήρανσης στην ανάπτυξη του πορώδους.

### **3.1 Διεργασίες Προεπεξεργασίας και Πορώδες**

Η προ-επεξεργασία των τροφίμων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία έχει ως στόχο να διατηρήσει τη δομική ακεραιότητα του τροφίμου, να παρατείνει πιθανώς το χρόνο ζωής του αλλά και να δώσει ένα προϊόν με βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Ανάμεσα στις μεθόδους προεπεξεργασίας μπορεί να συμπεριλαμβάνονται βασικές διεργασίες όπως ψήσιμο τηγάνισμα, κατάψυξη αλλά και άλλες οι οποίες είναι λιγότερο γνωστές. Με δεδομένο ότι σε επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε στο ψήσιμο, στο τηγάνισμα ή την κατάψυξη στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούμε σε προ-επεξεργασία που περιλαμβάνει την συμπύκνωση ύδατος και την επεξεργασία με διαλύματα αλάτων ή άλλων συστατικών.

#### **3.1.1. Προεπεξεργασία με Χρήση Διαλυμάτων**

Η προ-επεξεργασία με διαλύματα έχει ως στόχο τη διατήρηση της αρχικής δομής για όσο περισσότερο χρόνο είναι αυτό εφικτό αλλά και τη βελτίωση της συμπεριφοράς ενός τροφίμου στις διεργασίες που ακολουθούν. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά παραδείγματα χρήσης διαφόρων διαλυμάτων, η χρησιμοποίηση των οποίων οδηγεί σε προϊόντα με αυξημένο ή ελαττωμένο μέγεθος πόρων ανάλογα με τι κάθε φορά επιλέγουμε.

Έτσι η χρησιμοποίηση διαλύματος αλκοόλης και ζάχαρης όπως πραγματοποιήθηκε στην περίπτωση του Βραζιλιάνικου φρούτου πέκι οδήγησε στην ελάττωση του πορώδους

όταν το τρόφιμο λυοφιλοποιήθηκε. Αυτή η ελάττωση του πορώδους ερμηνεύθηκε με το σχηματισμού κρυσταλλικών δομών στο λυοφιλοποιήσιμο προϊόν οι οποίες ουσιαστικά οδηγούν σε ελάττωση του φαινομένου πορώδους (Dadmohammadi Y. & Datta K. 2020), παρεμπόδιση της κυτταρικής κατάρρευσης στο στάδιο της λυοφιλοποίησης αλλά και μείωση του ρυθμού επανυδάτωσης, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα αύξησης του χρόνου αποθήκευσης του τελικού προϊόντος.

Στον αντίποδα εάν πριν την ξήρανση βυθίσουμε κόκκινες πιπεριές σε υδατικό διάλυμα NaCl, το κυτταρικό τρίχωμα ενισχύεται και η κυτταρική κατάρρευση αναστέλλεται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ιόντων  $\text{Na}^+$  με το κυτταρικό τοίχωμα η οποία ενισχύει την ανθεκτικότητα. Σαν αποτέλεσμα το προϊόν διατηρεί το πορώδες του κατά την ξήρανση γεγονός το οποίο σε επόμενο στάδιο βοηθάει την ταχεία επανυδάτωση αυτού (Araki και συν. 2001).

Στο σημείο αυτό καλό θα ήταν να επισημάνουμε ότι και το νερό από μόνο του μπορεί να επηρεάσει το πορώδες ενός τροφίμου. Για παράδειγμα σε φρούτα και λαχανικά, με υψηλή περιεκτικότητα σε άμυλο, η επίδραση του νερού μέσω του μηχανισμού της κυτταρικής διάχυσης οδηγεί σε διόγκωση και ζελατινοποίηση του αμύλου με επακόλουθο τη διαφοροποίηση του πορώδους (Alvarez και συν. 1995). Σε γενικές γραμμές η διόγκωση των κυτταρικών τοιχωμάτων που μπορεί να γίνει λόγω της διάχυσης του νερού οδηγεί σε συμύκνωση του εξωκυττάριου χώρου και μείωση του πορώδους.

### 3.1.2 Blanching (Λεύκανση-Ζεμάτισμα)

Με τον όρο blanching αναφερόμαστε στη θερμική κατεργασία που υφίστανται τα τρόφιμα πριν από την κατάψυξη τη ξήρανση ή την κονσερβοποίησή τους. Στα Ελληνικά ο όρος blanching αποδίδεται ως ζεμάτισμα ή λεύκανση και ουσιαστικά η διαδικασία έχει ως σκοπό την απενεργοποίηση κυτταρικών λειτουργιών και ενζύμων, με τελικό στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη χρονικά διατήρηση του προϊόντος. Σαν θερμαντικά μέσα χρησιμοποιούνται κυρίως νερό  $100^{\circ}\text{C}$ , ατμός και θερμός αέρας διαφόρων θερμοκρασιών. Για τα λαχανικά χρησιμοποιείται κυρίως θερμό νερό ή ατμό ενώ στα φρούτα πολλές φορές μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση άλμης ασβεστίου. Κατά την διάρκεια του blanching αυτό που παρατηρούμε είναι η κυτταρική διόγκωση, κάτι που μπορεί κάτω από προϋποθέσεις να αυξήσει το πορώδες αλλά εάν πραγματοποιηθεί γενικότερη κυτταρική θραύση θα έχουμε δομική κατάρρευση και αντίθετα αποτελέσματα. Για τη διατήρηση του

πορώδους, έχει αποδειχθεί ότι σε πάρα πολλές περιπτώσεις η διαδικασία του blanching είναι καλό να γίνει με συνδυασμό θερμοκρασιών. Μιας χαμηλότερης και μιας υψηλότερης. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της πατάτας με την κατεργασία να ξεκινάει σε θερμοκρασία περίπου 65 °C και να ακολουθεί ανύψωση της θερμοκρασίας σε 95-100 °C. Η διαδικασία οδηγεί στην όσο το δυνατόν πιο μικρή μεταβολή του πορώδους συγκρινόμενο με προϊόν το οποίο υφίσταται λεύκανση χωρίς προθέρμανση (Sanjuan N. και συν. 2005, Dadmohammadi Y. & Datta K. 2020). Γενικά όταν το blanching πραγματοποιείται με τη βοήθεια χαμηλότερων θερμοκρασιών έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση της κυτταρικής δομής και την εν γένει ομοιομορφία του δείγματος.

### 3.1.3 Γενικά Συμπεράσματα στις Διεργασίες Προεπεξεργασίας

Σε γενικές γραμμές μια διαδικασία προ-επεξεργασίας τροφίμων, οδηγεί σε αύξηση του πορώδους όταν συμπιέζεται ο εξωκυττάριος χώρος, η κυτταρική ισορροπία διαταράσσεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παγιδευμένη υγρασία να μετακινείται προς την επιφάνεια του δείγματος, ενώ η ακεραιότητα των κυττάρων να παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστη. Μικρές αλλαγές σε μία διαδικασία μπορεί να οδηγήσουν, σε επόμενο στάδιο, σε κυτταρική κατάρρευση και συρρίκνωση. Ως εκ τούτου παράμετροι που σχετίζονται με το χρόνο διάρκειας της μεταφοράς θερμότητας, τον τρόπο επίδρασης αλλά και την προέλευση του δείγματος, θα πρέπει να εξετάζονται πολύ προσεκτικά πριν εφαρμοσθούν.

## 4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΕΣ

Ένας σημαντικός αριθμός από τις διεργασίες στις οποίες μετέχει ένα τρόφιμο σχετίζεται με μετάδοση θερμότητας προς αυτό. Ανάμεσα σε αυτές η σημαντικότερη είναι ίσως αυτή της ξήρανσης, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από διάφορες συνθήκες. Οι επιμέρους παράμετροι αυτών των συνθηκών διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση της πορώδους δομής του τροφίμου. Ποιες όμως είναι αυτές οι παράμετροι; Σε μια διαδικασία ξήρανσης οι σημαντικότερες εξωτερικές πειραματικές παράμετροι σχετίζονται με τη θερμοκρασία, την ταχύτητα ξήρανσης και την ασκούμενη πίεση. Οι εσωτερικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ξήρανσης αφορούν τη χημική σύσταση του προϊόντος, το αρχικό πορώδες και σχήμα

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε τόσο στις μεθόδους ξήρανσης που έχουν αναπτυχθεί όσο και στις επιμέρους παραμέτρους παραθέτοντας παραδείγματα για το πώς επηρεάζεται το πορώδες από αυτές.

#### 4.1 Γενικά περί Ξήρανσης

Η ξήρανση θεωρείται ως μια σύνθετη διαδικασία η οποία έχει ως σκοπό την απομάκρυνση του νερού από ένα τρόφιμο. Βασικός στόχος της διεργασίας είναι η επιμήκυνση του χρόνου ζωής του τροφίμου μέσω της παρεμπόδισης της μικροβιακής δράσης, όπως συμβαίνει συνήθως σε τρόφιμα με χαμηλή ενεργότητα ύδατος. Ταυτόχρονα η παραλαβή αποξηραμένων προϊόντων με διατήρηση των χαρακτηριστικών των νωπών τροφίμων και δυνατότητα ταχείας επανυδάτωσης αποτελεί επίσης έναν σημαντικό στόχο. Τέλος με τη ξήρανση ενός προϊόντος επιτυγχάνονται και οικονομικά οφέλη, τα οποία προκύπτουν από την ελάττωση της μάζας και του όγκου των μεταφερομένων ή αποθηκευμένων αποξηραμένων προϊόντων.

Στο σημείο αυτό θα ήταν χρήσιμο να ασχοληθούμε με τη μορφή με την οποία βρίσκεται το νερό στα διάφορα τρόφιμα. Έτσι το νερό στα τρόφιμα βρίσκεται σε δύο μορφές. Η πρώτη αναφέρεται ως δεσμευμένο ύδωρ και η δεύτερη ως ελεύθερο.

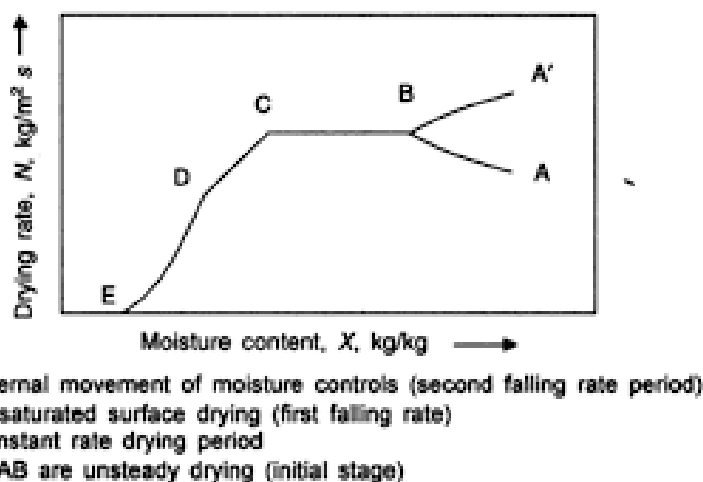
Το ελεύθερο ύδωρ βρίσκεται στις πιο απομακρυσμένες θέσεις από τα μη υδατικά συστατικά, λειτουργεί ως διαλύτης παγώνει σε θερμοκρασία μικρότερη από 0°C και ευνοεί την ανάπτυξη μικροβίων. Το ελεύθερο νερό παρουσιάζει μακροσκοπική ροή εκτός φυσικά από αυτό που είναι σε τριχοειδείς πόρους.

Στην περίπτωση του δεσμευμένου ύδατος τα πράγματα είναι λίγο πιο σύνθετα. Ως δεσμευμένο ύδωρ χαρακτηρίζουμε το νερό που υπάρχει στην περιοχή κοντά στα μη υδατικά συστατικά του τροφίμου. Δεν παγώνει ούτε στο -40°C δεν είναι διαθέσιμο ως διαλύτης ή ως χημικό αντιδραστήριο και κατά βάση δεν ευνοεί την ανάπτυξη μικροβίων. Για το δεσμευμένο ύδωρ έχουμε μία επιμέρους διάκριση. Έτσι διακρίνουμε αρχικά το ισχυρά δεσμευμένο νερό το οποίο συνδέεται με τα μη υδατικά συστατικά. Ακολούθως έχουμε το γειτνιαζόν ύδωρ το οποίο βρίσκεται πλησίον των μη υδατοδιαλυτών συστατικών με τα οποία συνδέεται με τις ιοντικές τους ομάδες. Και τέλος έχουμε το πολυστρωματικό νερό το οποίο βρίσκεται μετά το γειτνιαζόν και συνδέεται με τα μη υδατοδιαλυτά συστατικά με

δεσμούς υδρογόνου. Το πολυστρωματικό νερό επιτρέπει τουλάχιστον σε ένα μικρό σχετικά ποσοστό την ανάπτυξη μικροβιακής δράσης.

Η απομάκρυνση του νερού από τα τρόφιμα είναι δυσκολότερη όσο αυτό είναι δεσμευμένο. Αντίθετα το ελεύθερο νερό απομακρύνεται πολύ πιο εύκολα. Η απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφορών μηχανισμών που βασίζονται σε μεγάλο ποσοστό στο φαινόμενο της διάχυσης (διάχυση υγρής φάσης στους πόρους του στερεού, τριχοειδής κίνηση, διάχυση προς την επιφάνεια, μεταφορά λόγω μεταβολής πίεσης κλπ).

Στο Σχ.6 το οποίο ακολουθεί παρουσιάζεται μια καμπύλη η οποία αναπαριστά το ρυθμό ξήρανσης συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας



**Σχήμα 6:** Διάγραμμα ξήρανσης (Barbosa-Canowaw & Vega Mercado 1996)

Σε αυτό το σχήμα διακρίνουμε τρεις κύριες περιοχές (Barbosa-Canowaw & Vega Mercado 1996, Λαζαρίδης 2020) . Η περιοχή (AB) (ή A'B ) είναι η περιοχή προσαρμογής όπου η επιφάνεια του τροφίμου να ισορροπήσει σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα. Ακολουθεί η περιοχή (BC) όπου απομακρύνεται το ελεύθερο ύδωρ και η όλη διαδικασία απομάκρυνσης της υγρασίας πραγματοποιείται με έναν σταθερό ρυθμό (στάδιο σταθερού ρυθμού). Τέλος κατά τη φάση (CE) που είναι το στάδιο ελαττούμενου ρυθμού, η ταχύτητα μεταφοράς υγρασίας από το εσωτερικό του τροφίμου είναι μικρότερη από την ταχύτητα εξάτμισης από την επιφάνεια με επακόλουθο τη δημιουργία στην επιφάνεια ξηρών περιοχών. Στο στάδιο αυτό διακρίνουμε την περιοχή (CD) όπου όλες οι υγρές περιοχές στην επιφάνεια έχουν εξαφανισθεί και την περιοχή (DE) όπου η ξήρανση πραγματοποιείται όταν όλη η εξωτερική επιφάνεια είναι

ξηρή. Από το Σχ.6 παρατηρούμε ότι αν και κατά το στάδιο του ελαττούμενου ρυθμού το νερό που απομακρύνεται είναι σχετικά λιγότερο συγκρινόμενο με τα άλλα στάδια ο χρόνος είναι μεγαλύτερος. Για το λόγο αυτό το στάδιο αυτό είναι συνήθως και αυτό που ρυθμίζει τη ταχύτητα της όλης διεργασίας. Η τιμή της υγρασίας κατά την οποία έχουμε μετάβαση από το στάδιο σταθερού ρυθμού σε αυτό του ελαττούμενου ονομάζεται κρίσιμη υγρασία.

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης μία σειρά πολύπλοκων φυσικών διαδικασιών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της πορώδους δομής και κατ'επέκταση τη διαφοροποίηση για το τρόφιμο, των ιδιοτήτων που συνδέονται με φαινόμενα μεταφοράς και δομικές ιδιότητες. Σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των αποξηραμένων τροφίμων (όπως για παράδειγμα η τραγανότητα) επηρεάζονται από την ύπαρξη πορώδους δομής. Η αποτυχία να ελέγξουμε τον ρυθμό ξήρανσης, επιλέγοντας για παράδειγμα μια λανθασμένη μέθοδο, επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη του πορώδους στο προϊόν, αφού συνήθως έχει ως αποτέλεσμα συρρίκνωση η οποία συνοδεύεται με δομική κατάρρευση (Andersson και συν.1994)

Η συρρίκνωση των υλικών αποτελεί συνήθως μια αρνητική εξέλιξη όσον αφορά την ποιότητα των τελικών προϊόντων, αφού πλέον η δυνατότητα ταχείας ενυδάτωσης είναι εξαιρετικά μειωμένη ενώ συρρικνωμένα προϊόντα έχουν αυξημένη σκληρότητα και οπτικά μέτρια εικόνα. Η συρρίκνωση, η οποία εξαρτάται από την περιεχόμενη στο τρόφιμο υγρασία, πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τη διάχυση και απομάκρυνση του ύδατος προς την εξωτερική επιφάνεια. Η δομή και το σχήμα των κυττάρων ενώ στα αρχικά στάδια διατηρούνται χωρίς σημαντικές αλλαγές, σε επόμενα στάδια καθώς το προϊόν συρρικνώνεται αυτά παραμορφώνονται.

Οι μέθοδοι ξήρανσης είναι εξαιρετικά διαδεδομένοι και σύμφωνα με την βιβλιογραφία υπάρχουν περισσότεροι από 200 τύπους ξηραντήρων (Mujundar 1997) και για κάθε έναν από αυτούς οι συνθήκες για την διαδικασία ξήρανσης (π.χ. θερμοκρασία θαλάμου ξήρανσης, πίεση, ταχύτητα αέρα, χρόνος ξήρανσης) εξαρτώνται και καθορίζονται με βάση όχι μόνο από τις προδιαγραφές του προϊόντος, αλλά και την ακολουθούμενη μέθοδο ξήρανσης. Για παράδειγμα η επιλογή της ξήρανσης με λυοφιλοποίηση, οδηγεί συνήθως σε προϊόντα με το μεγαλύτερο δυνατό βαθμό ανάπτυξης πορώδους (80-95%) σε σχέση με όλες τις άλλες μεθόδους. Χαρακτηριστικός είναι ο πίνακας (2) που ακολουθεί και συνοψίζει μια συγκριτική μελέτη της ανάπτυξης του πορώδους, σε μια σειρά τροφίμων τα οποία έχουν υποστεί ξήρανση με διαφορετικές μεθόδους. Ο πίνακας έχει ληφθεί από σχετικό άρθρο ανασκόπησης (Joarder και συν. 2016).



**Πίνακας 2:** Σύγκριση του πορώδους για ξήρανση τροφίμων υπό διαφορετικές μεθόδους (Joarder και συν. 2016)

Τρόφιμο	Ανάπτυξη Πορώδους σε διαφορετικές μεθόδους ξήρανσης					Βιβλιογραφική Παραπομπή
	Συμβατική Ξήρανση	Ξήρανση με μικροκύματα	Ξήρανση με όσμωση	Ξήρανση υπό κενό	Λυοφιλοποίηση	
<b>Μήλο</b>	0.6	0.75	0.55	0.5-0.73	0.75-0.92	Krokida και συν. (1997, 1998) Giraldo και συν. (2003) Karathanos και συν. (1996)
<b>Μπανάνα</b>	0.20	0.25	0.20	0.2-0.7	0.8-0.9	Krokida και συν. (1997) Krokida & Maroulis (1997)
<b>Πατάτα</b>	0.20	0.70	-	0.15-0.25	0.78-0.87	Krokida & Maroulis (1997) Krokida και συν. (1997, 1998) Karathanos et al (1996)
<b>Καρότο</b>	0.10	0.70	-	0.1-0.5	0.88-0.94	Krokida and Maroulis (1997) Karathanos και συν. (1996)
<b>Μυρτίλο (Blueberry)</b>	0.15	0.21	-	0.45	0.70	Yang & Atallah (1985)
<b>Κυδώνι</b>	0.17	-	0.08	-	0.72	Koc και συν. (2008) Tsami & Katsioti (2000)

Στις επόμενες ενότητες θα μελετήσουμε εκτενέστερα την επίδραση που έχουν οι σημαντικότερες μέθοδοι ξήρανσης στην ανάπτυξη του πορώδους και οι οποίες όπως προκύπτει και από τον παραπάνω πίνακα είναι:

- 1) Ξήρανση με αέρα
- 2) Ξήρανση με ώσμωση
- 3) Ξήρανση με τη βοήθεια μικροκυμάτων
- 4) Ξήρανση υπό κενό
- 5) Ξήρανση με λυοφιλοποίηση

## 4.2 Ξήρανση με Ρεύμα Αέρα

Η ξήρανση με τη χρησιμοποίηση ρεύματος αέρα αποτελεί μια αρκετά παλιά, χαμηλού σχετικά κόστους διεργασία, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη συντήρηση κυρίως των τροφίμων και εξακολουθεί να παρουσιάζει βιομηχανικό ενδιαφέρον.

Τα αποτελέσματα σχετικά με την ανάπτυξη του πορώδους σε αυτήν τη διεργασία παρουσιάζονται διαφοροποιημένα και βρίσκονται σε στενή σχέση με τις συνθήκες ξήρανσης και το είδος του τροφίμου. Για παράδειγμα στην περίπτωση ξήρανσης της γλυκοπατάτας το πορώδες ελαττώνεται ενώ στην περίπτωση της ξήρανσης μπανάνας και μήλων το πορώδες αυξάνεται (Lozano και συν. 1983 , Krokida & Maroulis 1997).

Όπως συμβαίνει σε κάθε διαδικασία ξήρανσης, για να αναλυθεί ή/και να προβλεφθεί η ανάπτυξη του πορώδους είναι απαραίτητη η γνώση και κατανόηση της κυτταρικής δυναμικής και απόκρισης, της πορώδους δομής. Το γεγονός αυτό βέβαια όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες δεν είναι πάντα εφικτό.

Σε γενικές γραμμές η αφυδάτωση των τροφίμων με ξήρανση σε ρεύμα αέρος, περιλαμβάνει τη διάχυση του νερού από το εσωτερικό προς την εξωτερική επιφάνεια του υλικού που σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει πολλές φορές ως αποτέλεσμα την κατάρρευση της δομής και την παραλαβή προϊόντων με χαμηλό πορώδες.

Εξετάζοντας τους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της διεργασίας, η επιλογή και ο έλεγχος της θερμοκρασίας σε όλη τη διάρκεια της ξήρανσης, είναι η σημαντικότερη ίσως παράμετρος για την παραλαβή προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Σε χαμηλές έως μέσες θερμοκρασίες οι ατμοί διέρχονται από το πορώδες σύστημα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε τα κύτταρα, τα κυτταρικά τοιχώματα και τα εξωκυττάρια τμήματα να έχουν αρκετό χρόνο προκειμένου να υιοθετήσουν κατά ομαλό τρόπο τις επερχόμενες αλλαγές, χωρίς να διαταράσσεται η ακεραιότητα της όλης δομής. Ως εκ τούτου η σταδιακή ξήρανση με αέρα σε χαμηλή ταχύτητα και χαμηλές έως μέσες θερμοκρασίες οδηγεί στην διατήρηση και ανάπτυξη της πορώδους δομής.

Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η πίεση στο εσωτερικό του δείγματος είναι αρκετά έντονη και οι ατμοί εξερχόμενοι ασκούν σημαντικές δυνάμεις στην κυτταρική δομή καταστρέφοντας το πορώδες σύστημα. Το αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι προφανώς η κατάρρευση του πορώδους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μια διαφοροποίηση στην πορώδη δομή μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού του τροφίμου. Σε υψηλές θερμοκρασίες η υγρασία από την επιφάνεια εξατμίζεται ταχύτατα. Έτσι στην επιφάνεια τα περισσότερα κύτταρα μπορούν να καταρρεύσουν προκαλώντας όμως σκλήρυνση του εξωτερικού του τροφίμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένας σημαντικός αριθμός κυττάρων στο εσωτερικό του τροφίμου παραμένει ανέπαφο διαθέτοντας προφανώς περισσότερους πόρους από το επιφάνεια του τροφίμου.

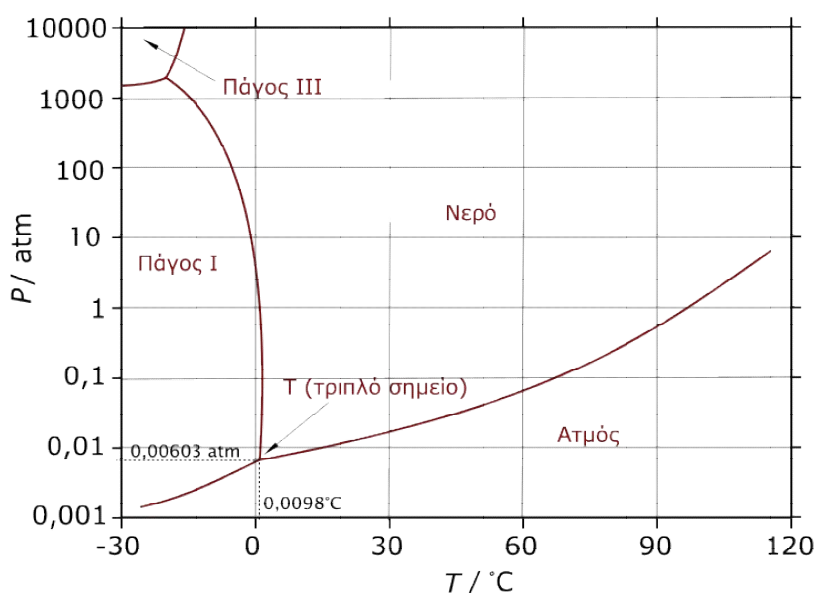
Συμπληρωματικές παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ξήρανσης είναι η ταχύτητα του αέρα και το μέγεθος του δείγματος. Ειδικά για την επίδρασή που έχει η ταχύτητα του αέρα θα πρέπει να πούμε ότι η αύξηση στην ταχύτητα του αέρα ενισχύει τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας και μάζας και οδηγεί σε μείωση του χρόνου ξήρανσης. Θα πρέπει όμως να τονισθεί ότι μεγάλη αύξηση αυτής της ταχύτητας θα ενισχύσει την ταχύτητα εξάτμισης της υγρασίας από την επιφάνεια γεγονός που συνδέεται με ψύξη αυτής και σκλήρυνση. Για το μέγεθος του δείγματος είναι προφανές ότι σε υλικά μικρού πάχους η διάχυση της υγρασίας είναι ταχύτατη και η ξήρανση γρηγορότερη.

Αν τώρα θα θέλαμε να συνοψίσουμε τις παραπάνω παρατηρήσεις θα λέγαμε ότι για τη διατήρηση του πορώδους θα πρέπει να επιλεγεί μια βέλτιστη θερμοκρασία (μεσαία-σχετικά χαμηλή) μαζί με μία σχετικά γρήγορη ταχύτητα αέρα και μικρού πάχους δείγματα, προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια γρήγορη ξήρανση χωρίς όμως κατάρρευση της πορώδους δομής.

### **4.3 Λυοφιλοποίηση**

Η λυοφιλοποίηση χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1940 σε βιολογικές και φαρμακευτικές εφαρμογές (Barbosa-Canovaw & Vega Merkado 1996). Σήμερα αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο, τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε βιομηχανική κλίμακα και χρησιμοποιείται για την παραλαβή προϊόντων με εξαιρετικά χαμηλή υγρασία. Μετά τη λυοφιλοποίηση το ποσοστό της υγρασίας το οποίο παραμένει στο τελικό προϊόν δεν υπερβαίνει το 4%. Τα προϊόντα αυτά δεν περιορίζονται πλέον, μόνο στο χώρο της φαρμακευτικής και της βιολογίας αλλά έχουν επεκταθεί και στο χώρο των τροφίμων, της επιστήμης των υλικών και της τεχνολογίας.

Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι αυτό στο οποίο το υλικό καταψύχεται, προφανώς σε θερμοκρασίες μικρότερες του μηδενός. Το πόσο χαμηλά θα κατέλθουμε αποτελεί ένα παράγοντα που επηρεάζει το πορώδες του τελικού προϊόντος, όπως θα δούμε και στις επόμενες παραγράφους. Με την κατάψυξη τα υδατικά διαλύματα των τροφίμων διαχωρίζονται σε δύο φάσεις. Αυτήν του πάγου και αυτήν της συμπυκνωμένης φάσης των διαλυτών συστατικών. Ακολουθώντας σε δεύτερο στάδιο με τη χρησιμοποίηση υψηλού κενού απομακρύνουμε την υγρασία από το παγωμένο στερεό υλικό, σε μία διαδικασία η οποία παραπέμπει στο φαινόμενο της εξάχνωσης. Ουσιαστικά σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση το στερεοποιημένο ύδωρ μεταβαίνει από την στερεή στην αέριο φάση χωρίς να διέλθει από την υγρή. Το διάγραμμα φάσεων του ύδατος που παρουσιάζεται στο Σχ.7 το οποίο ακολουθεί και αποδίδει την όλη διαδικασία.



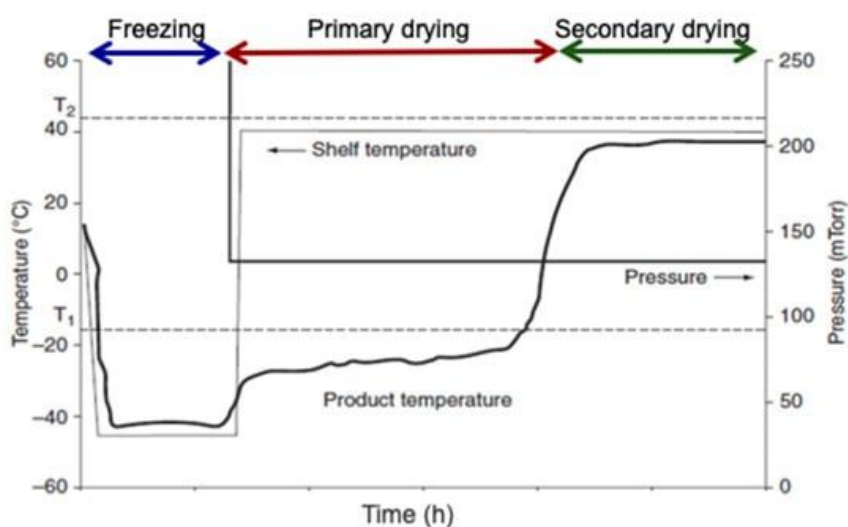
Σχήμα 7: Διάγραμμα φάσεων ύδατος (πηγή: wikipedia)

Κατά τη διαδικασία της απομάκρυνσης του ύδατος με τη μέθοδο της λυοφιλοποίησης, η εξάχνωση προοδευτικά ξεκινά από την επιφάνεια των υλικών σε ένα αργό σχετικά στάδιο στο οποίο απομακρύνεται το 85-90 % του περιεχόμενου νερού. Με την πόσληψη της απαιτούμενης λανθάνουσας θερμότητας εξάχνωσης, ο δημιουργούμενος ατμός απομακρύνεται από την επιφάνεια χωρίς ο πάγος στο εσωτερικό του υλικού να λειώσει. Προφανώς κάτω από αυτές τις συνθήκες το φαινόμενο της εξάχνωσης λαμβάνει χώρα λόγω της διαφοράς τάσεως ατμών μεταξύ του πάγου στο εσωτερικό του υλικού και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της λυοφιλοποίησης έχει παρατηρηθεί ο σχηματισμός ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια πολλών δειγμάτων το οποίο επιβραδύνει το ρυθμό εξάχνωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πολλές φορές περιστρεφόμενοι θάλαμοι.

Στο δεύτερο στάδιο αυτό της δευτερογενούς ξήρανσης, η υγρασία η οποία απομακρύνεται οφείλεται στο δεσμευμένο ύδωρ. Για την εκρόφιση του δεσμευμένου ύδατος αυξάνουμε σταδιακά τη θερμοκρασία μειώνοντας ταυτόχρονα τη μερική πίεση των υδρατμών. Κάτι τέτοιο υποβοηθείται και από το σύστημα συμπύκνωσης των υδρατμών με το οποίο κάθε λυοφιλοποιητής είναι εφοδιασμένος. Η αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει συνεχώς κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης έχοντας ως κύριο στόχο την κατάρρευση των φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων που δημιουργούνται μεταξύ του νερού και του παγωμένου υλικού (Οικονομοπούλου 2014).

Στο Σχ. 8 το οποίο ακολουθεί παρουσιάζονται συναρτήσεις του χρόνου τα στάδια της διαδικασίας της λυοφιλοποίησης (Rati 2013).



**Σχήμα 8:** Στάδια λυοφιλοποίησης για την παραλαβή ξηρού τροφίμου σε σκόνη (Rati 2013)

Κατά τη λυοφιλοποίηση η θερμοκρασία σε συνδυασμό και με την ταχύτητα κατάψυξης είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι φαίνεται ότι επηρεάζουν τις δομικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Από ερευνητικές μελέτες σε δείγματα αποξηραμένου σκόρδου έχει βρεθεί ότι όταν το δείγμα καταψύχθηκε στους  $-25^{\circ}\text{C}$ , τα χαρακτηριστικά των πόρων ήταν παρόμοια με αυτά που προέκυψαν όταν η κατάψυξη

πραγματοποιήθηκε σε  $-15^{\circ}\text{C}$ . Εντούτοις, συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα πειραμάτων όπου η κατάψυξη έγινε σε  $-5^{\circ}\text{C}$  παρατηρήθηκε ότι στην τελευταία περίπτωση ο αριθμός των ανοιχτών πόρων ήταν σημαντικά μειωμένος. Επίσης κατά την λυοφιλοποίηση σε θερμοκρασίες ψύξης από  $-5^{\circ}\text{C}$  έως  $-15^{\circ}\text{C}$  το παρατηρούμενο πορώδες για μια σειρά εξεταζόμενων δειγμάτων άγγιζε το 90 %, αρκετά υψηλότερο συγκρινόμενο με το πορώδες το οποίο λαμβάνουμε όταν η λυοφιλοποίηση στα ίδια δείγματα γίνει στους  $-45^{\circ}\text{C}$ . Αυτή η ελάττωση ποικίλει ανά δείγμα και φτάνει το 30% στην περίπτωση των μήλων και μειώνεται έως 10% για μια σειρά άλλων τροφίμων (Krokida και συν. 1998a).

Για την εξήγηση του παραπάνω φαινομένου θα πρέπει να εξετάσουμε το πως επηρεάζεται το μέγεθος των κρυστάλλων πάγου από τη θερμοκρασία κατάψυξης. Έτσι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλές ταχύτητες κατάψυξης, η ταχύτητα πυρήνωσης είναι υψηλή και η ανάπτυξη των κρυστάλλων γίνεται αργά. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρών κρυστάλλων πάγου η εξάχνωση των οποίων οδηγεί σε προϊόντα με μικρούς πόρους στο εσωτερικό τους. Αν και θεωρητικά το μικρό μέγεθος των πόρων μπορεί να μετριάσει την επίδραση που έχει στην κατάρρευση του υποστρώματος η απομάκρυνση του ύδατος κατά τη λυοφιλοποίηση, ταυτόχρονα αυτή η δημιουργία πολλών μικρών κρυσταλλικών δομών σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει σε παρεμπόδιση της ροής των ατμών στο στάδιο της εξάχνωσης δημιουργώντας αυξημένη εσωτερική πίεση και επιταχύνοντας τη δομική κατάρρευση. Στον αντίποδα η λυοφιλοποίηση σε υψηλότερες θερμοκρασίες και με αργούς σχετικά ρυθμούς κατάψυξης προκαλεί το σχηματισμό μεγαλύτερων κρυστάλλων και τη παραλαβή προϊόντων με μεγαλύτερους πόρους. Το γεγονός αυτό βέβαια μπορεί να επιφέρει κάποια προβλήματα στο εσωτερικό του τροφίμου αφού αυτή η διόγκωση μπορεί να επιφέρει τη θραύση των κυτταρικών τοιχωμάτων καταστρέφοντας κατ' επέκταση τη φυσική πορώδη δομή του δείγματος.

Στις περιπτώσεις όπου έχουμε αυξημένη ταχύτητα κατάψυξης έχει παρατηρηθεί και το φαινόμενο σχηματισμού κρούστας στην εξωτερική στοιβάδα του προϊόντος, η οποία παρεμποδίζει σε ένα βαθμό πιθανή συρρίκνωση προσφέροντας κάποια δομική σταθερότητα στο προϊόν.

Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις μας σχετικά με την ανάπτυξη του πορώδους σε τρόφιμα στα οποία η υγρασία απομακρύνεται με τη μέθοδο της λυοφιλοποίησης, θα λέγαμε ότι η επιλογή γενικά μιας μέσης θερμοκρασίας κατάψυξης αλλά και μιας μέσης ταχύτητας

ψύξης ευνοούν την παραλαβή προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά υψηλούς πορώδους δομής.

### 4.3 Ωσμωτική Αφυδάτωση

Η ωσμωτική αφυδάτωση χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της υγρασία κυρίως σε φρούτα και λαχανικά χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν έχει εφαρμοσθεί και σε άλλα τρόφιμα όπως για παράδειγμα η περίπτωση του κρέατος (Lewicki & Lanart 1995). Το ποσοστό της υγρασίας το οποίο παραμένει θεωρείται σχετικά υψηλό και είναι της τάξης του 20-50 % (Rault-Weck και συν. 1991).

Η μέθοδος συνίσταται στην εμφύσηση του τροφίμου σε ωσμωτικά διαλύματα. Τα ωσμωτικά διαλύματα έχουν ενεργότητα ύδατος μικρότερη από την ενεργότητα ύδατος των προϊόντων. Στην περίπτωση των φρούτων αυτά είναι πυκνά διαλύματα υδατανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους όπως για παράδειγμα διαλύματα μονοσακχαριτών (γλυκόζης, φρουκτόζης, λακτόζης), δισακχαριτών (σουκρόζης, μαλτόζης) ή και μίγματα αυτών (Οικονομοπούλου 2014). Για τα λαχανικά το διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl), αποτελεί συνήθως την κύρια επιλογή, παρά το γεγονός ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές οι οποίες προτείνουν τη συνδυασμένη χρήση αλάτων και σακχάρων (Shi & Maguer 2002). Η παρατηρούμενη διαφορά στη συγκέντρωση ευνοεί τη διάχυση του νερού από το τρόφιμο στο διάλυμα και τη μεταφορά διαλυμένων στερεών από το διάλυμα στο τρόφιμο. Σε πολύ μικρό ποσοστό υπάρχει και μία διάχυση διαλυμένων ουσιών (π.χ. βιταμίνες, άλατα) από το τρόφιμο στο διάλυμα. Το σύνολο των παραπάνω διαδικασιών πραγματοποιείται ταυτόχρονα και είναι προφανές ότι θα συνοδεύετε από δομικές αλλαγές οι οποίες επιφέρουν τροποποιήσεις στην κυτταρική δομή και οδηγούν συνήθως σε κατάρρευση των ιστών και συρρίκνωση.

Η διαδικασία με την οποία απομακρύνεται το νερό από τα τρόφιμα κατά τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο το νερό απομακρύνεται από το τρόφιμο με υψηλούς σχετικά ρυθμούς λόγω της μεγάλης διαφοράς στην ωσμωτική πίεση του διαλύματος και του τροφίμου. Κατά το δεύτερο στάδιο η απομάκρυνση του νερού πραγματοποιείται με πιο βραδείς ρυθμούς αφού η διαφορά στην ωσμωτική πίεση αρχίζει και εξισορροπείται. Η χρονική διάρκεια του πρώτου σταδίου είναι περί τις 2 ώρες ενώ του δεύτερου ποικίλει από 2 έως 6 ώρες (Barbosa-Canovas & Vega-Merkado 1996).

Σε πάρα πολλές μελέτες έχει βρεθεί ότι το πορώδες αφυδατωμένων προϊόντων, που προέρχονται από το χώρο των φρούτων, αρχικά ελαττώνεται αλλά στην πορεία αυξάνει (Giraldo και συν. 2003, Nieto και συν. 2004). Η αρχική ελάττωση του πορώδους του δείγματος μπορεί να εξηγηθεί από τον ταχύτατο αρχικό εμποτισμό του ιστού από το ωσμωτικό διάλυμα σακχάρου (π.χ. σουκρόζης), το οποίο με μια πληθώρα μηχανισμών που περιλαμβάνουν τριχοειδείς δυνάμεις και μηχανισμούς μεταφοράς μάζας, διαπερνά τους πόρους της εξωτερικής επιφάνειας. Η ταχεία απώλεια νερού και η πρόσληψη στερεών επιφέρουν δομικές αλλαγές που εκφράζονται συνήθως με κατάρρευση των επιφανειακών κυττάρων. Με την πάροδο του χρόνου στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού εναποτίθεται σουκρόζη, σχηματίζοντας ένα πυκνό στρώμα το οποίο αφενός μεν εμποδίζει την περαιτέρω διείσδυση του ωσμωτικού διαλύματος αφετέρου ελαχιστοποιεί την ροή αερίων από το εσωτερικό του τροφίμου προς το διάλυμα. Το συνολικό αποτέλεσμα από τον συνδυασμό των παραπάνω δράσεων είναι η τελική αύξηση του πορώδους. Υπό μία άλλη οπτική γωνία η διάχυση διαλυτών συστατικών του διαλύματος προς το εσωτερικό του τροφίμου αυξάνει τη θερμοκρασία υάλου και παρεμποδίζει την κατάρρευση της πορώδους δομής του τροφίμου. Σαν αποτέλεσμα έχουμε ενίσχυση της δομικής σταθερότητας, ελάττωση της συρρίκνωσης και αύξηση τελικά του πορώδους. Εντούτοις στο συμπέρασμα αυτό υπάρχουν και εξαιρέσεις αφού στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές όπου η ελάττωση του πορώδους διατηρείται σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, όπως για παράδειγμα συμβαίνει κατά την ωσμωτική αφυδάτωση μήλων (Mantroudis και συν. 1998).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση ερευνητικές αναφορές, τρόφιμα τα οποία έχουν υποστεί προκατεργασία με ωσμωτική αφυδάτωση επιδεικνύουν διαφοροποιημένο μέγεθος πόρων σε σχέση με τρόφιμα που δεν έχουν υποστεί αυτήν την προκατεργασία. Συγκεκριμένα η ξήρανση καρπών γαρκινίας (mangosteen) με προκατεργασία που περιλαμβάνει ωσμωτική πίεση, δίνει μετά από περαιτέρω ξήρανση προϊόντα που χαρακτηρίζονται από πολλούς μικρότερους πόρους συγκρινόμενα με αντίστοιχους καρπούς που δεν είχαν υποστεί την παραπάνω διαδικασία (Therdthai & Vissalrakkij 2012).

Σε γενικές γραμμές η διαδικασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης αποδίδει, τουλάχιστον για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, προϊόντα σταθερά έναντι μικροβιακής δράσης, ενώ μπορεί να αποτελέσει από μόνη της μια ξεχωριστή μέθοδο προεπεξεργασίας με τη χρησιμοποίησή της να έχει κατά βάση θετικά αποτελέσματα στην παραλαβή τροφίμων με αυξημένο πορώδες.



#### 4.4 Ξήρανση με Μικροκύματα

Η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για ξήρανση τροφίμων περιλαμβάνει κυρίως τη χρησιμοποίηση μικροκυμάτων και υπέρυθρης ακτινοβολίας και έχει ως στόχο την παραλαβή υψηλής ποιότητας τροφίμων. Το γεγονός αυτό σημαίνει προϊόντα τα οποία χαρακτηρίζονται από επιθυμητές δομικές ιδιότητες και ειδικά για τα αποξηραμένα τρόφιμα, τα προϊόντα θα πρέπει να έχουν υψηλό πορώδες. Κάτι τέτοιο πολλές φορές δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί γιατί τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της πορώδους δομής μπορούν πολύ εύκολα να μεταβληθούν τόσο από την ενέργεια η οποία μεταδίδεται στο υλικό όσο και από τον ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται αυτή η ενέργεια. Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούμε στην ξήρανση με τη χρήση μικροκυμάτων μια ενδιαφέρουσα διεργασία που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία συμπληρωματικά με άλλες διαδικασίες ξήρανσης.

Κατά τη χρησιμοποίηση των μικροκυμάτων η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική με στόχο την εξάτμιση και απομάκρυνση του νερού από το τρόφιμο. Η θέρμανση με μικροκύματα έχει σαφή πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων. Έτσι το τρόφιμο θερμαίνεται σχεδόν ομοιόμορφα περιορίζοντας το σχηματισμό κρούστας στην εξωτερική επιφάνεια διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό την έξοδο της υγρασίας από το εσωτερικό του τροφίμου. Επιπλέον η θέρμανση με μικροκύματα παρουσιάζει μια εκλεκτικότητα θερμαίνοντας πολύ πιο αποτελεσματικά τις περιοχές με υγρασία σε σχέση με άλλες περιοχές του τροφίμου. Κατά αυτόν τον τρόπο τόσο το δεσμευμένο νερό όσο και το ελεύθερο μπορούν απομακρυνθούν ομαλά από το τρόφιμο (Datta και συν. 2007). Η ανάπτυξη του πορώδους κατά τη διαδικασία εξαρτάται από το ρυθμό θέρμανσης κάτι που είναι σε άμεση σχέση με την ισχύ των μικροκυμάτων. Χρησιμοποίηση μικροκυμάτων χαμηλής ισχύος εξατμίζει σταδιακά την υγρασία δημιουργώντας ατμούς οι οποίοι αυξάνουν την πίεση στο εσωτερικό των πόρων αλλά και τις διαστάσεις αυτών. Με την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας σε χαμηλή ισχύ μικροκυμάτων θα έχουμε ως αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους σε συνδυασμό με μία ομοιόμορφη κατανομή πόρων. Η υψηλότερη ισχύ συνδέεται με ταχύτερη θέρμανση και ως εκ τούτου υψηλότερους ρυθμούς εξάτμισης, οι οποίοι οδηγούν σε αυξημένη πίεση στους πόρους και ρήξη αυτών. Το γεγονός αυτό επιφέρει εσωτερική κατάρρευση και συρρίκνωση του δείγματος. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα ξήρανσης με μικροκύματα δειγμάτων μπανάνας. Στην περίπτωση εφαρμογής υψηλών θερμοκρασιών, το πορώδες του τελικού προϊόντος

φάνηκε να είναι πολύ χαμηλό, κάτι που αποδίδεται προφανώς στη συρρίκνωση που παρατηρείται όταν χρησιμοποιούμε μικροκύματα υψηλής ισχύος (Tsami & Katsioti 2000).

Όπως είπαμε και σε προηγούμενη ενότητα τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό και με άλλες τεχνικές ξήρανσης. Εντούτοις στη βιβλιογραφία δεν είναι σαφές πότε είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν. Υπάρχουν αναφορές όπου τα μικροκύματα εφαρμόζονται υποστηρικτικά σε πρώιμα στάδια της ξήρανσης αποδίδοντας τελικά προϊόντα με υψηλό πορώδες (Zhang και συν. 2006). Σε κάποιες άλλες αναφορές βελτιωμένο πορώδες λαμβάνουμε όταν η χρήση των μικροκυμάτων γίνεται στο τέλος της διεργασίας (Askari και συν. 2006, Argyropoulos και συν. 2011).

Ολοκληρώνοντας θα λέγαμε ότι με την σωστή επιλογή θερμοκρασίας η χρήση των μικροκυμάτων μόνη της ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές οδηγεί σε προϊόντα με σημαντικό πορώδες αλλά και ομοιόμορφη κατανομή πόρων σε όλη την έκταση του δείγματος (Kumar et al. 2014).

#### **4.5 Ξήρανση υπό Κενό.**

Η ξήρανση υπό κενό χρησιμοποιείται σε προϊόντα τα οποία είναι ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Θεωρείται ως μια ήπια σχετικά μέθοδο ξήρανσης αναφορικά με το κόστος και τις δομικές μεταβολές στο τρόφιμο, ενώ οι συνθήκες της ξήρανσης (απουσία οξυγόνου) δεν ευνοούν οξειδωτικές διαδικασίες όπως για παράδειγμα αλλαγές στο χρώμα του τροφίμου (Amellal & Banamara 2008, Krokida και συν. 1997). Ως εκ τούτου τα προϊόντα της ξήρανσης υπό κενό είναι σε γενικές γραμμές καλύτερα, όσον αφορά την ποιότητά τους, συγκρινόμενα με αυτά που έχουν ληφθεί ύστερα από ξήρανση σε θερμό ρεύμα αέρα.

Το πώς λειτουργεί η ελάττωση της πίεσης στην ανάπτυξη της πορώδους δομής είναι μια διαδικασία η οποία ξεκινά με διαστολή του προϊόντος λόγω ταχείας ελάττωσης της πίεσης. Συγκεκριμένα η μείωση της πίεσης οδηγεί σε μείωση του σημείου βρασμού του νερού γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη διαστολής του αέρα και των υδρατμών και προφανώς τη διάχυση της υγρασίας. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τρόφιμα με διογκωμένη δομή στα οποία έχουν δημιουργηθεί πόροι στο εσωτερικό τους. (Saduikov και συν. 1985, Methakhup και συν. 2005).

Το πορώδες των προϊόντων τα οποία έχουν ληφθεί με ξήρανση υπό κενό ποικίλει ανάλογα με την εφαρμοζόμενη πίεση. Σε χαμηλότερες πιέσεις τα περισσότερα φρούτα και λαχανικά επιδεικνύουν υψηλότερο πορώδες. Σχετική είναι η μελέτη η οποία δημοσιεύθηκε το 1997 και αφορά μια σειρά φρούτων και λαχανικών όπως μπανάνες, καρότα, πατάτες και μήλα (Krokida και συν. 1997). Ίσως μια μικρή διαφοροποίηση παρουσιάζουν τα μήλα όπου η μεταβολή δεν είναι τόσο μεγάλη και αυτό οφείλεται στο αρχικό υψηλό πορώδες του τροφίμου. Με δεδομένο ότι στην ξήρανση υπό κενό υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας και της πίεσης μπορούμε να παραλάβουμε προϊόντα με υψηλό πορώδες το οποίο πλησιάζει αυτό των προϊόντων τα οποία έχουν αφυδατωθεί με τη μέθοδο της λυοφιλοποίησης.

## **5 ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο **3.1** μια σειρά διαδικασιών η οποία λαμβάνει χώρα πριν την περαιτέρω επεξεργασία ενός τροφίμου (διεργασίες προκατεργασίας) επηρεάζει το πορώδες του τροφίμου. Στην ίδια λογική θερμικές διαδικασίες οι οποίες σχετίζονται με τον τρόπο με τον οποίο κατεργαζόμαστε το τρόφιμο επηρεάζουν με τη σειρά τους το πορώδες και κατά συνέπεια πολλές από τις μηχανικές και οργανοληπτικές ιδιότητες του τροφίμου. Στις παρακάτω ενότητες θα εξετάσουμε τη μεταβολή του πορώδους στις διαδικασίες βαθέως τηγανίσματος (Deep-Frying) και ψησίματος.

### **5.1 Διαδικασία Τηγανίσματος- Βαθύ τηγάνισμα (Deep-Frying)**

Το βαθύ τηγάνισμα (deep frying) είναι μια δημοφιλής τεχνική στην κατεργασία των τροφίμων. Ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία το τρόφιμο βυθίζεται σε καυτό έλαιο (ή και λίπος) θερμοκρασίας 177-191 °C. Κατά την παραπάνω διαδικασία, το πορώδες των τροφίμων μπορεί να παγιδεύσει ποσότητα ελαίου, το οποίο αν δεν έχει αντικατασταθεί και έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές, θεωρείται επιβλαβές για την υγεία. Στην παράγραφο που ακολουθεί θα αναπτύξουμε τις διεργασίες που γίνονται κατά το βαθύ τηγάνισμα και πως αυτές συνδέονται και επηρεάζουν το πορώδες του τροφίμου.

Σε σχέση με τις δομικές μεταβολές που επέρχονται, η ταχεία βύθιση του τροφίμου σε υψηλή θερμοκρασία οδηγεί στην άμεση απομάκρυνση της υγρασίας, με τους

παραγόμενους υδρατμούς να προκαλούν ελαφριά διόγκωση και μικρή διαστολή στις διαστάσεις του προϊόντος. Αρχικά με την αύξηση της θερμοκρασίας απομακρύνεται το ελεύθερο νερό και το ποσοστό των πόρων που περιέχουν αέρα αυξάνεται. Σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας η πίεση στο εσωτερικό αυξάνεται και οι υδρατμοί κινούνται προς το εξωτερικό του τροφίμου. Η αύξηση του χρόνου θέρμανσης έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει να εξατμίζεται και το δεσμευμένο ύδωρ το οποίο βρίσκεται στα κυτταρικά τοιχώματα δημιουργώντας πόρους σε αυτά. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μεγαλύτερων πόρων ή να συνεισφέρει στην αποδιοργάνωση της κυτταρικής δομής και με να οδηγηθούμε σε δομική κατάρρευση (Dadmohammadi & Datta 2020). Μια παράμετρος η οποία έχει σημασία στην όλη διαδικασία είναι ο σχηματισμός κρούστας στην εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος (Datta 2001). Ο σχηματισμός αυτός οφείλεται στην ταχύτερη εξάτμιση του ύδατος στην επιφάνεια του τροφίμου σε σχέση με το εσωτερικό. Οι πόροι σε αυτήν την κρούστα, με βάση και την αυξημένη εσωτερική πίεση, επιτρέπουν την έξοδο των υδρατμών αλλά παρεμποδίζουν την είσοδο του ελαίου. Η είσοδος του ελαίου μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά την απομάκρυνση των υδρατμών και ειδικά όταν το τρόφιμο παραμείνει στο έλαιο. Σε αυτήν την περίπτωση μέσω τριχοειδών δυνάμεων το έλαιο διαπερνά την κρούστα και διέρχεται μέσω των πόρων στο εσωτερικό του τροφίμου.

Η ελάττωση του πορώδους είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο στο χρόνο μετά το τηγάνισμα. Το κενό το οποίο έχει αναπτυχθεί στους πόρους μετά την εξάτμιση του νερού, μπορεί να οδηγήσει σε αποδιοργάνωση της δομής, δραστική μείωση του μεγέθους και αριθμού των πόρων και φυσικά συρρίκνωση.

## **5.2 Διαδικασία Ψησίματος**

Η διαδικασία, η οποία έχει ευρεία βιομηχανική αλλά και οικιακή εφαρμογή, συνίσταται στη θέρμανση του τροφίμου σε υψηλές θερμοκρασίες (150-300°C) με το προϊόν να χαρακτηρίζεται από διατήρηση μικρού έστω ποσοστού υγρασίας. Ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία συνδέεται και σε αυτήν την περίπτωση με τον τρόπο και τον ρυθμό εξάτμισης της υγρασίας επηρεάζοντας το πορώδες και το ποσοστό των πόρων που συμπληρώνονται με υδρατμούς αέρα ή νερό. Η αρχική απότομη αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία μετατροπή της υγρασίας σε υδρατμούς οι οποίοι κινούνται προς την εξωτερική επιφάνεια του τροφίμου. Σε αυτήν την περίπτωση και σε συνδυασμό με τη διόγκωση που παρατηρείται σε πόρους που περιέχουν αέρια ή ατμούς

είναι πιθανό να διαταραχθεί η φυσική κυτταρική δομή ως συνέπεια της αύξησης του αριθμού και του όγκου των πόρων που περιέχουν αέρια και της επακόλουθης αύξησης της πίεσης στο εσωτερικό των πόρων. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την πιθανή συρρίκνωση του προϊόντος. Ο σχηματισμός κρούστας που παρατηρείται στην εξωτερική επιφάνεια των τροφίμων μπορεί να επιφέρει ένα διττό αποτέλεσμα. Από την μία πλευρά να σταθεροποιήσει τη δομή του τροφίμου αλλά και από την άλλη να περιορίσει τη μεταφορά υδρατμών και λοιπών αερίων από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του τροφίμου, αυξάνοντας τις διαστάσεις και οδηγώντας αρχικά σε κατάρρευση της εσωτερικής δομής και στην συνέχεια σε συρρίκνωση του τροφίμου. Την ίδια αλλά πιο έντονη εικόνα θα έχουμε αν αυξήσουμε τη θερμοκρασία ψησίματος στη λογική του ταχύτερου σχηματισμού της κρούστας για τη διατήρηση της γενικότερης δομής.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο έλεγχος της μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, σε συνδυασμό με το αρχικό πορώδες του τροφίμου, είναι απαραίτητοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου η ανάπτυξη των πόρων που περιέχουν αέρια ή υδρατμούς να είναι ομαλή. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο τελικό πορώδες και κατά συνέπεια στην υφή και ποιότητα του τροφίμου.

## **6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Το πορώδες ενός τροφίμου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες δομικές ιδιότητες με επίδραση στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, στην ποιότητα αλλά και τη γενικότερη αποδοχή ενός προϊόντος από το καταναλωτικό κοινό.

Η χρησιμοποίηση μεθόδων προκατεργασίας σε συνδυασμό με τη γενικότερη επεξεργασία ενός τροφίμου επηρεάζουν το πορώδες και ανάλογα με τις συνθήκες που ακολουθούνται δημιουργούνται προϊόντα με αυξημένο ή ελαττωμένο πορώδες. Η ανάπτυξη πορώδους δομής ειδικά στην περίπτωση των αποξηραμένων τροφίμων αποτελεί μια ιδιαίτερα επιθυμητή παράμετρος η οποία συνδέεται με φαινόμενα μεταφοράς μάζας τα οποία είναι σε άμεση σχέση με τη δυνατότητα ταχείας επανυδάτωσης. Η ταχεία επανυδάτωση είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την ποιότητα και αποδοχή των αφυδατωμένων προϊόντων τα οποία είναι ιδιαίτερα δημοφιλή στις μέρες μας και καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό στην αγορά των τροφίμων.

Σε κάθε περίπτωση θερμικές μέθοδοι προκατεργασίας ή επεξεργασίας των τροφίμων επηρεάζουν πολύ περισσότερο την ανάπτυξη του πορώδους σε σχέση με μεθόδους όπου η χρήση της θερμότητας είναι πολύ πιο περιορισμένη. Έτσι μελέτες οι οποίες αφορούν τη ξήρανση φρούτων και λαχανικών κατέδειξαν ότι η λυοφιλοποίηση θεωρείται ως η μέθοδο ξήρανσης με τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τη διατήρηση και ανάπτυξη της πορώδους δομής. Ταυτόχρονα το τρόφιμο διατηρεί στο μεγαλύτερο ποσοστό τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του. Με δεδομένο μάλιστα το χαμηλό ποσοστό του νερού το οποίο περιέχει παρουσιάζει υψηλό χρόνο ζωής και ανθεκτικότητα στη δράση παθογόνων μικροοργανισμών.

Προφανώς και η τελική επεξεργασία ενός τροφίμου βρίσκεται σε άμεση σχέση με την ανάπτυξη ή καταστροφή της πορώδους δομής. Με δεδομένο ότι σε αυτό το στάδιο οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως θερμικές, ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι απαραίτητος για τη διατήρηση της κυτταρικής δομής στα τρόφιμα και την αποφυγή κατάρρευσης και συρρίκνωσης.

Σε κάθε περίπτωση θα λέγαμε ότι η ανάπτυξη γενικευμένων μοντέλων που να περιγράφουν με ακρίβεια την μεταβολή της πορώδους δομής σε διάφορες συνθήκες θα βοηθούσε σε σημαντικό βαθμό στον σχεδιασμό διεργασιών που να μπορούν να αποδώσουν προϊόντα με υψηλό πορώδες αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό πολυδάπανους πειραματισμούς και σπατάλη χρόνου. Αν και πολλά μαθηματικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σχετική επιτυχία, η ευρύτητα στη χρησιμοποίησή τους δεν φτάνει στον επιθυμητό βαθμό αφού σε κάθε περίπτωση δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη και να συσχετισθούν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν μια διαδικασία.

Συνοψίζοντας, η κατανόηση των διαδικασιών οι οποίες ευνοούν την ομαλή μετακίνηση του νερού από το εσωτερικό των κυττάρων ενός τροφίμου, θα έχει άμεση επίπτωση στην ανάπτυξη (τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και εφαρμογής) μεθόδων που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραλαβή τροφίμων με επιθυμητές δομικές ιδιότητες και πορώδες. Προφανώς μια τέτοια εξέλιξη θα βοηθήσει σημαντικά στη βελτιστοποίηση της ποιότητας του τροφίμου όπως και αν αυτό καταναλώνεται από το αγοραστικό κοινό.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aguilera, J. M., Stanley, D. W. and Baker, K. W. (2000). New dimensions in microstructure of food products. *Trends in Food Science and Technology*. **11**(1): 3-9.

Aguilera, J. M., (2000). Microstructure and food product engineering. *Journal of Food Technology*. **54**(11): 56-X.

Aguilera, J. M., (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*. **67**(1-2): 3-11.

Alvarez, C., Aguerre, R., Gómez, R., Vidales, S., Alzamora, S. M., Gerschenson, L. N. (1995) Air Dehydration of Strawberries: Effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. *J. Food Eng.* **25**(2), 167–178.

Amellal, H., Benamara, S. (2008). Vacuum drying of common date pulp cubes. *Drying Technol.* **26**, 378–382

Andersson, A.; Gekas, V.; Lind, I.; Oliveira, F.; Öste, R.; Aguilera, J. M. (1994) Effect of preheating on potato texture. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **34**(3), 229–251.

Araki, T., Sagara, Y., Abdullah, K., Tambunan, A. H. (2001). Transport properties of cellular food materials undergoing freeze-drying. *Drying Technol.* **19**(2), 297–312.

Argyropoulos, D., Heindl, A., Móller, J. (2011). Assessment of convection, hot-air combined with microwave-vacuum and freeze-drying methods for mushrooms with regard to product quality. *Int. J. Food Sci. Technol.* **46**(2), 333–342.

ASHRAE. 1993. *ASHRAE Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York.

Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, S.M. (2006). Effects of combined coating and microwave assisted hot-air drying on the texture, microstructure and rehydration characteristics of apple slices. *Food Sci. Technol. Int.* **12**(1) 39–46.

Barbosa-Canovas, G.V., Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of Foods*. International Thomson Publishing (ITP), New York, USA.

Barbosa-Canovas, G.V. & Juliano P. (2005). *Encapsulated and Powdered Foods (1<sup>st</sup> Ed.)*, CRC Press, Editor C. Onwulata

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.

Crank, J., (1975). The mathematics of diffusion . Oxford University Press, Oxford

Dadmohammadi, Y. & Datta, A.K., (2020). Food as a porous media: a review of dynamics of porous properties during processing

Datta, A. K. (2001) Handbook of Microwave Technology for Food Application; CRC Press.

Datta, A. K. (2006). Hydraulic permeability of food tissues. *International Journal of food Properties*. **9**, 767-780.

Datta, A. K., Sahin, S., Sumnu, G., Ozge Keskin, S. (2007). Porous media characterization of breads baked using novel heating modes. *J. Food Eng.* **79**(1), 106–11

Dullien, F.A.L., (1979). *Porous media: Fluid transport and pore structure (2<sup>nd</sup> Ed.)*. Academic Press, USA.

Giraldo G., Talens P., Fito P., Chiralt A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *J Food Eng.* **58**, 33–43.

Joardder, M. U. H., Karim, M. A. Kumar, C. & Brown R. J. (2016). Porosity: Establishing the relationships between drying parameters and dried food quality, SpringerCham

Joardder, M. U. H., Kumar, C., & Karim, M. A., (2017). Food structure: Its formation and relationships with other properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. **57**(6), 1190-120. doi: 10.1080/10408398.2014.971354

Joshi DC, Das S.K., Mukherjee R.K., (1993). Physical properties of pumpkin seeds. *J. Agric. Eng. Res.* **54** 219-229.

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.

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., Kanellopoulos, N. K., Belessiotis, V. G. (1996). Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. *J. Food Eng.* **29**(2), 167–183.

Karunasena, H.C.P., Senadeera W., Brown R.J. & Gu Y.T. (2014). A particle based model to simulate microscale morphological changes of plant tissues during drying. *Soft Matter*. **10**, 5249-5268 .

Khalloufi, S., Kharaghani, A., Almeida-Rivera, C., Nijssse, J., van Dalen, G., & Tsotsas, E. (2015). Monitoring of initial porosity and new pores formation during drying: A scientific debate and a technical challenge. *Trends in Food Science & Technology*. **45** (2), 179-186.

Khan, M. I. H., Wellard, R. M., Nagy, S. A., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. (2017). Experimental investigation of bound and free water transport process during drying of hygroscopic food material. *International Journal of Thermal Science*. **117**, 266-273.

Kilpatric, P. W., Lowe, E., & Van Arsdel, W. B. (1955). *Tunnel dehydrators for fruits and vegetables*. New York: Academic Press.

Koc, B., Eren I., Kaymak Ertekin F. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: the effect of drying method. *J. Food Eng.* **85**(3) 340–349

Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*. **15**(10), 2441-2458.

Krokida, M.K., Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. (1997). Modelling shrinkage and porosity during vacuum dehydration. *Int. J Food Sci. Technol.* **32**(6), 445–458.

Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B. (1998a). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *J. Food Eng.* **35**(4), 369–380

Krokida M.K., Tsami E., Maroulis Z.B. (1998b). Kinetics of color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, **18**(3–5), 667–685.

Kumar, C., Karim, M.A., Joardder, M.U. H. (2014). Intermittent drying of food products: a critical review. *J. Food Eng.* **12**, 48–57.

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, 691-713.

Liu-ping, F., Zhang, M., Mujumdar, A.S. (2007). Storage stability of carrot chips. *Drying Technology*. **25**(9), 1537-1543.

Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbicain, M. J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*. **51**, 113-120.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1994). Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. *Journal of Food Engineering*. **23**(3), 309-319.

Mavroudis NE, Gekas V, Sjöholm I (1998a) Osmotic dehydration of apples. Shrinkage phenomena and the significance of initial structure on mass transfer rates. *J. Food Eng.* **38**, 101–123

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.

McCarthy, O. J. 1997. Physical properties of foods and packaging materials- an introduction. Food and Packaging Engineering I Course Material, Institute of Food, Nutrition and Human Health, Massey University, Palmerston North, New Zealand.

Mc Minnie, W.A.M. & Magee, T.R.A. (1997). Physical characteristics of dehydrated potatoes - Part I. *Journal of Food Engineering*. **33**, 37-48.

Mujumdar, A.S. (1997). Drying fundamentals. Industrial drying of foods. Chapman & Hall, London.

Nieto, A.B., Salvatori, D.M., Castro, M.A., Alzamora, S.M. (2004). Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *J Food Eng.* **61**(2), 269–278

Paudel, E., Boom, R. M., & Van der Sman, R. G. (2016). Effects of porosity and thermal treatment on hydration of mushrooms. *Food and Bioprocess Technology*. **9**, 511-519.

Porciuncula, B.D.A., Segura, L.A., Laurindo, J.B. (2016). Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. *Drying Technology*. **34**, 167-176.

Rahman, M. S. (2001). Toward prediction of porosity in foods during drying: A brief review. *Drying Technology*. **19**(1), 1-13.

Rahman, M. M., Joardder M.U.H. & Karim, M.A. (2016). *Investigation of cellular level water in plantbased food material*. Paper presented at the 20th International Drying Symposium, Gifu, Japan.

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.

Rapusas, R. S., & Driscoll, R. H. (1995). Thermophysical properties of fresh and dried white onion slices. *Journal of Food Engineering*. **24**(2), 149-164.

Ratti, C. (2013) *Freeze drying for food powder production, In Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 57–84.

Roos, Y.H., (1995). *Phase Transitions in Foods* (1st ed). Academic Press, London, UK.

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.

Sahin, S., & Sumnu, G. S. (2006). *Physical properties of foods* Springer Editions & Business Media, New York USA.

Sanjuán, N., Hernando, I., Lluch, M. A., Mulet, A. (2005). Effects of low temperature blanching on texture, microstructure and rehydration capacity of carrots. *J. Sci. Food Agric*. **85**(12), 2071–2076.

Shi, J., Maguer, M.L., (2002). Osmotic dehydration of foods: Mass transfer and modeling aspects. *Food Reviews International* . **18**(4), 305–335.

Teffera, T.F. (2019). Engineering properties of food materials from Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering (3<sup>rd</sup> Ed.) **Ch.4**, 45-89, Editor Meyer Kutz.

Tsami, E., & Katsioti, M. (2000). Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology*. **18**(7),1559–1581.

Therdthai N., Visalrakkij T. (2012). Effect of osmotic dehydration on dielectric properties, microwave vacuum drying kinetics and quality of mangosteen. *Int. J. Food Sci. Technol.* **47**(12), 2606–2612.

Yang, C., Atallah, W. (1985). Effect of four drying methods on the quality of intermediate moisture lowbush blueberries. *J. Food Sci.* **50**(5), 1233–1237.

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang, S. (2006) Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends Food Sci Technol* **17**(10), 524–534.

Zogzas NP, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. (1994) Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology* **12**, 1653-1666.

Λαζαρίδης, X.N., (2000). *Μηχανική Τροφίμων*. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη,

Οικονομοπούλου, K.B., (2014) *Ανάπτυξη Τροφίμων Πορώδους Δομής*  
Διδακτορική Διατριβή