

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ &  
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ  
ΠΜΣ: ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ  
ΑΝΘΡΩΠΟΥ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Μελέτη της αντίστασης του φλοιού νοπών σύκων στο ρυθμό ξήρανσης με ρεύμα  
θερμού αέρα.**

**ΔΙΑΜΑΝΤΩ Ι. ΛΕΝΤΖΟΥ**

**ΑΘΗΝΑ**

**2014**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΑΥΡΙΑΝΟΣ ΓΙΑΝΝΙΩΤΗΣ**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ &  
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ  
ΠΜΣ: ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ  
ΑΝΘΡΩΠΟΥ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Μελέτη της αντίστασης του φλοιού νοπών σύκων στο ρυθμό ξήρανσης με ρεύμα  
θερμού αέρα.**

**ΔΙΑΜΑΝΤΩ Ι. ΛΕΝΤΖΟΥ**

**ΑΘΗΝΑ**

**2014**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΑΥΡΙΑΝΟΣ ΓΙΑΝΝΙΩΤΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Μελέτη της αντίστασης του φλοιού νωπών σύκων στο ρυθμό ξήρανσης με ρεύμα θερμού αέρα.**

**ΔΙΑΜΑΝΤΩ Ι. ΛΕΝΤΖΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΑΥΡΙΑΝΟΣ ΓΙΑΝΝΙΩΤΗΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**  
**ΣΤΑΥΡΙΑΝΟΣ ΓΙΑΝΝΙΩΤΗΣ**  
**(Καθηγητής Γ.Π.Α.)**  
**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ**  
**(Επίκουρος Καθηγητής Γ.Π.Α.)**  
**ΑΝΔΡΕΑΣ ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ**  
**(Καθηγητής Ε.Μ.Π.)**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η αντίσταση του φλοιού στη μεταφορά μάζας σε ολόκληρα σύκα (με και χωρίς φλοιό) ποικιλίας *Καλαμών* κατά την ξήρανσή τους σε ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 45, 55 και 65 °C και ταχύτητας 1.0, 3.0 και 5.0 m/s. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα ισοθερμοκρασιακό υπολογιστικό μοντέλο ξήρανσης πεπερασμένων στοιχείων (Comsol Multiphysics 4.3b) το οποίο προσομοιώνει τη διάχυση των υδρατμών (*N. Fick*) λαμβάνοντας υπόψη την ταυτόχρονη συρρίκνωση του προϊόντος. Τόσο ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης ( $D_{\text{eff}}$ ) όσο και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $k_m$ ) υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας μη γραμμική βελτιστοποίηση *Levenberg-Marquardt*. Ο  $D_{\text{eff}}$  ελήφθη ως θερμοκρασιακά και υγρασιακά εξαρτώμενος μέσω μιας τροποποιημένης εξίσωσης τύπου Arrhenius  $D_{\text{eff}} = \exp(-E_a/RT)\exp(a/MR)$  με τους συντελεστές  $E_a$  και  $a$  υπολογιζόμενους από τη μέθοδο βελτιστοποίησης. Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $k_m$ ) συνίσταται από το συντελεστή μεταφοράς μάζας στο διαχυτικό οριακό στρώμα και τον αντίστοιχο συντελεστή στο φλοιό του προϊόντος. Ο αντίστροφος ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας αποτελεί την εξωτερική ή επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας ( $r_{\text{total}}$ ) και αποτελείται από δυο επιμέρους αντιστάσεις, αυτή του φλοιού ( $r_{\text{peel}}$ ) και αυτή του διαχυτικού οριακού στρώματος ( $r_{\text{dbl}}$ ). Η αντίσταση του οριακού διαχυτικού στρώματος βρέθηκε ότι είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση του φλοιού και έτσι δεν συνυπολογίστηκε. Σε όλες τις περιπτώσεις το μέσο σχετικό σφάλμα (πειραματικών-προβλεπόμενων τιμών) ήταν κάτω από το 2.5%. Η τιμή του  $k_m$  για τα μη αποφλοιωμένα σύκα κυμάνθηκε μεταξύ  $2.87 \times 10^{-7}$  έως  $6.93 \times 10^{-7}$  m/s ενώ για τα αποφλοιωμένα μεταξύ  $1.41 \times 10^{-6}$  έως  $2.01 \times 10^{-6}$  m/s. Αντίστοιχα, η εξωτερική ή επιφανειακή αντίσταση κυμάνθηκε για μεν τα μη αποφλοιωμένα σύκα μεταξύ  $14.4 \times 10^5$  έως  $34.8 \times 10^5$  s/m για δε τα αποφλοιωμένα μεταξύ  $5.0 \times 10^5$  έως  $7.1 \times 10^5$  s/m.

**Επιστημονική περιοχή:** Μετασυλλεκτική Τεχνολογία / Μηχανική Τροφίμων

**Λέξεις κλειδιά:** ξήρανση, βελτιστοποίηση, σύκα, αντίσταση φλοιού, μεταφορά μάζας

## ABSTRACT

### Study of the peel resistance of fresh figs in drying rate during hot air drying.

In this study the resistance of mass transfer of peel in whole figs (peeled and unpeeled), of Kalamata variety, during drying at 45, 55 and 65 °C and 1.0, 3.0 and 5.0 m/s air velocity was investigated. For this purpose an isothermal computer model of drying was developed employing finite elements (Comsol Multiphysics 4.3b) to simulate water vapour diffusion (N. Fick) considering the simultaneous shrinkage of the drying figs. The effective diffusion coefficient ( $D_{\text{eff}}$ ) and the mass transfer coefficient ( $k_m$ ) calculated by applying nonlinear Levenberg-Marquardt optimization.

The  $D_{\text{eff}}$  obtained as a temperature and water dependent by a modified Arrhenius type equation  $D_{\text{eff}} = \exp(-E_a/RT) \exp(a/MR)$  with  $a$  and  $E_a$  coefficients calculated from the employed optimization method. The total mass transfer coefficient ( $k_m$ ) constituted by the mass transfer coefficient in the diffusion boundary layer and the corresponding coefficient of figs' peel. The reverse total mass transfer coefficient is the external or surface resistance to mass transfer ( $r_{\text{total}}$ ) and consists of two individual resistances, this of peel ( $r_{\text{peel}}$ ) and that of the diffusion boundary layer ( $r_{\text{dbl}}$ ).

The resistance of the diffusion boundary layer found to be much less than the resistance of the peel and thus not accounted for. In all cases, the average relative error (experimental vs predicted values) was below 2.5%. The value of  $k_m$  for unpeeled figs ranged between  $2.87 \times 10^{-7}$  to  $6.93 \times 10^{-7}$  m/s whereas for peeled between  $1.41 \times 10^{-6}$  to  $2.01 \times 10^{-6}$  m/s. Similarly, the external or surface resistance ranged for unpeeled figs between  $14.4 \times 10^5$  to  $34.8 \times 10^5$  s/m and in the case of peeled between  $5.0 \times 10^5$  to  $7.1 \times 10^5$  s/m.

**Scientific area:** Post-harvest Technology / Food Engineering

**Keywords:** drying, optimization, figs, peel resistance, mass transfer

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	8
<b>1.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ</b> .....	8
<b>1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΞΗΡΑΝΣΗΣ</b> .....	8
<b>1.2.1 Ξήρανση και μεταβολές στην ποιότητα</b> .....	10
<b>1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΤΡΟΦΙΜΑ</b> .....	12
<b>1.3.1 Ελεύθερο και δεσμευμένο νερό</b> .....	12
<b>1.3.2 Ενεργότητα νερού</b> .....	13
<b>1.3.3 Επίδραση της ενεργότητας του νερού στη σταθερότητα των τροφίμων</b> .....	16
<b>1.4 ΣΤΑΔΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ</b> .....	18
<b>1.4.1. Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης</b> .....	19
<b>1.4.2. Περίοδος επιβραδυνόμενου ρυθμού ξήρανσης</b> .....	19
<b>1.5 ΣΥΚΑ</b> .....	20
<b>1.5.1 Η συκιά (Ficus carica)</b> .....	20
<b>1.5.2 Βοτανική ταξινόμηση- Βοτανικοί χαρακτήρες</b> .....	20
<b>1.5.3 Ωρίμαση-Συντήρηση-Ξήρανση</b> .....	21
<b>1.5.4 Ποικιλίες - Θρεπτική αξία - Σύσταση σύκων</b> .....	22
<b>2. ΘΕΩΡΙΑ</b> .....	24
<b>2.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ (Inverse Problem)</b> .....	24
<b>2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b> .....	25
<b>2.2.1 Ξήρανση</b> .....	25
<b>2.2.1.1 Ημιεμπειρικά μοντέλα</b> .....	26
<b>2.2.1.2 Θεωρητικό μοντέλο μεταφορά θερμότητας και μάζας</b> .....	27
<b>2.2.1.3 Συναγωγή</b> .....	28
<b>2.2.1.4 Διάχυση</b> .....	28
<b>2.3 ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ</b> .....	31
<b>2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS</b> .....	32

2.4.1 Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις (Partial Differential Equations – PDE)	33
2.4.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM)	34
2.4.3 Σταθμισμένα Υπόλοιπα Galerkin (Galerkin Weighted Residuals)	35
2.4.4 Αυθαίρετη μέθοδος Lagrange-Euler (Arbitrary Lagrangian-Eulerian-ALE)	35
2.4.5 Μέθοδος βελτιστοποίησης Levenberg–Marquardt	38
2.4.6 Sparse Nonlinear Optimizer (SNOPT)	38
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	40
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	40
3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	40
3.2.1 Πειραματικός εξοπλισμός	41
3.2.2 Μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας	42
3.2.3 Υπολογισμός όγκου και ταχύτητας συρρίκνωσης καρπών	42
3.2.4 Γεωμετρική αναπαράσταση καρπού. Αξονική συμμετρία	45
3.2.5 Ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου	46
3.2.6 Μοντέλο Διάχυσης	46
3.2.7 Θεμελιώδεις Εξισώσεις Υπολογιστικού Χωρίου	46
3.2.8 Συνοριακές Συνθήκες Υπολογιστικού Χωρίου	47
3.2.9 Διαμόρφωση του Κινούμενου πλέγματος (moving mesh)	49
3.2.10 Εξισώσεις υπολογιστικού χωρίου	49
3.2.11 Συνοριακές συνθήκες	50
3.2.12 Βελτιστοποίηση (optimization)	50
3.2.13 Solvers	51
3.2.14 Υπολογισμός αντίστασης φλοιού	51
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	53
4.1 Συρρίκνωση	53
4.2 Ανάλυση και επιβεβαίωση του προτεινόμενου υπολογιστικού μοντέλου ξήρανσης	54

<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	69
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	71



## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

Η συντήρηση των τροφίμων έχει ως σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής (shelf life) τους για να επιτρέπεται η αποθήκευση και η εύκολη διανομή τους. Ο σημαντικότερος και πιο επικίνδυνος για τον άνθρωπο περιορισμός της διάρκειας ζωής των τροφίμων είναι η δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Ο κυριότερος στόχος της συντήρησης είναι η εξάλειψη ή ο περιορισμός του κινδύνου μόλυνσης λόγω της δράσης των μικροοργανισμών και να αποφευχθούν οι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία, δραστηριότητές τους. (Karel and Lund, 2003; Rahman, 2007)

Με βάση τον τρόπο δράσης τους, οι κύριες τεχνικές συντήρησης μπορούν να διακριθούν σε:

1. επιβράδυνση ή αναστολή της χημικής υποβάθμισης και ανάπτυξης των μικροοργανισμών
2. άμεση αδρανοποίηση βακτηρίων, ζυμών, μούχλες ή ενζύμων και
3. αποτροπή επιμόλυνσης πριν και μετά την επεξεργασία των τροφίμων. (Rahman, 2007)

Στην πρώτη ομάδα δράσεων ανήκουν οι μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στον έλεγχο του περιβάλλοντος (π.χ. θερμοκρασία συντήρησης) και εκείνες που εξαρτώνται από εγγενείς ιδιότητες σε συγκεκριμένα τρόφιμα (π.χ. έλεγχος ενεργότητας νερού και προσαρμογής της, τιμή pH). Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι η αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες, μείωση της ενεργότητας του νερού, οξίνιση, ζύμωση, προσθήκη συντηρητικών ή αντιοξειδωτικών, έλεγχος του pH, κατάψυξη, ξήρανση, συμπίκνωση και συσκευασία σε τροποποιημένη ατμόσφαιρα. (Rahman, 2007)

Στη δεύτερη ομάδα δράσεων ανήκουν οι μέθοδοι θερμικής ή μη επεξεργασίας όπως αποστείρωση, παστερίωση, ακτινοβόληση, ζεμάτισμα, μεταβολή πίεσης, μαγνητικά πεδία κ.ά. (Rahman, 2007)

Στην τρίτη ομάδα δράσεων ανήκουν μέθοδοι και μέτρα, τα οποία δεν αποτελούν μεθόδους συντήρησης, αλλά εμμέσως συμβάλλουν στην αποτροπή επιμόλυνσης και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ασφαλών και υψηλής ποιότητας τροφίμων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η συσκευασία, η ασηπτική επεξεργασία, η ανάλυση και διαχείριση κινδύνων, η εφαρμογή σχεδίων ανάλυσης κινδύνων (HACCP), ISO 9000 κ.ά. (Rahman, 2007)

### **1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΞΗΡΑΝΣΗΣ**

Η ηθελημένη απομάκρυνση του νερού μέσω της ξήρανσης άρχισε να χρησιμοποιείται ήδη από την αρχαιότητα ως ένας τρόπος συντήρησης των τροφίμων. Η

ξήρανση στον ήλιο των φρούτων και το κάπνισμα των ψαριών και τους κρέατος είναι τεχνικές ήδη γνωστές από αρχαιοτάτων χρόνων που αποσκοπούσαν στην παράταση του χρόνου συντήρησης των τροφίμων (Couriel, 1980). Από ιστορικά κείμενα έχουμε περιγραφές ηλιακής ξήρανσης χουρμάδων, σύκων, σταφίδων και βερικόκων από τους κατοίκους της Μεσογείου και της Εγγύς Ανατολής (Salunkhe et al. 1991). Η ονομασία της αφυδάτωσης δόθηκε στις μεθόδους ξήρανσης που πραγματοποιούνται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Η πρώτη καταγραφή ελεγχόμενης τεχνητής ξήρανσης εμφανίστηκε το 18ο αιώνα. Λαχανικά μετά από χειρισμούς με ζεστό νερό τοποθετήθηκαν σε ζεστό φούρνο για ξήρανση (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996). Η εξέλιξη της ξήρανσης επιταχύνθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα με την εφαρμογή κυρίως τεχνολογιών που ήταν βασισμένες στη χρήση μιας τεχνητής πηγής θερμότητας.

Η ξήρανση είναι μια διεργασία κατά την οποία το περισσότερο διαθέσιμο νερό που περιέχεται στα τρόφιμα απομακρύνεται με θέρμανση, υπό ελεγχόμενες συνθήκες, για να επιβραδυνθούν ή ανασταλούν οι χημικές αντιδράσεις αλλά και η ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών, οι οποίες τελικώς οδηγούν στην ποιοτική του υποβάθμιση. (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Fellows, 2000) Συχνά ο όρος αποξηραμένος και αφυδατωμένος θεωρούνται συνώνυμοι αλλά αναφέρονται σε δυο διαφορετικά παραγόμενα προϊόντα. Ως αφυδατωμένα ορίζονται εκείνα τα τρόφιμα τα οποία δεν περιέχουν περισσότερο από 2.5% ξ.ο (dry basis) ενώ ως αποξηραμένα εκείνα τα τρόφιμα τα οποία έχουν περιεχόμενη υγρασία μεγαλύτερη από 2.5% ξ.ο. (dry basis) (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996).

Σκοπός της ξήρανσης είναι η παράταση της διάρκειας ζωής (shelf life) του προϊόντος, όχι ως νωπού, με την προϋπόθεση ότι αυτό θα συσκευασθεί κατάλληλα μετά το πέρας της ξήρανσής του ώστε να αποτραπεί η προσρόφηση υγρασίας από αυτό και η ποιοτική του υποβάθμιση. Αυτό επιτυγχάνεται με την ελεγχόμενη μείωση της ενεργότητας νερού σε ένα τέτοιο επίπεδο στο οποίο εμποδίζεται η ανάπτυξη ή και η εξάπλωση παθογόνων μικροοργανισμών, η ενζυμική δραστηριότητα και οι ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις. (Fellows, 2000)

Το κυριότερο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης είναι η εσωτερική μεταφορά νερού (internal mass transfer) που περιέχεται στο προϊόν. Οι μηχανισμοί αυτοί της κίνησης του νερού μέσα στο προϊόν συνοψίζονται σε: κίνηση του νερού υπό τριχοειδής δυνάμεις (capillary forces), διάχυση νερού λόγω κλίσης συγκέντρωσής του (concentration gradients), επιφανειακή διάχυση, διάχυση υδρατμών σε πόρους γεμάτους με αέρα (air-filled pores), ροή λόγω πιεσοστατικής κλίσης (pressure gradient) και ροή λόγω διαδοχής εξάτμισης-συμπύκνωσης (vaporization-condensation sequence). Η κίνηση του νερού μέσα στο προϊόν εξαρτάται από τη δομή των πόρων και την αλληλεπίδραση της υγρασίας με το πλέγμα (matrix) του τροφίμου. (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996)

Η απομάκρυνση του μεγαλύτερου ποσοστού του διαθέσιμου νερού από το τρόφιμο μειώνει τόσο το βάρος του όσο και τον όγκο του. Η μείωση αυτή καθιστά την ξήρανση

χρήσιμη για τη μείωση του κόστους, της συσκευασίας, του χειρισμού, της αποθήκευσης και της μεταφοράς του αποξηραμένου τροφίμου. (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Fellows, 2000; Brennan, 2006; Pessoa, et.al., 2007). Ωστόσο η ξήρανση είναι μια ενεργοβόρος διεργασία και το κόστος προμήθειας αυτής της ενέργειας μπορεί να είναι σχετικά υψηλό συγκριτικά με άλλες μεθόδους συντήρησης. (Brennan, 2006)

Η ξήρανση γίνεται με διάφορες μεθόδους ανάλογα με τον τρόπο απομάκρυνσης του νερού όπως (α) η θερμική ξήρανση (thermal), (β) η ωσμωτική (osmotic) ξήρανση και γ) η μηχανική (mechanical) ξήρανση. Στη *θερμική ξήρανση*, ένα αέριο ή κενό χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της υγρασίας από το προϊόν. Στην *ωσμωτική ξήρανση* χρησιμοποιείται διαλύμα ή κάποιος διαλύτης για την απομάκρυνση του νερού, ενώ στη *μηχανική ξήρανση* εφαρμόζεται κάποια δύναμη για την απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού (Rahman and Perera, 2007). Εκτός των παραπάνω σύγχρονων μεθόδων ξήρανσης υπάρχει και η παραδοσιακή ηλιακή ξήρανση όπου τα προϊόντα εκτίθενται απευθείας στον ήλιο (direct solar drying). Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται νέες μέθοδοι ξήρανσης όπως είναι η υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared drying) και τα μικροκύματα (microwave drying) ή συνδυασμοί αυτών όπως η ξήρανση με την επίδραση μικροκυμάτων και ρεύμα θερμού αέρα για την ταχεία απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996)

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ξήρανσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες: α) τον τύπο του προϊόντος, β) τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, γ) τα επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας ξήρανσης, δ) την ευαισθησία του προϊόντος στη θέρμανση, ε) τους απαιτούμενους προ-χειρισμούς (pre-treatments), στ) το αρχικό κόστος εγκατάστασης του εξοπλισμού ξήρανσης και το κόστος λειτουργίας αυτού συνυπολογιζόμενου και του κόστους επεξεργασίας του προϊόντος και ζ) περιβαλλοντικούς παράγοντες (Rahman and Perera, 2007)

Οι κυριότεροι τύποι ξηραντηρίων οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή μέχρι και σήμερα στην ξήρανση δημητριακών, καρπών και οπωρολαχανικών είναι οι ξηραντήρες τύπου σήραγγας (tunnel dryer), τύπου θαλάμου (oven dryer), μεταφορικής ταινίας (belt dryer), τυμπάνου (drum drier), περιστροφικός (rotary drier), ψεκασμού (spray drier) και αντίστοιχα το μέσο που χρησιμοποιείται είναι ο θερμός αέρας, το κενό, ο υπέρθερμος ατμός (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Αρβανιτογιάννης και Μπόσνεα, 2001).

### **1.2.1 Ξήρανση και μεταβολές στην ποιότητα**

Όλα τα προϊόντα υφίστανται μεταβολές κατά την ξήρανση και την αποθήκευσή τους οι οποίες υποβαθμίζουν την ποιότητά τους σε σχέση με τα φρέσκα και ο στόχος της βελτίωσης των τεχνολογιών της ξήρανσης είναι η ελαχιστοποίηση των μεταβολών μεγιστοποιώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Κύριες μεταβολές στα αποξηραμένα τρόφιμα αφορούν την υφή, τη γεύση, το άρωμα, το χρώμα και τη θρεπτική τους αξία. (Fellows, 2000; Brennan, 2006)

**Υφή:** στα στερεά τρόφιμα, οι αλλαγές στη υφή αποτελούν σημαντική αιτία υποβάθμισης της ποιότητας καθώς λόγω συρρίκνωσης μεταβάλλεται το σχήμα και το μέγεθος του προϊόντος. Επίσης, ο βαθμός και η φύση των προ-χειρισμών (pre-treatments) συνήθως προκαλούν ρωγμές και καταστροφή των κυττάρων προσδίδοντας συρρικνωμένη εμφάνιση στα επανυδατωμένα (rehydrated) προϊόντα. (Fellows, 2000) Γενικώς, η ταχεία ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες έχει σαν συνέπεια την αύξηση των μεταβολών στην υφή του προϊόντος σε σύγκριση με τους μέτριους ρυθμούς ξήρανσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Καθώς το νερό απομακρύνεται κατά την ξήρανση, διαλυμένες ουσίες σε υψηλές συγκεντρώσεις (π.χ. σάκχαρα, άλατα) συμπαρασύρονται προς την επιφάνεια του προϊόντος προκαλώντας συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών σε αυτήν. Οι υψηλές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης προκαλούν περίπλοκες φυσικοχημικές μεταβολές στις συγκεντρωμένες διαλυμένες ουσίες στην επιφάνεια του υπό ξήρανση προϊόντος με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σκληρού υδρόφοβου αδιαπέρατου στρώματος (impermeable skin). Αυτή η διαδικασία καλείται *σκλήρυνση περιβλήματος* (case hardening) η οποία συνεπάγεται μειωμένο ρυθμό ξήρανσης και παραγωγή τροφίμων με στεγνή επιφάνεια και υγρό εσωτερικό. Η σκλήρυνση αυτή ελαχιστοποιείται ελέγχοντας τις συνθήκες ξήρανσης ώστε να αποφευχθούν υπερβολικά αυξημένες διαφορές υγρασίας μεταξύ του εσωτερικού του τροφίμου και της επιφανείας του. (Potter and Hotchkiss, 1995; Fellows, 2000; Wihelm, et.al., 2004; Barta, 2006; Ramaswamy and Marcotte, 2006)

**Γεύση και άρωμα:** η επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί απώλειες πτητικών συστατικών, που επηρεάζουν τη γεύση και το άρωμα των τροφίμων, με αποτέλεσμα το αποξηραμένο προϊόν να έχει μειωμένη ένταση γεύσης σε σχέση με το αντίστοιχο φρέσκο ενώ το τελικό προϊόν υπό ορισμένες συνθήκες το προϊόν μπορεί να αποκτήσει γεύση «μαγειρεμένου» (Fellows, 2000; Brennan, 2006). Η έκταση της απώλειας των πτητικών συστατικών εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την περιεχόμενη υγρασία και την πίεση των ατμών των πτητικών και τη διαλυτότητά τους στους υδρατμούς. Πτητικά συστατικά με αυξημένη πτητικότητα και διαχυτότητα χάνονται στα πρώτα στάδια της ξήρανσης. (Fellows, 2000)

**Χρώμα:** υπάρχουν πολλά αίτια υποβάθμισης του χρώματος ή αλλαγής του. Η ξήρανση μεταβάλλει τα επιφανειακά χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια την ανακλαστικότητα του χρώματος. Στα φρούτα και τα λαχανικά προκαλούνται χημικές αλλαγές σε συστατικά όπως το καροτένιο και οι χλωροφύλλες, που διαμορφώνουν το χρώμα, λόγω της θέρμανσης και της οξειδωσής τους κατά την ξήρανση. Επίσης η δράση υπολειμμάτων πολυφαινολοξιδικών ενζύμων μπορεί να προκαλέσει καστανώση κατά την αποθήκευσή τους. Οι μεταβολές αυτές προλαμβάνονται με κατάλληλους προ-χειρισμούς όπως το ζεμάτισμα ή η εμβάπτιση σε ασκορβικό οξύ (κυρίως σε φρούτα) ή σε ενώσεις του διοξειδίου του θείου (λεύκανση) (Fellows, 2000)

**Θρεπτική αξία:** στα φρούτα και λαχανικά μεγαλύτερες απώλειες λαμβάνουν χώρα κατά την προετοιμασία τους παρά κατά τη διάρκεια της ξήρανσής τους. Οι βιταμίνες έχουν διαφορετικές διαλυτότητες στο νερό και με την πρόοδο της ξήρανσης μερικές γίνονται υπέρκορες και καθιζάνουν με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειές τους.

Άλλες όπως το ασκορβικό οξύ (βιταμίνη C) είναι διαλυτές και αντιδρούν με διαλυτές ουσίες σε υψηλότερα ποσοστά με την πρόοδο της ξήρανσης. Η βιταμίνη C είναι ευαίσθητη στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς και στην οξειδωση και για αυτό απαιτούνται μειωμένοι χρόνοι ξήρανσης, χαμηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας, μειωμένη υγρασία και επίπεδα οξυγόνου κατά την αποθήκευση, για την αποφυγή μεγάλων απωλειών. Η θειαμίνη είναι επίσης θερμοευαίσθητη, αλλά άλλες υδατοδιαλυτές βιταμίνες είναι πιο σταθερές στη θέρμανση και οξειδωση και οι απώλειές τους κατά την ξήρανση σπάνια ξεπερνούν το 5-10%, πέρα από τις απώλειες κατά το ζεμάτισμα όπου αυτό λαμβάνει χώρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απώλεια βιταμινών όπως η A και C μπορεί να είναι μεγαλύτερες κατά την ξήρανση από ότι στην κονσερβοποίηση ή κατάψυξη (Brennan, 2006). Λιποδιαλυτά θρεπτικά συστατικά (όπως απαραίτητα λιπαρά οξέα και βιταμίνες A, D, E και K) ως επί το πλείστον περιέχονται στη στερεή φάση των τροφίμων και δεν συμπυκνώνονται κατά την ξήρανση. (Fellows, 2000)

### **1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΤΡΟΦΙΜΑ**

#### **1.3.1 Ελεύθερο και δεσμευμένο νερό**

Το νερό στα τρόφιμα βρίσκεται σε δυο μορφές, είτε ως δεσμευμένο (bound water) είτε ως ελεύθερο (free water). Το δεσμευμένο αναφέρεται στο νερό το οποίο συγκρατείται με τέτοιο τρόπο ώστε να ασκεί μικρότερη πίεση ατμών σε σύγκριση με το ελεύθερο στην ίδια θερμοκρασία. Η μορφή αυτή του νερού μπορεί να συγκρατείται σε τριχοειδείς δομές, σε στερεές επιφάνειες του τροφίμου ή ως διάλυμα σε κυτταρικά τοιχώματα ή δεσμευμένο σε χημικές ενώσεις που περιέχονται στο τρόφιμο και για την απομάκρυνσή του χρειάζεται διάσπαση των δεσμών συγκράτησης. Το ελεύθερο νερό αναφέρεται στο νερό αυτό που βρίσκεται σε περίσσεια και μπορεί να ωθείται στην επιφάνεια του τροφίμου με μικρότερη ενέργεια από ότι το δεσμευμένο. (Barta, 2006; Cussler, 2007; Pessoa, 2007)

Το ποσό του δεσμευμένου νερού διαφέρει από τρόφιμο σε τρόφιμο και παρουσιάζει ιδιότητες σημαντικά διαφορετικές από αυτές του υπόλοιπου περιεχόμενου νερού. Υπάρχουν πολλοί βαθμοί δέσμευσης του νερού. Το πιο ισχυρά δεσμευμένο νερό είναι εκείνο που αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των μη υδατικών συστατικών. Το αμέσως επόμενο είναι το *δεσμευμένο νερό* που καταλαμβάνει τις πρώτες στρώσεις, σε επαφή με μη υδατικά συστατικά, συνδεδεμένο με ιοντικές κυρίως ομάδες αυτών των συστατικών. Ακολουθεί το *πολυστρωματικό νερό* που καταλαμβάνει τις αμέσως επόμενες στρώσεις μετά από το δεσμευμένο και, αν και δεν είναι τόσο ισχυρά συνδεδεμένο (κυρίως με δεσμούς υδρογόνου), παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του ελεύθερου. Η ποσότητα του δεσμευμένου νερού που υπάρχει στα τρόφιμα υψηλής υγρασίας είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα οι δύο πρώτες κατηγορίες δεσμευμένου νερού αποτελούν περίπου το 0.5 % και το πολυστρωματικό νερό το 1-5 % του ολικού νερού στα τρόφιμα.

Το ελεύθερο νερό είναι εκείνο που καταλαμβάνει τις πιο απομακρυσμένες θέσεις από τα μη υδατικά συστατικά και μπορεί να δρα ως διαλύτης, ενώ παγώνει σε θερμοκρασίες κάτω των 0 °C. Το ελεύθερο νερό μπορεί να βρίσκεται παγιδευμένο σε τριχοειδείς πόρους, οπότε και παρουσιάζει μειωμένη τάση ατμών όσο μικρότερη είναι η διάμετρος των τριχοειδών πόρων. Αυτό το νερό δεν εμφανίζει μακροσκοπική ροή, ενώ αντίθετα το μη δεσμευμένο νερό εμφανίζει ελεύθερη μακροσκοπική ροή.

Η απομάκρυνση του νερού από τα τρόφιμα είναι τόσο δυσκολότερη όσο ισχυρότερα είναι αυτό δεσμευμένο. Το *ελεύθερο νερό* απομακρύνεται ευκολότερα και η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισής του είναι η ίδια με αυτή του καθαρού νερού. Το *πολυστρωματικό νερό* είναι το επόμενο και παρουσιάζει λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης λίγο έως αρκετά μεγαλύτερη από το καθαρό νερό. Το *δεσμευμένο νερό* απομακρύνεται ακόμη δυσκολότερα και παρουσιάζει πολύ αυξημένη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, ενώ το νερό που αποτελεί τμήμα των μη υδατικών συστατικών του τροφίμου απομακρύνεται πολύ δύσκολα (Heldman and Singh, 1981; Karel and Lund, 2003).

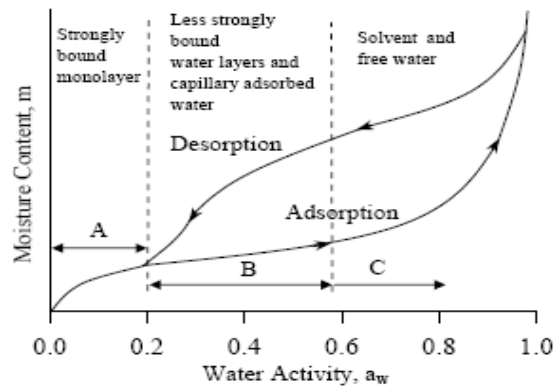
Η διαθεσιμότητα του νερού για την ανάπτυξη και δράση των μικροοργανισμών εξαρτάται επίσης από το πόσο ισχυρά είναι αυτό δεσμευμένο. Το νερό που αποτελεί τμήμα των μη υδατικών συστατικών του τροφίμου και το *δεσμευμένο νερό* δεν είναι διαθέσιμο για μικροβιακές δράσεις. Από το *πολυστρωματικό νερό* μικρό μόνο μέρος είναι διαθέσιμο, ενώ το *ελεύθερο νερό* είναι πλήρως διαθέσιμο. Αυτό σημαίνει ότι η ικανότητα ανάπτυξης των μικροοργανισμών και μέσω αυτής η σταθερότητα των τροφίμων, εξαρτάται όχι από το ολικό ποσό του περιεχόμενου νερού, αλλά από το ελεύθερο ή χαλαρά δεσμευμένο νερό και γι' αυτό σχετίζεται συνήθως με την *ενεργότητα του νερού* στο τρόφιμο. Επομένως η αποτελεσματικότητα της ξήρανσης ως μεθόδου συντήρησης και ο σχεδιασμός της αντίστοιχης διεργασίας εξαρτάται από την έκταση στην οποία επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του νερού από το τρόφιμο (Heldman and Singh, 1981; Brennan, 2006; Bhandari and Adhikari, 2008).

### 1.3.2 Ενεργότητα νερού

Το ποσοστό του περιεχόμενου νερού στα τρόφιμα δεν επαρκεί για την περιγραφή της μικροβιακής σταθερότητας των τροφίμων. Για το σκοπό αυτό, έχει επικρατήσει στην τεχνολογία των τροφίμων η ενεργότητα του νερού για τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής των τροφίμων. Ως ενεργότητα νερού ( $a_w$ ) ορίζεται ο λόγος της πίεσης των υδρατμών ( $p_v$ ) ενός τροφίμου προς την πίεση των ατμών του καθαρού νερού ( $p_{v0}$ ) στην ίδια θερμοκρασία,  $a_w = p_v / p_{v0}$ .

Η σχέση μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας ισορροπίας  $M_e$  και της αντίστοιχης ενεργότητας του νερού σε σταθερή θερμοκρασία αποτελεί την ισόθερμη καμπύλη προσρόφησης-εκρόφησης νερού (water adsorption-desorption isotherm). Η ισόθερμη καμπύλη είναι μια από τις θεμελιώδεις παραμέτρους που επηρεάζουν πολύπλευρα τις διεργασίες αφυδάτωσης και τη σταθερότητα του αποξηραμένου προϊόντος. Για τα

συστήματα τροφίμων οι ισόθερμες καμπύλες δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τους μηχανισμούς προσρόφησης-εκρόφησης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των βιομερών του τροφίμου με το νερό (Ramaswamy and Marcotte, 2006; Brennan, 2006; Bhandari and Adhikari, 2008). Οι ισόθερμες καμπύλες νερού των περισσότερων τροφίμων γενικά παρουσιάζουν μια σιγμοειδή μορφή. (Karel and Lund, 2003). Οι ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την υγροσκοπική συμπεριφορά ενός τροφίμου, ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες εκρόφησης είναι χρήσιμες στην ξήρανση. Στις ισόθερμες καμπύλες χαρακτηρίζονται σεμπορούν να διακριθούν τρεις διαφορετικές ζώνες (Σχήμα 1). Η ζώνη Α αναπαριστά την προσρόφηση-εκρόφηση του νερού που είναι ισχυρά δεσμευμένο και είναι αδύνατο να λειτουργήσει σαν διαλυτικό μέσο. Σε αυτή την περιοχή, υπάρχει ουσιαστικά ο σχηματισμός μιας μονομοριακής στρώσης νερού. Η ζώνη Β αναπαριστά το λιγότερο ισχυρά δεσμευμένο νερό και το νερό που συγκρατείται από τριχοειδείς δυνάμεις.



**Σχήμα 1:** Ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης-εκρόφησης νερού και οι ζώνες δέσμευσης του νερού συναρτήσει της  $a_w$  (Πηγή: Kahveci and Cihan, 2007).

Στη ζώνη C το νερό είναι ακόμα πιο χαλαρά δεσμευμένο και είναι διαθέσιμο για συμμετοχή στις αντιδράσεις ενώ λειτουργεί και ως διαλυτικό μέσο (Mujumdar, 1997; Mujumdar, 2006; Toledo, 2007). Η περιεχόμενη υγρασία της μονομοριακής στρώσης (ζώνη A) συχνά θεωρείται σαν μια καλή πρώτη προσέγγιση του περιεχόμενου νερού παρέχοντας τη μέγιστη σταθερότητα ενός αποξηραμένου υλικού. Από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα υπολογισμού της περιεχόμενης υγρασίας της μονομοριακής στρώσης είναι αυτό των Brunauer-Emmett-Teller (BET, εξ. (1)) (Brunauer et al., 1938; Karel and Heidelbaugh, 1973; Labuza, 1980):

$$\frac{a_w}{X(1-a_w)} = \frac{1}{X_w C} + \frac{C-1}{X_w C} (a_w) \quad (1)$$

όπου, X είναι η περιεχόμενη υγρασία,  $X_w$  είναι η περιεκτικότητα νερού που αντιστοιχεί στα μόρια του νερού που καλύπτουν την επιφάνεια των σωματιδίων σαν μονοστιβάδα, το C είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και  $a_w$  είναι η ενεργότητα νερού. Το μειονέκτημα της εξίσωσης BET είναι ότι καλύπτει πολύ μικρό εύρος τιμών ενεργότητας νερού,  $0.05 < a_w < 0.45$  (Bhandari and Adhikari, 2008). Εκτός

της εξίσωσης BET έχουν αναπτυχθεί και άλλα μοντέλα ισόθερων καμπυλών όπως αυτά των Halsey (2 ή 3 παραμέτρων), Henderson (2 σταθερών), Kuhn, Oswin, Smith, Iglesias και Cherife (2 σταθερών) (Πίνακας 1). Κανένα από αυτά τα μοντέλα όμως δεν μπορεί να αναπαράγει την ισόθερμη καμπύλη σε ολόκληρο το εύρος των τιμών  $a_w$  για όλα τα τρόφιμα.

**Πίνακας 1:** Μοντέλα δύο παραμέτρων ισόθερων καμπυλών υγρασίας

FREUNDLICH (1906)	$x_w = A \cdot a_w^B$
LANGMUIR (1916)	$x_w = x_{\max} \left( \frac{a_w}{a_w + B} \right)$
SMITH (1947)	$x_w = A + B \cdot \ln(1 - a_w)$
OSWIN (1946)	$x_w = A \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$
HENDERSON (1952)	$x_w = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right]^{\frac{1}{B}}$
BRUNAUER, EMMET, TELLER (1938) (BET)	$x_w = \frac{x_{w,a} \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)}$ $\frac{1}{x_w} \cdot \frac{a_w}{1 - a_w} = \frac{1}{x_{w,a} \cdot C} + \frac{C - 1}{x_{w,a} \cdot C} \cdot a_w$
HALSEY (1948)	$x_w = \left[ -\frac{A}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{B}}$
CHUNG, PFOST (1967)	$x_w = -\frac{1}{B} \cdot \ln \left[ -\frac{\ln a_w}{A} \right]$
IGLESIAS, CHIRIFE (1978)	$\ln \left[ x_w + (x_w^2 + x_{0.5w})^{\frac{1}{2}} \right] = A \cdot a_w + B$
LEWICKI (2000)	$x_w = A \cdot \left[ \frac{1}{a_w} - 1 \right]^{B-1} - 1$

(Πηγή: Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Bhandari and Adhikari, 2008)

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αναπτύχθηκε το μοντέλο των Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB, εξ (2)) το οποίο ενσωματώνει τις βασικές αρχές της Langmuir και της BET. Το μοντέλο GAB θεωρείται ίσως το καταλληλότερο για πολλά τρόφιμα συμπεριλαμβανομένων και των οπωρολαχανικών σε ένα μεγάλο εύρος ενεργοτήτων έως και 0.90-0.95. (Bhandari and Adhikari, 2008; Singh and Heldman, 2009; Xanthopoulos, et.al., 2014)

Οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται στην GAB έχουν φυσική σημασία στη μεταξύ τους σύνδεση και μπορεί να γραφεί με διαφορετικούς ισοδύναμους τρόπους όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{m}{M_o} = \frac{CKa_w}{(1 - Ka_w)[1 - Ka_w + CKa_w]} \quad (2)$$

όπου C και K σταθερές οι οποίες σχετίζονται με τις ενθαλπίες ρόφησης εξ. (3-6)



$$C = C_o \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) (3), \quad \Delta H_c = H_o - H_n (4), \quad K = K_o \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) (5),$$

$$\Delta H_k = H_n - H_l (6)$$

όπου  $C_o$  και  $K_o$  είναι εντροπικοί παράγοντες,  $H_o$  και  $H_n$  οι μοριακές ενθαλπίες ρόφησης μονής (monolayer) και πολλαπλής (multi-layer) στρώσης ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) αντίστοιχα, και  $H_l$  η μοριακή ενθαλπία της υγρής φάσης του σωρού (bulk liquid phase  $\text{kJ mol}^{-1}$ ) (Wihelm, et.al., 2004; Bhandari and Adhikari, 2008; Singh and Heldman, 2009; ). Η εξίσωση GAB καταλήγει στην BET όταν  $K=1$ . Η σταθερά  $K$  επιτρέπει στην εξίσωση να εφαρμόζεται σε υψηλότερες τιμές ενεργότητας νερού σε πολυστρωματικό εύρος υγρασίας. (Bhandari and Adhikari, 2008)

### 1.3.3 Επίδραση της ενεργότητας του νερού στη σταθερότητα των τροφίμων

Η ποσότητα του νερού στα τρόφιμα και τα αγροτικά προϊόντα επηρεάζει την ποιότητα και τη φθαρτότητα (perishability) αυτών, δεν συνδέεται όμως άμεσα με την περιεχόμενη υγρασία, για τον λόγο αυτό καλύτερος δείκτης φθαρτότητας είναι η διαθεσιμότητα του νερού στο προϊόν (Wihelm, et.al., 2004). Καθώς μειώνεται η υγρασία μειώνεται και η ενεργότητα του νερού. Όταν η ενεργότητα φτάσει στο 0.6 το προϊόν γενικά θεωρείται σταθερό από μικροβιακής, χημικής και φυσικής απόψεως. (Driscoll, 2004) Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες επιδράσεις της ενεργότητας-διαθεσιμότητας του νερού στη σταθερότητα του προϊόντος.

**Μικροβιακή σταθερότητα:** τα όρια αυτής καθορίζονται από την ενεργότητα. Για παράδειγμα τα περισσότερα βακτήρια αναπτύσσονται σε υψηλές τιμές ενεργότητας και συγκεκριμένα πάνω από 0.91 και οι μούχλες (molds) πάνω από 0.8. Το όριο ενεργότητας εξαρτάται από άλλους παράγοντες όπως το pH, η διαθεσιμότητα οξυγόνου, η φύση των διαλυμένων ουσιών, η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών και η θερμοκρασία (Driscoll, 2004). Ενδεικτικές ελάχιστες τιμές ενεργότητας νερού για την ανάπτυξη μικροοργανισμών και το εύρος της ενεργότητας νερού ορισμένων κατηγοριών τροφίμων δίνονται στον Πίνακα 2. Είναι προφανές ότι η περιοχή μεγαλύτερης σταθερότητας αντιστοιχεί σε τιμές 0.25 έως 0.50-0.65 ανάλογα με το προϊόν.

**Χημική σταθερότητα:** το νερό μπορεί να παίρνει μέρος σε χημικές αντιδράσεις ως διαλύτης, αντιδρών, προϊόν και/ή ως τροποποιητής (modifier) σε καταλυτικές ή ανασταλτικές αντιδράσεις. Αντιδράσεις οι οποίες εξαρτώνται από την περιεχόμενη υγρασία για την έναρξή τους, γίνονται όλο και πιο περιορισμένες κατά τη ξήρανση λόγω της μειωμένης μοριακής κινητικότητας των αντιδρώντων. Η θερμοκρασία επίσης αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για το ρυθμό των αντιδράσεων και άρα και της ποιότητας όπως αυτή επηρεάζεται από τη μεταβολή του ρυθμού. Στις αντιδράσεις αυτές συγκαταλέγονται: i) ενζυμικές αντιδράσεις οι οποίες γίνονται με πολύ αργό ρυθμό σε χαμηλές τιμές ενεργότητας, ii) μη-ενζυμικές αντιδράσεις οι οποίες εξαρτώνται από το

περιεχόμενο νερό και έχουν μέγιστο ρυθμό αντίδρασης σε τιμές  $a_w \in (0.6-0.7)$  (Driscoll, 2004; Ramaswamy and Marcotte, 2006).

**Πίνακας 2:** Εύρη  $E_a$  για την ανάπτυξη μικροοργανισμών και ομάδες τροφίμων που αντιστοιχούν σε αυτά τα εύρη.

Ενεργότητα νερού	Μικροοργανισμοί των οποίων αναστέλλεται η δράση τους στην κατώτερη τιμή του $a_w$	Τρόφιμα που αντιστοιχούν στο εύρος $a_w$
1.00-0.95	Pseudomonas, Escherichia, Bacillus, Clostridium perfringens, μερικές ζύμες	Φρέσκα φρούτα, λαχανικά, κρέας, ψάρι, γάλα, ψωμί
0.95- 0.91	Salmonella, Vibrio parahaemolyticus, Serratia, Lactobacillus, μερικές μούχλες	Μερικά τυριά (τσένταρ, προβολόνε), Παστά κρέατα
0.91- 0.87	Πολλές ζύμες (Candida, Torulopsis, Hansenula), Micrococcus	Σαλάμια που έχουν υποστεί ζύμωση, κέικ, ξερά τυριά, μαργαρίνη
0.87- 0.80	Οι περισσότερες μούχλες (mycotoxigenic penicillia), Staphylococcus aureus	Οι περισσότεροι συμπυκνωμένοι χυμοί, συμπυκνωμένο ζαχαρούχο γάλα, ρύζι, ζαμπόν
0.80- 0.75	Τα περισσότερα halophilic βακτήρια, mycotoxigenic aspergilli	Μαρμελάδα, μάρζιπαν, φρουί γλασέ
0.75- 0.65	Ξεροφιλικές μούχλες (Aspergillus chevalieri, A. candidus), Saccharomyces bisporus	Βρώμη, Μερικά αποξηραμένα φρούτα, Ξηροί καρποί
0.65- 0.60	Ωσμωτικές ζύμες (Saccharomyces rouxii), μερικές μούχλες (Aspergillus echinulatus, Monascus bisporus)	Ξερά φρούτα, καραμέλες, μέλι
0.50	Δεν υπάρχει μικροβιακή ανάπτυξη	Noodles, Spaghetti, Ξερά μπαχαρικά
0.40	-	Σκόνη αυγού
0.30	-	Μπισκότα, Κράκερς
0.20	-	Γάλα σε σκόνη, αποξηραμένα λαχανικά

(Πηγή: Rahman and Labuza, 2007)

**Φυσική σταθερότητα:** η μεταβολή του υγρασιακού περιεχομένου σχετίζεται με: (i) Μαλάκωμα ή σκλήρυνση της υφής, μαλακότερη υφή σε αυξημένες υγρασίες και σκληρότερη σε μειωμένες υγρασίες; (ii) Διαφορική (differential) συρρίκνωση κατά την οποία τα εξωτερικά στρώματα συρρικνώνονται με διαφορετικό τρόπο από ότι τα εσωτερικά οδηγώντας σε επιφανειακές ή ακτινικές ρωγμές το προϊόν; (iii) Σκλήρυνση περιβλήματος (case hardening) δημιουργώντας μία επιφανειακή υδρόφοβη στρώση σε πλούσια σε έλαια (oil-rich) ή σε σάκχαρα προϊόντα; iv) Κατάρρευση της κυτταρικής δομής καθώς απομακρύνεται η περιεχόμενη υγρασία. (Driscoll, 2004; Ramaswamy and Marcotte, 2006)

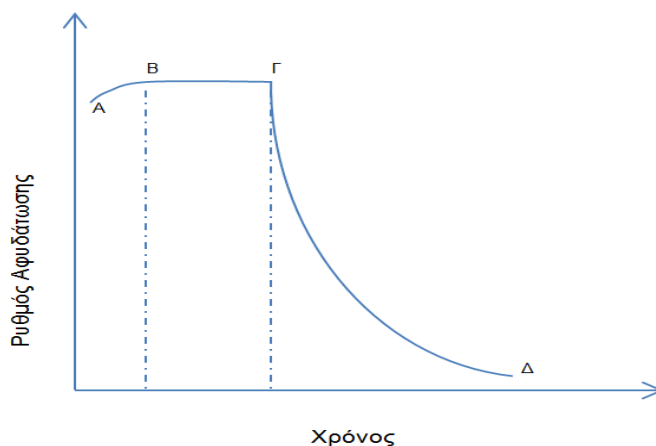
Η ανάπτυξη τοξινών είναι δυνατή σε πολλές περιπτώσεις, σε τιμές  $a_w$  μεγαλύτερες από εκείνες της ανάπτυξης των αντίστοιχων μικροοργανισμών, γεγονός που παρέχει σε αυτές τις περιπτώσεις ένα πρόσθετο παράγοντα ασφάλειας. Οι μύκητες τείνουν να αναπτύσσονται πιο αργά από τα βακτήρια, είναι πιο ανθεκτικοί σε αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος και μπορούν να προκαλέσουν αλλοίωση. Μερικές μούχλες μπορούν να παράξουν *μυκοτοξίνες* σε τρόφιμα (δημητριακοί και ξηροί καρποί, σύκα, κακάο, καφέ, κ.ά.) οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν οξείες και χρόνιες τοξικότητες στον άνθρωπο και τα ζώα. Η μείωση της  $a_w$  δεν είναι επαρκής για να καταστρέψει τους υπαίτιους μικροοργανισμούς για την παραγωγή των μυκοτοξινών, καθώς η ξήρανση δεν καταστρέφει απαραίτητως τα σπόρια των μυκήτων αυτών αλλά και γιατί οι μυκοτοξίνες είναι θερμοανθεκτικές ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες (Grabowski et al., 2003; Ramaswamy and Marcotte, 2006). Γενικά η παραγωγή μυκοτοξινών συνδέεται με μη ορθές πρακτικές κατά την ξήρανση ή αποθήκευση των τροφίμων. (Grabowski et al., 2003)

#### 1.4 ΣΤΑΔΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Η καμπύλη ξήρανσης (Σχήμα 2) δίνει σχηματικά τη σχέση μεταξύ του ρυθμού ξήρανσης με τον αντίστοιχο χρόνο ξήρανσης ή με την αντίστοιχη περιεχόμενη υγρασία. Σε μια θεωρητική καμπύλη ξήρανσης μπορεί να παρατηρηθούν τρία κύρια στάδια:

1. Στάδιο προσαρμογής κατά το οποίο το προϊόν θερμαίνεται στη θερμοκρασία ξήρανσης (transient period)
2. Σταθερή περίοδος ξήρανσης, όπου η υγρασία μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα άρα ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σχετικά σταθερός (constant rate period)
3. Επιβραδυνόμενη φάση ξήρανσης, όπου το εναπομείναν νερό είναι δεσμευμένο ή συγκρατείται στο σταθερό πλέγμα του προϊόντος με συνέπεια ο ρυθμός ξήρανσης βαίνει μειούμενος (Rahman and Perera, 2007)

Στο Σχήμα 2 διακρίνονται αρχικά το στάδιο προσαρμογής (A→B) και στη συνέχεια ο σταθερός ρυθμός ξήρανσης (B→Γ), ακολουθούμενος από τον επιβραδυνόμενο ρυθμό ξήρανσης (Γ→Δ). Το σημείο στο οποίο παρατηρείται αυτή η μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης καλείται κρίσιμη υγρασία ( $w_c$ ). Η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης μπορεί να εμφανίσει ένα αρχικό τμήμα αυξανόμενου ρυθμού (A→B) εάν το προϊόν εισέλθει στον ξηραντήρα σε χαμηλή θερμοκρασία.. (Μπλούκας, 2004; Rahman and Perera, 2007)



**Σχήμα 2:** Ρυθμός ξήρανσης συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης; διακρίνονται τα στάδια των φάσεων ξήρανσης. (Πηγή: Μπλούκας,2004).

#### 1.4.1. Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης

Η σταθερή περίοδος ξήρανσης αντιστοιχεί στην απομάκρυνση του ελεύθερου νερού από το προϊόν. Η επιφάνεια του προϊόντος διατηρείται κορεσμένη στην αρχή και η  $a_w$  είναι σχεδόν ένα. Η περίοδος αυτή διατηρείται όσο ο ρυθμός μεταφοράς νερού από το εσωτερικό του προϊόντος ισούται με το ρυθμό εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια. (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996)

#### 1.4.2. Περίοδος επιβραδυνόμενου ρυθμού ξήρανσης

Η επιβραδυνόμενη περίοδος εμφανίζεται όταν ο ρυθμός ξήρανσης αρχίζει να μειώνεται, και η  $a_w$  στην επιφάνεια είναι μικρότερη από ένα. Ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από την εσωτερική ροή νερού ή υδρατμού. Το στάδιο αυτό μπορεί να διακριθεί σε δυο υποστάδια. Η πρώτη επιβραδυνόμενη περίοδος κατά την οποία η επιφάνεια του προϊόντος ξηραίνεται μέχρι να ξηραθεί όλη η επιφάνεια και η δεύτερη επιβραδυνόμενη περίοδος η οποία αρχίζει όταν η επιφάνεια είναι τελείως ξηρή. (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Saravacos and Maroulis, 2001; Olivas-Vargas et al., 2003). Η ποσότητα του νερού που αφαιρείται κατά την περίοδο αυτή μπορεί να είναι σχετικά μικρή αλλά ο αντίστοιχος χρόνος απομάκρυνσης νερού είναι μεγάλος καθώς ο ρυθμός ξήρανσης είναι χαμηλός. (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Cussler, 2007). Τα περισσότερα τρόφιμα ξηραίνονται σχεδόν εξολοκλήρου στην επιβραδυνόμενη φάση. (Saravacos and Maroulis, 2001)

## 1.5 ΣΥΚΑ

### 1.5.1 Η συκιά (*Ficus carica*)

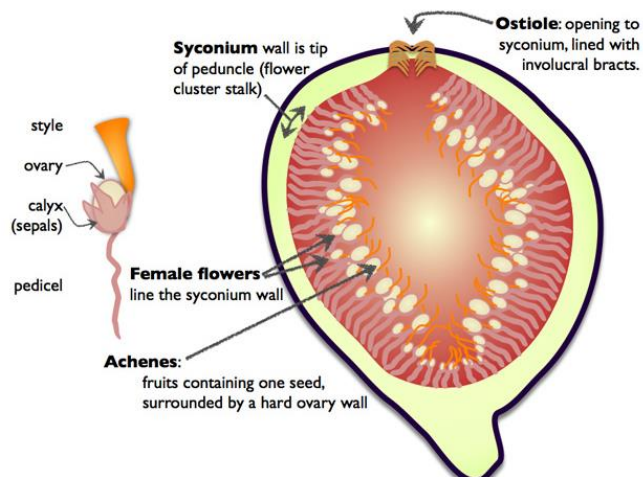
Η συκιά καλλιεργείται στις ανατολικές μεσογειακές περιοχές της Ευρώπης και της Αφρικής, καθώς και στις νοτιοδυτικές περιοχές της Ασίας από τους αρχαίους χρόνους ακόμα. Η καταγωγή της εντοπίζεται στη Νότια Αραβία. Σήμερα η συκιά αποτελεί σημαντική δενδρώδη καλλιέργεια σε πολλά μέρη του κόσμου και κυρίως σε χώρες οι οποίες συνορεύουν με τη Μεσόγειο, την Ερυθρά και την Αραβική θάλασσα.

Η συκιά ευδοκμεί γενικά σε υποτροπικές και τροπικές περιοχές, ακόμα και σε ήπιες κλιματικά περιοχές της εύκρατης ζώνης. Οι κυριότερες χώρες παραγωγής σύκων είναι η Ισπανία, Ιταλία, Τουρκία, Ελλάδα, Πορτογαλία, ΗΠΑ κ.ά. Η παγκόσμια παραγωγή νωπών και ξηρών σύκων ανέρχεται σε 1,200,000 τόνους και 200,000 τόνους αντίστοιχα. Αντίστοιχα, η εγχώρια παραγωγή σε νωπά σύκα ανέρχεται σε 30,304 τόνους και σε ξηρά στους 20,483 τόνους (Ποντίκης, 1996; Crisosto and Kader, 2014). Στην Ελλάδα η συκιά καλλιεργείται κυρίως στην Πελοπόννησο, Στερεά Ελλάδα και Εύβοια, στα νησιά του Αιγαίου, στα Επτάνησα και στην Κρήτη. Για παραγωγή ξηρών σύκων καλλιεργείται κυρίως στη Μεσσηνία, Λακωνία, Εύβοια και κάποια νησιά του Αιγαίου. (Ποντίκης, 1996)

### 1.5.2 Βοτανική ταξινόμηση- Βοτανικοί χαρακτήρες

Η συκιά ανήκει στην οικογένεια *Moraceae* στο γένος *Ficus*, στο υπογένος *Eusyce* και στο είδος *F.carica* L. Το είδος *F.carica* είναι θηλυκοδίοικο είδος, το οποίο περιλαμβάνει δυο ευκρινείς τύπους δένδρων, την αρρενοσυκιά, που είναι μόνοικη, δηλαδή έχει αρσενικά και θηλυκά άνθη και την ημεροσυκιά, που έχει μόνο θηλυκά άνθη. (Ποντίκης, 1996; Thompson, 2003; Crisosto and Kader, 2014) Ως δένδρο είναι φυλλοβόλο, μετρίου έως μεγάλου μεγέθους, με μαλακό ξύλο. Ο φλοιός του καρπού είναι διαφόρων αποχρώσεων, πράσινος, πρασινοκίτρινος, λευκοκίτρινος, μοβ, μελανός και χαλκόχρους. Η σάρκα είναι επίσης διαφόρων αποχρώσεων, κεχριμπάρι, ανοικτοκόκκινη, κόκκινη, ρόδινη, μαλακή και γλυκιά. (Ποντίκης, 1996; Crisosto and Kader, 2014)

Ο καρπός του σύκου προέρχεται από μια σύνθετη ταξιανθία και καλείται συκόνιο (*syconium*). Οπωροκομικά ως καρπός θεωρείται το ώριμο, εύχυμο συκόνιο, ενώ βοτανικά είναι ένας ψευδής καρπός. Ο καρπός (συκόνιο) έχει σχήμα σφαιρικό ή αχλαδόμορφο (Ποντίκης, 1996) και περικλείει εκατοντάδες καρπούς (Σχήμα 3α). Οι πραγματικοί καρποί είναι μικροσκοπικές δρύπεις (*drupelets-achenes*) που προέρχονται από μικροσκοπικά άνθη στο εσωτερικό του συκονίου. Το εσωτερικό του συκονίου επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω ενός μικρού ανοίγματος στη βάση του ψευδοκαρπού το οποίο καλείται οστιόλη (*ostiole*) ή ‘μάτι’ (Crisosto et al., 2011).



**Σχήμα 3α:** Μορφολογία συκονίου (Πηγή: Preston and Osnas, 2013)

### 1.5.3 Ωρίμαση-Συντήρηση-Ξήρανση

Τα σύκα θεωρούνται ώριμα όταν ο φλοιός αποκτήσει το χαρακτηριστικό χρώμα της ποικιλίας και είναι μέτρια συνεκτικά. Η έκκριση γάλακτος από τον ποδίσκο του καρπού όταν ο καρπός είναι ώριμος δεν υφίσταται. Στο στάδιο αυτό ωριμότητας συλλέγονται όταν πρόκειται για νωπή κατανάλωση. Τα σύκα τα οποία προορίζονται για ξήρανση πρέπει να συλλέγονται στο στάδιο πλήρους ωριμότητας κατά το οποίο ο φλοιός συρρικνώνεται και η περιεκτικότητα σε σάκχαρα είναι η μέγιστη. Τα σύκα είναι πολύ φθαρτοί καρποί και διατηρούνται σε ψυκτικούς θαλάμους μόνο για μια εβδομάδα σε θερμοκρασία 0 °C και σχετική υγρασία 90%. (Ποντίκης, 1996; Crisosto and Kader, 2014)

Στην Ελλάδα τα σύκα τα οποία προορίζονται για ξήρανση αφού πρώτα ξηρανθούν μερικώς πάνω στο δένδρο, ολοκληρώνουν την ξήρανσή στον ήλιο, πάνω σε ξύλινους ταρσούς σε μονή στρώση και για λίγες μέρες μέχρι η υγρασία να μειωθεί στο 17-18%. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι καρποί καλύπτονται με πανί για να μην απορροφήσουν υγρασία και για να προστατευθούν από προσβολές εντόμων. Με το πέρας της ξήρανσης οι καρποί μεταφέρονται σε αποθήκη αφού προηγουμένως αποστειρωθούν (Ποντίκης, 1996).

Στις χώρες της Δ. Ευρώπης, ΗΠΑ και Β. Αφρικής του σταδίου της ξήρανσης προηγείται στάδιο προετοιμασίας για την απομάκρυνση ξένων υλών και για να σχιστεί ελαφρά ο φλοιός (Ποντίκης, 1996; Hii and Law, 2010). Πρέπει να τονιστεί ότι η θερμοκρασία ξήρανσης των σύκων δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 60-65 °C, γιατί τότε το προϊόν μπορεί να μαυρίσει και να αποκτήσει μυρωδιά καμμένου. Η ξήρανση και σε αυτή την περίπτωση ολοκληρώνεται όταν η υγρασία των καρπών μειωθεί στο 17-18% ΦΚ (Ποντίκης, 1996; Grabowski et al., 2003; Crisosto and Kader, 2014).

Τα αποξηραμένα σύκα έχει βρεθεί ότι έχουν αυξημένο πρόβλημα ανάπτυξης μυκοτοξινών (κυρίως αφλατοξινών). Οι αφλατοξίνες έχουν βρεθεί τόσο σε ολόκληρα

αποξηραμένα σύκα όσο και σε προϊόντα σύκου ενώ η ένταση και η έκταση της προσβολής εξαρτώνται από τη διαδικασία ξήρανσης και τους παράγοντες που την επηρεάζουν (Ratti and Mujumdar, 2005; Crisosto and Kader, 2014).

#### 1.5.4 Ποικιλίες - Θρεπτική αξία - Σύσταση σύκων

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 3, 4) παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες ποικιλίες σύκων, ελληνικές και ξένες, οι οποίες προορίζονται τόσο για νωπή κατανάλωση όσο και για ξήρανση.

**Πίνακας 3:** Ελληνικές ποικιλίες σύκων

Ονομασία ποικιλίας	Νωπή κατανάλωση	Ξήρανση
Βασιλική μαύρη	+	
Μαύρη Βοτανικού	+	
<b>Καλαμών</b>	+	+
<b>Κύμης</b>	+	+
Πρασινοσυκιά Λέσβου	+	
Λιβανό	+	
Πολίτικο	+	+
Φρακασάνα	+	
Βασιλική λευκή	+	
Αργαλαστής	+	

(Πηγή: Ποντίκης, 1996)

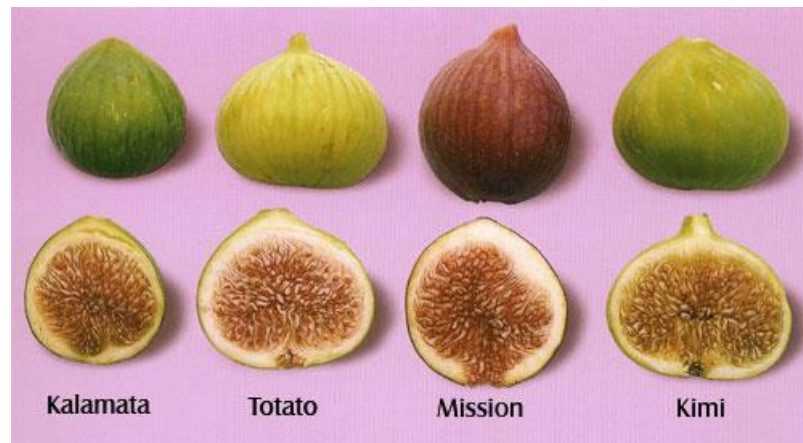
**Πίνακας 4:** Ξένες ποικιλίες σύκων

Ονομασία ποικιλίας	Νωπή κατανάλωση	Ξήρανση
Γιλδίτζ	+	
Verdone	+	+
Sari Lop	+	+
Mission	+	
San Piero	+	
Alifiore	+	
Dottato	+	+
Dauphine	+	
Braziliana	+	

(Πηγή: Ποντίκης, 1996)

Στην Ελλάδα από τις πιο διαδεδομένες είναι η ποικιλία Καλαμών (τσαπέλες). Ο καρπός της ποικιλίας αυτής έχει μέτριο μέγεθος και σχήμα σφαιρικό, ελαφρά πλακέ (Σχήμα 3β). Ο φλοιός είναι κιτρινοπράσινος, η σάρκα είναι κεχριμπαρένια και πάρα πολύ γλυκιά. Ωριμάζει κατά τον Αύγουστο με Σεπτέμβριο. Ως δένδρο είναι ζωνρό και

παραγωγικό και θεωρείται εκλεκτής ποιότητας και κατάλληλο τόσο για νωπή κατανάλωση όσο και για ξήρανση (Ποντίκης, 1996).



**Σχήμα 3β:** Ποικιλίες σύκων. (Πηγή: GreekCuisine.com, 2008)

Τα αποξηραμένα σύκα έχουν περιεκτικότητα σε νερό και υδατάνθρακες 23% και 69.1% αντίστοιχα, 1.3% λίπη και 4.3% πρωτεΐνες. Χημική σύσταση αποξηραμένων σύκων ανά 100 γραμμάρια είναι: 23% νερό, 69% υδατάνθρακες, 4.3% πρωτεΐνες, 1.3% λίπη, 274 kcal ενέργεια. Βιταμίνες: A 80 IU, B (νιασίνη) 0.7mg, B<sub>1</sub> (θειαμίνη) 0.1mg, B<sub>2</sub> (ριβοφλαβίνη) 0.1mg. Ανόργανα: Κάλιο 640mg, Ασβέστιο 126mg, Φώσφορος 77mg, Μαγνήσιο 40mg, Νάτριο 34mg, Σίδηρος 3mg (Συγκική, 2009; Βασιλακάκης, 2010)



## 2. ΘΕΩΡΙΑ

### 2.1 ANTIΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ (Inverse Problem)

Η μέτρηση ιδιοτήτων όπως είναι η θερμοκρασία και η πίεση αποτελούν μια τυπική διαδικασία. Για πολλά πειραματικά μεγέθη έχουν αναπτυχθεί τα αντίστοιχα όργανα μέτρησης όπως είναι το θερμόμετρο (θερμοκρασία), το μανόμετρο (πίεση), το ροόμετρο (ροή), οι ζυγοί (βάρος), κ.α. Ωστόσο υπάρχουν αρκετές ιδιότητες συνήθως σύνθετες οι οποίες δεν είναι άμεσα μετρήσιμες όπως π.χ οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών (π.χ. συντελεστής διάχυσης ή ειδική θερμοχωρητικότητα), η εκτίμηση των συνθηκών εισόδου και η ροή θερμότητας στο σύνορο (boundary heat flux) κατά τη βεβαιωμένη συναγωγή σε αγωγούς, κ.α (Özisik and Orlande, 2000). Οι ιδιότητες που δεν μπορούν να υπολογιστούν άμεσα, μέσω οργάνων μέτρησης, υπολογίζονται μέσω της επίλυσης ενός αντιστρόφου προβλήματος (inverse problem) εφαρμόζοντας τεχνικές μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Η εύρεση αυτών γίνεται με την χρήση δεδομένων τα οποία προέρχονται από πειραματικές μετρήσεις. Ο συντελεστής διάχυσης αποτελεί μία σημαντική ιδιότητα στην μεταφορά μάζας. Πέρα από το νόμο του Fick για τη διάχυση, συναντάται σε πολλές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη διάχυση νερού ή υδρατμού σε ένα πορώδες ή μη υγροσκοπικό μέσο. Η συγκεκριμένη ιδιότητα δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα μέσω κάποιου οργάνου μέτρησης και αυτό καθιστά τον προσδιορισμό της εξαιρετικά περίπλοκο.

Σε ένα ευθέως ορισμένο πρόβλημα (direct problem) διάχυσης εισάγουμε την τιμή του γνωστού συντελεστή διάχυσης στην εξίσωση που περιγράφει τη διάχυση στο υπολογιστικό μοντέλο, και το μοντέλο προβλέπει τη μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας. Ωστόσο, ο συντελεστής διάχυσης είναι γνωστό ότι είναι κυρίως θερμοκρασιακά εξαρτώμενος και δευτερευόντως εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία, που τον καθιστά μη γραμμικά μεταβαλλόμενο. Για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος διάχυσης και κατά συνέπεια του προσδιορισμού του συντελεστή διάχυσης απαιτείται η καταγραφή της μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας από πειραματικά δεδομένα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μαθηματικού μοντέλου για την επίλυση ενός ευθέως και ενός αντιστρόφου προβλήματος διάχυσης αποτελεί η μελέτη του Kowar (2013) ο οποίος προτείνει ότι για την αύξηση της ακρίβειας της λύσης του αντιστρόφου προβλήματος θα πρέπει το αντίστοιχο ευθέως ορισμένο πρόβλημα να είναι και αυτό ορθώς ορισμένο.

Τα αντίστροφα προβλήματα είναι από τη φύση τους μη καλώς ορισμένα (ill-posed) επειδή χαρακτηρίζονται όχι από μια μοναδική λύση αλλά από μια ομάδα πιθανών λύσεων. Η έννοια του ορθώς ορισμένου προβλήματος (well-posed) πρωτοαναφέρθηκε από τον Hadamard (1923) ορίζοντας ότι η λύση του θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω τρεις συνθήκες:

- η λύση πρέπει να υπάρχει,
- η λύση πρέπει να είναι μοναδική,

- η λύση θα πρέπει να είναι σταθερή κάτω από μικρές μεταβολές των πειραματικών δεδομένων (input data)

Βάσει των παραπάνω προτείνεται η προσέγγιση των αντιστρόφων προβλημάτων λόγω της πολυπλοκότητάς τους να γίνεται με καλή κατανόηση του φυσικού και μαθηματικού υπόβαθρου του προβλήματος.

Επειδή ο προσδιορισμός του πραγματικού συντελεστή διάχυσης του νερού σε αγροτικά προϊόντα (επεξεργασμένα και μη) είναι δύσκολος τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά και επειδή η ξήρανση ως διεργασία περιλαμβάνει διαφορετικούς μηχανισμούς εσωτερικής μεταφοράς μάζας όπως η υγρή διάχυση, η διάχυση ατμών καθώς και η τριχοειδής διάχυση (Heldman, 1997), οι εσωτερικοί μηχανισμοί μεταφοράς μάζας ενσωματώνονται σε ένα φαινόμενο συντελεστή διάχυσης (effective diffusion coefficient).

## **2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

Παρακάτω παρουσιάζονται μαθηματικά μοντέλα ξήρανσης και τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας που διέπουν τη διεργασία της ξήρανσης. Στη συνέχεια, εξετάζεται η συρρίκνωση ως αποτέλεσμα της μείωσης της υγρασίας λόγω ξήρανσης και τέλος παρατίθενται αναλυτικά οι υπολογιστικές και αριθμητικές μέθοδοι που υιοθετήθηκαν για την προτυποποίηση και αριθμητική επίλυση του φυσικού προβλήματος της διάχυσης.

Το μελετώμενο πρόβλημα αναφέρεται στην ξήρανση νωπών φρούτων σε διάφορες θερμοκρασίες ξήρανσης προκειμένου να εκτιμηθεί ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης ( $D_{eff}$ ) του νερού στο υπό ξήρανση προϊόν μέσα από μία διαδικασία βελτιστοποίησης (non linear optimization).

### **2.2.1 Ξήρανση**

Η χρήση μαθηματικών μοντέλων για τη προτυποποίηση της ξήρανσης εμφανίστηκε το 1920 από τον Lewis και ακολούθησαν οι μελέτες του Sherwood το 1929 (Hall, 1987). Για την προτυποποίηση της ξήρανσης νωπών οπωρολαχανικών έχουν προταθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα ανάλογα με τις συνθήκες ξήρανσης και το ίδιο το προϊόν. Σε αυτά τα μοντέλα εξετάζεται η μεταφορά του περιεχόμενου νερού, ενώ σε κάποια μελετάται και η ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας. Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα ξήρανσης είναι τα ημιεμπειρικά καθώς και το διφασικό μοντέλο μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

### 2.2.1.1 Ημιεμπειρικά μοντέλα

Τα ημιεμπειρικά μοντέλα στηρίζονται τόσο σε πειραματικά δεδομένα όσο και σε εξισώσεις πρόβλεψης συμπεριφοράς του υπό ξήρανση προϊόντος. Γενικότερα, η ανάπτυξη μοντέλων βασισμένων σε πειραματικά δεδομένα είναι μαθηματικά και υπολογιστικά απλούστερη σε σχέση με τα αμιγώς θεωρητικά μοντέλα. Ο απλουστευμένος σχεδιασμός της ξήρανσης, βασισμένος στην εμπειρική προτυποποίηση, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό σειράς ειδικών παραμέτρων ρύθμισης εισόδου, όπως η θερμοκρασία ξήρανσης, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης, και τη μέτρηση των μεγεθών εξόδου από ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων (Shahari, 2012).

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει μαθηματικά μοντέλα ξήρανσης μονής στρώσης για διάφορα αγροτικά προϊόντα όπως μήλα (Wang et al. 2006), ρύζι (Cihan et al. 2007), κόκκινη πιπεριά (Kaleemullah and Kailappan 2005), βερίκοκο (Togrul and Pehlivan, 2002 & 2003), δαμάσκηνο (Doymaz 2004), βιολογικά μήλα (Sacilik and Elicin 2005), μελιτζάνα (Ertekin and Yaldiz 2004), σταφύλι, πράσινη πιπεριά, κολοκύθι, πράσινο φασόλι και κρεμμύδι (Yaldiz and Ertekin, 2001).

Τα θεωρητικά μοντέλα ξήρανσης λαμβάνουν υπόψη μόνο την εσωτερική αντίσταση στη μεταφορά υγρασίας, ενώ τα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μόνο την εξωτερική. Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως (Πίνακας 5) στην περιγραφή της ξήρανσης σε μονή στρώση και μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με την προέλευση στις παρακάτω κατηγορίες:

A. Σε αυτά που προέρχονται από το Νόμο ψύξης του Νεύτωνα.

i) Μοντέλο Lewis

ii) Μοντέλο Page, με τις τροποποιημένες μορφές του

B. Σε αυτά που προέρχονται από το 2<sup>ο</sup> Νόμο του Fick.

i) Εκθετικό μοντέλο μονού όρου και οι τροποποιημένες μορφές του (Henderson and Pabis, Logarithmic)

ii) Εκθετικό μοντέλο δύο όρων και οι τροποποιημένες μορφές του (Two term, Exponential two term, Wang and Singh, Diffusion approach)

iii) Εκθετικό μοντέλο τριών όρων (Modified Henderson and Pabis)

**Πίνακας 5:** Ημι-εμπειρικά μοντέλα ξήρανσης σε μονή σειρά

	<b>Μοντέλο</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>
Lewis (Newton)	$MR = \exp(-kt)$	Pakowski and Mujumdar, 2006
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Diamante και Munro, 1993
Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$	Whith et al., 1978
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Zhang και Litchfield, 1991
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al., 1999
Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson, 1974
Exponential two term	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-akt)$	Sharaf-eldeen et al., 1980
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang και Singh, 1978
Diffusion approach Modified	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Yardiz & Ertekin, 2001
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos, 1999

Από τα προηγούμενα μοντέλα το καταλληλότερο για την περιγραφή της ξήρανσης έχει αποδειχτεί ότι είναι το λογαριθμικό μοντέλο (Togrul and Pehlivan, 2002 & 2003; Doymaz, 2007; Sujata and Das, 2007; Xanthopoulos et al., 2007a & b; Xanthopoulos et al., 2010; Xanthopoulos et al., 2012a)

### 2.2.1.2 Θεωρητικό μοντέλο μεταφορά θερμότητας και μάζας

Στα μοντέλα της κατηγορίας αυτής ως κινητήριος δύναμη θεωρείται η διαφορά θερμοκρασίας η οποία προκαλεί ροή θερμότητας ενώ αντίστοιχα η διαφορά συγκέντρωσης του μεταφερόμενου συστατικού (πχ. νερού) μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης, κατά την ξήρανση, προκαλεί ροή μάζας. (Fellows, 2000; Karel and Lund, 2003)

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας και μάζας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, θεωρώντας το προϊόν ως ένα ομογενές συνεχές μέσο. Το συγκεκριμένο μοντέλο διέπεται από τους βασικούς νόμους μεταφοράς θερμότητας και μάζας, δηλαδή από το Νόμο αγωγής θερμότητας του Fourier, εξ. (7), και από το Νόμο διάχυσης του Fick, εξ. (8).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (8)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα,  $T$  η θερμοκρασία,  $k$  η θερμική αγωγιμότητα,  $M$  η περιεχόμενη υγρασία και  $D$  ο συντελεστής διάχυσης στο προϊόν. Για την αποτύπωση τόσο της χωρικής (spatial) όσο και της χρονικής (temporal) μεταβολής το σύστημα αυτών των εξισώσεων θα πρέπει να συνοδεύεται από τον ορισμό των αρχικών συνθηκών και των αντίστοιχων συνοριακών τιμών στη διεπιφάνεια (σύνορο-boundary) του προϊόντος.

Το σύστημα των εξισώσεων αυτών χαρακτηρίζεται από ένα περιορισμένο αριθμό παραμέτρων ( $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$ ,  $D$ ) που απαιτείται η γνώση τους για την επίλυση του συστήματος. Ωστόσο, η απλουστευμένη μορφή του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας και μάζας δε μπορεί να λάβει υπόψη την εσωτερική δομή του προϊόντος η οποία επηρεάζει τα φαινόμενα αυτά (Shahari, 2012). Οι κυριότεροι μηχανισμοί μεταφοράς μάζας είναι η συναγωγή και η διάχυση.

### 2.2.1.3 Συναγωγή

Η μεταφορά μάζας με συναγωγή αναφέρεται στη μεταφορά κάποιου συστατικού λόγω μακροσκοπικής κίνησης ενός ρευστού. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας,  $N_A$ , μέσω συναγωγής είναι ανάλογος της κινητήριας δύναμης, δηλαδή της διαφοράς συγκέντρωσης, και δίνεται από την εξ. (9):

$$N_A = k_c (c_{As} - c_\infty) \quad (9)$$

όπου,  $c_{As}$ ,  $c_\infty$  οι συγκεντρώσεις στα όρια της επιφάνειας ανταλλαγής μάζας και  $k_c$  ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, ο οποίος εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του ρευστού (ιξώδες, πυκνότητα, συντελεστή διάχυσης), όσο και από τη γεωμετρία της επιφάνειας και την κίνηση του ρευστού (Λυγερού κ.α., 2005).

### 2.2.1.4 Διάχυση

Η διάχυση ακολουθεί το Ν. Fick, σε αντιστοιχία με το Ν. Newton για τη μεταφορά ορμής και το Ν. Fourier για τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Κατ' επέκταση συνδέει το ρυθμό της διάχυσης,  $J_A$ , με τη βαθμίδα συγκέντρωσης ως προς μία διεύθυνση  $z$ , εξ. (10):

$$J_{Az} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (10)$$

όπου  $D_{AB}$  ο συντελεστής διάχυσης του συστατικού  $A$  στο  $B$  και  $c_A$  η συγκέντρωση του διαχεόμενου συστατικού. Αν η διάχυση λαμβάνει χώρα σε περισσότερες της μιας διευθύνσεις (δισδιάστατη ή και τρισδιάστατη), ο παραπάνω νόμος εκφράζεται, εξ.(11), ως:

$$J_A = -cD_{AB} \nabla_{X_A} \quad (11)$$

όπου  $c$  η ολική συγκέντρωση και  $x_A$  το γραμμομοριακό κλάσμα του συστατικού A. (Saravacos and Maroulis, 2001; Λυγερού κ.α., 2005). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) παρουσιάζεται η τάξη μεγέθους του συντελεστή διάχυσης για διαφορετική φυσική κατάσταση:

**Πίνακας 6:** Τάξη μεγέθους συντελεστών διάχυσης ανάλογα με τη φυσική κατάσταση του διαχεόμενου συστατικού

Κατάσταση φάσης	Συντελεστής διάχυσης (m <sup>2</sup> /s)
Αέρια	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-5</sup>
Υγρά	10 <sup>-9</sup>
Στερεά	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-14</sup>

(Πηγή: Λυγερού κ.α., 2005).

Σε όλες τις διεργασίες μεταφοράς μάζας λαμβάνει χώρα διάχυση τουλάχιστον σε μία φάση. Παρά το γεγονός ότι η διάχυση οφείλεται κυρίως στη βαθμίδα της συγκέντρωσης, μπορεί να προκληθεί επίσης και από τη βαθμίδα της θερμοκρασίας, της πίεσης ή ακόμα και της ενεργότητας όπως στην αντίστροφη ώσμωση. Υπάρχουν αρκετές θεωρίες ερμηνείας της διάχυσης, όπως εκείνη του οριακού στρώματος, η θεωρία διείδυσης και η θεωρία των δύο υμενίων (McCabe et al., 2008).

Για τη διάχυση σε στερεά δεν υπάρχει κάποια ειδική σχέση που να προσεγγίζει επαρκώς όλα τα συστήματα. Αυτό οφείλεται στην ποικιλία των στερεών, στο μέγεθος του διαχεόμενου συστατικού αλλά και στη συρρίκνωση που συντελείται κατά την απομάκρυνση της υγρασίας η οποία στην πραγματικότητα ακολουθεί μια στοχαστική μεταβολή ειδικότερα σε προϊόντα με πολύπλοκη βιολογική δομή όπως είναι τα αγροτικά προϊόντα.

Η ξήρανση όπως προαναφέρθηκε περιλαμβάνει διαφορετικούς εσωτερικούς μηχανισμούς μεταφοράς μάζας όπως η διάχυση υγρού και υδρατμού καθώς και τριχοειδή φαινόμενα. Συνήθως οι μηχανισμοί αυτοί εναλλάσσονται ή και συνυπάρχουν γεγονός που καθιστά την φυσική και μαθηματική περιγραφή τους εξαιρετικά περίπλοκη. Για την αντιμετώπιση αυτής της πολυπολοκότητας, οι εσωτερικοί μηχανισμοί μεταφοράς μάζας ενσωματώνονται σε έναν φαινόμενο συντελεστή διάχυσης. Στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε πορώδη υδροσκοπικά υλικά (σε αυτά συγκαταλέγονται και τα αγροτικά προϊόντα) είναι απαραίτητο στην ανάλυση μεταφοράς μάζας να συνυπολογιστεί η εκτεταμένη συρρίκνωση που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης στα οπωρολαχανικά. Από μαθηματικής απόψεως η συρρίκνωση επηρεάζει σημαντικά την επίλυση του προβλήματος εφόσον συνοδεύεται και από σημαντική μεταβολή του υπολογιστικού χωρίου η οποία αγγίζει τα όρια της παραμόρφωσης αυτού (Xanthopoulos et al., 2014).

Η εξάρτηση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία περιγράφεται μέσω της εξίσωσης Arrhenius, εξ.(12) (Saravacos and Maroulis, 2001):

$$D_{\text{eff}} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

όπου  $E_a$  η ενέργεια ενεργοποίησης,  $R$  η παγκόσμια σταθερά αερίων και  $D_o$  η προεκθετική παράμετρος και  $T$  η θερμοκρασία. Για την ενσωμάτωση και της υγρασιακής εξάρτησης του συντελεστή διάχυσης έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές της εξίσωσης Arrhenius (εξ. (13,14)) όπως:

$$D_{\text{eff}} = D_o \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT} + aM_t\right) \quad (13)$$

$$D_{\text{eff}} = D_o \exp\left[\frac{-E_a}{RT} + \frac{a}{M_t} - \frac{b}{M_t^2}\right] \quad (14)$$

(Xanthopoulos et al. 2009; Xanthopoulos et al., 2012b; Xanthopoulos, et.al., 2014)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξ.(15) γιατί είχε τις λιγότερες παραμέτρους βελτιστοποίησης:

$$D_{\text{eff}}|_t = \exp\left(-\frac{E_a}{RT} + \frac{a}{MR_t}\right) \quad (15)$$

όπου  $MR$  είναι το αδιάστατο υγρασιακό πηλίκιο και  $a$  και  $n$  οι παράμετροι που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση.

Για την περίπτωση ξήρανσης αγροτικών προϊόντων έχει καταγραφεί ότι ο συντελεστής διάχυσης κυμαίνεται μεταξύ  $10^{-11}$ - $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (Sabarez, 2012). Τιμές του συντελεστή διάχυσης όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την ξήρανση διαφόρων αγροτικών προϊόντων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7) με τα αντίστοιχα εύρη θερμοκρασιών,

**Πίνακας 7:** Ενδεικτικές τιμές φαινομένου συντελεστή διάχυσης για αγροτικά προϊόντα σε διαφορετικές θερμοκρασίες ξήρανσης.

Προϊόν	$D_{\text{eff}}$ (m <sup>2</sup> /s)	Θερμοκρασία (°C)	Πηγή
Καφές	$5.98 \times 10^{-11}$	40	Correa et al., 2010
Ντομάτα	$4.76 \times 10^{-9}$	100-160	Celma et al., 2009
Σταφύλι	$0.5-1.0 \times 10^{-9}$	80	Caglar et al., 2009
Κρεμμύδι	$1.0 \times 10^{-8}$	30	Mota et al., 2010
Καρότο	$7.52 \times 10^{-10}$	40	Mulet, 1994
Μήλο	$8.12 \times 10^{-9}$	40	Zogzas et al., 1996

## 2.3 ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ

Η συρρίκνωση (shrinkage) είναι ένα φαινόμενο που συνοδεύει την ξήρανση των αγροτικών προϊόντων. Εξαιτίας της συρρίκνωσης μπορεί να προκληθούν σημαντικές δομικές μεταβολές στο αποξηραίνόμενο προϊόν και κατ' επέκταση στην τελική ποιότητα αυτού. Αν και σε γενικές γραμμές η συρρίκνωση αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα, πολλά προϊόντα, όπως οι σταφίδες, τα σύκα, τα δαμάσκηνα, κ.α, έχουν καθιερωθεί σήμερα περισσότερο ως αποξηραμένα παρά ως νωπά προϊόντα. (Mayor and Sereno, 2004) Κατά τη ξήρανση, ο όγκος του αποξηραίνόμενου προϊόντος μειώνεται εξαιτίας της απομάκρυνσης του περιεχόμενου νερού. Πολλές φορές, η συρρίκνωση οδηγεί σε μείωση του αρχικού όγκου του προϊόντος έως και 75% (Hansen, 1987).

Κατά την ξήρανση λαμβάνουν χώρα μεταβολές της κυτταρικής δομής στα τρόφιμα λόγω της μείωσης του περιεχόμενου νερού, ανακατανομή των περιεχόμενων διαλυτών στερεών και κατ' επέκταση συρρίκνωση σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό. Οι μεταβολές αυτές έχουν ως συνέπεια τη μεταβολή των ιδιοτήτων μεταφοράς μάζας. Πειράματα των Ruiz-Lopez και Garcia-Alvarado (2007); Hernandez et al. (2000); Simal et al. (1998); Kingsly et al.(2007) έδειξαν ότι η συρρίκνωση στα τρόφιμα είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας τους σε νερό.

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης η συρρίκνωση μπορεί να μεταβληθεί λόγω ανάπτυξης αντιστάσεων στη μεταφορά νερού από το εσωτερικό του προϊόντος. Σε χαμηλές ταχύτητες του αέρα, η επιφανειακή αντίσταση υπερισχύει, η υγρασία του δείγματος είναι ομοιόμορφη και οι εσωτερικές καταπονήσεις μικρές, για αυτό το λόγο τα τρόφιμα συρρικνώνονται σχετικώς ομοιόμορφα. Αντιθέτως σε υψηλές ταχύτητες αέρα, η εσωτερική αντίσταση ελέγχει την ταχύτητα μεταφοράς ιδιαίτερα σε χαμηλές περιεκτικότητες σε νερό (Crapiste et al., 1988). Στην περίπτωση που η επιφάνεια ξηραίνεται ταχύτερα από ότι το γεωμετρικό κέντρο τότε η συρρίκνωση τείνει να είναι ανισότροπη (Ratti, 1994). Όταν η συρρίκνωση είναι ανισότροπη, αναπτύσσονται επιφανειακές ρωγμές οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη ασύμμετρων τάσεων και κατά συνέπεια στην κατάρρευση του αποξηραίνόμενου δείγματος. Η συρρίκνωση είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερος ο όγκος του νερού που απομακρύνεται, και έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται μόνο από την περιεχόμενη υγρασία και όχι από τη θερμοκρασία. Η θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου της συρρίκνωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις καταπονήσεις και παραμορφώσεις του υλικού κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Στα τρόφιμα αυτό είναι δύσκολο και περίπλοκο λόγω της πολυφασικής και κυτταρικής φύσης τους. Για την προτυποποίηση της συρρίκνωσης είναι απαραίτητη η γνώση της δομής, των μηχανικών ιδιοτήτων κάθε φάσης τους, και της μεταβολής του περιεχόμενου νερού. (Bakker-Arkema et al., 1974). Η προτυποποίηση της συρρίκνωσης κατά τη διάρκεια της ξήρανσης γίνεται συνήθως μέσω εμπειρικών μοντέλων συσχέτισής της με την περιεκτικότητα σε νερό του υπό συρρίκνωση προϊόντος (Simal et al. 1998; Mayor and Sereno, 2004).

Για την προτυποποίηση της συρρίκνωσης στην ξήρανση έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη συνίσταται στην εμπειρική συσχέτιση των



πειραματικών δεδομένων με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και η δεύτερη, που είναι και πιο θεμελιώδης βασίζεται σε μια φυσική ερμηνεία του προϊόντος και προσπαθεί να προβλέψει τις γεωμετρικές αλλαγές βάσει των νόμων διατήρησης μάζας και όγκου. Η συρρίκνωση (S), εξ.(16), εκφράζεται μέσω της σχετικής μείωσης του όγκου ενός προϊόντος όπως αυτός εκφράζεται από τον λόγο του εκάστοτε όγκου (Maskan, 2001):

$$S = \frac{V_t}{V_o} \quad (16)$$

όπου  $V_t$  ο όγκος κάθε χρονική στιγμή  $t$ ;  $V_o$  ο αρχικός όγκος για  $t=0$ .

Οι Ruiz-Lopez et al., (2012) περιέγραψαν τη συρρίκνωση συναρτήσει της αδιάστατης περιεχόμενης υγρασίας με την εξ.(17):

$$\frac{V}{V_o} = \varphi + (1 - \varphi)MR^m \quad (17)$$

όπου,  $\varphi$  και  $m$  αδιάστατες παράμετροι του μοντέλου συρρίκνωσης. Η εξίσωση αυτή μπορεί να εκφράσει πιθανές αποκλίσεις από την ομοιόμορφη συρρίκνωση. Έτσι αν  $0 \leq m < 1$ , η μεταβολή της συρρίκνωσης με την αδιάστατη υγρασία παρουσιάζει κοίλη μορφή με τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ όταν  $m > 1$  η καμπύλη είναι κυρτή, κοίλα προς τα άνω. Στην περίπτωση που το  $m=0$  η συρρίκνωση του προϊόντος είναι αμελητέα ενώ όταν  $m=1$  η συρρίκνωση είναι ομοιόμορφη.

Εναλλακτικά, έχουν προταθεί και άλλες εξισώσεις προτυποποίησης της συρρίκνωσης όπως η εξ.(18) από τους Mayor και Sereno (2004):

$$\frac{V}{V_o} = \frac{1}{(1 - \varepsilon) \left[ 1 + \frac{\rho_o(M - M_o)}{\rho_w(1 + M_o)} + \varepsilon_o \right]} \quad (18)$$

όπου  $M_o$ ,  $M$  η αρχική περιεχόμενη υγρασία και η αντίστοιχη κάθε χρονική στιγμή,  $\varepsilon_o$  και  $\varepsilon$  το αρχικό πορώδες και το πορώδες κάθε χρονική στιγμή,  $\rho_o$  η αρχική πυκνότητα του τροφίμου, και  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού.

## 2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS

Για τη προτυποποίηση του υπολογιστικού προβλήματος προσδιορισμού του συντελεστή διάχυσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics 4.3b (Comsol, Inc., Burlington, Massachusetts, USA), το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM) για την επίλυση του συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equations – PDEs) με τις αντίστοιχες αρχικές και συνοριακές συνθήκες σε προβλήματα

ρευστομηχανικής, μεταφοράς θερμότητας, χημικής μηχανικής, ηλεκτρομαγνητισμού, μαγνητικών πεδίων, δομικής μηχανικής και άλλων προβλημάτων.

#### 2.4.1 Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις (Partial Differential Equations – PDE)

Τα προβλήματα των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων προκύπτουν συχνά σε προβλήματα προσομοίωσης και προτυποποίησης στη ρευστομηχανική με τις πρώτες να επιλύονται με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Οι πιο κλασικές Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις που απαντώνται στα προβλήματα ρευστομηχανικής είναι οι γραμμικές εξισώσεις δευτέρας τάξεως με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές της μορφής (εξ. (19)):

$$L[u] = Au_{xx} + 2Bu_{xy} + Cu_{yy} + Du_x + Eu_y + Fu - G \quad (19)$$

όπου A, B, C, D, E, F, G είναι συναρτήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών x, y. Οι Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις χρησιμοποιούνται κυρίως για την επίλυση δύο ειδών προβλημάτων, αυτών των συνοριακών τιμών και αυτών των αρχικών τιμών. Ένα Πρόβλημα Συνοριακών Τιμών περιγράφεται είτε από τους αγνώστους u,  $\partial u / \partial n$  σε ένα ορισμένο χωρίο D, είτε από το γραμμικό συνδυασμό τους στο όριο του χωρίου  $\partial D$ . Επίσης, για την επίλυση ενός Προβλήματος Αρχικών Τιμών πρέπει η συνάρτηση  $u(x, y, t)$  να ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση στο χωρίο D τη χρονική στιγμή  $t=0$ , αλλά και τις συνοριακές αρχικές συνθήκες (Young, 2003). Τέλος για να επιλυθεί ένα πρόβλημα Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων θα πρέπει να είναι ορθώς ορισμένο (well posed), δηλαδή να υπάρχει μία μοναδική λύση εξαρτώμενη από τις Συνοριακές Συνθήκες που συνοδεύουν το πρόβλημα. Ως εναλλακτική μέθοδος επίλυσης των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων είναι η Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών, όπου οι μερικές παράγωγοι πρώτης και δεύτερης τάξης ορίζονται ως πολυώνυμα μικρότερης τάξης συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς κόμβους ενός πλέγματος διακριτοποιημένου υπολογιστικού χωρίου (domain).

Στην περίπτωση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων η διακριτοποίηση των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων στους κόμβους του πλέγματος παράγει σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται στους κόμβους του πλέγματος. Άλλες μέθοδοι επίλυσης Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων είναι τα πολυπλέγματα, η μέθοδος των χαρακτηριστικών και η μέθοδος των γραμμών. Στα πολυπλέγματα, πέρα από το βασικό πλέγμα, δημιουργείται ένα αραιό πλέγμα προκειμένου να βρεθούν νέες προσεγγιστικές λύσεις από μία διαδικασία εξομάλυνσης. Η μέθοδος των χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται για την επίλυση υπερβολικών εξισώσεων ή συστημάτων εξισώσεων. Τέλος, η μέθοδος των γραμμών χρησιμοποιεί συνήθεις διαφορικές εξισώσεις για την προσέγγιση της λύσης των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων.

#### 2.4.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογιστικά προβλήματα μηχανικής, ρευστομηχανικής, ροής θερμότητας και ηλεκτρομαγνητισμού. Είναι μια αριθμητική μέθοδος υπολογισμού προσεγγιστικών λύσεων διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το υπό μελέτη υπολογιστικό χωρίο διακριτοποιείται σε υποχωρία με ένα πλέγμα. Οι τομές των γραμμών του πλέγματος ονομάζονται κόμβοι και είναι τα σημεία στα οποία υπολογίζονται οι προσεγγιστικές λύσεις. Λόγω της διακριτότητας του πεπερασμένου πλήθους των σημείων, η προσεγγιστική επίλυση ονομάζεται και διακριτοποίηση.

Αν και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αποτελεί μια προσεγγιστική μέθοδος επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων, μπορεί να δώσει λύσεις υψηλής ακρίβειας δεδομένης της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Προκειμένου να εφαρμοστεί η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων πρέπει αρχικά να εισαχθεί η γεωμετρία του υπολογιστικού χωρίου (domain) στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics και στη συνέχεια να λάβει χώρα η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου δηλαδή η ανάπτυξη του πλέγματος των κόμβων (Mesh – Refined mesh) δεδομένου ότι έχουν εισαχθεί οι κατάλληλες συνοριακές και αρχικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιεί μια προσέγγιση της άγνωστης λύσης μέσω γνωστών συναρτήσεων βάσης (basis functions) για να μετατρέψει τις διαφορικές εξισώσεις μερικών παραγώγων σε αντίστοιχες γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις (Μπουντουβής, 1992).

Στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, το υπό μελέτη χωρίο  $D$ , καθώς και το όριο του ( $\partial D$ ) υποδιαιρούνται σε υποχωρία (subdomains) μέσω ενός πλέγματος (mesh) όπου κάθε υποχωρία καλείται στοιχείο (element). Για κάθε κόμβο  $j$ , του πλέγματος ορίζεται και η αντίστοιχη συνάρτηση βάσης  $\varphi^j$ , η οποία είναι συνήθως ένα πολυώνυμο πρώτου ή δευτέρου βαθμού, των συντεταγμένων του διανύσματος θέσης. Η συνάρτηση βάσης  $\varphi^j$  είναι μη μηδενική μόνο στην περιοχή του χωρίου το οποίο αποτελείται από τα στοιχεία τα οποία μοιράζονται τον κόμβο  $j$ , δηλαδή η συνάρτηση βάσης  $\varphi^j$  είναι ίση με τη μονάδα στον κόμβο  $j$  ( $\varphi^j=1$ ) και μηδενική ( $\varphi^j=0$ ) σε όλους τους άλλους κόμβους. Η άγνωστη λύση  $u$  προσεγγίζεται από τις γνωστές συναρτήσεις βάσης  $\varphi^j$  σύμφωνα με την εξίσωση εξ.(20):

$$u(x) = \sum_{j=1}^N u_j \varphi^j(x) \quad (20)$$

όπου  $N$  το πλήθος των κόμβων και  $u_j$  οι άγνωστοι συντελεστές που είναι οι τιμές της λύσης στους κόμβους.

### 2.4.3 Σταθμισμένα Υπόλοιπα Galerkin (Galerkin Weighted Residuals)

Η μέθοδος των Σταθμισμένων Υπολοίπων Galerkin χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων συνοριακών τιμών. Θεωρώντας μία διαφορική εξίσωση (εξ. (21-22)) της μορφής:

$$Lu = f \text{ στο } D \text{ (χωρίο)} \quad (21)$$

$$Bu = g \text{ στο } \partial D \text{ (σύνορο χωρίου)} \quad (22)$$

το σταθμισμένο υπόλοιπο σε κάποιο κόμβο  $j$  του διακριτοποιημένου χωρίου δίνεται από την εξ. (23):

$$R_j = \int_D D[(Lu - f)]\phi^j dS, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (23)$$

Το πλήθος των υπολοίπων είναι ίσο με το πλήθος των συναρτήσεων βάσης και κατ' επέκταση ίσο με το πλήθος των κόμβων του πλέγματος. Η μέθοδος Galerkin αναζητεί τη λύση που μηδενίζει κάθε σταθμισμένο υπόλοιπο. Στη συνέχεια, εισάγονται στα υπόλοιπα οι συνοριακές συνθήκες οι οποίες ορίζουν τη λύση  $u$  στο σύνορο  $\partial D$ . Δηλαδή στο σημείο  $k$  (κόμβος), όπου ορίζεται η τιμή της λύσης ίση με  $t_k$ , το υπόλοιπο Galerkin αντικαθιστάται από την εξ. (24):

$$R_k = u_k - F(t_k) = 0 \quad (24)$$

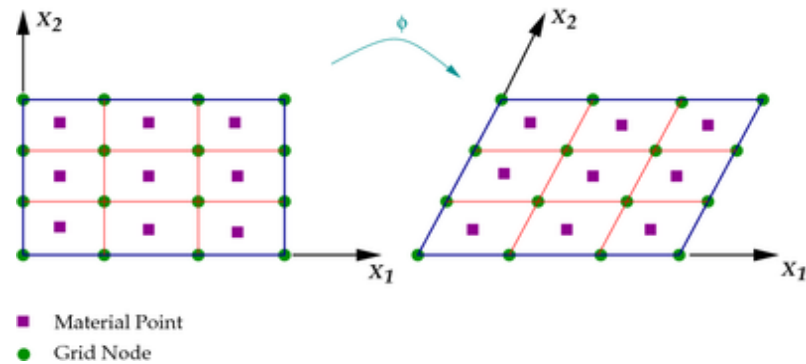
Με παραγοντική ολοκλήρωση στα υπόλοιπα μπορούν να ληφθούν υπόψη οι Συνοριακές Συνθήκες για τις τιμές των παραγώγων της λύσης στο όριο του χωρίου  $D$ . Με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων καταλήγουμε στην επίλυση ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων, εφόσον οι αρχικές διαφορικές εξισώσεις είναι γραμμικές, με αγνώστους τους συντελεστές  $u_j$  της εξ. (20). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων η οποία ανήκει στις ολοκληρωτικές μεθόδους αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων μερικών παραγώγων. Στις ολοκληρωτικές μεθόδους η διακριτοποιημένη εξίσωση, που χρησιμοποιείται για την εύρεση της αριθμητικής λύσης, προκύπτει από την ολοκλήρωση στον πεπερασμένο όγκο ελέγχου των εξισώσεων μεταφοράς (Μαρκάτος κ.α., 1995).

### 2.4.4 Αυθαίρετη μέθοδος Lagrange-Euler (Arbitrary Lagrangian-Eulerian-ALE)

Για την μαθηματική περιγραφή της συρρίκνωσης των καρπών λόγω της απομάκρυνσης της περιεχόμενης υγρασίας από το προϊόν κατά την ξήρανσή τους, η οποία οδηγεί σε ένα χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενο υπολογιστικό χωρίο είναι απαραίτητη η εφαρμογή της μεθόδου Lagrange-Euler. Η μέθοδος Lagrange-Euler είναι μια διαμόρφωση (formulation) πεπερασμένων στοιχείων στην οποία το υπολογιστικό χωρίο δεν είναι εκ των προτέρων σταθερό στο χώρο ή συνδεδεμένο με κάποιο υλικό.

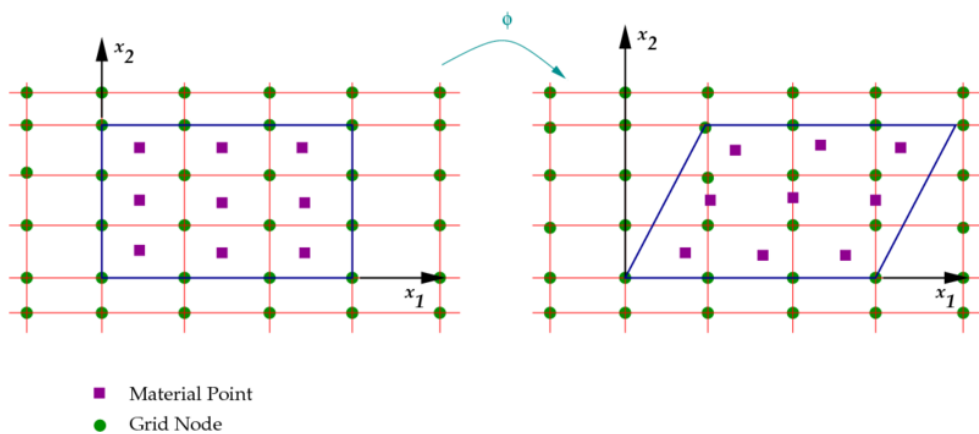
Χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση σε πολυδιάστατα προβλήματα στη ρευστομηχανική και σε μη γραμμικά συστήματα μηχανικής στερεών. Κυριότερη εφαρμογή βρίσκει σε προβλήματα κινούμενων συνοριακών συνθηκών (moving boundaries). Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος Lagrange- Euler, το πλέγμα του χωρίου μπορεί να κινηθεί αυθαίρετα για τη βελτιστοποίηση του σχήματος των στοιχείων του (Wang et al., 1997).

Στον αλγόριθμο κατά Lagrange κάθε κόμβος του πλέγματος (κυκλικά σημεία στο Σχήμα 4) ακολουθεί το αντίστοιχο υλικό σημείο (τετράγωνα σημεία στο Σχήμα 4) κατά την κίνηση του πλέγματος. Το πλέγμα, σε αυτή την περίπτωση ακολουθεί το συνεχές μέσο στην κίνηση του και οι κόμβοι του πλέγματος παραμένουν συνεχώς συνδεδεμένοι με το υλικό. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό πλεονέκτημα για τους υπολογισμούς, εκτός αν το υπολογιστικό χωρίο υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις (Donea et al., 2004).



**Σχήμα 4:** Απεικόνιση πλέγματος Lagrange (Πηγή: Wikiversity, 2010)

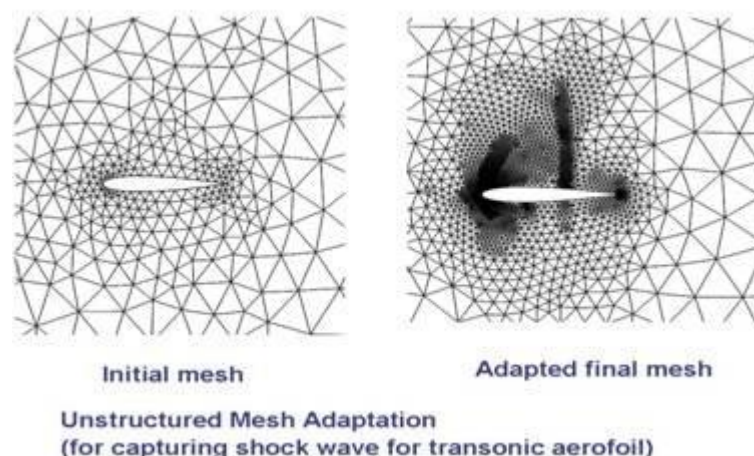
Αντίστοιχα, από τον Euler προτάθηκε ένας διαφορετικός αλγόριθμος, ο οποίος εφαρμόζεται κυρίως σε προβλήματα μηχανικής ρευστών. Σε αυτόν τον αλγόριθμο το πλέγμα είναι σταθερό (κυκλικά σημεία στο Σχήμα 5) και το συνεχές μέσο κινείται σύμφωνα με το πλέγμα (τετράγωνα σημεία στο Σχήμα 5). Οι μεγάλες παραμορφώσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με αρκετή ευκολία σε αυτό το μοντέλο.



**Σχήμα 5:** Απεικόνιση του πλέγματος Euler (Πηγή: Wikiversity, 2010)

Οι αλγόριθμοι οι οποίοι προαναφέρθηκαν περιορίζουν τους κόμβους του πλέγματος και έτσι αναπτύχθηκε μια συνδυαστική μέθοδος ‘ή αυθαίρετη μέθοδος Lagrange-Euler’, κατά την οποία οι κόμβοι μπορούν είτε να κινούνται μαζί με το συνεχές μέσο, όπως στη μέθοδο Lagrange, είτε να παραμένουν σταθεροί όπως στη μέθοδο Euler, είτε κάποιιοι να παραμένουν σταθεροί και κάποιιοι να κινούνται. Η ελευθερία κινήσεων η οποία προσφέρεται από την ‘αυθαίρετη μέθοδο Lagrange- Euler’ επιτρέπει την προσομοίωση μεγαλύτερων παραμορφώσεων από εκείνων που επιτρέπει η μέθοδος Lagrange και με μεγαλύτερη ακρίβεια λύσης από εκείνη που προσφέρει η μέθοδος Euler (Wang et al., 1997).

Κατά την εκτέλεση της μεθόδου Lagrange-Euler, δημιουργείται ένα πλέγμα το οποίο επανασχεδιάζεται στο τέλος κάθε χρονικού βήματος μέσα από μια διαδικασία που απαιτεί ως δεδομένο εισόδου την ταχύτητα μετατόπισης των κόμβων του πλέγματος ή τη χωρική μετατόπισή τους. Οι τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον επανασχεδιασμό του πλέγματος είναι δυο. Η *πύκνωση* του πλέγματος (mesh refinement) και η *προσαρμογή* του πλέγματος (mesh adaptation) (Σχήμα 6). Η πρώτη αποτελεί τεχνική γεωμετρικής φύσης η οποία μέσω της πύκνωσης του πλέγματος αποτρέπει τις παραμορφώσεις του πλέγματος. Στην πύκνωση του πλέγματος απαιτείται ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των κόμβων σε κάθε υπολογιστικό βήμα. Σε προβλήματα αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε ρευστό και στερεό, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται στους στερεούς κόμβους με αλγόριθμους Lagrange ενώ οι κόμβοι ρευστού θεωρούνται σταθεροί ή ανανεώνονται βάσει κάποιας διαδικασίας παρεμβολής. Η προσαρμογή του πλέγματος έχει ως στόχο τον προσδιορισμό του βέλτιστου υπολογιστικού πλέγματος προκειμένου να επιτευχθεί δεδομένη ακρίβεια λύσης. Στη διαδικασία αυτή, ο αριθμός των κόμβων καθώς και η συνδεσιμότητα των στοιχείων παραμένουν σταθερά. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή στη ρευστομηχανική καθώς λαμβάνει υπόψη την κατεύθυνση κίνησης ενός ρευστού.



**Σχήμα 6:** Προσαρμογή του υπολογιστικού πλέγματος (Πηγή: University of Oxford, 2015)

### 2.4.5 Μέθοδος βελτιστοποίησης Levenberg–Marquardt

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης μελετήθηκε υπολογιστικά συγκρίνοντας τις προβλεπόμενες θεωρητικές τιμές της μέσης περιεχόμενης υγρασίας από τις αντίστοιχες πειραματικές. Η μέθοδος *Levenberg-Marquardt* είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στη μελετώμενη περίπτωση, υπολογίζονται η τιμή μίας συνάρτησης, η απόκλιση αυτής της τιμής από την αντίστοιχη πειραματική και τελικά το άθροισμα των τετραγώνων όλων των αποκλίσεων, το οποίο χρησιμοποιείται και ως *αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης* (objective function, εξ. (25)).

$$OF(D) = \int \left[ \bar{C}_{\text{exp}}(t) - \bar{C}_{\text{num}}(t, D) \right]^2 dt \approx \sum_i \left[ \bar{C}_{\text{exp}}(t_i) - \bar{C}_{\text{num}}(t, D) \right]^2 \quad (25)$$

Η μέθοδος *Levenberg-Marquardt* αποτελεί συνδυασμό δύο μεθόδων ελαχιστοποίησης, της βαθμιδωτής καθοδικής μεθόδου (*Gradient Descent*) και της μεθόδου *Gauss-Newton*. Η πρώτη μειώνει το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης μείωσης της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η δεύτερη θεωρεί τη συνάρτηση ελαχίστων τετραγώνων τοπικά τετραγωνική και βρίσκει το ελάχιστο της τετραγωνικής συνάρτησης (Gavin, 2013). Συγκεκριμένα, η μέθοδος της βαθμιδωτής καθόδου ανανεώνει τις τιμές των παραμέτρων σε κατεύθυνση αντίθετη εκείνης της βαθμίδας της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για προβλήματα μεγάλου πλήθους παραμέτρων βελτιστοποίησης. Αντίθετα, η μέθοδος *Gauss-Newton* είναι πιο εύχρηστη σε προβλήματα «μεσαίου μεγέθους» και χαρακτηρίζεται από ταχεία σύγκλιση. Η μετάβαση από τη μια στην άλλη μέθοδο (*Gradient Descent* και *Gauss-Newton*) ελέγχεται από ένα συντελεστή απόσβεσης (damping factor) ο οποίος για μικρές τιμές, κοντά στο μηδέν, οδηγεί τον επιλυτή βελτιστοποίησης στην ανανέωση της λύσης μέσω της μεθόδου *Gauss-Newton* ενώ για μεγάλες τιμές του συντελεστή οδηγεί τον επιλυτή βελτιστοποίησης στην ανανέωση της λύσης μέσω της μεθόδου *Gradient Descent* ή *Steepest Descent*.

### 2.4.6 Sparse Nonlinear Optimizer (SNOPT)

Μια εναλλακτική μέθοδος βελτιστοποίησης που διαθέτει το Comsol Multiphysics 4.3 είναι η μέθοδος SNOPT η οποία συνοψίζεται σε έναν αλγόριθμο Διαδοχικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού για βελτιστοποίηση υψηλής κλίμακας περιορισμών. Οι αλγόριθμοι Διαδοχικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming (SQP)) είναι αρκετά αποτελεσματικοί στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Γενικώς έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχή ως ο NPSOL (Nonlinear Programming Systems Optimization Laboratory), ο οποίος έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης με 2000 περιορισμούς και 1000 ανεξάρτητες μεταβλητές. Ωστόσο η ανάγκη για επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων

οδηγεί στη συνεχή βελτίωση των αλγορίθμων Διαδοχικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Gill et al., 2005). Ο αλγόριθμος SNOPT βασίζεται στην ελαχιστοποίηση κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης σύμφωνα με  $\text{minimize OF(D)}, x \in R$ , όπου  $OF(D)$ , μια γραμμική ή μη αντικειμενική συνάρτηση, και στην ικανοποίηση περιορισμών ανώτατου και κατώτατου ορίου,  $\ell \leq \begin{pmatrix} x \\ g(x) \\ Ax \end{pmatrix} \leq h$ , όπου  $\ell$  το κατώτατο επιτρεπτό όριο,  $h$  το ανώτατο επιτρεπτό όριο,  $g(x)$  το διάνυσμα περιορισμών και  $A$  πίνακας.

Ο στόχος του Διαδοχικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού είναι να επιλύσει ένα πρόβλημα με μη γραμμικούς περιορισμούς λύνοντας μια σειρά υπο-προβλημάτων τετραγωνικού προγραμματισμού. Ουσιαστικά, οι λύσεις κάθε υπο-προβλήματος αποτελούν γραμμικοποιήσεις της λύσης του αρχικού προβλήματος και η αντικειμενική συνάρτηση ενός υπο-προβλήματος είναι μία τετραγωνική προσέγγιση της συνάρτησης Lagrange. Πιο συγκεκριμένα, κάθε υπο-πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού ελαχιστοποιεί ένα τετραγωνικό μοντέλο μιας συγκεκριμένης συνάρτησης Lagrange, το οποίο υπόκειται σε γραμμικοποιημένους περιορισμούς. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σύγκλιση της μεθόδου μειώνεται κάποια συνάρτηση αξίας σε κάθε επανάληψη. Ο Διαδοχικός Τετραγωνικός Προγραμματισμός περιλαμβάνει επαναλήψεις υψίστης και ήσσονος σημασίας. Οι επαναλήψεις υψίστης σημασίας χρησιμοποιούνται στον Διαδοχικό Τετραγωνικό Προγραμματισμό για να παραχθεί μια σειρά αποτελεσμάτων σημείων  $(x_k, y_k)$  τα οποία συγκλίνουν στην τελική λύση  $(x_1, y_1)$ . Αφού προσδιοριστεί το σημείο  $(x_k, y_k)$ , οι επαναλήψεις ήσσονος σημασίας εφαρμόζονται σε κάποιο υποπρόβλημα, προκειμένου να βρεθεί η κατεύθυνση προς την οποία βρίσκεται το επόμενο σημείο  $(x_{k+1}, y_{k+1})$ . Η επίλυση με Τετραγωνικό Προγραμματισμό σε ένα υποπρόβλημα αποτελεί από μόνη της μια επαναληπτική διαδικασία. Η μέθοδος SNOPT είναι ουσιαστικά ένας αλγόριθμος Διαδοχικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού ο οποίος εκμεταλλεύεται την Ιακωβιανή ορίζουσα και διατηρεί μία προσέγγιση λύσης για μικρό χρονικό διάστημα.



### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αποξηραμένα φρούτα αποτελούν εκλεκτό έδεσμα λόγω της θρεπτικής τους αξίας αλλά και της μακράς διάρκειας ζωής (Barta, 2006). Στη σημερινή αγορά τροφίμων τα αποξηραμένα τρόφιμα παίζουν σημαντικό ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα. (Grabowski et al., 2003). Για τον λόγο αυτό οι ιδιότητές τους και ο τρόπος που αυτές επηρεάζονται από τις συνθήκες ξήρανσης αλλά και από διάφορους προ-χειρισμούς έχουν αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών (Babalís and Belessiotis, 2004; Doymaz, 2007; Sabarez, 2012; Xanthopoulos, 2012a & b) εκ των οποίων οι περισσότερες αφορούσαν τη διάχυση νερού-υδρατμών σε διάφορα οπωρολαχανικά, όπως μάνγκο (Corzo et al., 2008), μπανάνα (Mauro et al., 1995; Rastogi et al., 1997), ροδάκινο (Askar et al., 1996), ανανάς (Berinstain et al., 1990), μήλο (Hawkes et al., 1978; Quintero-Ramos et al., 1993), καρότο (Qi et al., 1998) πατάτα (Lazarides et al., 1997) και ντομάτα (Xanthopoulos et al., 2012a & b). Παρόλα αυτά όμως η αντίσταση του φλοιού στην διάχυση κατά την ξήρανση δεν έχει μελετηθεί, σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, ενώ αντίθετα έχει μελετηθεί σε ψυχοσυντηρούμενα προϊόντα.

Η μελέτη της αντίστασης του φλοιού σύμφωνα με τους Pham et al., 2009 θεωρείται σημαντική καθώς αποτελεί το κυριότερο εμπόδιο στην ανταλλαγή αερίων.

Σε μελέτες που έχουν γίνει η αντίσταση του φλοιού έχει μελετηθεί για την διάχυση αιθανίου (Pham et al., 2009) και νέου (Schotsmans et al., 2002; Pham et al., 2009). Στις μελέτες αυτές η αντίσταση του φλοιού μελετήθηκε ως προσομοίωση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος αντιστάσεων σε σειρά (Van der sman, 2003) θεωρώντας την αντίσταση του φλοιού ίση με το αντίστροφο του συντελεστή μεταφοράς μάζας (Pham et al., 2009).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της αντίστασης του φλοιού κατά την ξήρανση σε διαφορετικές θερμοκρασίες και ταχύτητες ρεύματος αέρα σύμφωνα με την θεώρηση των παραπάνω μελετών.

#### 3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν ολόκληροι αποξηραίνόμενοι καρποί σύκου (Καλαμάτας, τύπου τσαπέλα) αποφλοιωμένοι και μη. Η πρώτη ύλη προμηθεύτηκε από τοπικό παραγωγό της Καλαμάτας. Στη συνέχεια, έγινε διαλογή της πρώτης ύλης και οι καρποί ταξινομήθηκαν ώστε κάθε πειραματική ομάδα να έχει παρόμοιο μέγεθος και βάρος μεταξύ των δειγμάτων. Η μέση αρχική περιεχόμενη υγρασία των καρπών κυμάνθηκε από 2.51 έως 3.13  $\text{kg}_w/\text{kg}_{dm}$  για τους μη αποφλοιωμένους καρπούς και από 2.07 έως 3.37  $\text{kg}_w/\text{kg}_{dm}$  για τους αποφλοιωμένους ενώ η μέση διάμετρος κυμαινόταν από 37.1 έως 40.3 mm και από 37.0 έως 40.5 mm για τους μη αποφλοιωμένους και αποφλοιωμένους αντίστοιχα. Οι καρποί αποξηράθηκαν σε τρεις θερμοκρασίες (45, 55 και 65 °C) και τρεις ταχύτητες αέρα (1.0, 3.0 και 5.0 m/s). Οι συνδυασμοί θερμοκρασίας ταχύτητας αέρα καθώς και ο χρόνος διάρκειας για τελικό αδιάστατο

υγρασιακό πηλίκο ( $MR=M_t/M_o$ ) κάθε πειραματικής περίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Μετά τη διαλογή τα δείγματα αποθηκεύτηκαν στο ψυγείο στους 0 °C μέχρι να χρησιμοποιηθούν.

**Πίνακας 8:** Συνθήκες και ο αντίστοιχος χρόνος ξήρανσης,  $MR \geq 0.2$ .

Θερμοκρασία (°C)	ΜΕ ΦΛΟΙΟ		ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ	
	Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος Ξήρανσης (h)	Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος Ξήρανσης (h)
45	1	-	1	-
	3	35	3	27
	5	31	5	22
55	1	27	1	22
	3	26	3	15
	5	20	5	14
65	1	15	1	14
	3	14	3	15
	5	12	5	11

Η προετοιμασία κάθε πειραματικής σειράς περιελάμβανε τη ζύγιση, την μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των καρπών, ώστε το δείγμα να είναι όσο πιο ομοιόμορφο γίνεται, και τέλος την αποφλοιώση των καρπών που προορίζονταν για ξήρανση χωρίς τον φλοιό. Η αποφλοιώση των καρπών γινόταν με το χέρι με προσοχή ώστε να μην απομακρύνονται μαζί με το φλοιό κομμάτια από την σάρκα του καρπού. Στη συνέχεια οι καρποί ζυγίζονταν και τοποθετούνταν στα κελιά του ξηραντηρίου, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Σε κάθε πειραματική σειρά χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα αποφλοιωμένα και τέσσερα μη αποφλοιωμένα δείγματα. Οι ζυγίσεις ήταν ωριαίες μέχρι τη μέση περίπου της ξήρανσης και δίωρες από εκεί και μέχρι το πέρας της ξήρανσης η οποία σηματοδοτούνταν από τη μη μεταβολή του βάρους των αποξηραίνόμενων δειγμάτων. Αντίθετα, η μέτρηση των διαστάσεων λάμβανε χώρα κάθε 4 ώρες. Ο προσδιορισμός της ξηράς ουσίας λάμβανε χώρα σύμφωνα με το πειραματικό πρωτόκολλο AOAC (1997).

### 3.2.1 Πειραματικός εξοπλισμός

Η ξήρανση των δειγμάτων διεξήχθη σε δύο πειραματικά ξηραντήρια τα οποία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο "Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας" του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί ώστε να εξασφαλίζεται ο έλεγχος και η συνεχής καταγραφή των συνθηκών ξήρανσης όπως η ταχύτητα και η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης ενώ η κίνηση του αέρα εντός αυτών γίνεται από μονοφασικούς φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, και η θέρμανση του αέρα από σύστημα ηλεκτρικών αντιστάσεων των 8.7 kW και 12 kW αντίστοιχα. Η μέτρηση και καταγραφή των συνθηκών ξήρανσης γίνεται από θερμοϋγρασιακούς αισθητήρες

συνδεδεμένους σε ένα κεντρικό σταθμό ο οποίος επικοινωνεί μέσω ειδικού λογισμικού με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος των ξηραντηρίων μπορούν να βρεθούν από τους Xanthopoulos et al., 2007a. Οι ζυγίσσεις πραγματοποιούνταν σε ηλεκτρονικό ζυγό KERN (PCB-440, Japan) με ακρίβεια  $\pm 0.01$  g. Ο έλεγχος της ταχύτητας του ρεύματος αέρα γινόταν με ανεμόμετρο θερμαινόμενου νήματος CLIMATHERM, με ακρίβεια  $\pm 0.044$  m/s και διακριτικής ικανότητας 0.1 m/s. Η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα ξήρανσης καταγράφονταν με θερμοϋγρασιακούς αισθητήρες Hobo 8H (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA) οι οποίοι συνδέονταν σε σταθμό αποθήκευσης δεδομένων Hobo Micro station (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA). Οι αισθητήρες είχαν διακριτική ικανότητα 0.4 °C και 0.5% και, ακρίβεια  $\pm 0.7$ ,  $\pm 3\%$  αντίστοιχα στη μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Η στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έγινε με το στατιστικό πρόγραμμα Statgraphics Centurion XVI (Statpoint Technologies, USA) σε επίπεδο σημαντικότητας  $P \leq 0.05$ . Τέλος, η μέθοδος της μη-γραμμικής βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης καθώς και του συντελεστή μεταφοράς μάζας έγιναν μέσω της προσομοίωσης της ισοθερμοκρασιακής ξήρανσης με το πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3.

### 3.2.2 Μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας

Η περιεχόμενη υγρασία ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{dm}$ ) υπολογίστηκε επί ξηράς ουσίας  $MC = (m_t - m_{dm}) / m_{dm}$ , όπου  $m_t$  η μάζα του αποξηραίνόμενου καρπού (g) και  $m_{dm}$  η μάζα της ξηράς ουσίας (g). Ως περιεχόμενη υγρασία ελήφθη ο μέσος όρος των τεσσάρων δειγμάτων ανά περίπτωση ξήρανσης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε και η αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία  $MR = MC_t / MC_o$ , όπου  $MC_t$  η μέση περιεχόμενη υγρασία των αποξηραίνόμενων δειγμάτων για κάθε χρονική στιγμή και  $MC_o$  η μέση αρχική περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων. Οι υπολογισμοί έλαβαν χώρα θεωρώντας ως τελική περιεχόμενη υγρασία  $MR \geq 0.2$  σύμφωνα με τους Babalis και Belessiotis (2004). Οι καταγραφές των πειραματικών περιεχόμενων υγρασιών με το χρόνο ξήρανσης μετατράπηκαν σε ωριαίες μέσω του Curve expert 1.4 (Madison, Alabama) με την εφαρμογή κυβικής παρεμβολής (Cubic Interpolation) και εξήχθησαν σε αρχείο txt. Η διαμόρφωση αυτή είναι απαραίτητη εφόσον στο υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol Multiphysics το χρονικό βήμα της προσομοίωσης τέθηκε στη μία ώρα.

### 3.2.3 Υπολογισμός όγκου και ταχύτητας συρρίκνωσης καρπών

Ο προσδιορισμός του όγκου των καρπών έλαβε χώρα θεωρώντας το προϊόν ως ελλειψοειδές, εξ. (26), με την μέτρηση των τριών διαμέτρων του καρπού με ηλεκτρονικό παχύμετρο κατά τη διάρκεια της ξήρανσης τους,

$$V = \frac{4\pi}{3} \times \frac{a}{2} \times \frac{b}{2} \times \frac{c}{2} \quad (26)$$

όπου a, b, c οι τρεις διάμετροι των καρπών (cm) και V ο όγκος (cm<sup>3</sup>). Από τον όγκο αυτό στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση ισοδύναμη διάμετρος για κάθε δείγμα θεωρώντας τα ως σφαίρες. Με τον υπολογισμό του όγκου των δειγμάτων κατά την ξήρανσή τους προσδιορίστηκε τόσο η πραγματική πυκνότητα (m<sub>t</sub>/V<sub>t</sub>, kg/m<sup>3</sup>) των καρπών όσο και το ποσοστό συρρίκνωσής τους ως S=V<sub>t</sub>/V<sub>o</sub> (αδιάστατη).

Στους Πίνακες 9, 10 που ακολουθούν παρουσιάζεται ο μέσος αρχικός όγκος, η αντίστοιχη μέση αρχική ακτίνα, η μέση αρχική πυκνότητα των καρπών καθώς και το συνολικό ποσοστό συρρίκνωσης για κάθε πειραματική σειρά θεωρώντας ως τελικό ποσοστό ξήρανσης MR<sub>f</sub>=0.2.

**Πίνακας 9:** Πειραματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά μη αποφλοιωμένων σύκων (MR<sub>f</sub>≥0.2)

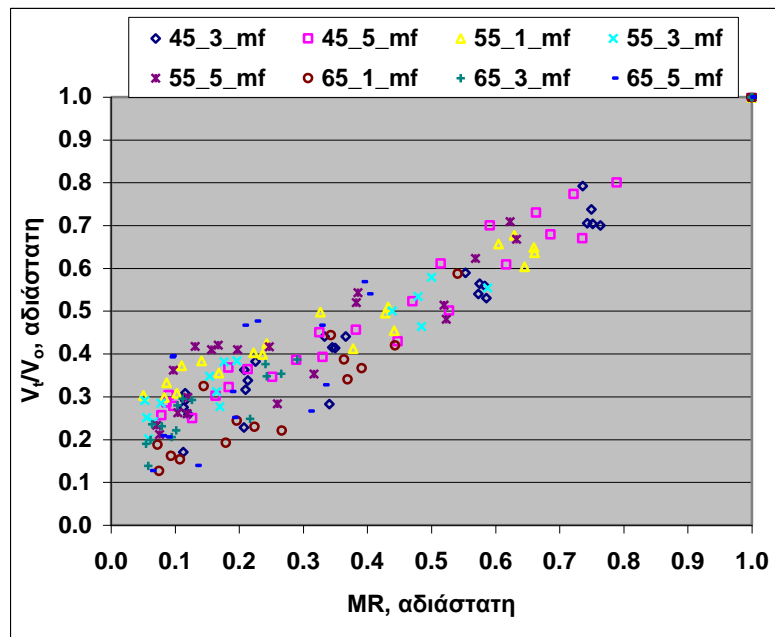
ΜΕ ΦΛΟΙΟ					
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα (m/s)	V <sub>o</sub> (mm <sup>3</sup> )	r <sub>o</sub> (mm)	ρ <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	r <sub>f</sub> /r <sub>o</sub> (%)
45	1	-	-	-	-
	3	28,316	19	1,439	68.5
	5	26,964	19	1,345	69.8
55	1	31,640	20	1,285	73.3
	3	32,685	20	1,198	69.7
	5	31,688	20	1,248	72.3
65	1	32,673	20	1,229	63.8
	3	34,404	20	1,229	63.6
	5	30,566	19	1,263	67.3

**Πίνακας 10:** Πειραματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αποφλοιωμένων σύκων (MR<sub>f</sub>≥0.2).

ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ					
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα (m/s)	V <sub>o</sub> (mm <sup>3</sup> )	r <sub>o</sub> (mm)	ρ <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	r <sub>f</sub> /r <sub>o</sub> (%)
45	1	-	-	-	-
	3	33,319	20	1,415	67.2
	5	35,031	20	1,472	63.9
55	1	26,572	18	1,473	70.0
	3	31,105	19	1,450	66.3
	5	32,829	19	1,462	65.4
65	1	33,143	20	1,435	66.8
	3	28,797	19	1,474	70.4
	5	34,477	20	1,446	65.3

Βάσει των υπολογισθέντων ποσοστών συρρίκνωσης συμπεραίνεται ότι η συρρίκνωση των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 63 και 73% για τα μη αποφλοιωμένα και μεταξύ 64 και 71% για τα αποφλοιωμένα και προφανώς δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Η συρρίκνωση (S) σε σχέση με την αδιάστατη υγρασία εμφανίζει γραμμική τάση, όπως φαίνεται από το διάγραμμα (Σχήμα 7), και συμφωνεί με βιβλιογραφικές αναφορές των Xanthopoulos et al., 2009; Xanthopoulos et al., 2012b



**Σχήμα 7:** Συρρίκνωση αποφλοιωμένων και μη σύκων κατά την ξήρανση από ρεύμα θερμού αέρα

Για να περιγραφεί μαθηματικά η συρρίκνωση του αποξηραίνόμενου προϊόντος όπως αυτή απαιτείται από το Comsol Multiphysics (Moving Mesh, ALE) και δεδομένου ότι ως τελική περιεχόμενη υγρασία ελήφθη το  $MR_f=0.2$  θεωρήθηκε ότι η μεταβολή του όγκου των δειγμάτων κατά την ξήρανσή τους ήταν ισοδύναμη με την ποσότητα της υγρασίας που απομακρύνονταν (Sabarez, 2012). Βάσει της προηγούμενης υπόθεσης ο υπολογισμός της ταχύτητας συρρίκνωσης των δειγμάτων έγινε μέσω μιας γραμμικής σχέσης της μορφής,  $R_i=a+bt$ , όπου  $R_i$  η μέση ισοδύναμη ακτίνα των δειγμάτων για κάθε περίπτωση σε m;  $t$  ο χρόνος ξήρανσης σε s και  $b$  η κλίση της ευθείας σε m/s.

Η μεταβολή της ισοδύναμης ακτίνας  $R_i$  και του αντίστοιχου χρόνου ξήρανσης σε  $s$  εισήχθησαν στο στατιστικό πακέτο Statgraphics και για κάθε περίπτωση υπολογίστηκε η ταχύτητα συρρίκνωσης η οποία αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας  $R_i=f(t)$ . Στον πίνακα 11 που ακολουθεί καταγράφονται οι ταχύτητες συρρίκνωσης για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και ταχύτητας θερμού αέρα όπως αυτές υπολογίστηκαν από τη γραμμική παλινδρόμηση της εξίσωσης  $R_i=f(t)$ .

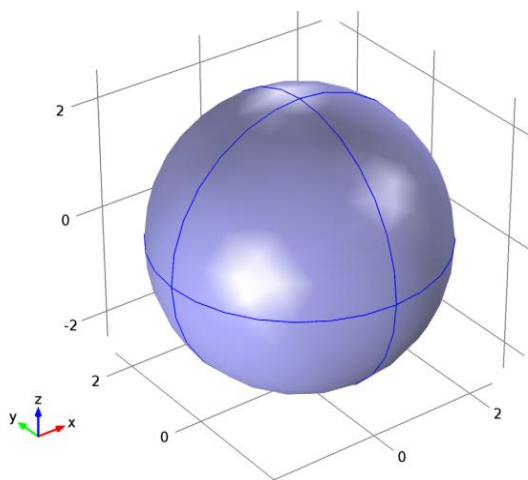
**Πίνακας 11:** Ταχύτητα συρρίκνωσης για κάθε συνθήκη ξήρανσης.

ΜΕ ΦΛΟΙΟ			ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ	
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα αέρα (m/s)	Ταχύτητα συρρίκνωσης (m/s)	Ταχύτητα αέρα (m/s)	Ταχύτητα συρρίκνωσης (m/s)
45	1	-	1	-
	3	4.86E-08	3	6.89E-08
	5	5.40E-08	5	8.61E-08
55	1	5.93E-08	1	6.67E-08
	3	6.52E-08	3	1.14E-07
	5	8.27E-08	5	1.30E-07
65	1	1.40E-07	1	1.28E-07
	3	1.41E-07	3	1.21E-07
	5	1.31E-07	5	1.83E-07

### 3.2.4 Γεωμετρική αναπαράσταση καρπού. Αξονική συμμετρία

Όπως σε κάθε υπολογιστικό πρόβλημα έτσι και εδώ για την προτυποποίησή του έγιναν ορισμένες παραδοχές.

- Τα δείγματα που εξετάστηκαν θεωρήθηκαν ως σφαίρες ακολουθώντας την περιγραφή του Ποντίκη (1996) ο οποίος χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη ποικιλία ως σφαιρική.
- Το προϊόν θεωρήθηκε ομοιογενές
- Η μεταφορά μάζας (νερού) εντός του προϊόντος γίνεται μέσω διάχυσης
- Η συρρίκνωση οφείλεται μόνο στην απώλεια υγρασίας.



**Σχήμα 8:** Η γεωμετρία του υπολογιστικού χωρίου σε τρισδιάστατο σύστημα αξόνων.

Η αναπαράσταση του υπολογιστικού χωρίου σε τρεις διαστάσεις, ισοδυναμεί με σφαίρα ακτίνας ίσης με τη μέση ακτίνα των καρπών της κάθε πειραματικής σειράς όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 8. Βάσει των παραπάνω υποθέσεων το υπολογιστικό χωρίο μπορεί να απλοποιηθεί εισάγοντας έναν άξονα συμμετρίας ο οποίος ουσιαστικά μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο και αντίστοιχα αυξάνει την υπολογιστική ταχύτητα. Με τον παραπάνω μετασχηματισμό, πρακτικά αντικαθίσταται το τρισδιάστατο πρόβλημα από ένα ισοδύναμο δισδιάστατο. Στο τέλος κάθε ωριαίου βήματος το πρόγραμμα υπολόγιζε τη μέση περιεχόμενη υγρασία

$$\overline{MC}_t = 1/V_t \int_0^V MC(R) dV \text{ καθώς και το μέσο φαινόμενο συντελεστή διάχυσης}$$

$$\overline{D}_{\text{eff}}|_t = 1/V_t \int_0^V D_{\text{eff}}(R) dV \text{ στην περιστρεφόμενη γεωμετρία του υπολογιστικού χωρίου.}$$

### 3.2.5 Ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου

Για τη ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου επελέγησαν στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b το μοντέλο μεταφοράς μάζας μέσω διάχυσης νερού, το μοντέλο κινούμενου πλέγματος και το μοντέλο βελτιστοποίησης. Παρακάτω γίνεται εκτενής αναφορά στις συνθήκες που επελέγησαν στο κάθε μοντέλο και στις παραμέτρους που ορίστηκαν για την επίλυσή τους.

### 3.2.6 Μοντέλο Διάχυσης

Για τον ορισμό του προβλήματος της διάχυσης επελέγη το Add Physics από το Model Wizard, στη συνέχεια επελέγη το Chemical Species Transport, και στη συνέχεια το μοντέλο Transport of Diluted Species. Στην επιλογή Studies, επελέγη το Present Studies και ορίστηκε το πρόβλημα ως Time Dependent. Στο Coordinate System επελέγη το Global (προεπιλογή) και στην επιλογή Bulk Material επιλέγεται None. Η σταθερά Diffusion Coefficient,  $D_c$ , θεωρήθηκε ως User Defined. Στη συνέχεια ορίστηκαν οι θεμελιώδεις εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο της διάχυσης στο υπολογιστικό χωρίο αλλά και οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες.

### 3.2.7 Θεμελιώδεις Εξισώσεις Υπολογιστικού Χωρίου

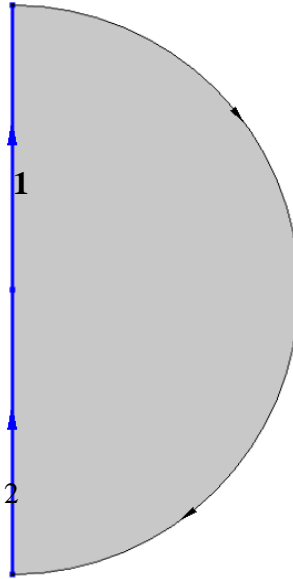
Η θεμελιώδης εξίσωση διάχυσης όπως ορίζεται στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b δίνεται παρακάτω από την εξ.(27) και ορίζεται στο υπολογιστικό χωρίο  $\Omega$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (D_i \nabla c_i) = 0 \tag{27}$$

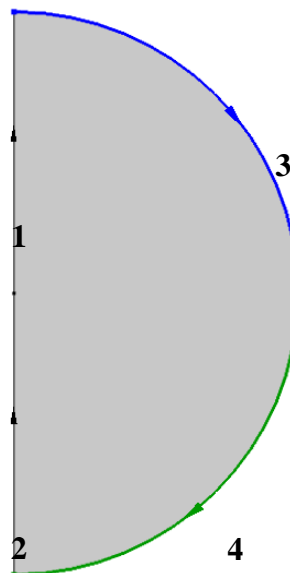
όπου  $D_i$  ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης,  $c_i$  η συγκέντρωση υγρασίας και  $t$  ο χρόνος ξήρανσης. Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης επελέγη ως θερμοκρασιακά και υγρασιακά εξαρτώμενος.

### 3.2.8 Συνοριακές Συνθήκες Υπολογιστικού Χωρίου

Στις συνοριακές συνθήκες επελέγη αρχικά η αξονική συμμετρία, Axial Symmetry, στα όρια 1 και 2 όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 9:



**Σχήμα 9:** Επιλογή αξονικής συμμετρίας στα όρια 1 και 2



**Σχήμα 10:** Επιλογή αδιαπέρατων και περατών ορίων στην κίνηση των υδρατμών

Στα όρια 3 και 4 (Σχήμα 10) επελέγη ροή μάζας, Flux, σύμφωνα με την παρακάτω γενική εξίσωση (28):



$$-\mathbf{n} \cdot (D \nabla c_i) = k_{c,j} (c_{b,j} - c_i) \quad (28)$$

όπου  $\mathbf{n}$  το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια (σύνορο) του υπολογιστικού χωρίου,  $k_{c,j}$  ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (m/s),  $c_{b,j}$  η συγκέντρωση της υγρασίας στον εξωτερικό αέρα ( $\text{mol/m}^3$ ),  $c_i$  η συγκέντρωση υγρασίας στην επιφάνεια του προϊόντος ( $\text{mol/m}^3$ ). Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη συνοριακή συνθήκη στη διεπιφάνεια αέρα/προϊόντος η οποία αντιπροσωπεύει το ισοζύγιο μάζας μεταξύ της ροής διάχυσης (diffusive flux) του νερού κινούμενου από το εσωτερικό του προϊόντος προς την επιφάνειά του και την αντίστοιχη ροή διάχυσης του υδρατμού από την επιφάνεια του προϊόντος προς το ρεύμα του θερμού αέρα (Chen, 1999; Sabarez, 2012)

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ορίζεται ως  $k_{c,j}=k_m$  και προσδιορίζεται, όπως και ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης  $D_{\text{eff}}=D$ , από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η συγκέντρωση του νερού στο προϊόν εκφράστηκε με την παρακάτω εξίσωση (29):

$$c = M_{\text{wb}} \times \frac{\rho_{\text{prod}}}{M_w} \quad (29)$$

όπου  $c$  η συγκέντρωση του νερού ( $\text{mol/m}^3$ ),  $M_{\text{wb}}$  η περιεχόμενη υγρασία σε φυσική κατάσταση ( $\text{kg}_{\text{νερού}}/\text{kg}_{\text{prod}}$ ),  $\rho_{\text{prod}}$  η πυκνότητα του προϊόντος ( $\text{kg/m}^3$ ) και  $M_w$  το μοριακό βάρος του νερού ( $0.018 \text{ kg}_{\text{νερού}}/\text{mol}$ ).

Η ισόρροπη περιεχόμενη υγρασία ( $M_e$ ) για κάθε περίπτωση ξήρανσης προσδιορίστηκε από την καμπύλη της περιεχόμενης υγρασίας και του χρόνου ξήρανσης. Ως ισόρροπη περιεχόμενη υγρασία ελήφθη η ελάχιστη υγρασία στο αποξηραινόμενο δείγμα, η οποία παραμένει σταθερή από κάποια χρονική στιγμή και μέχρι τη λήξη του πειράματος για δεδομένες συνθήκες ξήρανσης (θερμοκρασία και σχετική υγρασία). Στον Πίνακα 12 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ισόρροπη περιεχόμενη υγρασία για τους δυο χειρισμούς (με φλοιό και χωρίς φλοιό) και για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και ταχύτητας αέρα.

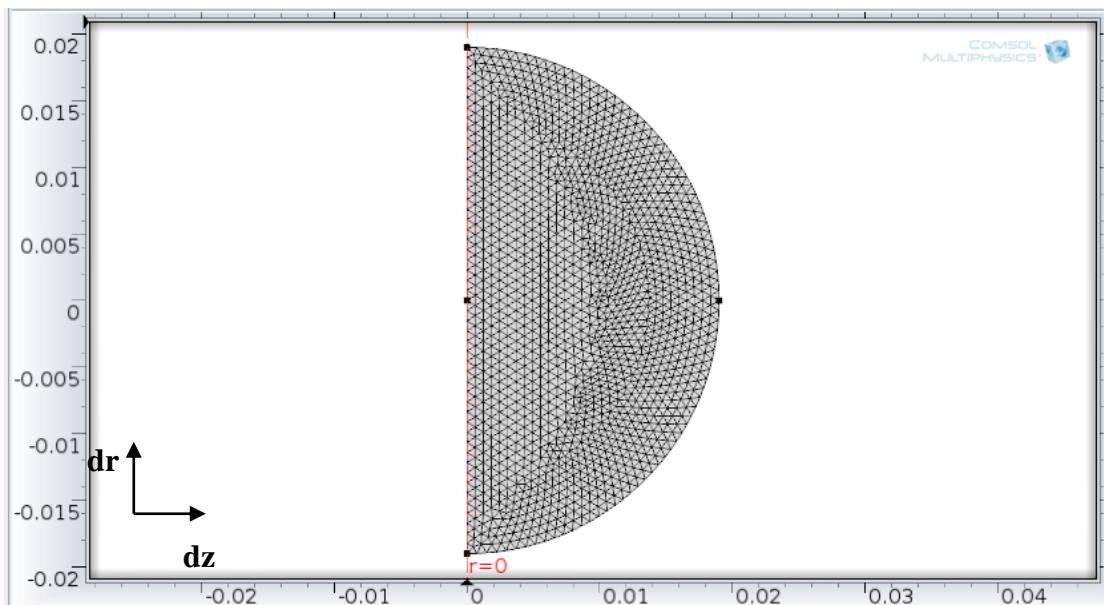
**Πίνακας 12:** Ισόρροπη περιεχόμενη υγρασία ( $M_e$ ) για κάθε περίπτωση ξήρανσης.

		ΜΕ ΦΛΟΙΟ	ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα (m/s)	$M_e$ ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dm}}$ )	$M_e$ ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dm}}$ )
	1	-	-
45	3	0.64	0.53
	5	0.57	0.67
	1	0.52	0.43
55	3	0.53	0.54
	5	0.57	0.58
	1	0.58	0.52
65	3	0.54	0.41
	5	0.49	0.61

Η ισορροπη περιεχόμενη υγρασία χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση της εξίσωσης (28) και συγκεκριμένα στον υπολογισμό της συγκέντρωσης  $c_{b,j}$ .

### 3.2.9 Διαμόρφωση του Κινούμενου πλέγματος (moving mesh)

Για την εισαγωγή της συρρίκνωσης στο υπολογιστικό μοντέλο επελέγη από το Model Builder το Moving Mesh (ale) το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο ALE, που αναλύθηκε στην ενότητα 2.4.4, για τον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου του συρρικνούμενου υπολογιστικού χωρίου. Στο παρακάτω Σχήμα 11 φαίνεται το διακριτοποιημένο αρχικό πλέγμα το οποίο ορίστηκε προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα.



Σχήμα 11: Πλέγμα κόμβων στο αρχικό υπολογιστικό χωρίο

Η διακριτοποίηση του πλέγματος έγινε με τη χρήση τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων (free triangular finite elements). Προκαταρκτική μελέτη για την ανεξαρτησία λύσης, έλαβε χώρα για να εξασφαλιστεί ότι η λύση είναι ανεξάρτητη της πυκνότητας των στοιχείων του πλέγματος. Από αυτήν την προκαταρκτική μελέτη βρέθηκε ότι η επιλογή Element size > Extra fine μπορούσε να εξασφαλίσει την ανεξαρτησία λύσης. Ο αριθμός των τριγωνικών στοιχείων στο υπολογιστικό πλέγμα με την προηγούμενη επιλογή ήταν κοντά στα 2850 στοιχεία.

### 3.2.10 Εξισώσεις υπολογιστικού χωρίου

Στην επιλογή Moving Mesh (ale) προστέθηκε αρχικά η επιλογή Domains με τις υποεπιλογές Fixed Mesh 1–Selection: All Domains και Free Deformation 1 - Selection: Manual και τελικώς επελέγη ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο. Ουσιαστικά θεωρήθηκε ότι η παραμόρφωση του χωρίου ακολουθεί αυτή των συνοριακών συνθηκών.

### 3.2.11 Συνοριακές συνθήκες

Στη συνέχεια προστέθηκε η επιλογή Boundaries ως υποεπιλογή του Moving Mesh και ορίστηκαν τα εξής:

Prescribed Mesh Displacement 1 – Επιλέγονται τα όρια 1 και 2 (αντιστοιχούν στον άξονα συμμετρίας) και επιλέγεται μετατόπιση στο Prescribed r Displacement  $dr=0$  (δεν υφίσταται μετατόπιση κατά τον άξονα r) και στο Prescribed z Displacement το dz αφήνεται ελεύθερο (ελεύθερη μετατόπιση στο άξονα z, μετατόπιση υποκείμενη στις συνοριακές συνθήκες και μόνο).

Prescribed Mesh Velocity 1 – Επιλέγονται τα όρια 3 και 4 (επιφάνεια προϊόντος) και στις επιλογές Prescribed r Velocity και Prescribed z Velocity (ταχύτητες συρρίκνωσης κατά τους άξονες r και z αντίστοιχα) έκφραση  $-V_r \times n_r$  και  $-V_z \times n_z$  αντίστοιχα, όπου  $n_r$  και  $n_z$  οι συνιστώσες του διανύσματος  $\mathbf{n}$  στη διεύθυνση r και z αντίστοιχα και  $V_r$  και  $V_z$  οι συνιστώσες του διανύσματος ταχύτητας  $\mathbf{V}$  στη διεύθυνση r και z αντίστοιχα όπου  $V$  οι ταχύτητες συρρίκνωσης (Πίνακας 11).

### 3.2.12 Βελτιστοποίηση (optimization)

Για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος, επιλέγεται από το Model Builder το μοντέλο Optimization και σε αυτό ορίστηκαν τα παρακάτω:

Global Least Squares 1 όπου ως input χρησιμοποιείται ένα αρχείο txt στο οποίο καταγράφονται πινακοποιημένες οι πειραματικές τιμές της περιεχόμενης υγρασίας επί ξηράς ουσίας και ο χρόνος ξήρανσης (s). Στη συνέχεια προστίθεται η επιλογή Time Column και η επιλογή Value Column.

Global Control Variables 1 όπου ορίζονται οι παράμετροι που συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση καθώς και οι αρχικές τους τιμές. Οι αρχικές τιμές των  $k_m$  (συντελεστής μεταφοράς μάζας),  $E_a$  (ενέργεια ενεργοποίησης, εξ. (15)) και  $a$  (παράμετρος της εξ. (15)) που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε χειρισμό κυμάνθηκαν μεταξύ  $2.773e-7$  έως  $6.927e-7$  (m/s), 0.792 έως 0.731 (J/mol), 2.81 έως 2.09 (kg/kg), για τα μη αποφλοιωμένα,  $1.81e-6$  έως  $1.90e-6$  (m/s), 0.72 έως 0.71 (J/mol) και 1.8 έως 1.66 (kg/kg) για τα αποφλοιωμένα, αντίστοιχα.

Η αρχική τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης ( $E_a$ ) επιλεγόταν μεγαλύτερη για χαμηλότερες θερμοκρασίες ξήρανσης. Το μέγεθος αύξησης της ενέργειας ενεργοποίησης ( $E_a$ ) ανάλογα με την μείωση της θερμοκρασίας υπολογίστηκε μετά από αρκετές δοκιμές για την κάθε θερμοκρασία.

### 3.2.13 Solvers

Για την επίλυση του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος επιλέχθηκε η μέθοδος μεταβλητού χρονικού βήματος ολοκλήρωσης (backward differentiation method-BDF) η οποία ανήκει σε μια κατηγορία μεθόδων έμμεσης ολοκλήρωσης στο χρόνο (implicit-time stepping methods) καθώς και ο επιλυτής βελτιστοποίησης (Optimization Solver) Levenberg-Marquardt ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων βελτιστοποίησης οι οποίες βασίζονται στις υπολογισθείσες κλίσεις των παραμέτρων βελτιστοποίησης. Ως χρονικό βήμα ορίστηκε η μία ώρα αν και το πρόγραμμα Comsol Multiphysics χρησιμοποιεί εσωτερικά μεταβλητό χρονικό βήμα για να ικανοποιήσει τις συνθήκες των παραμέτρων σχετικής ανοχής (relative tolerance= $10^{-4}$ ) και απόλυτης ανοχής (absolute tolerance= $10^{-5}$ ) για τον έλεγχο του σφάλματος σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης στο χρόνο.

Ως μέθοδος υπολογισμού των κλίσεων επιλέχθηκε η αριθμητική (numeric) η οποία μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει αριθμητικά την κλίση ενώ ως τάξη προσέγγισης της κλίσης επιλέχθηκε η 2<sup>ου</sup> βαθμού για μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια. Ως αρχική τιμή του συντελεστή απόσβεσης (damping factor) χρησιμοποιήθηκε η προεπιλεγμένη τιμή  $10^{-6}$  αν και η μέθοδος βελτιστοποίησης ελέγχει εσωτερικά τον συντελεστή απόσβεσης κρατώντας τον όσο γίνεται σε πιο χαμηλές τιμές. Στη μέθοδο βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt ορίστηκαν μόνο οι αρχικές τιμές στις παραμέτρους βελτιστοποίησης. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή σε προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων, η μέθοδος αυτή συγκλίνει ταχύτερα, ωστόσο δε λειτουργεί με περιορισμούς (lower and upper bounds). Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης του παρόντος προβλήματος δεν υιοθετήθηκε ως μοναδικό κριτήριο η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά λήφθηκαν υπόψιν τα παρακάτω κριτήρια:

1)  $D_{\text{eff}} \in (10^{-11}-10^{-9}) \text{ m}^2/\text{s}$  (Sabarez, 2012)

2) Τελικά η υπολογιζόμενη ακτίνα συρρίκνωσης να συμπίπτει με την αντίστοιχη πειραματική τιμή.

3) Το μέσο σχετικό σφάλμα μεταξύ προβλεπόμενης και πειραματικής περιεχόμενης υγρασίας για κάθε πειραματική σειρά να είναι κάτω από το 2.5%.

### 3.2.14 Υπολογισμός αντίστασης φλοιού

Γενικώς ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $k_m$ ) αποτελείται από δύο επιμέρους συντελεστές οι οποίοι είναι ο εξωτερικός συντελεστής μεταφοράς μάζας στο διαχυτικό οριακό στρώμα και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας στην επιδερμίδα του προϊόντος Van der Sman (2003). Ο αντίστροφος του συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $k_m$ ) αποτελεί την εξωτερική ή επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας ( $r_{\text{total}}$ ) η οποία αποτελείται από δυο επιμέρους αντιστάσεις, την αντίσταση του φλοιού ( $r_{\text{peel}}$ ) και αυτή του διαχυτικού οριακού στρώματος σε επαφή με το φλοιό του προϊόντος ( $r_{\text{dbi}}$ ). Ο υπολογισμός της επιφανειακής αντίστασης όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπολογίστηκε

ως δυο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά, εξ. (30) σύμφωνα με τον Van der Smán (2003).

$$r_{\text{total}} = r_{\text{peel}} + r_{\text{dbl}} \quad (30)$$

Στην περίπτωση του ακίνητου αέρα, η αντίσταση στη μεταφορά μάζας αέρα ( $r_{\text{dbl}}$ ) γύρω από μια σφαίρα διαμέτρου  $2R$  μπορεί να υπολογιστεί από τη βασική θεωρία διάχυσης και είναι ίση με  $R/D_v$  όπου  $D_v$  ο συντελεστής διάχυσης υδρατμών στον αέρα (Pham et al., 2009), ο οποίος έδωσε τιμές, για θερμοκρασίες 45-65 °C, της τάξεως του  $6.0\text{-}7.0 \times 10^2$  s/m όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 13. Η τιμή αυτή είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή της υπολογισθείσας αντίστασης του φλοιού ( $r_{\text{peel}}$ ) και για αυτό θεωρήθηκε ότι η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας οφείλεται εξ' ολοκλήρου στην αντίσταση του φλοιού  $r_{\text{total}} = r_{\text{skin}}$ .

**Πίνακας 13:** Τιμές συντελεστή διάχυσης υδρατμών στον αέρα και αντίστασης του οριακού διαχυτικού στρώματος.

$T_{\text{air}}$ (°C)	$D_v$ m <sup>2</sup> /s	R (m)	Αντίσταση (s/m)
45	$28.0 \cdot 10^{-6}$	0.02	$7.14 \cdot 10^2$
55	$29.5 \cdot 10^{-6}$	0.02	$6.77 \cdot 10^2$
65	$31.0 \cdot 10^{-6}$	0.02	$6.45 \cdot 10^2$

Με βάση την μέχρι τώρα ανάλυση, η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (εξ.(31)):

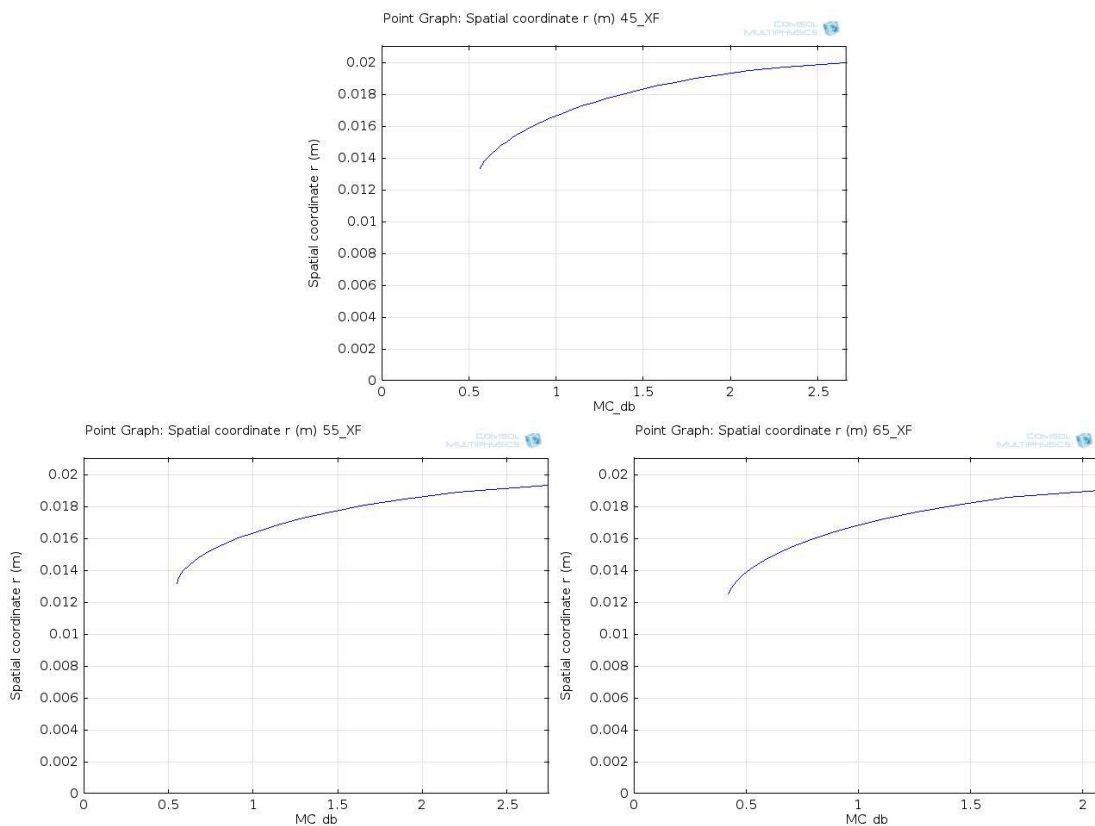
$$r_{\text{total}} = r_{\text{skin}} = \frac{1}{k_m} \quad (31)$$

όπου  $r_{\text{peel}}$  αντίσταση στην εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος σε (s/m) και  $k_m$  ο συντελεστής μεταφοράς μάζας όπως αυτός υπολογίζεται από τη μέθοδο βελτιστοποίησης σε (m/s).

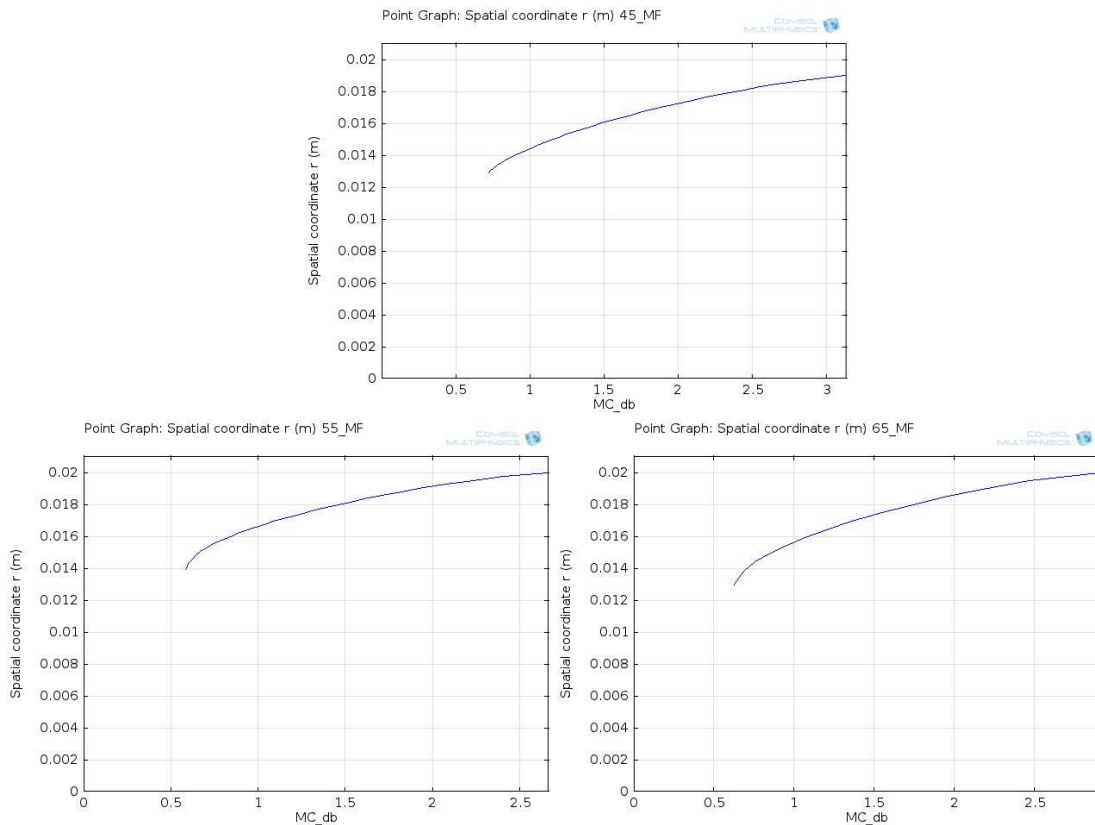
## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Συρρίκνωση

Η συρρίκνωση όπως αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 11 από τα πειραματικά δεδομένα κυμάνθηκε μεταξύ 30-40% της αρχικής ισοδύναμης ακτίνας γεγονός που θεωρήθηκε ως σημαντική μεταβολή του αρχικού όγκου του προϊόντος. Για αυτό το λόγο η συρρίκνωση περιγράφηκε μαθηματικά μέσω απλών γραμμικών σχέσεων όπως προαναφέρθηκε θεωρώντας ότι η μεταβολή του όγκου των δειγμάτων κατά την ξήρανσή τους ήταν ισοδύναμη με την ποσότητα του νερού που απομακρυνόταν. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι στατιστικοί συντελεστές της γραμμικής παλινδρόμησης κυμάνθηκαν σε ικανοποιητικά επίπεδα δηλαδή τα  $R_{adj}^2 \geq 0.85$  και  $SEE \leq 0.001$ . Η πολυπαραγοντική ανάλυση διακύμανσης (multifactor ANOVA) έδειξε, όπως αναμενόταν, ότι η συρρίκνωση ήταν υγρασιακά εξαρτώμενη ( $P \leq 0.05$ ) ενώ η αποφλοιώση και η θερμοκρασία δεν είχαν σημαντική επίδραση ( $P \leq 0.05$ ). Όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 12 και 13 η συρρίκνωση για ταχύτητα αέρα ξήρανσης 3 m/s και τις τρεις θερμοκρασίες ξήρανσης 45, 55 και 65 °C η συρρίκνωση έδειξε μια ημι-γραμμική (quasi-linear) μεταβολή για τιμές  $MC > 1.0 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  που συμφωνεί με τους Ratti (1994), Ruiz-López et al.(2012) και Xanthopoulos et al. (2012b). Παρόμοιες συσχετίσεις της συρρίκνωσης με την περιεχόμενη υγρασία σημειώθηκαν και στις υπόλοιπες πειραματικές περιπτώσεις.



**Σχήμα 12:** Μεταβολή της ισοδύναμης ακτίνας (προβλεπόμενη) συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας για αποφλοιωμένα (XF) σύκα στους 45, 55 και 65 °C και 3 m/s.



**Σχήμα 13:** Μεταβολή της ισοδύναμης ακτίνας (προβλεπόμενη) συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας για μη αποφλοιωμένα (MF) σύκα στους 45, 55 και 65 °C και 3 m/s.

Για μικρότερες τιμές περιεχόμενης υγρασίας  $MC < 1.0 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  παρατηρείται εκτεταμένη συρρίκνωση όπως αναφέρει και η Ratti (1994) η οποία είναι πολύ δύσκολο να προτυποποιηθεί χωρίς τον κίνδυνο υψηλών σφαλμάτων με την ενσωμάτωση αυτής σε αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα ξήρανσης.

#### 4.2 Ανάλυση και επιβεβαίωση του προτεινόμενου υπολογιστικού μοντέλου ξήρανσης

Η ακρίβεια του προτεινόμενου μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης ισοθερμοκρασιακής ξήρανσης εκτιμήθηκε συγκρίνοντας τις πειραματικές με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές της μέσης περιεχόμενης υγρασίας καθώς και της απόκλισης αυτών μέσω του μέσου σχετικού σφάλματος (ΜΣΣ, %) όπως αυτό παρουσιάστηκε και εφαρμόστηκε από τους Xanthopoulos et al. (2012b). Σε όλες τις πειραματικές περιπτώσεις (αποφλοιωμένα και μη σύκα) που εξετάστηκαν, το ΜΣΣ δεν ξεπέρασε το 2.2% όπως παρουσιάζεται στους Πίνακες 14 και 15. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 14-19 στα οποία παρουσιάζονται οι μεταβολές της πειραματικής και της προβλεπόμενης αδιάστατης περιεχόμενης υγρασίας (MR) με το χρόνο ξήρανσης για όλες τις πειραματικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, οι προβλεπόμενες τιμές συμφωνούν αρκετά καλά με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Όπως ανέφερε ο

Sabarez (2012) πραγματοποιώντας υπολογιστική προσομοίωση ξήρανσης δαμάσκηνων, ένα μοντέλο ξήρανσης είναι αποδεκτό όταν το ΜΣΣ<10%. Τα αποτελέσματα από τη μελέτη αυτή (ΜΣΣ<2.2%) αποδεικνύουν την καταλληλότητα του προτεινόμενου μοντέλου να προσομοιώνει τη διεργασία της ξήρανσης κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα ξήρανσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι καμπύλες ξήρανσης [MR=f(t)] τόσο στην περίπτωση των αποφλοιωμένων όσο και των μη αποφλοιωμένων δειγμάτων παρατάχθηκαν σχετικά κοντά η μία στην άλλη, γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί και από τη σχετικά χαμηλή αρχική περιεχόμενη υγρασία των προϊόντων  $2.7\pm 0.3 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  ( $0.7 \text{ kg}_w/\text{kg}_{wb}$ ) λαμβάνοντας υπόψη ότι αποξηραίνόμενα προϊόντα όπως το τοματάκι (Xanthopoulos et al. 2012a & b), μανιτάρι (Xanthopoulos et al. 2007a) και το βερίκοκο (πειραματικά αδημοσίευτα δεδομένα) έχουν αρχική περιεχόμενη υγρασία άνω του 0.8-0.9  $\text{kg}_w/\text{kg}_{wb}$ .

Αν και οι παράμετροι  $E_a$  και  $a$  στην εξ. 15 υπολογισμού του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης δεν έχουν κάποια άμεση φυσική ερμηνεία, οι τιμές του  $E_a$  είναι ενδεικτικές της θερμοκρασιακής εξάρτησης του συντελεστή διάχυσης. Οι υπολογισθείσες τιμές του  $E_a$  ανήκουν στο εύρος τιμών που βιβλιογραφικά έχουν καταγραφεί για αποξηραίνόμενα αγροτικά προϊόντα όπως είναι το μανιτάρι (Da Silva et al. 2009, Xanthopoulos et al., 2014), σταφύλι (Ramos et al. 2010) κ.α. αν και η σύγκριση των τιμών αυτών θα πρέπει να γίνεται με προσοχή όπως σχολίασε και ο Chen (2007). Οι διαφορετικές πειραματικές μέθοδοι και συνθήκες, καθώς και οι τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων (μαθηματική προτυποποίηση και συνοριακές συνθήκες) που εφαρμόζονται όπως επίσης και οι διαφορετικές ποικιλίες διαφορετικής φυσιολογικής κατάστασης που χρησιμοποιούνται στα πειράματα, θα πρέπει να συνυπολογίζονται αλλιώς τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει κανείς μπορεί είναι παραπλανητικά.

**Πίνακας 14:** Τιμές των παραγόντων βελτιστοποίησης ( $k_m$ ,  $E_a$ ,  $a$ ) στις πειραματικές περιπτώσεις των αποφλοιωμένων σύκων με το αντίστοιχο ΜΣΣ (%) και  $\bar{D}_{eff}$

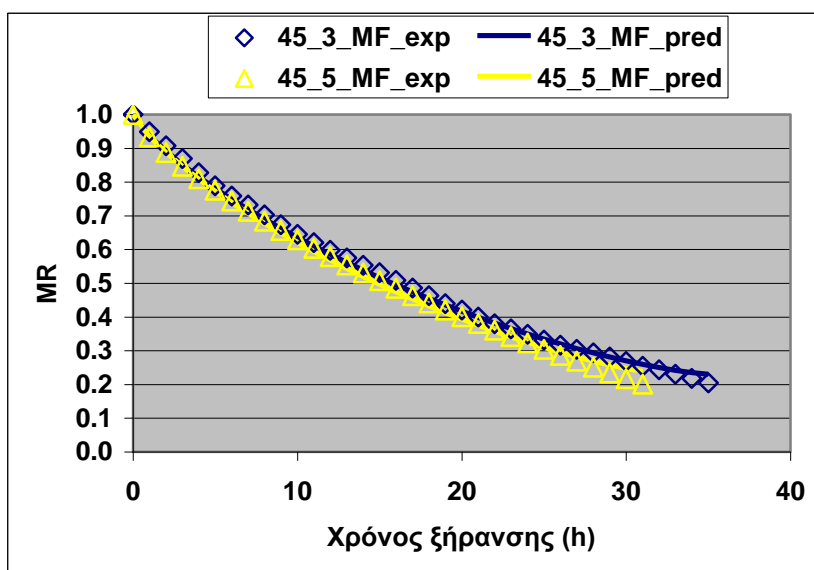
ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ						
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα αέρα (m/s)	$k_m$ (m/s)	$E_a$ (kJ/mol)	$a$	ΜΣΣ (%)	$\bar{D}_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)
45	1	-	-	-	-	-
45	3	1.41E-06	72.0	1.80	1.47	2.39E-09
45	5	1.44E-06	72.0	1.83	1.35	2.56E-09
55	1	1.54E-06	71.9	1.67	1.20	3.84E-09
55	3	1.78E-06	71.5	1.75	1.81	4.53E-09
55	5	1.84E-06	71.5	1.75	1.62	4.23E-09
65	1	1.59E-06	71.0	1.52	1.84	4.35E-09
65	3	1.91E-06	71.0	1.53	1.60	4.15E-09
65	5	2.01E-06	71.0	1.65	1.48	4.46E-09



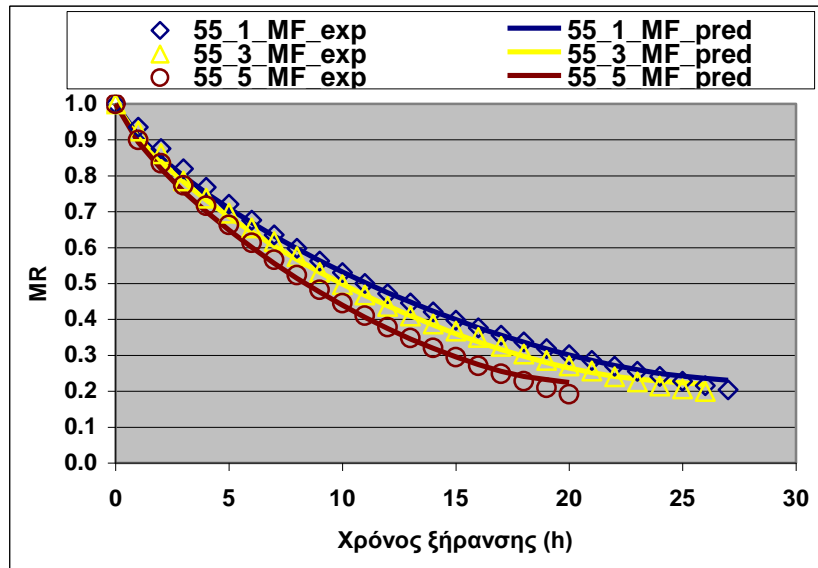
**Πίνακας 15:** Τιμές των παραγόντων βελτιστοποίησης ( $k_m$ ,  $E_a$ ,  $a$ ) στις πειραματικές περιπτώσεις των μη αποφλοιωμένων σύκων με το αντίστοιχο ΜΣΣ (%) και  $\bar{D}_{eff}$

ΜΕ ΦΛΟΙΟ						
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα αέρα (m/s)	$k_m$ (m/s)	$E_a$ (kJ/mol)	$a$	ΜΣΣ (%)	$\bar{D}_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)
45	1	-	-	-	-	-
45	3	2.87E-07	79.2	2.81	1.67	1.41E-09
45	5	3.08E-07	79.2	2.81	2.20	1.43E-09
55	1	3.20E-07	73.4	2.22	1.44	2.45E-09
55	3	3.70E-07	73.4	2.22	1.92	2.97E-09
55	5	3.77E-07	73.5	2.26	2.07	2.75E-09
65	1	5.55E-07	73.0	2.09	1.64	4.00E-09
65	3	7.05E-07	73.1	2.09	1.82	4.18E-09
65	5	6.93E-07	73.1	2.09	2.2	4.69E-09

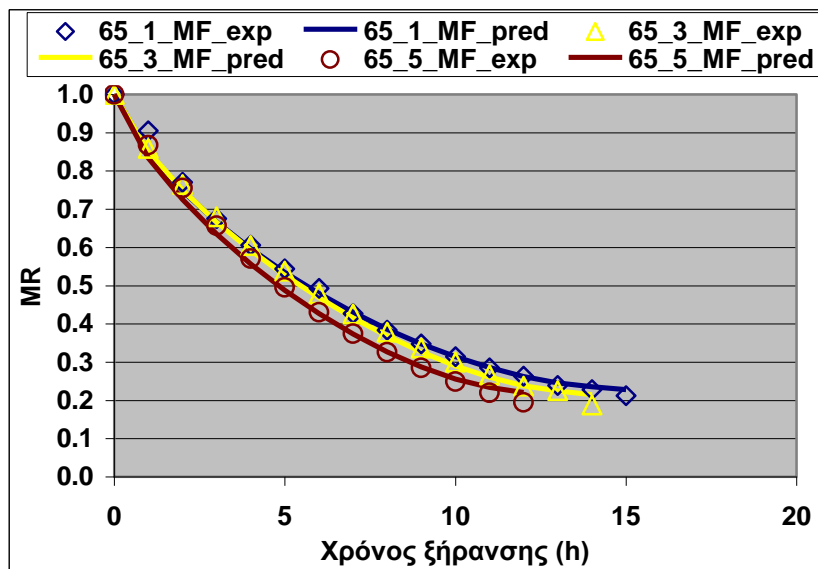
Οι υπολογισθείσες τιμές του  $E_a$  κυμάνθηκαν στο εύρος 71-72 kJ/mol για τα αποφλοιωμένα σύκα και 73-79 kJ/mol για τα μη αποφλοιωμένα (Πίνακες 14-15) τάση που παρατηρήθηκε και σε αντίστοιχο πείραμα ξήρανσης σε αποφλοιωμένο και μη τοματάκι από τους Xanthopoulos et al. (2012b), δηλαδή χαμηλότερες τιμές του  $E_a$  στα αποφλοιωμένα προϊόντα που συνεπάγεται αντίστοιχα χαμηλότερη απαιτούμενη ενέργεια για τη πραγματοποίηση της διάχυσης της υγρασίας στο προϊόν. Η αποφλοιώση που έλαβε χώρα εργαστηριακά στόχευε καθαρά στη διερεύνηση του ρόλου του φλοιού στην κίνηση του νερού από το εσωτερικό του προϊόντος και πως αυτή εκφράζεται στις διάφορες συνθήκες ξήρανσης που εξετάστηκαν και όχι στην εφαρμογή της ως προ-χειρισμού για τη σύντμηση του χρόνου ξήρανσης.



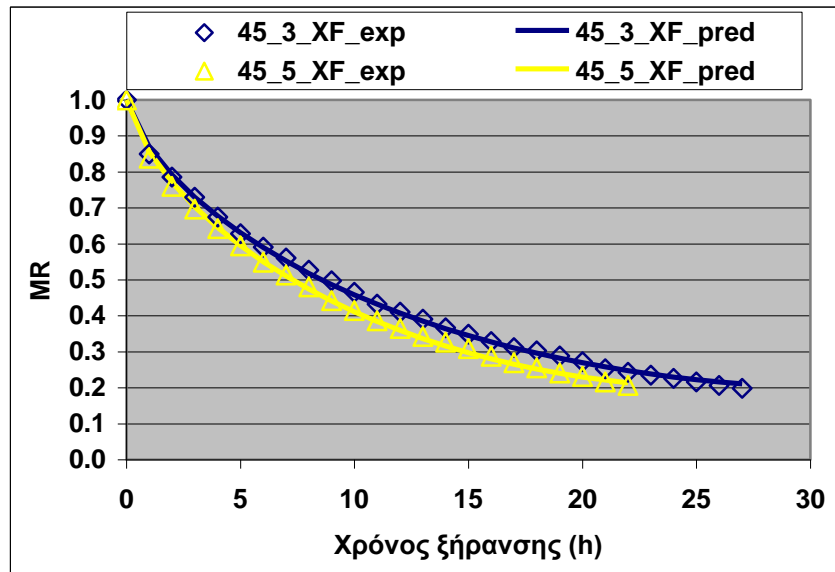
**Σχήμα 14:** Πειραματικές (exp) και προβλεπόμενες (pred) τιμές μη αποφλοιωμένων σύκων στους 45 °C και ταχύτητες αέρα 3 και 5 (m/s)



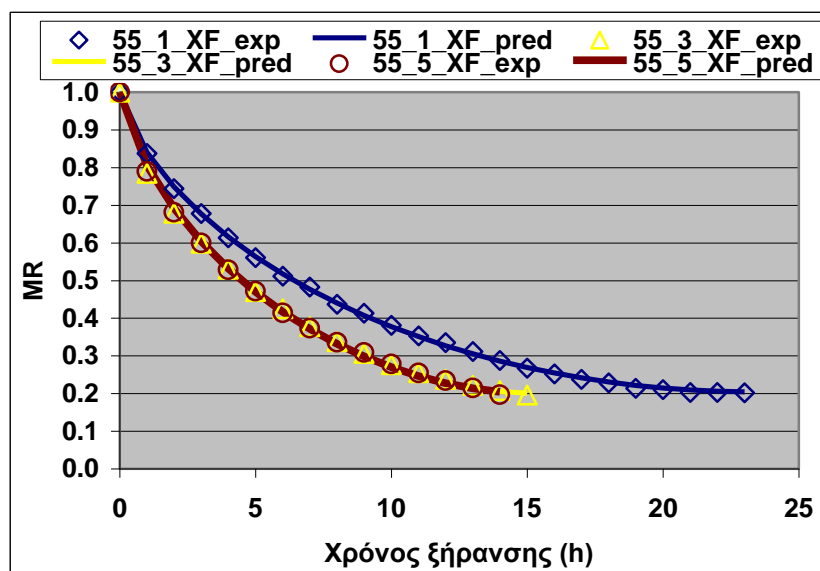
**Σχήμα 15:** Πειραματικές (exp) και προβλεπόμενες (pred) τιμές μη αποφλοιωμένων σύκων στους 55 °C και ταχύτητες αέρα 1, 3 και 5 (m/s)



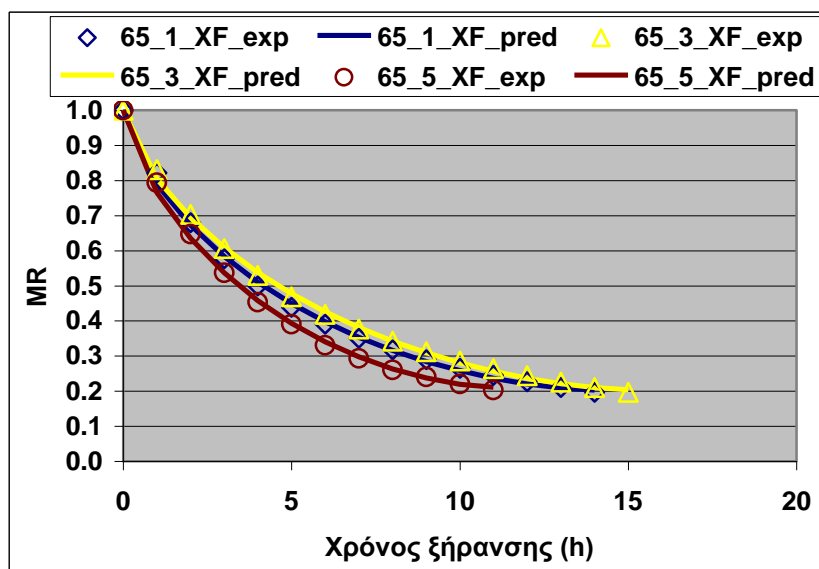
**Σχήμα 16:** Πειραματικές (exp) και προβλεπόμενες (pred) τιμές μη αποφλοιωμένων σύκων στους 65 °C και ταχύτητες αέρα 1, 3 και 5 (m/s)



**Σχήμα 17:** Πειραματικές (exp) και προβλεπόμενες (pred) τιμές αποφλοιωμένων σύκων στους 45 °C και ταχύτητες αέρα 3 και 5 (m/s)

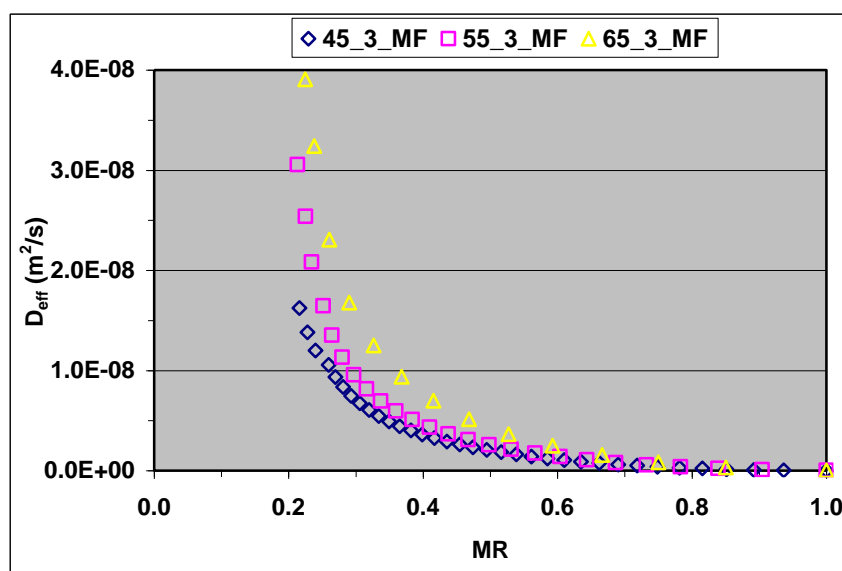


**Σχήμα 18:** Πειραματικές (exp) και προβλεπόμενες (pred) τιμές αποφλοιωμένων σύκων στους 55 °C και ταχύτητες αέρα 1, 3 και 5 (m/s)



**Σχήμα 19:** Πειραματικές (exp) και προβλεπόμενες (pred) τιμές αποφλοιωμένων σύκων στους 65 °C και ταχύτητες αέρα 1, 3 και 5 (m/s)

Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται η μεταβολή του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  των μη αποφλοιωμένων σύκων με την αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία για τις 3 θερμοκρασίες ξήρανσης (45, 55 και 65 °C) και για ταχύτητα αέρα 3 m/s. Στις υπόλοιπες πειραματικές περιπτώσεις (1.0 και 5.0 m/s) και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες ξήρανσης 45, 55 και 65 °C) εμφανίστηκαν παρόμοιες μεταβολές του συντελεστή διάχυσης με την αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία.

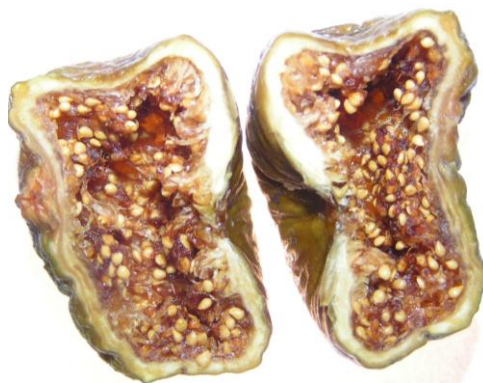


**Σχήμα 20:** Φαινόμενος συντελεστής διάχυσης μη αποφλοιωμένων σύκων για ταχύτητα αέρα 3.0 m/s.

Οι Singh et al. (2007) και Ruiz-López et al. (2012) σχολίασαν ότι η αύξηση του  $D_{eff}$  στα αρχικά στάδια της ξήρανσης οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του υπό ξήρανση προϊόντος εφόσον το  $D_{eff}$  είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτώμενο από τη

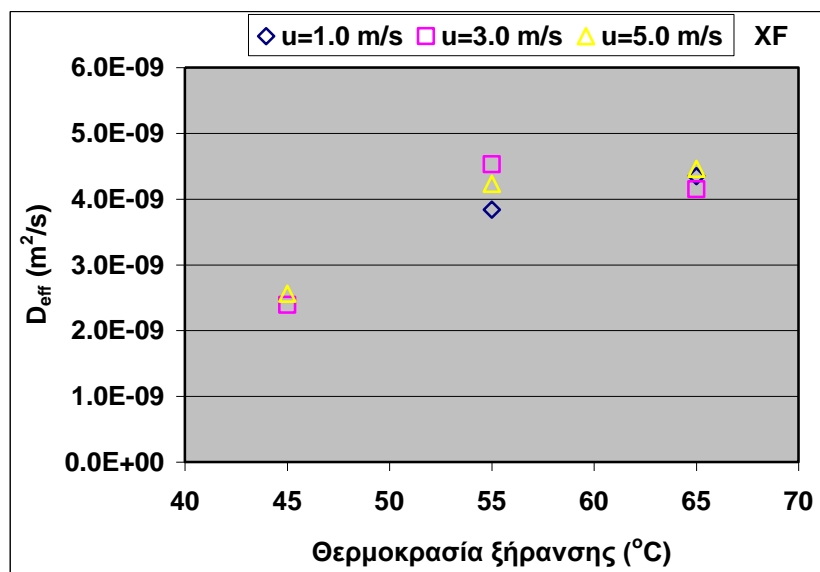
θερμοκρασία και σε μικρότερο από την περιεχόμενη υγρασία. Στα τελευταία στάδια της ξήρανσης για  $MR < 0.2$  παρατηρείται μείωση του  $D_{eff}$  αν και η θερμοκρασία του προϊόντος είναι ίδια με αυτή του αέρα ξήρανσης τάση η οποία μπορεί να εξηγηθεί από τη σημαντικά μειωμένη κινητικότητα του νερού στο αποξηραινόμενο προϊόν όπως αυτή προκαλείται από την κατάρρευση της κυτταρικής δομής ή από την υψηλή ενέργεια προσρόφησης των μορίων νερού στην στερεή φάση του αποξηραινόμενου προϊόντος. Οι Saravacos and Maroulis (2001) σχολίασαν ότι η αντίστοιχη μεταβολή του συντελεστή διάχυσης με την περιεχόμενη υγρασία είναι χαρακτηριστική σε πορώδη τρόφιμα και συγκεκριμένα η αύξηση του συντελεστή  $D_{eff}$  οφείλεται στην ανάπτυξη πορώδους που διευκολύνει την κίνηση του νερού μέσα σε αυτό, ενώ η απότομη μείωσή της σε χαμηλές περιεχόμενες υγρασίες οφείλεται στο ισχυρά δεσμευμένο νερό στη στερεή φάση του αποξηραινόμενου προϊόντος.

Όπως προαναφέρθηκε, ο καρπός ή ορθότερα ο 'ψευδοκαρπός του σύκου' εσωτερικά χαρακτηρίζεται από μια περίπλοκη δομή όπου εκατοντάδες ανθίδια και μικροσκοπικές δρύπεις εκφύονται κατά μήκος του εσωτερικού τοιχώματος του συκονίου. Η δομή αυτή είναι αδύνατον να περιγραφεί μαθηματικά και να ενσωματωθεί σε ένα υπολογιστικό μοντέλο όπως αυτό που περιγράφεται στην παρούσα εργασία. Οι Chrisosto et al. (2011) ανέφεραν ότι οι ξαφνικές μεταβολές της εσωτερικής πίεσης στο σύκο προκαλούν σχίσσιμο στην οστιόλη με συνέπεια την αύξηση της έκθεσης της εσωτερικής κοιλότητας του συκονίου στο εξωτερικό περιβάλλον. Η παραπάνω ανάλυση σε συνδυασμό με τη μορφολογική περιγραφή του συκονίου (ενότητα 1.5.4), την ύπαρξη της οστιόλης η οποία διευκολύνει την επικοινωνία του εσωτερικού του συκονίου με το εξωτερικό περιβάλλον και πειραματικές παρατηρήσεις, καταδεικνύουν ότι το σύκο διαθέτει εσωτερικά μια πορώδη δομή η οποία μεγεθύνεται αρκετά με την πρόοδο της ξήρανσης (Σχήμα 21). Στα τελικά στάδια της ξήρανσης η απότομη αύξηση του συντελεστή διάχυσης ( $D_{eff}$ ) μπορεί να αποδοθεί στην εκτεταμένη ανάπτυξη πορώδους συνυπολογίζοντας και το ρόλο της οστιόλης στην κίνηση των υδρατμών από το εσωτερικό του συκονίου αλλά και στην μερική ασυμφωνία της πειραματικής και της προβλεπόμενης συρρίκνωσης εφόσον από ένα σημείο και έπειτα δεν οφείλεται μόνο στην εξάτμιση του περιεχόμενου νερού αλλά και στις δομικές μεταβολές (collapsing) της κυτταρικής δομής του αποξηραινόμενου προϊόντος.



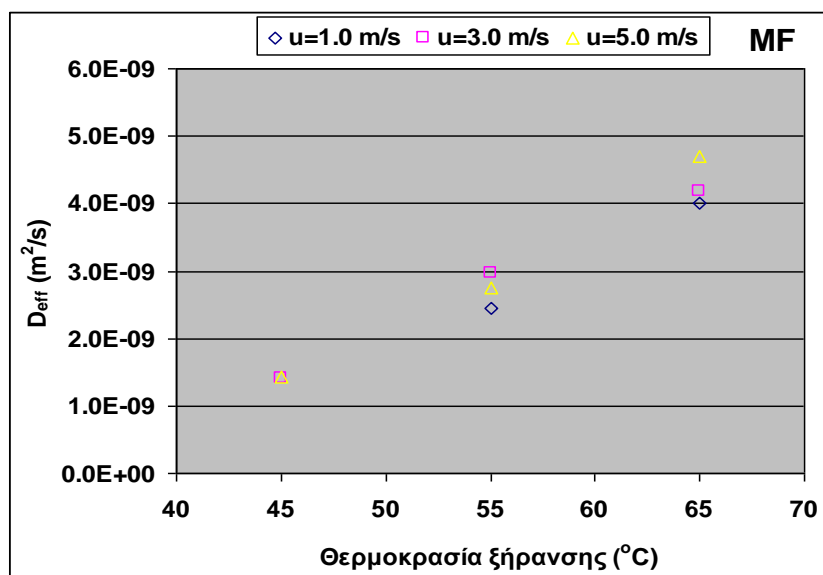
**Σχήμα 21:** Αποξηραμένα σύκα όπου είναι εμφανής ο υψηλός βαθμός συρρίκνωσης και το εσωτερικά διαμορφωμένο πορώδες.

Οι τιμές των μέσων  $D_{eff}$  όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 22 και 23 με τις θερμοκρασίες ξήρανσης και τις αντίστοιχες ταχύτητες του αέρα ξήρανσης έχουν προέλθει από τους γεωμετρικούς μέσους όρους των προβλεπόμενων από το υπολογιστικό πρόγραμμα τιμών του  $D_{eff}$  ανά ωριαίο χρονικό βήμα για τις τρεις ταχύτητες του αέρα ξήρανσης (1.0, 3.0 και 5.0 m/s) και τις αντίστοιχες τρεις θερμοκρασίες αέρα ξήρανσης. Ο μέσος γεωμετρικός όρος επιλέχθηκε κατόπιν στατιστικής ανάλυσης των κατανομών των δεδομένων  $D_{eff}=f(t)$  και σε όλες τις περιπτώσεις η κανονική κατανομή, η οποία αντιστοιχεί στον αριθμητικό μέσο ταξινομούταν πολύ πίσω συγκριτικά με τις αντίστοιχες lognormal κατανομές, οι οποίες περιγράφονται από το μέσο γεωμετρικό όρο. Την προσέγγιση αυτού του μέσου όρου προτείνουν οι Marsily (1991) και Pham (2009) στις εργασίες τους.



**Σχήμα 22:** Μεταβολή των μέσων  $D_{eff}=f(t)$  αποφλοιωμένων σύκων για όλες τις ταχύτητες αέρα συναρτήσει της αντίστοιχης θερμοκρασίας ξήρανσης.

Στα Σχήματα 22 και 23 παρουσιάζονται οι τιμές των μέσων  $D_{eff}$  (Πίνακες 14 και 15) στα οποία είναι εμφανής η επίδραση της θερμοκρασίας ξήρανσης στην αύξηση των μέσων συντελεστών διάχυσης ενώ αντίστοιχα η επίδραση της ταχύτητας του αέρα ξήρανσης παρουσιάζεται να μην είναι σημαντική. Οι τιμές των μέσων  $D_{eff}$  που υπολογίστηκαν ανήκουν στο εύρος των αντιστοίχων τιμών αποξηραίνόμενων αγροτικών προϊόντων ( $10^{-11}$ - $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s) όπως αυτές παρουσιάζονται ενδεικτικά στον Πίνακα 7 αλλά και αυτών που παρουσιάζονται για πολλά αγροτικά προϊόντα από τους Saravacos and Maroulis (2001). Στα αποφλοιωμένα σύκα οι τιμές των μέσων  $D_{eff}$  εμφανίζουν παρόμοιες τιμές στις θερμοκρασίες των 55 και 65 °C γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο case hardening στο σχηματισμό δηλαδή μιας συνεκτικής στρώσης στερεοποιημένων σακχάρων στην επιφάνεια των σύκων η οποία δυσκολεύει την κίνηση του νερού από το εσωτερικό των σύκων προς την επιφάνειά τους.



**Σχήμα 23:** Μεταβολή των μέσων  $D_{\text{eff}} = f(t)$  μη αποφλοιωμένων σύκων για όλες τις ταχύτητες αέρα συναρτήσει της αντίστοιχης θερμοκρασίας ξήρανσης.

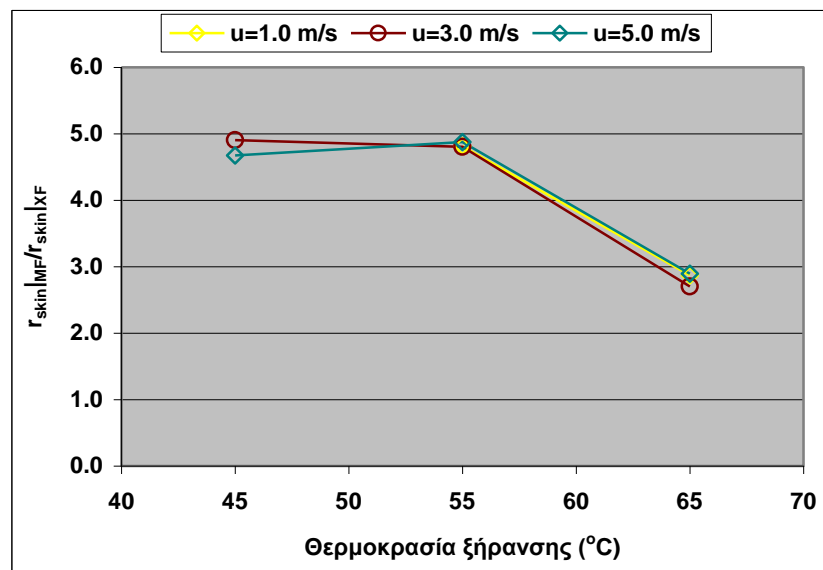
Οι Piga et al. 2004 αναφέρουν ότι σε φρούτα πλούσια σε σάκχαρα όπως είναι τα σύκα, όταν ο αέρας ξήρανσης είναι αρκετά θερμός η κίνηση του νερού από το εσωτερικό του προϊόντος είναι ταχύτερη από ότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με συνέπεια τη διόγκωση του προϊόντος και την εκροή ρευστοποιημένων σακχάρων στην επιφάνεια του προϊόντος συμπαρασυρόμενα από το εξερχόμενο νερό. Στα αποφλοιωμένα σύκα η έλλειψη φλοιού αυξάνει το ρυθμό ξήρανσης και άρα εντείνει το φαινόμενο της εκροής νερού και σακχάρων στην επιφάνεια των σύκων γεγονός που δικαιολογεί και τους μικρότερους χρόνους ξήρανσης των αποφλοιωμένων σύκων.

Όπως προαναφέρθηκε, ο αντίστροφος του συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $k_m$ ) αποτελεί την εξωτερική ή επιφανειακή αντίσταση ( $r_{\text{peel}}$ ) στη μεταφορά μάζας. Οι τιμές του συντελεστή  $k_m$  και αυτές της επιφανειακής αντίστασης  $r_{\text{peel}}$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 16. Η μεταβολή των σχετικών επιφανειακών αντιστάσεων φαίνεται να εξαρτάται από τη θερμοκρασία ξήρανσης και όχι από την ταχύτητα του αέρα ξήρανσης. Αν και αντίστοιχες εργασίες που στοχεύουν στον υπολογισμό της επιφανειακής αντίστασης στην κίνηση του νερού από το εσωτερικό των σύκων κατά την ξήρανσή τους δεν βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε βάσει αντίστοιχων αποτελεσμάτων των Pham et al., 2009 από την κίνηση αερίων (μίγμα αέρα-αιθανίου) στην επιφάνεια μήλων 'Jonica' κατά την ψυχοσυντήρησή τους. Αν και τα αποτελέσματά τους δεν μπορούν να είναι άμεσα συγκρίσιμα, παρόλα αυτά η τάξη μεγέθους του συντελεστή  $k_m$  είναι ίδια, κυμάνθηκε δε μεταξύ  $5.0-20.0 \times 10^{-7}$  m/s ενώ στην παρούσα εργασία κυμάνθηκε μεταξύ  $3.0-7.0 \times 10^{-7}$  m/s. Αντίστοιχες τιμές σημειώθηκαν και για την επιφανειακή αντίσταση που στην παρούσα εργασία κυμάνθηκαν μεταξύ  $14.0-35.0 \times 10^5$  s/m για τα σύκα με φλοιό ενώ στα αποφλοιωμένα η επιφανειακή αντίσταση, όπως αναμενόταν, ήταν αρκετά μικρότερη και κυμάνθηκε μεταξύ  $5.0-7.0 \times 10^5$  s/m. Αν και ως απόλυτα μεγέθη, οι τιμές της επιφανειακής αντίστασης δεν μπορούν να δώσουν κάποιο φυσικό νόημα, η σχετική μεταβολή τους

δηλαδή το πηλίκο  $r_{\text{peel}}|_{\text{MF}}/r_{\text{peel}}|_{\text{XF}}$  όπως αυτό εμφανίζεται στο Σχήμα 24 δείχνει ότι ενώ μεταξύ 45 και 55 °C δεν παρουσιάστηκε κάποια σημαντική μεταβολή (η επιφανειακή αντίσταση των μη αποφλοιωμένων σύκων είναι περίπου 5-πλασια των αποφλοιωμένων) αντιθέτως μεταξύ των 55 και 65 °C η σχέση αυτή μειώνεται σταδιακά στο ήμισυ γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σε μείωση της επιφανειακής αντίστασης του φλοιού στα μη αποφλοιωμένα σύκα. Βέβαια για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα θα πρέπει να γίνει και μικροσκοπική παρατήρηση για να επιβεβαιωθεί και οπτικά η αποδόμηση του φλοιού και κατά συνέπεια η μείωση της επιφανειακής αντίστασης. Σε αντίστοιχο πείραμα ξήρανσης βερίκοκου, οι Καφούρος κ.α. 2013 παρατήρησαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, ρωγμές (cracks) στο φλοιό του φρούτου κατά την ξήρανσή του σε παρόμοιες συνθήκες και εικόνα γενικότερης αποδόμησης του φλοιού.

**Πίνακας 16:** Συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $k_m$ ) και η επιφανειακή αντίσταση ( $r_{\text{surf}}$ ) σε αποφλοιωμένα και μη σύκα.

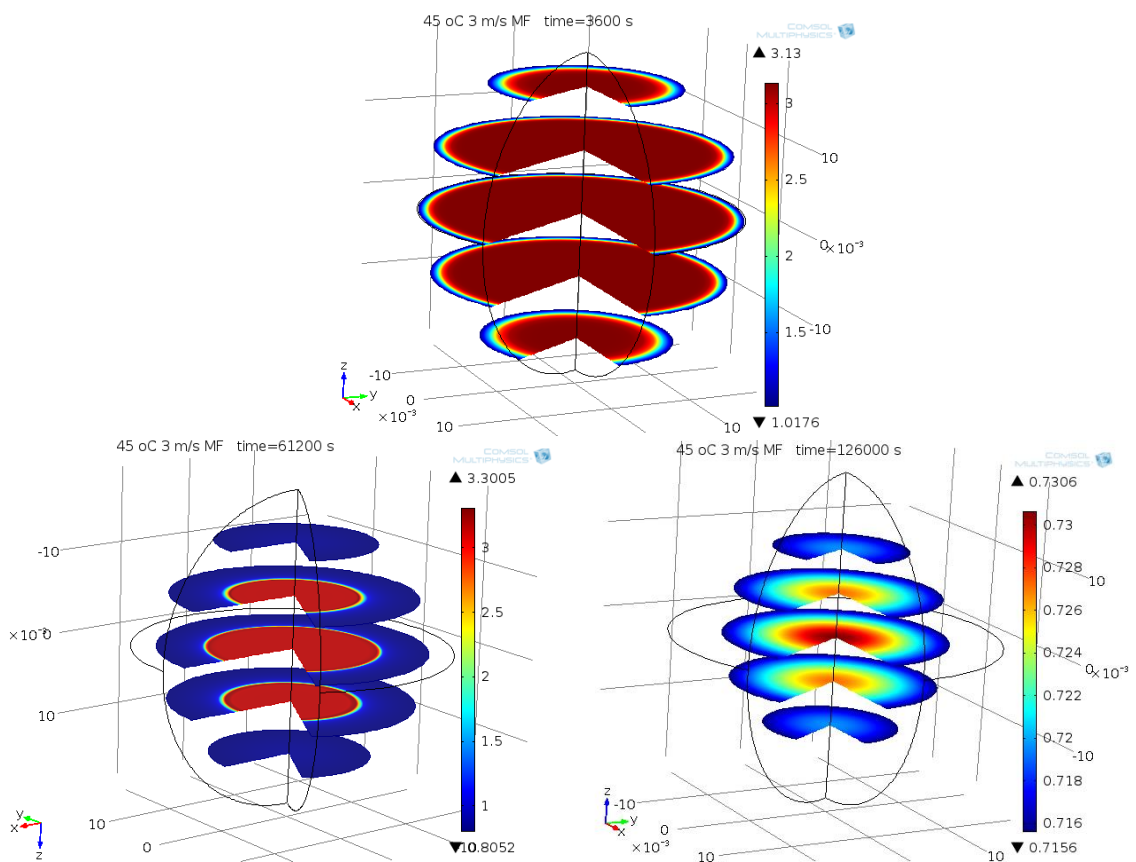
Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα αέρα (m/s)	ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ		ΜΕ ΦΛΟΙΟ		$r_{\text{peel}} _{\text{MF}}/r_{\text{peel}} _{\text{XF}}$
		$k_m$ (m/s)	$r_{\text{peel}} \times 10^5$ (s/m)	$k_m$ (m/s)	$r_{\text{peel}} \times 10^5$ (s/m)	
45	3	1.41E-06	7.1	2.87E-07	34.8	4.9
45	5	1.44E-06	7.0	3.08E-07	32.5	4.7
55	1	1.54E-06	6.5	3.20E-07	31.2	4.8
55	3	1.78E-06	5.6	3.70E-07	27.0	4.8
55	5	1.84E-06	5.4	3.77E-07	26.6	4.9
65	1	1.59E-06	6.3	5.55E-07	18.0	2.9
65	3	1.91E-06	5.2	7.05E-07	14.2	2.7
65	5	2.01E-06	5.0	6.93E-07	14.4	2.9



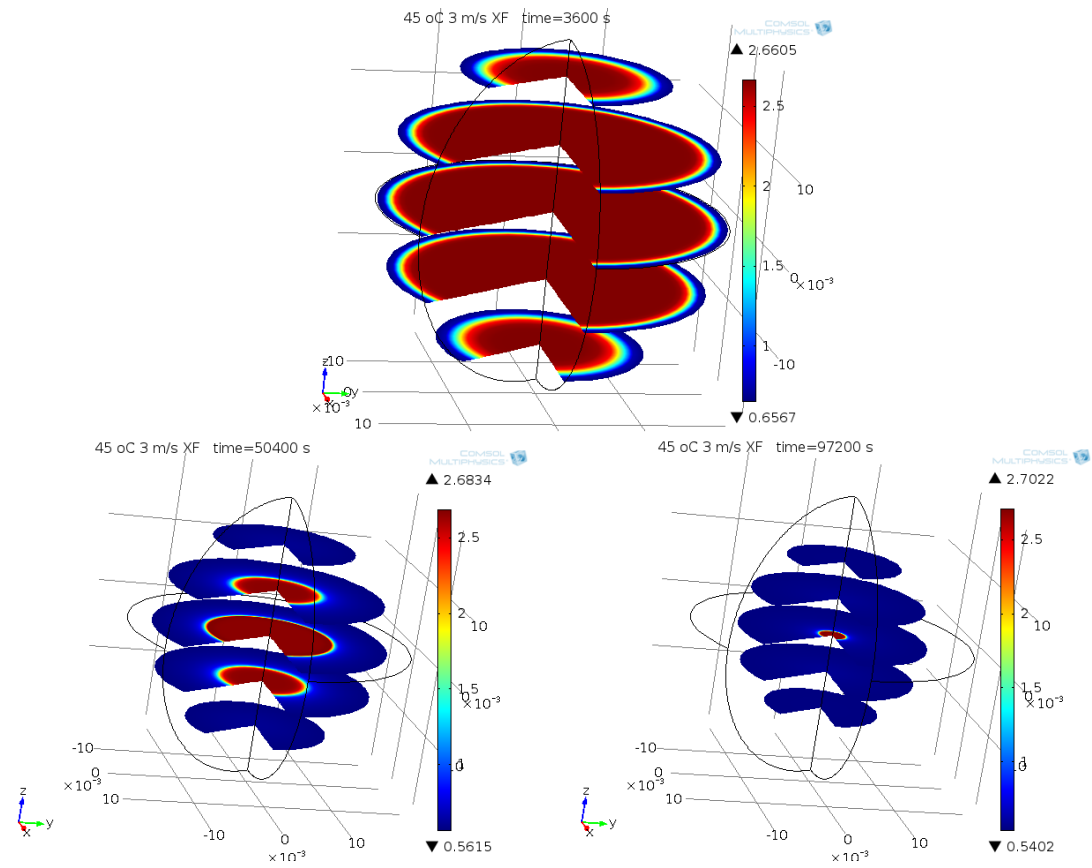
**Σχήμα 24:** Πηλίκο μεταβολής του  $k_m$  μεταξύ αποφλοιωμένων και μη συναρτήσεως της θερμοκρασίας ξήρανσης.



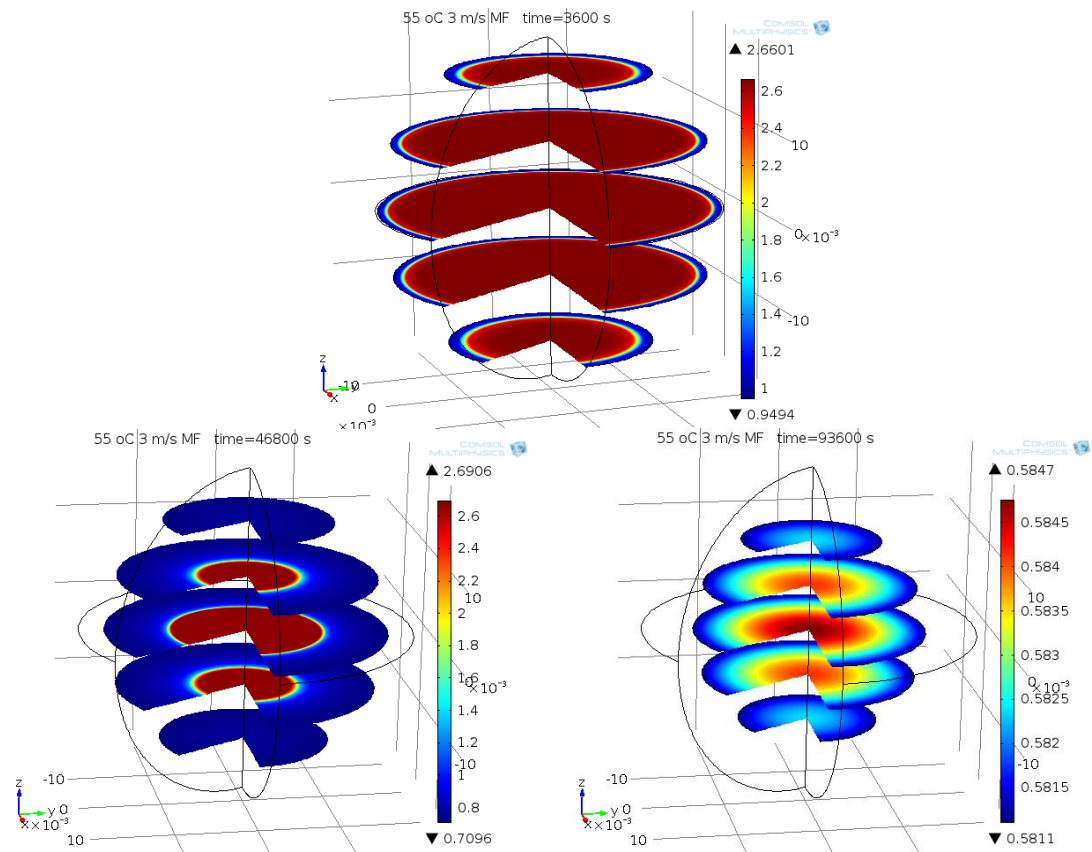
Στα Σχήματα 25-30 παρουσιάζονται τρισδιάστατες απεικονίσεις της μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης στο υπολογιστικό χωρίο αποξηραινόμενων σύκων με και χωρίς φλοιό για τρεις ενδεικτικές συνθήκες ξήρανσης (45 °C, 3.0 m/s; 55 °C, 3.0 m/s; 65 °C, 3.0 m/s) και για τρεις διακεκριμένους χρόνους (αρχή, μέση και τέλος) ξήρανσης. Οι απεικονίσεις αυτές προέρχονται από την περιστροφή του δισδιάστατου υπολογιστικού χωρίου και την απεικόνιση των μεταβολών της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε πέντε επίπεδα διατασσόμενα παράλληλα του ισημερινού επιπέδου του φρούτου. Οι απεικονίσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των μεταβολών της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης εφόσον δίνουν πολύ καλύτερη εκτίμηση των μεταβολών αυτών στον τρισδιάστατο χώρο από ότι μια δισδιάστατη απεικόνιση.



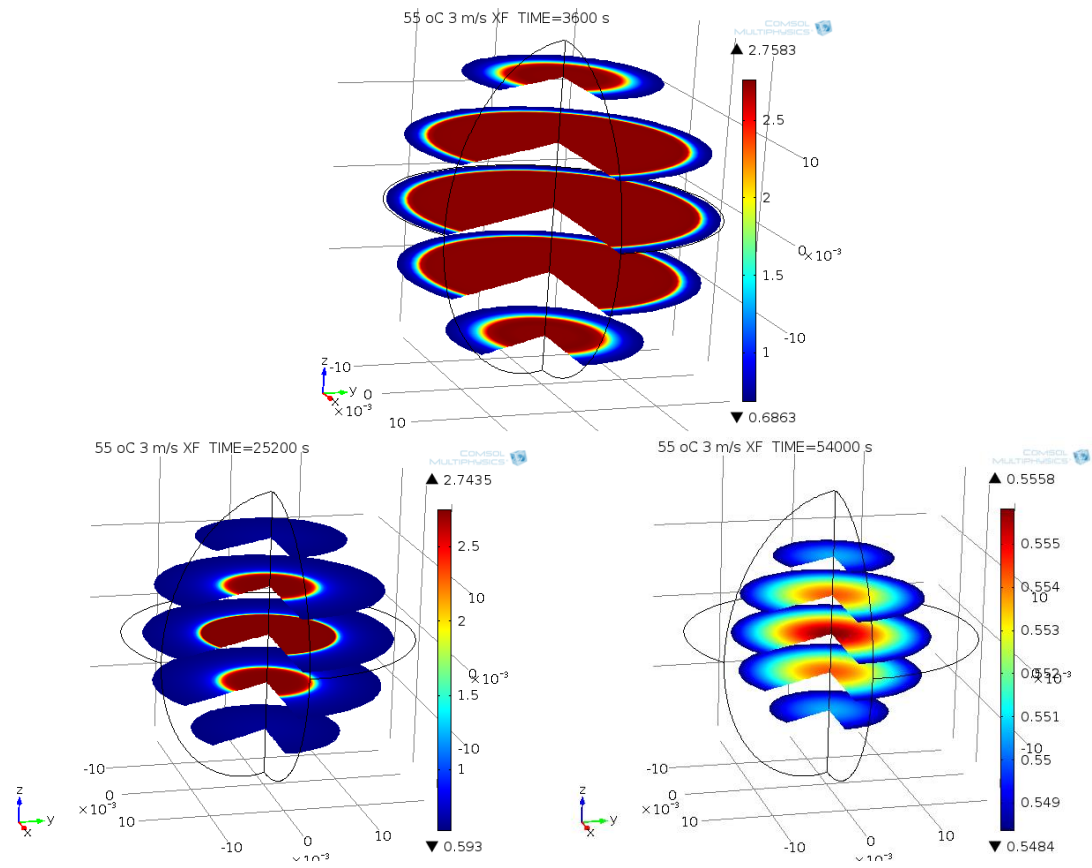
**Σχήμα 25:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε 3 χρόνους ξήρανσης (αρχή, μέση, τέλος) μη αποφλοιωμένων σύκων (45 °C, 3 m/s)  
 $MC_o=3.13 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$   $MC_f=0.69 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$ .



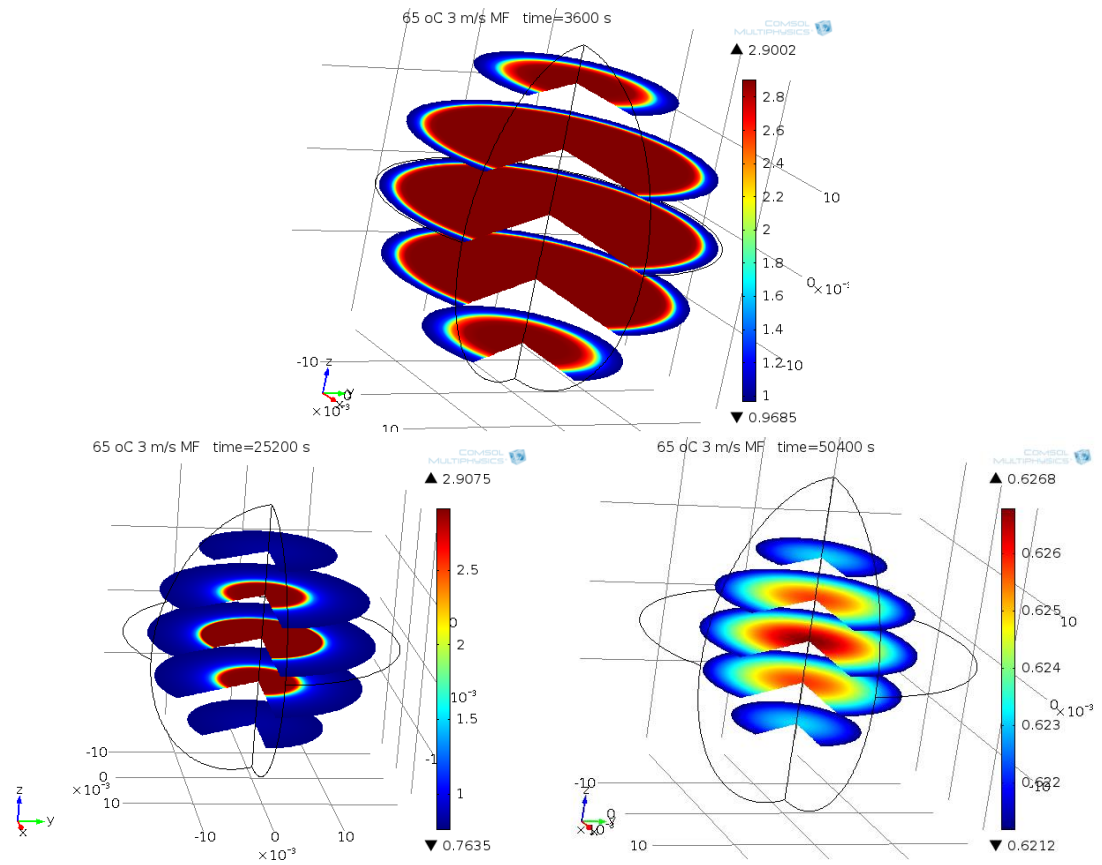
**Σχήμα 26:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε 3 χρόνους ξήρανσης (αρχή, μέση, τέλος) αποφλοιωμένων σύκων (45 °C, 3 m/s)  
 $MC_o=2.66 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$   $MC_f=0.53 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$ .



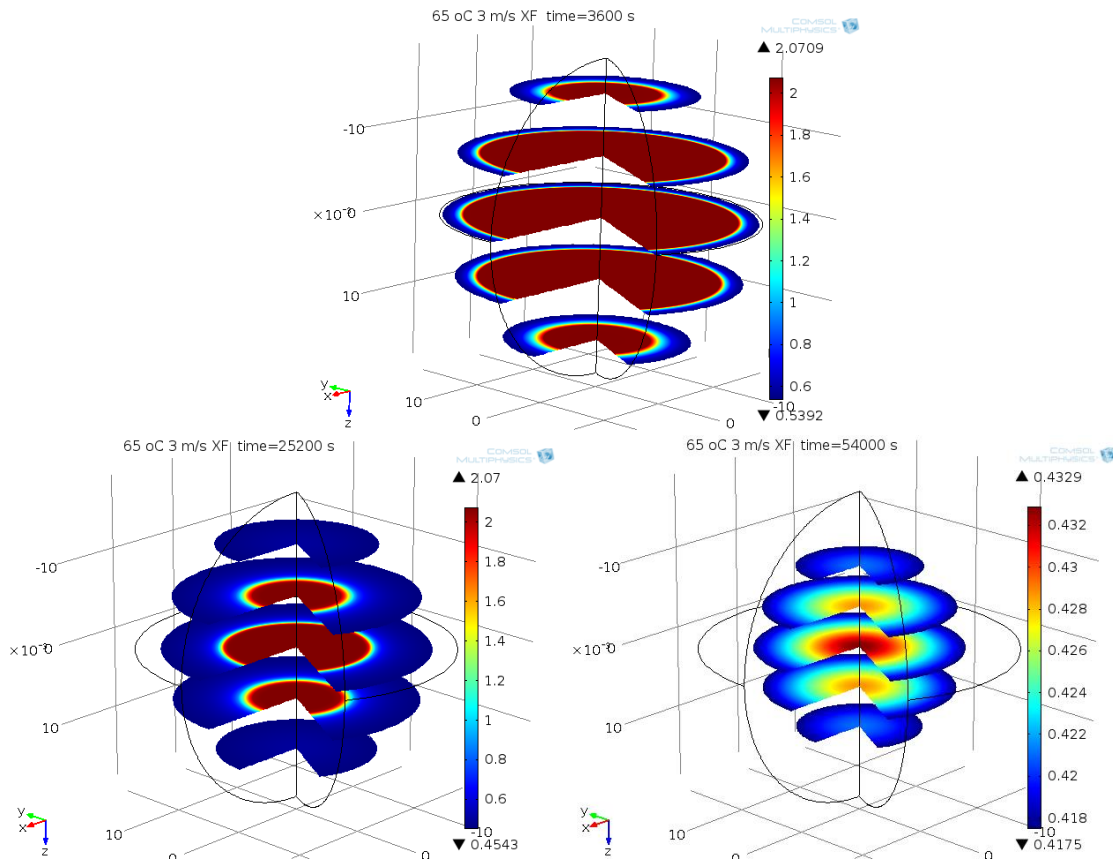
**Σχήμα 27:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε 3 χρόνους ξήρανσης (αρχή, μέση, τέλος) μη αποφλοιωμένων σύκων (55 °C, 3 m/s)  
 $MC_o=2.66 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$   $MC_f=0.55 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$ .



**Σχήμα 28:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε 3 χρόνους ξήρανσης (αρχή, μέση, τέλος) αποφλοιωμένων σύκων (55 °C, 3 m/s)  
 $MC_o=2.74 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$   $MC_f=0.54 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$ .



**Σχήμα 29:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε 3 χρόνους ξήρανσης (αρχή, μέση, τέλος) μη αποφλοιωμένων σύκων (65 °C, 3 m/s)  $MC_o=2.9 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$   $MC_f=0.59 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$ .



**Σχήμα 30:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιεχόμενης υγρασίας και της συρρίκνωσης σε 3 χρόνους ξήρανσης (αρχή, μέση, τέλος) αποφλοιωμένων σύκων (65 °C, 3 m/s)  $MC_o=2.07 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$   $MC_f=0.41 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$ .

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο βασικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη ενός απλουστευμένου υπολογιστικού μοντέλου για την επίλυση ενός αντίστροφου προβλήματος υπολογισμού του συντελεστή διάχυσης, του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς μάζας και της επιφανειακής αντίστασης κατά την ξήρανση ολόκληρων αποφλοιωμένων και μη σύκων κάτω από διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης συνυπολογίζοντας και τη μεταβολή του υπολογιστικού χωρίου λόγω συρρίκνωσης των αποξηραίνόμενων σύκων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο υπολογιστικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προβλέπει με ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα ξήρανσης εφόσον το υπολογιζόμενο ΜΣΣ σε όλες τις περιπτώσεις δεν ξεπερνά το 2.2%. Ο υπολογιζόμενος μέσος συντελεστής διάχυσης κυμάνθηκε μεταξύ  $2.4-4.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  για τα αποφλοιωμένα σύκα και  $1.4-4.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  για τα μη αποφλοιωμένα σύκα. Από τη διαδικασία βελτιστοποίησης υπολογίστηκε ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς μάζας και από αυτόν η επιφανειακή αντίσταση στην κίνηση νερού από το εσωτερικό των σύκων προς το περιβάλλον. Η μεταβολή των σχετικών επιφανειακών αντιστάσεων (λόγος των μη αποφλοιωμένων προς τα αποφλοιωμένα σύκα,  $\Gamma_{peel|MF}/\Gamma_{peel|XF}$ ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία ξήρανσης και όχι από την ταχύτητα του αέρα ξήρανσης. Ο

υπολογισμός του λόγου  $\Gamma_{peel|MF}/\Gamma_{peel|XF}$  έδειξε ότι μεταξύ των 45 και 55 °C δεν παρουσιάστηκε κάποια σημαντική μεταβολή (η επιφανειακή αντίσταση των μη αποφλοιωμένων σύκων ήταν περίπου 5-πλασια των αποφλοιωμένων) αντιθέτως μεταξύ των 55 και 65 °C η σχέση αυτή μειώθηκε σταδιακά στο ήμισυ γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σε μείωση της επιφανειακής αντίστασης του φλοιού στα μη αποφλοιωμένα σύκα.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AOAC, (1997): *Official Methods of Analysis, 16th ed.* Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC
- Askar, A., Heikal, Y., Ghonaim, S.M., Abdel-Fadeel, M.G., Ali, A. M., and Abd El-Gaied, I.O. (1996): *Osmotic and solar dehydration of peach fruits*. *Fruit Processing*, 7: 258–262.
- Babalís, S.J. and Belessiotis, G.V. (2004): *Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs*. *Journal of food engineering*, 65: 449-458.
- Bakker-Arkema, F.W., Lerew, L.E., De Boer, S.F and Roth, M.G. (1974): *Grain dryer simulation*. Research report 224, Michigan State University, Agricultural Experiment Station, East Lansing, MI, USA
- Barbosa-Canovas, G.V. and Vega-Mercado, H. (1996): *Dehydration of foods*. Springer Science and business media, 320pp.
- Barta, J. (2006): *Fruit Drying Principles*. In: Y.H. Hui (editor), *Handbook of fruits and fruit processing*. Blackwell Publishing, Iowa, pp. 81-94.
- Berinstain C.I., Azuara, E., Cortes, R., and Garcia, H. S. (1990): *Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings*. *International Journal of Food Science and Technology*, 25: 576–582.
- Bhandari, R.B. and Adhikari, P.B. (2008): *Water activity in food processing and preservation*. In: D.X. Chen and A.S. Mujumdar (eds) *Drying Technologies in food processing*. Blackwell Publishing, Ltd. Oxford, UK, pp. 55-89.
- Brennan, G.J., (2006): *Evaporation and Dehydration*. In: G.J Brennan (Editor), *Food Processing Handbook*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co.kGaA, Weinheim, Germany, pp 71-124.
- Brunauer, S., Emmett, H.P. and Teller, E. (1938): *Adsorption of gases in multi-molecular layer*. *Journal of American Chemistry Society*, 60: 309-319.
- Caglar A., Togrul I.T., Togrul H. (2009): *Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying*. *Food and Bioproducts Processing*, 87: 292–300.
- Celma A.R., Cuadros F., López-Rodríguez F. (2009): *Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process*. *Food and Bioproducts Processing*, 87: 282-291.
- Chen, H., Bradley, P.M., Rong, Y.M (1999): *Modelling coupled heat and mass transfer for onvection coking chicken patties*. *Journal of food engineering*, 42:139-146.



- Chen, X.D. (2007): *Moisture diffusivity in food and biological materials*. *Drying Technology*, 25(7–8): 1203–1213.
- Cihan, A., Kahveci, K. and Hacıhafizoglu, O. (2007): *Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice*. *Journal of Food Engineering*, 79: 293–298.
- Corrêa, P.C., Oliveira G.H.H., Botelho F.M., Goneli A.L.D. and Carvalho F.M. (2010): *Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of coffee (Coffea arabica L.) during the drying process*. *Revista Ceres* 57: 595-601
- Corzo O., Bracho N., Alvarez C. (2008): *Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying*. *Journal of Food Engineering*, 87: 479-484.
- Couriel, B. (1980): *Freeze drying: past, present, and future*. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 34(5), 352-357.
- Crapiste, G.H., Whitaker, S. and Rostein, E. (1988): *Drying of cellular material*. *Chemical engineering science*, 43(11): 2923-2936.
- Crisosto, H., Ferguson, L., Bremer, V., Stover, E. and Colelli, G. (2011): *Fig (Ficus carica L.)*. In: E.M. Yahia, *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*, vol.3. Woodhead Publishing Ltd.
- Crisosto, C.H. and Kader A.A. (2014): *Fig*. Internet address: [www.ba.ars.usda.gov/hb66/fig.pdf](http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/fig.pdf).
- Cussler, E.L. (2007): *Diffusion Mass Transfer in fluid systems*, 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge University Press, New York, 655 pp
- Da Silva, C.K.F., Da Silva, Z.E., Mariani, V.C. (2009): *Determination of the diffusion coefficient of dry mushrooms using the inverse method*. *Journal of Food Engineering*, 95: 1–10.
- Diamante L. M. and Munro P. A. (1993): *Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices*. *Solar Energy*, 51(4):271–276.
- Donea J., Huerta A., Ponthot J.Ph. and Rodriguez-Ferran A. (2004): *Arbitrary Lagrangian–Eulerian Methods (ch.14)*. In: E. Stein, R. de Borst and T. J. R. Hughes (eds) *Encyclopedia of Computational Mechanics*. John Wiley & Sons Ltd, New York, pp. 1-25.
- Doymaz, I. (2004): *Convective air drying characteristics of thin layer carrots*. *Journal of Food Engineering*, 61: 359–364.
- Doymaz, I. (2007): *Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry*. *Journal of food engineering*, 78: 591-596

- Driscoll, R. (2004): *Food dehydration*. In: J.S. Smith and Y.H. Hui (eds) *Food processing principles and applications*. Blackwell Publishing, Iowa, USA, pp.31-44
- Ertekin, C. and Yaldiz O. (2004): *Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model*. *Journal of Food Engineering*, 63: 349–359.
- Fellows, P.J. (2000): *Food processing technology principles and practice (2<sup>nd</sup> ed)*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 563 pp.
- Gavin. H.P. (2013):*The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems*. University of Duke, 17 pp.
- Gill P.E., Murray W., Saunders M.A. (2005): *SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 47: 99-131.
- Grabowski, S.G., Marcotte, M and Ramaswamy, S.H. (2003): *Drying of fruits, vegetables and spices*. In: A. Chakraverty, A.S. Mujumdar, G.S.V. Raghavan and H.S. Ramaswamy (eds) *Handbook of postharvest technology: cereals, fruits, vegetables, tea and spices*. Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 653-695.
- GreekCuisine.com (2008): *Sweet figs*. Internet address: [www.greekcuisine.com/cuisine/](http://www.greekcuisine.com/cuisine/)
- Hadamard, J.(1923): *Lectures on Cauchy's problem in linear differential equations*. Yale University Press, New Haven, CT.
- Hall, C.W. (1987): *The Evolution and Utilization of Mathematical Models of Drying*. *Mathematical Modelling*, 8: 1-812
- Hansen W. (1987): *Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste*. Department of Civil Engineering, The University of Michigan, 70 (5): 323-328
- Hawkes J., and Flink, J. M. (1978): *Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2: 265–284.
- Heldman, D.R. and Singh, R.P. (1981): *Food process engineering (2<sup>nd</sup> ed)*. The AVI Publishing Co. Inc, Westport, Connecticut, 385 pp.
- Heldman, D.R., Hartel, W.R. (1997): *Principles of food processing*. Chapman an Hall, New York.
- Henderson S. M. (1974): *Progress in developing the thin layer drying equation*. *Transactions of the ASAE*, 17:1167–1172.
- Hernandez, J.A., Pavon, G. and Garcia, M.A. (2000): *Analytical solution of mass transfer equation considering shrinjage for modeling food-drying kinetics*. *Journal of food engineering*, 45: 1-10.

- Hii, C.L. and Law, C.L. (2010): *Product quality evolution during drying of foods, vegetables and fruits (ch.6)*. In: S.V. Jangam, C.L. Law and A.S.Mujumdar (eds) *Drying of foods, vegetables and fruits*. ISBN-978-981-08-6759-1, Published in Singapore, pp. 125-144.
- Kahveci, K. and Cihan, A (2007): *Transport phenomena during drying of food materials*. In: V.N. Pletney (editor), *Focus on food engineering research and developments*. Nova Science Publishers, Inc. New York, pp. 13-163.
- Kaleemullah, S. and Kailappan R. (2005): *Modelling of thinlayer drying kinetics of red chillies*. *Journal of Food Engineering*, 76: 531–537.
- Karathanos V. T. (1999): *Determination of water content of dried fruits by drying kinetics*. *Journal of Food Engineering*, 39: 337–344.
- Karel, M. and Heidelbaugh, N.D. (1973): *Recent research and development in the field of low moisture and intermediate moisture foods*. *Critical reviews in food science and nutrition*, 3(3):329-373.
- Karel M and Lund D.B., (2003): *Physical principles of food preservation*. Marcel Dekker Inc., New York, pp.117-166
- Kingsly, A.R.P., Meena, H.R., Jain, R.K. and Singh, D.B. (2007): *Shrinkage of ber (Zizyphus Mauritian L.) fruits during sun drying*. *Journal of food engineering*, 79: 6-10.
- Kowar R. (2013): *Analysis of a casual diffusion model and its backwards diffusion problem*. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 400: 222-238
- Lazarides H. N., Gekas V., and Mavroudis N. (1997): *Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing*. *Journal of Food Engineering*, 31, 315–324.
- Marsily G.DE, (1991): *Stochastic description of porous media*. In: J. Bear and J-M. Buchlin (eds) *Modelling and Applications of Transport Phenomena in Porous Media*, Springle Science & Business Media, B.V., pp. 343-370
- Maskan, M. (2001): *Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying*. *Journal of Food Engineering*, 48(2): 169-175.
- Mauro M.A. and Menegalli F.C. (1995): *Evaluation of diffusion coefficients in osmotic concentration of banana*. *International Journal of Food Science and Technology*, 30: 199–213
- Mayor L. and Sereno A.M. (2004): *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*. *Journal of food engineering*, 61: 373-386
- McCabe, W., Smith, J. and Harriot P. (2008): *Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής 6η Έκδοση*. Εκδ.Τζιόλα, 1248 σελ.

- Mota C.L., Luciano C., Dias A., Barroca M.J., Guinéa R.P.F. (2010): *Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation*. Food and Bioproducts Processing, 88: 115-123
- Mujumdar, A.S., (1997): *Drying fundamentals*. In: C.G.J.Baker (editor) Industrial drying of foods. Blackie academic and professional, London, pp. 7-30.
- Mujumdar, A.S. (2006): *Principles, classification and selection of dryers*. In: A.S. Mujumdar (editor) Handbook of industrial drying (3<sup>rd</sup> ed.) Taylor and Francis Group LLC, Boca Raton, Florida, pp 3-30.
- Mulet (1994): *Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes*. Journal of Food Engineering, 22:329–348.
- Olivas-Vargas, R., Molina-Corral, F.J., Pere-Hernandez, A. and Ortega-Rivas, E (2003): *Modeling dehydration kinetics and reconstitution properties of dried Jalapeno Pepper (ch.11)*. In: J.Welti-Chanes, J.F.Velez-Ruiz and G.V. Barbosa-Canovas, Transport phenomena in food processing. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, pp. 169-182.
- Ozsisik, M.N.O. and Orlande, H.R.B. (2000): *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. Taylor and Francis, New York
- Pakowski, Z. and Mujumdar, A.S. (2006): *Basic process calculations and simulations in drying*. In: A.S. Mujumdar (editor) Handbook of industrial drying (3<sup>rd</sup> ed). Taylor and Francis Group LLC, Boca Raton, Florida, pp. 54-78.
- Pessoa, LPF., Mendes, FM., Queiroz, ME., Vieira de Melo, SAB. and Lee Nelson, D. (2007): *Distillation and drying*. In: Y.H. Hui (editor), Handbook of food products manufacturing. John Wiley and sons, Inc. New Jersey, pp 157-168.
- Pham, Q.T., Bulens, I., Ho, T.Q., Verlinde, B.E., Verboven, P. and Nicolai, B. (2009): *Simultaneous measurement of ethane diffusivity and skin resistance of 'Jonica' apples by efflux experiment*. Journal of food engineering, 95: 471-478.
- Piga, A., Pinna, I., Ozer, K.B., Aggabio, M., Aksoy, U. (2004): *Hot air dehydration of figs (Ficus carica L.): drying kinetics and quality loss*. International Journal of Food Science and Technology, 39: 793-799.
- Potter, N.N. and Hotchkiss, H.J. (1995): *Food science*. Springer, New York, 608 pp.
- Preston, K.A. and Osnas, J.L.D. (2013): *Figs and Mulberries, Inside and Out*. Internet address: [www.soiledandseeded.com/magazine/issue09/](http://www.soiledandseeded.com/magazine/issue09/)
- Qi H., Sharma S. K., and Le Maguer M. (1999): *Modeling multicomponent mass transfer in plant material in contact with aqueous solutions of sucrose and sodium chloride during osmotic dehydration*. International Journal of Food Properties, 2: 39–54.

- Quintero-Ramos, A., De La Veja, C., Hernandez, E., and Anzaldúa- Morales, A. (1993): *Effect of conditions of osmotic treatment on the quality of dried apple dices*. Aiche Symposium Series, 89: 108–113.
- Rahman M.S., (2007): *Food preservation: Overview*. In: MS. Rahman (Editor), *Handbook of food preservation (2<sup>nd</sup> ed)*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp.3-19.
- Rahman, M.S. and Labuza, P.T. (2007): *Water activity and food preservation*. In: M.S. Rahman (editor) *Handbook of food preservation (2<sup>nd</sup> ed)*. CRC Press, Boca Raton, Florida pp.447-476.
- Rahman, SM and Perera, OC. (2007): *Drying and food preservation*. In: MS. Rahman (Editor), *Handbook of food preservation (2<sup>nd</sup> ed)*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp: 403-432.
- Ramaswamy, H and Marcotte, M. (2006): *Food processing Principles and applications*. Taylor and Francis Group LLC, Boca Raton, Florida, 419pp.
- Ramos, I.N., Miranda, J.M.R., Brandao, T.R.S., Silva, C.L.M. (2010): *Estimation of water diffusivity parameters on grape dynamic drying*. Journal of Food Engineering, 97: 519–525.
- Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S. and Niranjana, K. (1997). *Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration*. Journal of Food Engineering, 31, 423–432.
- Ratti, C. (1994): *Shrinkage during drying of foodstuffs*. Journal of food engineering, 23: 91-105.
- Ratti, C. and Mujumdar, A.S. (2005); *Drying of fruits*. In: D.M. Barrett, L.Somogyi and H. Ramaswamy (eds) *Processing fruits science and technology*. CRC Press, Boca Raton, Florida pp.127-161.
- Ruiz-Lopez, I.I. and Garcia-Alvarado, M.A. (2007): *Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity*. Journal of food engineering, 79: 208-216.
- Ruiz-López, I.I.; Ruiz-Espinosa, H.; Arellanes-Lozada, P.; Bárcenas- Pozos, M.E.; García-Alvarado, M.A. (2012): *Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products*. Journal of Food Engineering, 108: 427–435.
- Sabarez, H.T. (2012): *Computational modeling of the transport phenomena occurring during convective drying of prune*. Journal of food engineering, 111:279-288.
- Sacilik, K. and Elicin A.K. (2005): *The thin layer drying characteristics of organic apple slices*. Journal of Food Engineering, 73: 281–289.

- Salunke, DK., Bolin, HR. and Reddy NR. (1991): *Storage, processing and nutritional quality of fruits and vegetables. Volume 1*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp.323.
- Saravacos, D.G. and Maroulis, B.Z. (2001): *Transport properties of foods*. Marcel Dekker, Inc., New York, 429 pp.
- Schotsmans, W., Verlinden, B.E., Lammertyn, J., Peirs, A., Janksok, P.T., Scheerlink, N., Nicolai, B.M. (2002): *Factors affecting skin resistance measurements in pipfruit*. *Postharvest Biology and Technology*, 25: 169–179.
- Shahari N.A. (2012): *Mathematical Modelling of Drying Food Products: Application to Tropical Fruits*. Ph.D. University of Nottingham, 247 pp.
- Sharaf-eldeen Y. I., Blaisdell J. L. and Hamdy M. Y. (1980): *A model for ear corn drying*. *Transaction of the ASAE*, 1980, 23:1261–1271
- Simal, S., Rosello, C., Berna, A. and Mulet, A. (1998): *Drying of shrinking cylinder-shaped bodies*. *Journal of food engineering*, 37:423-435.
- Singh, B.; Kumar, A.; Gupta, A.K. (2007): *Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes*. *Journal of Food Engineering*, 79: 471–480.
- Singh, R.P and Heldman, D.R. (2009): *Introduction to food engineering (4<sup>th</sup> ed)*. Elsevier Inc, California, 864pp.
- Sujata, J. and Das, H. (2007): *Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake*. *Journal of food engineering*, 79: 92-99.
- Thompson, A.K. (2003): *Fruit and vegetables: harvesting, handling and storage*. Blackwell Publishing, Ltd, Iowa, USA, 482pp.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. (2002): *Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers*. *Journal of Food Engineering*, 55: 209–216.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. (2003): *Modeling of drying kinetics of single apricot*. *Journal of Food Engineering*, 58(1): 23–32.
- Toledo, T.R. (2007): *Fundamentals of food process engineering (3<sup>rd</sup> ed)*. Springer Science and business Media, LLC, New York, 584 pp.
- University of Oxford (2015): *Unstructured and multi-block structured mesh solvers*. Internet address: [www.eng.ox.ac.uk/thermofluids/research/computational-fluid-dynamics/unstructured-and-multi-block-structured-mesh-solvers](http://www.eng.ox.ac.uk/thermofluids/research/computational-fluid-dynamics/unstructured-and-multi-block-structured-mesh-solvers).
- Van der Sman, R.G.M. (2003): *Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods*. *Journal of food engineering*, 60: 383-390.

- Wang C. Y. and Singh R. P. (1978): *A single layer drying equation for rough rice*. ASAE, paper no. 3001.
- Wang J., Gadala M.S. (1997): *Formulation and survey of ALE method in nonlinear solid mechanics*. Finite Elements in Analysis and Design, v.24, 4: 253-269
- Wang, Z., J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu and X. Hu. (2006): *Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace*. Journal of Food Engineering, 40: 39–46.
- Whith G.M., Bridges T.C., Loewer O.J. and Ross I.J. (1978): *Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions*. ASAE paper no. 3052.
- Wihelm, L.R., Suter, D.A. and Brusewitz, G.H. (2004): *Drying and dehydration (ch.10)*. In: American Society of Agricultural Engineers (eds) Food and Process Engineering Technology, St Joseph, Michigan, pp: 259-284.
- Wikiversity (2010): *Nonlinear finite elements/Lagrangian and Eulerian descriptions*. Internet address: <https://en.wikiversity.org/wiki/>.
- Xanthopoulos G., Lambrinos Gr., and Manolopoulou H. (2007a): *Evaluation of thin layer Models for mushroom (Agaricus Bisporus) Drying*. Drying technology, 25: 1471-1481.
- Xanthopoulos G., Oikonomou N. and Lambrinos G. (2007b): *Applicability of a single layer drying model to predict the drying rate of whole figs*. Journal of food engineering, 81: 553-559.
- Xanthopoulos G., Yanniotis S., and Lambrinos Gr. (2009): *Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs*. Drying Technology, 27(3): 502-512
- Xanthopoulos G., Yanniotis S., and Lambrinos Gr. (2010): *Study of the drying behavior in peeled and unpeeled whole figs*. Journal of food engineering, Elsevier, 97(3), 419-424
- Xanthopoulos G., Yanniotis, S. and Talaiporou E., (2012a): *Influence of salting on drying kinetics and diffusivity of tomato halves*. International Journal of Food Properties, 15(4): 847-863.
- Xanthopoulos, G., Yanniotis, S. and Boudouvis, A.G. (2012b): *Numerical simulation of variable water diffusivity during drying of peeled and unpeeled tomato*. Journal of food science, 77(10): E287-E296
- Xanthopoulos G., Nastas C.V., Boudouvis A.G. and Aravantinos-Karlatos E. (2014): *Color and Mass Transfer kinetics during air drying of pretreated oyster mushrooms (Pleurotus ostreatus spp)*. Drying Technology: An International Journal, 32 (1):77-88.

- Yagcioglu A., Degirmencioglu A. and Cagatay F. (1999): *Drying characteristic of laurel leaves under different conditions*. Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy, Adana, Turkey: Faculty of Agriculture, Cukurova University, pp. 565–569
- Yaldiz O. and Ertekin C. (2001): *Thin layer solar drying of some vegetables*. Drying Technology, 19: 583–596.
- Young D.M. and Kincaid D.R. (2003): *Partial Differential Equations*. Encyclopedia of Computer Science. 4: 1367-1370
- Zhang Q. and Litchfield J.B. (1991): *An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer*. Drying Technology, 9: 383–395.
- Zogzas N. P. and Maroulis Z. B. (1996): *Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis*. Drying Technology, 14:1542–1573.
- Αρβανιτογιάννης, ΣΙ. και Μπόσνεα, Λ. (2001): *Στοιχεία τεχνολογίας, μεταποίησης και συσκευασίας τροφίμων*. University Studio Press, 363 σελ.
- Βασιλακάκης, Δ.Μ. (2014): *Μετασυλλεκτική φυσιολογία, μεταχείριση οπωροκηπευτικών και τεχνολογία. Διαιτητική αξία οπωροκηπευτικών*. Εκδόσεις Γαρταγάνης, Θεσσαλονίκη, 586 σελ.
- Καφούρος, Α., Ξανθόπουλος, Γ., Λέντζου, Δ., Αραβαντινός-Καρλάτος, Ε. & Λαμπρινός Γρ. (2013): *Μελέτη των συντελεστών μεταφοράς μάζας, του συντελεστή διάχυσης και των μεταβολών της μικροδομής κατά την τεχνητή ξήρανση βερίκοκου*. Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Ένωση Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Βόλος, σελ 298-303.
- Λυγερού Β., Ασημακόπουλος Κ., Αραμπατζής Γ. (2005): *Μεταφορά Μάζας*. Εκδ.Παπασωτηρίου, 349 σελ.
- Μαρκάτος Ν., Ασημακόπουλος Δ. (1995): *Υπολογιστική Ρευστομηχανική*. Εκδ. Παπασωτηρίου, 222 σελ.
- Μπλούκας, Γ.Ι. (2004): *Επεξεργασία & συντήρηση τροφίμων*. Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης Α.Ε., Αθήνα, 500 σελ.
- Μπουντουβής Α. (1992): *Υπολογιστική Μηχανική με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων*. Εκδ. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Ποντίκης, Κ. (1996): *Ειδική δνδροκομία, τόμος Β Ακρόδρυα, Πυρηνόκαρπα*. Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα, 496 σελ.
- Συκική (2009): *Διατροφική αξία σύκου- θρεπτικά χαρακτηριστικά*. Διεύθυνση διαδικτύου: <http://www.sykiki.gr/>