

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση των απωλειών μάζας σε
ψυχροσυντηρούμενα νεκταρίνια με την εφαρμογή
υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Κατσαλήρου Μαρία

Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδρέας Μπουντουβής

Αθήνα 2017

Ευχαριστίες

Η διπλωματική μου εργασία, εκπονήθηκε στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ανδρέα Γ. Μπουντουβή, τον οποίο ευχαριστώ για την ανάθεση και τη βοήθειά του κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ επίσης τον επίκουρο καθηγητή Γιώργο Ξανθόπουλο για τη δυνατότητα συνεργασίας με το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, την παροχή του χώρου και του εξοπλισμού για την διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας και την παροχή πλούσιου επιστημονικού υλικού (βιβλιογραφία, λογισμικό προσομοίωσης κλπ).

Εν συνεχεία, ευχαριστώ θερμά τον κ. Σταθερόπουλο για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή.

Τέλος, είμαι ακόμα περισσότερο ευγνώμων προς την οικογένειά μου και προς ορισμένα φιλικά πρόσωπα που μου παρείχαν υλική και ηθική υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ειδικότερα στο διάστημα της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ψύξη είναι μία διεργασία συντήρησης η οποία συνοδεύεται από απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας του τροφίμου, κυρίως λόγω ελλείμματος πίεσης υδρατμών. Η απώλεια αυτή είναι μη επιθυμητή και οδηγεί σε μείωση της εμπορικής αξίας του προϊόντος. Η απώλεια νερού γίνεται φανερή με τη μείωση της μάζας του φρούτου κατά τη διάρκεια της συντήρησής του και η απώλεια αυτή οφείλεται αφενός στο έλλειμμα της πίεσης των υδρατμών μεταξύ του περιβάλλοντα αέρα και του εσωτερικού του καρπού, και αφετέρου στο φαινόμενο της αναπνοής του τροφίμου.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται ανάλυση των απωλειών νερού και υπολογιστική προσομοίωση του φαινομένου της διάχυσης των υδρατμών στο εσωτερικό του καρπού. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε πειραματικά η ψυχοσυντήρηση νεκταρινιών σε θερμοκρασία 0° C και σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα σχετικής υγρασίας (RH%) 45.6%, 49%, 79% και 95% αντίστοιχα. Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής Comsol Multiphysics 4.3b με το οποίο πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση των απωλειών μάζας. Προσδιορίστηκε ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης του νερού, οι τιμές του οποίου κυμάνθηκαν μεταξύ $1.06 \cdot 10^{-10}$ και $2.48 \cdot 10^{-12}$ (m²/s) και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, οι τιμές του οποίου κυμάνθηκαν μεταξύ $6.29 \cdot 10^{-10}$ και $1.73 \cdot 10^{-10}$ (m/s).

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας k_m , χρησιμοποιείται η τεχνική μη γραμμικής βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt και το πρόβλημα επιλύεται ως αντίστροφο πρόβλημα μεταφοράς μάζας.

Τέλος, γίνεται υπολογισμός μέσω προτυποποίησης του αναπνευστικού ρυθμού και, μέσω αυτού, ποσοτικοποίηση των απωλειών νερού σε σχέση με τη συνολική απώλεια νερού.

ABSTRACT

Cold storage of fruits and vegetables is accompanied by a decrease in their moisture content mainly because of a substantial vapor pressure deficit. This decrease is unwanted since it contributes to the reduction of market value of these products. The loss of moisture content becomes evident via observation of the mass loss of the products during storage time. It is attributed primarily to the difference between the vapor pressure of water inside the product and the vapor pressure of the existing water in the air of the cooler and secondarily to the phenomenon of respiration. This thesis presents a complete analysis of the observed water losses while simulating the diffusion phenomena taking place during the cold storage of nectarines. Specifically, the experiment was conducted in a typical cooler with temperature of 0°C and for four different levels of relative humidity (RH) of atmosphere (45.6%, 49%, 79%, 95%). After the completion of the experiment, the gathered experimental data are used as input for the Comsol Multiphysics 4.3b CFD program in order to simulate the mass losses. The value of the apparent diffusion coefficient of water, D_{eff} , varies from $1.06 \cdot 10^{-10}$ to $2.48 \cdot 10^{-12}$ (m²/s) and the value of the mass transfer coefficient, k_m , ranges between $1.73 \cdot 10^{-10}$ and $6.29 \cdot 10^{-10}$ (m/s). For the calculation of the mass transfer coefficient, the Levenberg-Marquardt technique of non linear optimization was used and the problem was solved as an inverse problem of mass transfer. Finally, the respiration rate is modeled and estimated.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΥΠΟΜΝΗΜΑ.....	9
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	13
1.2 Γενικά στοιχεία.....	13
1.2.1 Διάχυση του νερού στα τρόφιμα.....	13
2. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
2.1 Απώλεια Νερού.....	17
2.1.1 Μηχανισμοί Διάχυσης.....	18
2.1.2 Περιγραφή του προβλήματος.....	19
2.1.3 Το αντίστροφο πρόβλημα.....	19
2.2 Περιγραφή του λογισμικού προσομοίωσης-Comsol Multiphysics.....	24
2.2.1 Γενικά στοιχεία.....	25
2.2.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων(Finite Element Method).....	26
2.2.3 Η Μέθοδος Levenberg-Marquardt	27
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	27
3.1 Περιγραφή του πειράματος.....	28
3.1.1 Εξοπλισμός.....	29
3.2 Γεωμετρική αναπαράσταση φρούτου.....	35
3.3 Μοντέλα και αρχικές συνθήκες.....	36
3.3.1 Διάχυση.....	36
3.3.2 Βελτιστοποίηση.....	39
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
4.1 Εκτίμηση επιφάνειας και όγκου.....	42

4.2 Απώλειες μάζας.....	42
4.3 Φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} και συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m	44
4.3.1 Συντήρηση σε σχετική υγρασία θαλάμου(45,6%).....	48
4.3.2 Συντήρηση σε σχετική υγρασία 49%.....	51
4.3.3 Συντήρηση σε σχετική υγρασία 79%.....	55
4.3.4 Συντήρηση σε σχετική υγρασία 95%.....	58
4.4 Αναπνοή, Υπολογισμός, Προτυποποίηση και ποσοτικοποίηση παραγόμενου νερού	61
4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	64
5.ΣΥΝΟΨΗ.....	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

J_v η πυκνότητα της ροής (kg_{H_2O}/m^2).

p_i η πίεση στα μεσοκυττάρια διαστήματα του προϊόντος (Pa)

p_{amb} η πίεση της ατμόσφαιρας συντήρησης (Pa)

T_{amb} η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας συντήρησης (K)

R_{vap} η σταθερά των υδρατμών (J/kg·K)

A η επιφάνεια του προϊόντος (m^2)

r η αντίσταση του οριακού στρώματος(m)

J_{Az} ροή διάχυσης του συστατικού A κατά τη διεύθυνση z ($mol/m^2\cdot s$)

D_{AB} η διαχυτότητα του A στο B (m^2/s)

C_A η συγκέντρωση του A (mol/m^3)

$\frac{dC_A}{dz}$ η βαθμίδα μεταβολής της συγκέντρωσης του A κατά τη διεύθυνση z

J_A η ροή διάχυσης του A($mol/m\cdot s$)

c η συνολική συγκέντρωση(mol/m^3)

∇y_A το μοριακό κλάσμα του A.

N_A ρυθμός μεταφοράς μάζας ($mol/m^2\cdot s^2$)

δ πάχος οριακού στρώματος (m)

C_{As} η συγκέντρωση στο εσωτερικό άκρο του οριακού στρώματος(mol/m^3)

$C_{A\infty}$ η συγκέντρωση του A στο εξωτερικό άκρο του οριακού στρώματος (mol/m^3)

k_m ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (m/s)

r η ακτίνα του προϊόντος (m)

t χρόνος (h)

D_{eff} ο φαινόμενος συντελεστής μεταφοράς(m^2/s)

$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t}$ η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου

M_o η αρχική περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος(kg_w/kg_{ab})

M_e η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος στην ισορροπία ($\text{kg}_w/\text{kg}_{db}$)
 \overline{M}_t η μέση τιμή της περιεχόμενης υγρασίας του προϊόντος την τυχαία χρονική στιγμή t ($\text{kg}_w/\text{kg}_{db}$)
 r_e η ισοδύναμη ακτίνα (m)
 a η ακτίνα της έλλειψης στο μεγάλο άξονα (m)
 b η ακτίνα της έλλειψης στο μικρό άξονα (m)
 M η τελική περιεχόμενη υγρασία ($\text{kg}_w/\text{kg}_{db}$)
 M_w η περιεχόμενη υγρασία ($\text{kg}_w/\text{kg}_{db}$)
 M_o^1 το υγρασιακό περιεχόμενο του πρώτου ροφητικού στρώματος ($\text{kg}_w/\text{kg}_{db}$)
 H_o η ενθαλπία ρόφησης του μονομοριακού στρώματος (kJ/mol)
 H_n η ενθαλπία ρόφησης για τα πολλαπλά στρώματα κάτω από το μονομοριακό (kJ/mol)
 H η ενθαλπία συμπύκνωσης του καθαρού νερού (kJ/mol)
 RR ο αναπνευστικός ρυθμός ($\text{ml } CO_2/100g \cdot h$)
 $\frac{\Delta c}{\Delta t}$ η μεταβολή της συγκέντρωσης CO_2 προς τον χρόνο (ppm/h)
 V_C ο όγκος του κυκλώματος της συσκευής μέτρησης CO_2 (ml)
 V_{fr} ο όγκος του προϊόντος (ml)
 WL η απώλεια νερού σε $\text{g } H_2O/h \cdot \text{kg}$ νωπού καρπού
 R_{ext} η εξωτερική ακτίνα του προϊόντος (m)
 R_{stone} η ακτίνα του πυρήνα (m)
 c_b η συγκέντρωση της υγρασίας στην εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος (mol/m^3)
 c_i η συγκέντρωση της υγρασίας στο εσωτερικό του προϊόντος (mol/m^3)
 ρ η πυκνότητα του προϊόντος (kg/m^3)
 M_{water} η μάζα του νερού ανά mole νερού ($0,018 \text{ kg}/\text{mole}$)
 V ο όγκος του προϊόντος (m^3)

¹ Ο δείκτης είναι γράμμα σε αντίθεση με το M_o που ο δείκτης είναι αριθμητικός.

S η επιφάνεια του προϊόντος (m^2)

λ ειδική θερμική αγωγιμότητα του προϊόντος ($W/m \cdot K$)

$\frac{\partial T}{\partial r}$ η βαθμίδα μεταβολής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά μήκος της ακτίνας (K/m)

h_{ext} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο εξωτερικό οριακό στρώμα ($W/m^2 \cdot K$)

H_{vap} η ενθαλπία εξάτμισης (J/mol)

$c_{sat}(T)$ η συγκέντρωση των υδρατμών στον περιβάλλοντα αέρα σε συνθήκες κορεσμού (mol/m^3)

c_{amb} η συγκέντρωση των υδρατμών στον περιβάλλοντα αέρα (mol/m^3)

k_{tot} ο συνολικός σταθερός συντελεστής μεταφοράς μάζας στην επιφάνεια του προϊόντος (m/s)

k_{ext} ο συντελεστής μεταφοράς μάζας στο εξωτερικό οριακό στρώμα (m/s)

k_{skin} ο συντελεστής μεταφοράς μάζας στην επιδερμίδα (m/s)

TR_{mnet} ο ρυθμός διαπνοής που οφείλεται στο έλλειμμα πίεσης υδρατμών ($g_{H_2O} / kg \cdot h$)

TR_m ο ρυθμός διαπνοής ανά μονάδα μάζας ($g_{H_2O} / kg \cdot h$)

Αδιάστατα Μεγέθη

F_o ο αριθμός Fourier

a_w η ενεργότητα του νερού

k η σταθερά ρόφησης

C η σταθερά ρόφησης

k_o ο εντροπικός προεκθετικός παράγοντας

C_o ο εντροπικός προεκθετικός παράγοντας

MR η αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία

ΔM το ποσοστό των απωλειών μάζας(%)

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των απωλειών υγρασίας κατά την ψυχοσυντήρηση νεκταρινιών, αλλά και η προσομοίωση του φαινομένου της διάχυσης των υδρατμών στο εσωτερικό του καρπού. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη του φαινομένου σε νεκταρίνια ποικιλίας Big Top και σε θερμοκρασία συντήρησης 0°C για τέσσερα διαφορετικά επίπεδα σχετικής υγρασίας του θαλάμου συντήρησης (45.6%, 49%, 79%, 95%). Στη συνέχεια έγινε προτυποποίηση του φυσικού προβλήματος με βάση τις συνθήκες συντήρησης των καρπών, με απώτερο σκοπό τη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων της περιεχόμενης υγρασίας, με αυτές που υπολογίζονται από την προσομοίωση, για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης του συντελεστή διάχυσης για τα διαφορετικά επίπεδα υγρασίας.

1.2 Γενικά στοιχεία

Η μέθοδος της ψυχοσυντήρησης είναι μία από τις παλαιότερες και ευρέως διαδεδομένες μεθόδους διασφάλισης της ποιότητας των τροφίμων, δηλαδή της διατήρησης της γεύσης, της υφής και της θρεπτικής αξίας τους. Η ψυχοσυντήρηση, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών στις οποίες πραγματοποιείται, αναστέλλει την ανάπτυξη μικροοργανισμών και επιβραδύνει την πραγματοποίηση πληθώρας μηχανισμών (διαπνοή) και χημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό του τροφίμου (αναπνοή). Για τη διεργασία αυτή, πρέπει να τηρούνται ορισμένοι κανόνες. Η θερμοκρασία πρέπει να βρίσκεται κάτω των 5 °C κατά περίπτωση, να υπάρχει κατάλληλος έλεγχος της υγρασίας του θαλάμου ψυχοσυντήρησης (συμβατική ψυχοσυντήρηση) και σε ορισμένες περιπτώσεις και έλεγχος της σύστασης της ατμόσφαιρας (O₂, CO₂, N₂) που πραγματοποιείται η συντήρηση (ελεγχόμενη ατμόσφαιρα).

1.2.1 Διάχυση του νερού στα τρόφιμα

Η σημασία της απώλειας του νερού είναι μεγάλη για τον καθορισμό της ποιότητας των συγκομισμένων καρπών, αφού ο καρπός ύστερα από την απομάκρυνση από το μητρικό φυτό, αδυνατεί να την αναπληρώσει λόγω του φαινομένου της διαπνοής κυρίως και της αναπνοής δευτερευόντως. Συνεπώς, οι συγκομισμένοι καρποί παραμένουν φρέσκοι όσο χρονικό διάστημα καθίσταται δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν οι προαναφερθείσες απώλειες. Η απώλεια του νερού πραγματοποιείται σύμφωνα με το μηχανισμό της διάχυσης και οφείλεται κατά κύριο λόγο στο έλλειπα πίεσης υδρατμών ανάμεσα στον περιβάλλοντα αέρα και στο εσωτερικό του προϊόντος (διαπνοής) και λιγότερο, στο φαινόμενο της αναπνοής.

Διαπνοή

Η διαπνοή των νωπών φρούτων, είναι μία διαδικασία μεταφοράς μάζας (υγρασίας) κατά την οποία το εξατμιζόμενο νερό μεταφέρεται από το εσωτερικό του καρπού προς την επιφάνεια αυτού και από εκεί προς τον αέρα που το περιβάλλει. Η διάχυση του νερού στο εσωτερικό του προϊόντος, γίνεται μέσω των μεσοκυττάρων χώρων, καθώς και από τριχοειδή αγγεία επί των κυτταρικών μεμβρανών (aquaporins)-(deGroot BL, Grubmuller H, 2001).

Η αντίστοιχη μεταφορά γίνεται μέσω της επιδερμίδας αλλά και των φακιδίων (τροποποιημένα στομάτια) που βρίσκονται στην επιφάνεια αυτής. Έτσι λοιπόν, η μετασυλλεκτική διάρκεια ζωής για τους καρπούς υψηλής περιεχόμενης υγρασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία του αέρα συντήρησης, η οποία συνιστάται να κυμαίνεται κατά περίπτωση πάνω από 90%.

Για την περιγραφή του μηχανισμού της διαπνοής, χρησιμοποιείται ο Νόμος του Fick (εξ.1) για τη διάχυση (Yehoshua S.B. and Rodon V, 2003).

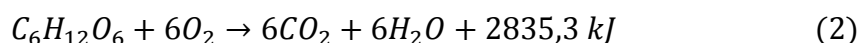
$$J_v = \frac{(p_i - p_{amb}) \cdot A}{R_{vap} \cdot T_{amb} \cdot r} \quad (1)$$

Όπου $p_i - p_{amb}$ το έλλειμμα πίεσης μεταξύ των μεσοκυττάρων διαστημάτων του προϊόντος και της ατμόσφαιρας συντήρησης(Pa), A είναι η επιφάνεια του καρπού (m^2), R_{vap} η σταθερά των υδρατμών ($461,5 \frac{J}{kg \cdot K}$), T η θερμοκρασία σε (K), r η αντίσταση στη διέλευση των υδρατμών από το εσωτερικό του καρπού προς την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα(m) και J η πυκνότητα της ροής (flux) σε $\frac{Kg_{H_2O}}{m^2}$. Όπως φαίνεται, η ροή της μάζας των υδρατμών είναι ανάλογη του της κλίσης $p_i - p_{amb}$ και της ελεύθερης επιφάνειας του προϊόντος A.

Αναπνοή

Η αναπνοή είναι το φαινόμενο της χημικής μετατροπής ενεργειακά πλούσιων οργανικών υποστρωμάτων που βρίσκονται στα κύτταρα των ζωντανών οργανισμών, σε δομικά απλούστερα μόρια (CO_2 και H_2O) και η ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας (εξώθερμη αντίδραση) που καλύπτει τις ανάγκες των κυττάρων. Η αναπνοή επηρεάζει σημαντικά τη διαπνοή και τις συνολικές απώλειες υγρασίας, καθώς κατά τις χημικές διεργασίες και αντιδράσεις που την απαρτίζουν, υπάρχει παραγωγή νερού, CO_2 και θερμότητας η οποία μεταβάλλεται με την ένταση αυτής. Η αντίδραση που περιγράφει την εν λόγω

μετατροπή για την κατανάλωση της γλυκόζης είναι η εξής(Kader and Saltveit, 2003):



Το παραγόμενο από την αντίδραση νερό καθώς και το CO₂ δεν παραμένουν στους ιστούς του προϊόντος, με το νερό να συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στις απώλειες μάζας των φρούτων και λαχανικών.

Ο ρυθμός της αναπνοής ενός προϊόντος, αποτελεί μία καλή ένδειξη αναφορικά με το χρόνο ζωής αυτού στη συντήρηση. Όσο υψηλότερος ο αναπνευστικός ρυθμός, τόσο μικρότερο το χρονικό διάστημα συντήρησης του τροφίμου.

Ο ρυθμός με τον οποίο αναπνέουν τα οπωρολαχανικά μπορεί να εκφραστεί ως η ποσότητα του CO₂ που παράγεται (ml) ανά 100g νωπού προϊόντος και ανά ώρα(h).

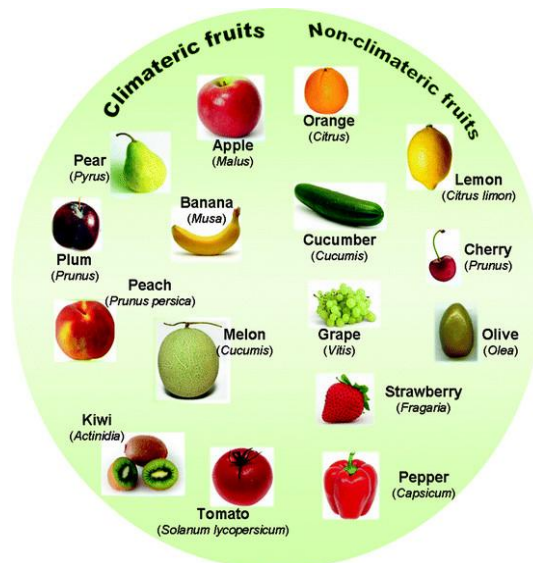
Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπνοή/ αναπνοή

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο είτε εντείνοντάς το είτε παρεμποδίζοντάς το είναι ποικίλοι. Σχετίζονται τόσο με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του προϊόντος όσο και με τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται η συντήρησή του. Ειδικότερα:

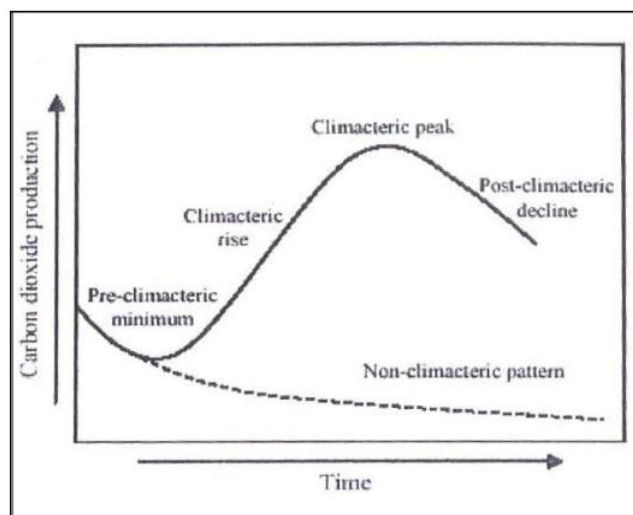
- **Μορφολογικοί Παράγοντες**

Από μελέτες(Jorze E. Lozano, 2006) που έχουν πραγματοποιηθεί, συμπεραίνεται ότι οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απώλεια υγρασίας είναι τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του καρπού, όπως ο λόγος επιφάνειας-όγκου του καρπού, η ύπαρξη ή μη κηρών στην επιδερμίδα του και τέλος το σχήμα του. Προϊόντα με μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας-όγκου, παρουσιάζουν μεγαλύτερο ρυθμό διαπνοής. Τέλος, η αντίσταση της επιδερμίδας του καρπού αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα/φραγμό στην διάχυση του νερού και του διοξειδίου του άνθρακα από το εσωτερικό του καρπού προς τον περιβάλλοντα αέρα.

Άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον αναπνευστικό ρυθμό και δευτερευόντως την απώλεια υγρασίας είναι το είδος του καρπού, όσο αφορά τη διάκρισή τους σε κλιμακτηριακούς και μη. Στους κλιμακτηριακούς (νεκταρίνι, αχλάδι, μήλο κλπ), η ωρίμαση του καρπού σχετίζεται με χαρακτηριστική αύξηση του αναπνευστικού ρυθμού μέχρι που αυτός αποκτά μία μέγιστη τιμή (climacteric peak) και ύστερα μειώνεται σταθερά με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, στους μη κλιμακτηριακούς καρπούς, η ωρίμαση δεν συνοδεύεται από αλλαγή του παρατηρούμενου αναπνευστικού ρυθμού.(βλ. Εικ.1&2)



Εικόνα 1.1 :Χαρακτηριστικοί κλιμακτηριακοί και μη καρποί(Salveit, 2004).



Εικόνα 1.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες αναπνευστικού ρυθμού για κλιμακτηριακούς και μη καρπούς.(Salveit, 2004)

- **Συνθήκες Συντήρησης**

Οι συνθήκες συντήρησης όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του αέρα στο θάλαμο συντήρησης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απώλεια της υγρασίας των προϊόντων.

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα της κατηγορίας αυτής, λόγω της επίδρασής του σε όλους τους τύπους των βιολογικών δράσεων και κατά συνέπεια και στο φαινόμενο της αναπνοής. Η θερμοκρασία προάγει τις απώλειες μέσω εξάτμισης. Η εξάτμιση περιλαμβάνει τη διαφυγή του νερού κυρίως από την επιφάνεια του προϊόντος, ενώ διακυμάνσεις της μπορούν να

προκαλέσουν μεγαλύτερες απώλειες νερού σε σχέση με τις περιπτώσεις στις οποίες η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή. Η μείωση της θερμοκρασίας συντήρησης ενός προϊόντος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αναπνευστικού ρυθμού και την αύξηση της διάρκειας ζωής του προϊόντος.

Επίσης, εξίσου σημαντικό παράγοντα με τη θερμοκρασία συντήρησης, αποτελεί η σχετική υγρασία η οποία συμμετέχει στη διαμόρφωση ελλείμματος πίεσης υδρατμών, το οποίο οδηγεί σε απώλεια νερού.

Τέλος, η έντονη κυκλοφορία αέρα σε έναν κλειστό θάλαμο συντήρησης καθιστά ομοιόμορφη τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο της ατμόσφαιρας, ελαχιστοποιώντας τα φαινόμενα συμπύκνωσης υδρατμών συμβάλλοντας στη διαπνοή (Kojiwano et al., 2013).

2. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την ενότητα, διατυπώνεται η μαθηματική περιγραφή φαινομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μελετώμενο πρόβλημα αναφέρεται στην απώλεια νερού με τη μορφή υδρατμών λόγω διαφοράς της πίεσης μεταξύ του εσωτερικού του καρπού και της ατμόσφαιρας και απώτερος σκοπός είναι η εύρεση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης του νερού (D_{eff}) στον αέρα και του συντελεστή μεταφοράς μάζας, k_m . Η μεταφορά του νερού στο εσωτερικό του καρπού αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα μεταφοράς μάζας και ειδικότερα, ως πρόβλημα διάχυσης. Τέλος, η απώλεια των υδρατμών από τον καρπό προς τον αέρα του θαλάμου συντήρησης, αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα διάχυσης/συναγωγής αερίου σε αέριο.

2.1 Απώλεια Νερού

Η απώλεια νερού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκλαμβάνεται ως σύνθεση δύο φαινομένων. Το πρώτο είναι αυτό της διάχυσης του νερού στους ιστούς του καρπού μέχρι την επιδερμίδα του φρούτου και το δεύτερο η απομάκρυνση του νερού αυτού με τη μορφή υδρατμών πλέον στον αέρα, μέσω του φαινομένου της συναγωγής. Η συνολικά παρατηρούμενη απώλεια νερού που έλαβε χώρα κατά τη διεξαγωγή του πειράματος αποδίδεται κυρίως στο φαινόμενο της διαπνοής, ενώ ποσοστό αυτής οφείλεται στο φαινόμενο της αναπνοής το οποίο όμως είναι πολύ μικρό όπως και αποδεικνύεται από την ανάλυση και γι' αυτό τον λόγο στην υπολογιστική προσομοίωση δεν λαμβάνεται υπόψη.

2.1.1 Μηχανισμοί διάχυσης

- Διάχυση

Με τον όρο διάχυση γίνεται αναφορά στην αυθόρμητη ανάμιξη ατόμων ή μορίων εξαιτίας της ελεύθερης κίνησής τους, χωρίς να παρατηρείται απαραίτητα και μακροσκοπική ροή μάζας. Απουσία άλλων μεταβολών (θερμοκρασίας, ηλεκτρικού δυναμικού ή βαρυτικού δυναμικού), τα μόρια ορισμένου χημικού είδους διαχέονται από περιοχές μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε περιοχές μικρότερης. Η διάχυση περιγράφεται από το Νόμο του Fick, (Fogler, 2009).

$$J_{Az} = -D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{dz} \quad (3)$$

Η γενική εξίσωση τριών διαστάσεων(x, y, z) για το J_A και τη ροή διάχυσης αυτού, η οποία οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης, σχετίζεται με την κλίση του μοριακού κλάσματος μέσω του πρώτου Νόμου του Fick:

$$J_A = -c \cdot D_{AB} \cdot \nabla y_A \quad (4)$$

όπου c η συνολική συγκέντρωση(mol/m^3), D_{AB} η διαχυτότητα του A στο B (m^2/s) και y_A το μοριακό κλάσμα του A. (Fogler, 2009).

Προκειμένου να επιλυθεί ένα πρόβλημα μεταφοράς μάζας πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί ο συντελεστής διάχυσης, ο οποίος προσδιορίζεται πειραματικά και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και τη σύσταση του εξεταζόμενου μίγματος.

Στο πρόβλημα που εξετάζεται, ως A ορίζεται η μάζα των υδρατμών και B ο αέρας που περιβάλλει το προϊόν στη συντήρηση. Τα περισσότερα τρόφιμα έχουν χαρακτηριστική γεωμετρία έτσι ώστε ως z να λαμβάνεται μία ορισμένη διάσταση(ακτίνα διατομής, μήκος, πλάτος κλπ)του γεωμετρικού σχήματος(σφαίρα, κύλινδρος απείρου μήκους κλπ) στο οποίο θεωρείται ότι μοιάζει το προϊόν.

- Συναγωγή

Μια χρήσιμη μέθοδος προσομοίωσης της μεταφοράς μάζας είναι η θεώρηση της στοιβάδας του ρευστού αμέσως μετά τα όρια του στερεού ως λεπτό στάσιμο οριακό στρώμα, πάχους δ . Θεωρείται λοιπόν ότι όλη η αντίσταση στη μεταφορά

μάζας εντοπίζεται στο εσωτερικό του υποθετικού αυτού στρώματος, πάχους δ , ενώ οι ιδιότητες (συγκέντρωση, θερμοκρασία) του ρευστού στο εξωτερικό άκρο του οριακού στρώματος είναι παρόμοιες με αυτές της κύριας μάζας του ρευστού. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας N_A δίνεται από τη σχέση (Fogler, 2009):

$$N_A = \frac{D_{AB}}{\delta} \cdot (C_{As} - C_{A\infty}) \quad (5)$$

όπου C_{As} η συγκέντρωση στο εσωτερικό άκρο του οριακού στρώματος, $C_{A\infty}$ η συγκέντρωση στο εξωτερικό άκρο που θεωρείται ίση με τη συγκέντρωση του A συστατικού στην κύρια μάζα του ρευστού.

Εν συνεχεία ορίζεται ως k_m το κλάσμα που ισούται με $\frac{D_{AB}}{\delta}$ και τελικά προκύπτει ότι:

$$N_A = \frac{1}{1/k_m} \cdot (C_{As} - C_{A\infty}) \quad (6)$$

2.1.2 Περιγραφή του προβλήματος

Το πρόβλημα το οποίο μελετάται είναι η εύρεση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης, D_{eff} , και του συντελεστή μεταφοράς μάζας, k_m . Το πρόβλημα αυτό είναι ένα αντίστροφο πρόβλημα, η επίλυση του οποίου απαιτεί μία ειδική προσέγγιση.

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία επίλυσης ενός αντιστρόφου προβλήματος και παρουσιάζεται ο τρόπος εύρεσης και εκτίμησης αρχικών και συνοριακών συνθηκών για το πρόβλημα της διάχυσης του νερού σε ψυχορροσυντηρούμενα νεκταρίνια. Οι απαραίτητες παράμετροι που αναζητούνται είναι κατά σειρά η αρχική εκτίμηση για τον συντελεστή διάχυσης D_{eff} , η οποία προκύπτει από την επίλυση του αναπτύγματος κατά Taylor για την εξίσωση που εκφράζει το Νόμο του Fick και για σφαιρικές συντεταγμένες και η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας του καρπού που προκύπτει από το μοντέλο ισόθερων ρόφησης.

2.1.3 Το αντίστροφο πρόβλημα

Στην επιστήμη της μηχανικής, είναι συνήθης η περιγραφή φυσικών φαινομένων με τη χρήση εμπειρικών, ημιεμπειρικών και θεωρητικών μοντέλων. Κατά τον τρόπο αυτό, για ένα σύστημα με τις διάφορες παραμέτρους/ιδιότητες του, αφού περιγραφεί μαθηματικά, είναι δυνατό να προβλεφθούν οι αποκρίσεις που μπορεί να έχει ανάλογα με τα δεδομένα και τις συνθήκες που εισάγονται σε αυτό. Ένα τέτοιο πρόβλημα καλείται ορθό ή ευθύ πρόβλημα.

Πολλές φορές όμως, δεν είναι δυνατή η περιγραφή όλων των παραμέτρων/ιδιοτήτων ενός προβλήματος απευθείας (π.χ. μέτρηση με όργανα). Αυτές οι παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν από τις αποκρίσεις (προερχόμενες από πειραματικά δεδομένα/καταγραφές) που έχει το σύστημα/πρόβλημα που εξετάζεται, μέσω μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ένας τέτοιος τύπος προβλήματος ονομάζεται αντίστροφο πρόβλημα.

Η σχέση μεταξύ του ευθέως και του αντίστροφου προβλήματος μπορεί να παραλληλιστεί με αυτή του αιτίου-αποτελέσματος, όπου η αιτία μπορεί να αντιπροσωπεύεται από μία συνοριακή συνθήκη, αρχική συνθήκη, θερμοφυσική ιδιότητα κλπ, ενώ το αποτέλεσμα είναι μία μετρήσιμη αντίδραση/απόκριση που έχει το σύστημα και η οποία μπορεί να μετρηθεί πειραματικά.

Στο παρόν πρόβλημα, η εύρεση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης του νερού (D_{eff}) από το εσωτερικό του προϊόντος προς τον περιβάλλοντα χώρο (Εξ.3), σε ψυχροσυντηρούμενα νεκταρίνια, καθώς και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (k_m) (Εξ.6) αποτελούν δύο ιδιότητες του προϊόντος οι οποίες δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα από ένα όργανο μέτρησης ή ένα συνδυασμό οργάνων.

Σε ένα ευθέως ορισμένο πρόβλημα (direct problem) η τιμή του γνωστού συντελεστή διάχυσης θα εισαγόταν στην εξίσωση που περιγράφει τη διάχυση (Εξ.3) και θα προέβλεπε τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας και το συντελεστή μεταφοράς μάζας k_m .

Για την επίλυση, του αντίστροφου αυτού προβλήματος διάχυσης απαιτείται η εφαρμογή μίας επαναληπτικής μεθόδου και ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης με τους οποίους θα μπορέσουν να προσδιοριστούν τα ζητούμενα μεγέθη. Αυτοί οι αλγόριθμοι, για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν το εξεταζόμενο πρόβλημα απαιτούν την εύρεση αρχικών τιμών και συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Αυτές είναι οι αρχικές εκτιμήσεις για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης, D_{eff} , και το συντελεστή μεταφοράς μάζας, k_m , και συνοριακές συνθήκες όπως η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος στην ισορροπία, η αρχική και η τελική περιεχόμενη υγρασία.

Αρχικές και Συνοριακές Συνθήκες

Συντελεστής Διάχυσης

Ο υπολογισμός της αρχικής προσέγγισης (αρχική τιμή) του συντελεστή διάχυσης, D_{eff} , πραγματοποιείται με αναλυτική επίλυση του 1^{ου} Νόμου του Fick. Ωστόσο, η επίλυσή της εισάγει κάποιο σφάλμα, μικρότερο ή μεγαλύτερο ανάλογα με τις παραδοχές που γίνονται. Παρόλα αυτά, μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική αρχική τιμή.

Στην περίπτωση αυτή, μελετάται ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των κλίσεων (method of slopes) (Karathanos et al., 1990; Perry and Green, 1999), η οποία βασίζεται στο Νόμο του Fick για τη διάχυση. Ο Νόμος του Fick για σφαιρικές συντεταγμένες και διάχυση στη διεύθυνση της ακτίνας του προϊόντος, δίνεται από την Εξ.7 μαζί με τις κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες(Εξ.8).

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M(t=0, 0 \leq r < r_o) &= M_o \\ M_s(t \geq 0, r = r_s) &= M_e \\ (t > 0, r = 0), \frac{\partial M}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

όπου M_o η αρχική περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος, M_e η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος στην ισορροπία και r η ακτίνα αυτού.

Η αναλυτική λύση της Εξ. 7 συνοψίζεται στην παρακάτω εξίσωση(9), η οποία δίνεται στον Crank (1975), στην οποία η ακτίνα r του προϊόντος και ο συντελεστής διάχυσης του νερού, D_{eff} , θεωρούνται μεγέθη σταθερά κατά τη ψυχορροσυντήρηση. Η Εξ.9, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης D_{eff} , εφόσον οι καμπύλες ξήρανσης $MR=f(t)$ είναι γραμμικές όταν απεικονίζονται σε ημι-λογαριθμική κλίμακα. Διαφορετικά, ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} εκτιμάται με χρήση αριθμητικών μεθόδων με επίλυση της Εξ. 7.

$$MR \equiv \frac{\bar{M}_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \exp(-n^2 \cdot \pi^2 \cdot F_o) \quad (9)$$

όπου $F_o = D_{eff} \cdot t / r_e^2$ είναι ο αριθμός Fourier.

Στην περίπτωση που το προϊόν είναι σφαιρικό χρησιμοποιείται η εξ. 10.

$$MR = \exp(-\pi^2 F_0 a^2) \quad (10)$$

όπου $\alpha' = 0.83$ για σφαίρα (Efremon and Kudra, 2005).

Η προηγούμενη ανάλυση αφορά τη μεταφορά νερού σε συμπαγή σφαίρα. Η μεταφορά υγρασίας σε “κούφια” σφαίρα με εσωτερική ακτίνα a και εξωτερική b έγινε από τους Lü and Bülow (2000), οι οποίοι θεώρησαν την εσωτερική επιφάνεια αδιαπέρατη στην κίνηση της υγρασίας, ενώ την εξωτερική επιφάνεια ότι έχει σταθερή υγρασία. Οι αρχικές και οι συνοριακές συνθήκες περιγράφονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} M(t=0, a \leq r < b) &= M_o \\ M_s(t \geq 0, r = b) &= M_e \\ (t > 0, r = a), \frac{\partial M}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Η αντίστοιχη με την Εξ. 7 σχέση στην περίπτωση ψυχοσυντήρησης “κούφιας” σφαίρας είναι αρκετά περίπλοκη και για το λόγο αυτό προτάθηκε η χρήση μιας μεθόδου ελαχιστοποίησης της διαφοράς μεταξύ των προβλεπόμενων MR τιμών από την Εξ. 9 για συμπαγή σφαίρα και την αντίστοιχη (μέσω της ισοδύναμης ακτίνας σφαίρας) από την “κούφια” σφαίρα. Βάσει της προηγούμενης προσέγγισης η ισοδύναμη ακτίνα σφαίρας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$r_e = b - \frac{a^3}{b^2} \quad (12)$$

Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} υπολογίστηκε, τελικά, βάσει της Εξ. 13, για όλες τις περιεχόμενες υγρασίες, στην οποία η ισοδύναμη ακτίνα r_e , είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και την υγρασία.

$$D_{eff} = \frac{(dMR/dt)_{exp}}{(dMR/dFo)_{theor}} \cdot r_e^2 \quad (13)$$

Περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας

Ο υπολογισμός της περιεχόμενης υγρασίας ενός ψυχοσυντηρούμενου προϊόντος που υφίσταται απώλειες υγρασίας, μπορεί πραγματοποιηθεί με ημιεμπειρικά μοντέλα αξιοποιώντας πειραματικά δεδομένα. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα είναι συνήθως αρκετά απλουστευμένα και συγχρόνως η επίλυσή τους δίνει αποτελέσματα που μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

Για τη δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου υπολογίζεται πρώτα η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος, M_w , συναρτήσει του χρόνου. Ύστερα, δημιουργείται το διάγραμμα της αδιάστατης σχετικής υγρασίας (MR) συναρτήσει του χρόνου από την παρακάτω εξίσωση:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = f(t) \quad (13)$$

όπου M_e η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας και M_o η αρχική.

Αξίζει να σημειωθεί πως στις περιπτώσεις απώλειας νερού κατά την ψυχορσυντήρηση, η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας δεν αντιστοιχεί στην περιεχόμενη υγρασία του καρπού στο πέρας της συντήρησης. Αυτό συμβαίνει διότι η διαδικασία ωρίμανσης του καρπού και κατά συνέπεια η υποβάθμιση της ποιότητας, είναι διαδικασίες σαφώς ταχύτερες σε σχέση με την απώλεια της υγρασίας και συνεπώς δεν είναι δυνατή αλλά δεν έχει και νόημα η εύρεση της τελικής τιμής περιεχόμενης υγρασίας, διότι το προϊόν πλέον δεν είναι εμπορεύσιμο αφού δεν πληρούνται οι απαιτήσεις των καταναλωτών (χρώμα, γεύση, υφή κλπ).

Ειδικότερα, για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισόθερμη καμπύλη ρόφησης νερού, όπως αυτή κατασκευάζεται με αξιοποίηση πειραματικών δεδομένων και χρήση σχέσεων παρόμοιων με την Εξ.13. Η ισόθερμη καμπύλη περιγράφει την σύνδεση που υπάρχει μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας και της ενεργότητας του νερού στα προϊόντα. Ακόμη, περιγράφει και τη θερμοδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ της ενεργότητας του νερού και της υγρασίας ισορροπίας του προϊόντος σε δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η πλήρης γνώση και κατανόηση των ισοθέμων καμπυλών είναι εξαιρετικά σημαντική για την τεχνολογία των τροφίμων καθώς επίσης και για τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση διεργασιών αφυδάτωσης και συντήρησης προϊόντων.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα ισόθερμης καμπύλης, είναι η εμπειρική εξίσωση Guggenheim- Anderson- de Boer (GAB). Το όνομα του μοντέλου προέκυψε από τα αρχικά των ονομάτων των Guggenheim, Anderson και de Boer οι οποίοι ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, εξήγαγαν την παραπάνω εξίσωση τα έτη 1966, 1946 και 1953 αντίστοιχα.

Το μοντέλο GAB συνίσταται στην παρακάτω εξίσωση (C. T. Kiranoudis, et al., 1992):

$$M_w = \frac{M_o \cdot C \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + C \cdot k \cdot a_w)} \quad (14)$$

όπου M_o το υγρασιακό περιεχόμενο του πρώτου ροφητικού στρώματος, C και k σταθερές ρόφησης και a_w η ενεργότητα του νερού στο δείγμα.

Ο υπολογισμός των σταθερών του μοντέλου πραγματοποιείται με χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

$$C = C_o \cdot \exp\left(\frac{H_o - H_n}{R \cdot T}\right) \quad (15)$$

$$k = k_o \cdot \exp\left(\frac{H - H_n}{R \cdot T}\right) \quad (16)$$

όπου C_o και k_o οι εντροπικοί προεκθετικοί παράγοντες, H_o, H_n, H οι ενθαλπίες ρόφησης για το μονομοριακό στρώμα, τα πολλαπλά στρώματα κάτω από το μονομοριακό και η ενθαλπία συμπύκνωσης του καθαρού νερού, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η θερμοκρασία σε (K).

Η εξίσωση GAB έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως χάρη στην ικανότητά της να περιγράφει με ακρίβεια την ροφητική συμπεριφορά πολλών τροφίμων σε μεγάλο εύρος ενεργοτήτων (0-0.9).

2.2 Περιγραφή του λογισμικού προσομοίωσης-Comsol Multiphysics

Η επίλυση και η προτυποποίηση του προβλήματος εύρεσης του συντελεστή διάχυσης, D_{eff} , χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics 4.3b. Το πρόγραμμα αυτό επιλύει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών φυσικής και μηχανικής που σχετίζονται με φαινόμενα μεταφοράς, εφαρμόζοντας τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων(ΜΠΣ), για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ) με τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

2.2.1 Γενικά στοιχεία

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα «εργαλείο» προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής, μεταφοράς θερμότητας, χημικής μηχανικής, ηλεκτρομαγνητισμού, δομικής μηχανικής και άλλων. Περιλαμβάνει διάφορα υποπρογράμματα, το καθένα από τα οποία αποτελεί ένα αυτοτελές μοντέλο για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Ο χρήστης του προγράμματος, αφού σχεδιάσει το χωρίο, πρέπει για το κάθε μοντέλο να ορίσει τις εξισώσεις, τις συνοριακές συνθήκες, τις αρχικές τιμές και τις διαφορές σταθερές που περιέχονται σε αυτές. Στο παρόν πρόβλημα εισάγονται τα πειραματικά δεδομένα των μετρήσεων της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης, και προσδιορίζεται, μέσω μη γραμμικής βελτιστοποίησης (Levenberg-Marquardt), ο συντελεστής διάχυσης του νερού στο δείγμα D_{eff} και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m .

Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις

Η διατύπωση των φυσικών νόμων για διάφορα προβλήματα που αφορούν μεταβολές μεγεθών στον χώρο ή και στο χρόνο, οδηγεί συνήθως σε μερικές διαφορικές εξισώσεις, δηλαδή διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους. Στην πλειοψηφία τους, οι εξισώσεις αυτές είναι αρκετά πολύπλοκες και δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν αναλυτικά. Επιλύονται, προσεγγιστικά, συνήθως με μεθόδους διακριτοποίησης.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις μεθόδους διακριτοποίησης. Σε προβλήματα προσομοίωσης και προτυποποίησης, όπως αυτό που εξετάζεται, ένα πλήθος μερικών διαφορικών εξισώσεων προκύπτει και αυτές επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στις περισσότερες οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν είναι γραμμικές, δεύτερης τάξης με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, της μορφής:

$$L[u] = Au_{xx} + 2Bu_{xy} + Cu_{yy} + Du_x + Eu_y + Fu - G \quad (17)$$

όπου A,B,C,D,E,F,G είναι εν γένει γνωστές συναρτήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών x,y. Στην Εξίσωση 17, $u=u(x,y)$ είναι η άγνωστη συνάρτηση και, εδώ, λαμβάνεται ανεξάρτητη του χρόνου.

Οι ΜΔΕ χρησιμοποιούνται κυρίως για την επίλυση δύο ειδών προβλημάτων, προβλημάτων συνοριακών τιμών και προβλημάτων αρχικών τιμών. Σε ένα πρόβλημα συνοριακών τιμών οι συνοριακές συνθήκες αφορούν στους

αγνώστους u (συνθήκες Dirichlet), $\frac{\partial u}{\partial n}$ (συνθήκες Neumann) ή σε γραμμικό συνδυασμό τους (συνθήκες μικτές ή Robin) στο σύνορο του χωρίου ∂D . Γ. Σε ένα πρόβλημα αρχικών τιμών ορίζεται η τιμή της συνάρτησης $u(x,y,t=0)$, δηλαδή οι αρχικές συνθήκες (Young, 2003).

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται το πρόβλημα της διάχυσης του νερού σε ένα στερεό μέσο, ένα πρόβλημα που περιγράφεται από τον 1^ο Νόμο του Fick (Εξ.3). Η Εξίσωση 3 είναι μία μερική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης στην οποία υπάρχει η ανάγκη εύρεσης του φαινομένου συντελεστή μεταφοράς των υδρατμών. Επειδή η επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης δεν δύναται να πραγματοποιηθεί αναλυτικά και με ευθύ τρόπο, εφαρμόζεται η ΜΠΣ και το πρόβλημα λύνεται ως ένα αντίστροφο πρόβλημα μεταφοράς μάζας με γνωστές αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

2.2.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στο μελετώμενο χωρίο εφαρμόζεται ένα πλέγμα ορισμένης πυκνότητας, η οποία καθορίζεται από τον χρήστη, που το διαιρεί σε διακριτό πλήθος υποχωρίων. Συνήθως το πλέγμα αποτελείται είτε από τριγωνικά είτε από ρομβικά στοιχεία. Οι τομές των γραμμών του πλέγματος ονομάζονται κόμβοι και στα σημεία αυτά υπολογίζονται οι τιμές της αναζητούμενης λύσης. Η άγνωστη λύση προσεγγίζεται μέσω συναρτήσεων βάσης, οι οποίες είναι χαμηλού βαθμού πολυώνυμα των ανεξάρτητων μεταβλητών του χώρου. Εν συνεχεία, οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε αλγεβρικές με την εφαρμογή της μεθόδου των σταθμισμένων υπολοίπων Galerkin.

Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων επιλύεται ως προς τους αγνώστους που είναι οι τιμές της αναζητούμενης λύσης στους κόμβους του πλέγματος. Η αξιοπιστία της προσεγγιστικής λύσης ελέγχεται με την ανεξαρτησία της λύσης ως προς την πυκνωση του πλέγματος. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται από το υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol Multiphysics. Πρώτα σχεδιάζεται η χαρακτηριστική γεωμετρία του υπολογιστικού (domain) στο πρόγραμμα. Ύστερα από την κατασκευή του χωρίου, επιλέγεται ο τύπος του πλέγματος και εισάγονται οι κατάλληλες συνοριακές και αρχικές συνθήκες.

2.2.3 Η Μέθοδος Levenberg-Marquardt

Το φαινόμενο της απώλειας υγρασίας κατά την ψυχοσυντήρηση και η εύρεση μελετήθηκε, επιλύθηκε και προσομοιώθηκε, με απώτερο σκοπό την εύρεση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης D_{eff} και του συντελεστή μεταφοράς μάζας k_m .

Η μέθοδος Levenberg-Marquardt βασίζεται σε μία κλασική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν κατά την προσαρμογή (fitting) μιας ορισμένης παραμετροποιημένης συνάρτησης σε ένα σετ πειραματικών δεδομένων, υπό τον περιορισμό της ελαχιστοποίησης του άθροισματος των τετραγώνων των αποκλίσεων που εμφανίζονται μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών που προκύπτουν από τη συνάρτηση. Η μέθοδος Levenberg-Marquardt, ουσιαστικά αποτελεί τον συνδυασμό δύο μεθόδων ελαχιστοποίησης, της μεθόδου βαθμιδωτής καθόδου (gradient descent method) και της μεθόδου Gauss-Newton. Στην πρώτη, το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων μειώνεται με ενημέρωση/αλλαγή των παραμέτρων της συνάρτησης προς την κατεύθυνση της βαθμίδας με την πιο απότομη μείωση. Η Gauss-Newton, από την άλλη μειώνει το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων, θεωρώντας πως η συνάρτηση είναι τοπικά τετραγωνική (quadratic) και βρίσκει έτσι το ελάχιστο της τετραγωνικής αυτής συνάρτησης.

Η μέθοδος Levenberg-Marquardt δρα περισσότερο ως μέθοδος βαθμιδωτής καθόδου όταν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων έχουν μεγάλη διαφορά από τις βέλτιστες τιμές. Όταν συμβαίνει το αντίθετο, η Levenberg-Marquardt δρα ως Gauss-Newton και η σύγκλιση επιτυγχάνεται ταχύτατα. (Gavin, 2013)

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα που διεξήχθη και προσομοιώθηκε ήταν η ψυχροσυντήρηση νεκταρινιών ποικιλίας Big Top σε σταθερή θερμοκρασία, η οποία μελετήθηκε σε 3 διαφορετικά σταθερά επίπεδα σχετικής υγρασίας και ένα μεταβλητό. Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται οι συνθήκες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας και το μοντέλο προσομοίωσης, από τις παραδοχές που έγιναν, το σχεδιασμό του χωρίου στο πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics και τις εξισώσεις με τις οποίες διατυπώθηκε και επιλύθηκε το πρόβλημα, μέχρι την εύρεση των αρχικών τιμών και των συνοριακών συνθηκών. Από την πειραματική διαδικασία και τη μοντελοποίηση, προέκυψαν τα αποτελέσματα για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης του νερού στο νεκταρίνι, D_{eff} και το συντελεστή μεταφοράς μάζας στην επιδερμίδα, k_m .

3.1 Περιγραφή του πειράματος

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν νεκταρίνια ποικιλίας Big Top μέσου βάρους 108- 164 g. Η αγορά τους έγινε σε τοπική λαϊκή αγορά. Στη συνέχεια έγινε διαλογή των καρπών στο εργαστήριο και απομακρύνθηκαν καρποί με τραυματισμούς, άγουροι ή/και πολύ μικροί. Αυτοί που κρίθηκαν κατάλληλοι καθαρίστηκαν χρησιμοποιώντας απορροφητικό χαρτί, ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας και ογκομετρήθηκαν.

Ύστερα οι καρποί ταξινομήθηκαν κατά σειρά μεγέθους και χωρίστηκαν σε ομάδες ανά επίπεδο υγρασίας για τη συντήρηση σε θερμοκρασία 0 °C. Δημιουργήθηκαν ομάδες των τριών οι οποίες τοποθετήθηκαν τόσο σε συνθήκες θαλάμου (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) όσο και σε ειδικούς περιέκτες στους οποίους είχαν δημιουργηθεί συγκεκριμένες, ελεγχόμενες συνθήκες σχετικής υγρασίας. Αυτές επιτεύχθηκαν με χρήση υπέρκορων διαλυμάτων αλάτων (για τη μέση και χαμηλή σχετική υγρασία) και νερού (για την υψηλή σχετική υγρασία-κορεσμός). Η χαμηλή σχετική υγρασία ρυθμίστηκε με χρήση υπέρκορου διαλύματος $MgCl_2 \cdot H_2O$ (49%), ενώ η μέτρια με υπέρκορο διάλυμα $NaCl$ (79%). Για τη ρύθμιση της υγρασίας κορεσμού(95%) χρησιμοποιήθηκε το απιονισμένο νερό.

Τα διαλύματα αλάτων και το απιονισμένο νερό τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα δοχεία κι αυτά με τη σειρά τους εντός των περιεκτών. Πάνω από τα δοχεία τοποθετήθηκε ειδική μεταλλική σχάρα για τη στήριξη των πλαστικών θηκών στις οποίες φυλάσσονταν οι καρποί. Η επιφάνεια των δοχείων κάλυπτε όλη την ελεύθερη επιφάνεια σε κάθε περιέκτη. (βλ. Εικόνα3.1)

Στον Πίνακα3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες συντήρησης. Η ημέρα αγοράς των καρπών ορίστηκε ως η πρώτη ημέρα διεξαγωγής του πειράματος ($t=0$) καθώς πραγματοποιήθηκε μέτρηση του αναπνευστικού τους ρυθμού.

Η συνολική χρονική διάρκεια συντήρησης των καρπών ήταν 20 ημέρες.

Πίνακας 3.1: Εξεταζόμενες συνθήκες συντήρησης (σχετική υγρασία) .

Θερμοκρασία	Κορεσμένα Διαλύματα	Σχετική Υγρασία
0°C	Αέρας Θαλάμου	45,6%
	$MgCl_2 \cdot H_2O$	49%
	$NaCl$	79%
	Απιονισμένο Νερό	95%



Εικόνα 3.1: Περιέκτης και δείγματα σε ειδικές θήκες. Κάτω από τη σχάρα, βρίσκονται τα υπέρκορα διαλύματα αλάτων για τη ρύθμιση της σχετικής υγρασίας του αέρα συντήρησης.

3.1.1 Εξοπλισμός

Υπολογισμός των απωλειών μάζας

Κατά τη διάρκεια συντήρησης των δειγμάτων στον ψυκτικό θάλαμο πραγματοποιούνταν καθημερινά μετρήσεις των απωλειών μάζας με χρήση ηλεκτρονικού ζυγού ακριβείας KERN (μοντέλο PCB-440, Japan) ο οποίος είχε ακρίβεια $\pm 0.01\text{g}$ (βλ.Εικόνα3.2). Σε κάθε επίπεδο υγρασίας, αντιστοιχούν 3 μελετώμενα δείγματα. Η ζύγιση των δειγμάτων που ήταν στο θάλαμο συντήρησης έγινε με το ζυγό ακριβείας τοποθετημένο εξ αρχής μέσα στο θάλαμο, για την αποφυγή πιθανής συμπύκνωσης υδρατμών του ψυκτικού θαλάμου στην επιφάνειά του και στην επιφάνεια των καρπών, γεγονός που θα οδηγούσε σε σφάλμα στην μέτρηση. Ακόμη, οι περιέκτες στους οποίους φυλάσσονταν τα δείγματα, ανοίχτηκαν με προσοχή για να εξασφαλιστεί η ελάχιστη διαταραχή της εσωτερικής τους ατμόσφαιρας.

Το ποσοστό των απωλειών μάζας (%) υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\Delta M = \frac{M_o - M_t}{M_o} \cdot 100\% \quad (23)$$

όπου M_o η αρχική μάζα του δείγματος και M_t η μάζα κάθε ημέρα μέτρησης.



Εικόνα 3.2: Ηλεκτρονικός ζυγός που χρησιμοποιήθηκε KERN (μοντέλο PCB-440, Japan).

Εκτίμηση επιφάνειας και όγκου

Η ογκομέτρηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της εκτόπισης ύδατος. Μετά τη ζύγιση των φρούτων, ένας ογκομετρικός κύλινδρος ζυγίστηκε και το απόβαρο του αφαιρέθηκε. Στη συνέχεια, τα δείγματα βυθίστηκαν, το καθένα ξεχωριστά, σε ένα ανοιχτό, μεταλλικό δοχείο που διέθετε μικρή οπή στο τοίχωμά του, στο ύψος της στάθμης νερού. Το νερό που εκτοπίστηκε από τη βύθιση, συλλέχθηκε στο βαθμονομημένο ογκομετρικό κύλινδρο και προσδιορίστηκε ο όγκος του.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε εκ νέου στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, για τον υπολογισμό του όγκου των πυρήνων των νεκταρινιών που χρησιμοποιήθηκαν.

Όπως είναι γνωστό, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος της επιφάνειας ανά μονάδα μάζας του προϊόντος, τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο της διαπνοής και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη και η απώλεια νερού από το φλοιό του. Αυτό αποδεικνύει τη σημασία που έχει η έκφραση της διαπνοής ανά μονάδα επιφάνειας του προϊόντος. Ωστόσο, η εκτίμηση της επιφάνειας μέσω των γεωμετρικών διαστάσεων συνοδεύεται από σημαντική απόκλιση από την πραγματική τιμή του εμβαδού της επιφάνειας του φλοιού. Από την άλλη, η εκτίμηση της πραγματικής επιφάνειας είναι πολύ πιο δύσκολη και χρονοβόρα, καθώς απαιτεί την αποφλοιώση του προϊόντος και τον υπολογισμό της συνολικής επιφάνειας αυτού ως άθροισμα των επιμέρους επιφανειών που προκύπτουν από την αποφλοιώση του προϊόντος.



Εικόνα 3.3 : Δείγματα φρούτου προς αποφλοιώση για τον υπολογισμό του μέσου εμβαδού της επιφάνειάς του προϊόντος.

Ο υπολογισμός του εμβαδού της επιφάνειας των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση ειδικού λογισμικού επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων ImageJ 1.46 (Research Services Branch, NIH, MD, USA). Για να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκε αποφλοιώση των καρπών σε νωπή κατάσταση(βλ.Εικόνα3.3). Μετά την αποφλοιώση, τα τμήματα του φλοιού τοποθετήθηκαν προσεκτικά πάνω σε λευκό χαρτόνι, το οποίο λειτούργησε ως φόντο με υψηλό βαθμό αντίθεσης και ύστερα φωτογραφήθηκαν με ψηφιακή κάμερα Konica Minolta Dimage Z2 (4.0 Mpixel)(βλ.Εικόνα3.4).

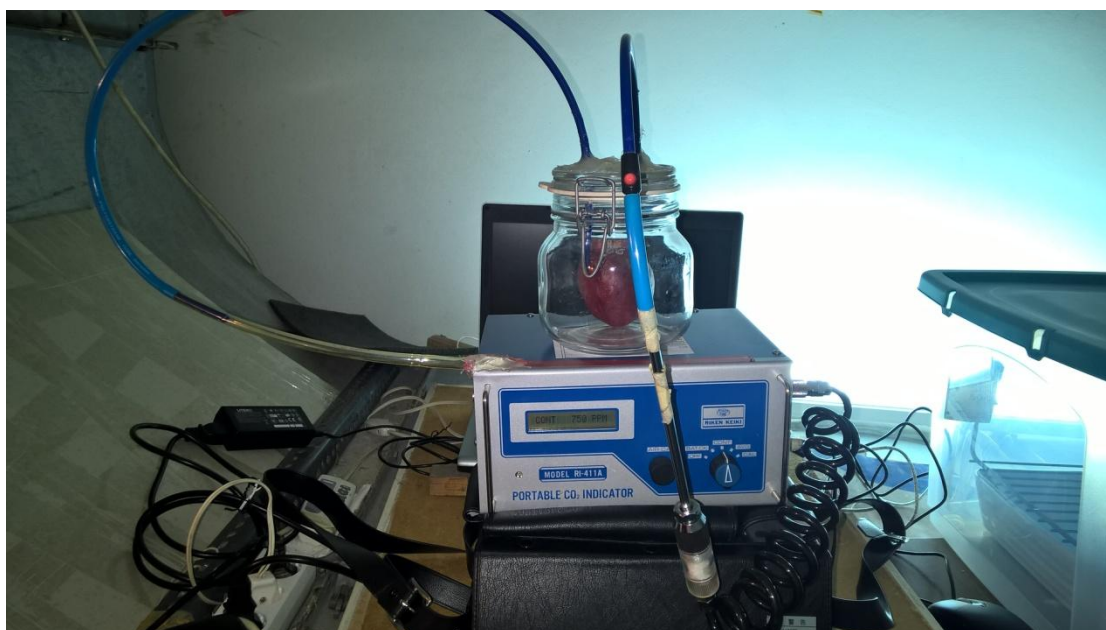


Εικόνα3.4: Τμήματα φλοιού τοποθετημένα σε κατάλληλο φόντο για τη λήψη ψηφιακής εικόνας.

Με τη βοήθεια του προγράμματος ImageJ 1.46 (Research Services Branch, NIH, MD, USA), οι εικόνες μετατράπηκαν σε ασπρόμαυρη δυαδική μορφή των 8bit (8bit grayscale binary) και με μία γνωστή κλίμακα που απεικονιζόταν στις εικόνες (χάρακας), έγινε η διαστασιολόγηση και ο υπολογισμός της επιφάνειας του καρπού ως το άθροισμα των επιμέρους επιφανειών των κομματιών του φλοιού που παρατίθεντο. Ο μέσος όρος επιφάνειας των δειγμάτων κυμάνθηκε στα $116,38 \pm 10,3 \text{ cm}^2$.

Υπολογισμός του αναπνευστικού ρυθμού και του παραγόμενου νερού

Για την μέτρηση του αναπνευστικού ρυθμού χρησιμοποιήθηκε φορητή διάταξη μέτρησης της αναπνοής (βλ.Εικόνα3.5). Η διάταξη αποτελείτο από ένα φορητό μετρητή CO₂ ,Riken Keiki, τύπου RI-411A (RKI Instruments, Japan), που συνδέεται χάρη στην προσθήκη ανεξάρτητων, εύκαμπτων, πλαστικών σωλήνων με γυάλινο αναπνευστικό κελί σταθερού όγκου. Το όργανο έχει κλίμακα μέτρησης 0-5000 ppm CO₂ με ακρίβεια $\pm 2 \%$ της κλίμακας και η διακριτική του ικανότητα είναι ίση με 25 ppm CO₂.



Εικόνα3.5: Φορητή συσκευή μέτρησης αναπνοής Riken Keiki τύπου RI-411A (RKI Instruments, Japan).

Τα νεκταρίνια τοποθετήθηκαν ατομικά εντός του αναπνευστικού κελιού, το οποίο έκλεινε αεροστεγώς για να γίνει η καταγραφή της αρχικής ένδειξης. Στη συνέχεια παρέμειναν εκεί για ικανό χρονικό διάστημα μέχρι η συγκέντρωση του CO₂ μέσα σε αυτό να αυξηθεί αρκετά, ώστε να υφίσταται σημαντική διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής μέτρησης. Μετά την πάροδο του απαραίτητου χρονικού διαστήματος (5h), άνοιξαν εκ νέου οι στρόφιγγες για την καταγραφή

της τελικής μέτρησης CO₂. Η συσκευή μετρά τη συγκέντρωση CO₂ σε ppm, τα οποία με κατάλληλες μετατροπές εκφράζονται ως αναπνευστικός ρυθμός ($\frac{ml\ CO_2}{100gr \cdot h}$).

Ο αναπνευστικός ρυθμός υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$RR = \left(\frac{\Delta C}{\Delta t}\right) \cdot \frac{V}{m} \cdot 10^{-4} \quad (24)$$

όπου: RR ο αναπνευστικός ρυθμός, $\Delta C = C_{fin} - C_{in}$ η μεταβολή της συγκέντρωσης CO₂ με C_{fin} τη συγκέντρωση που καταγράφηκε στην τελική μέτρηση και C_{in} τη συγκέντρωση της αρχικής μέτρησης, $V = V_c - V_{fr}$ όπου V_c ο όγκος του κυκλώματος της συσκευής (ml) και V_{fr} ο όγκος του καρπού (ml). Ως Δt συμβολίζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων και εκφράζεται σε h.

Στα νεκταρίνια, οι ουσίες που δρουν ως μεταβολικά υποστρώματα για το φαινόμενο της αναπνοής είναι τα σάκχαρα. Συγκεκριμένα, η αναπνοή μπορεί να περιγραφεί από την οξείδωση της γλυκόζης ή του ισομερούς της, της φρουκτόζης, αφού οι συγκεντρώσεις των υπολοίπων περιεχόμενων σακχάρων θεωρούνται μικρές (USDA, 2016). Επειδή η φρουκτόζη και η γλυκόζη είναι ισομερή (C₆H₁₂O₆), η εξίσωση της οξείδωσης των σακχάρων είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, γι' αυτό και ως υπόστρωμα της αναπνοής θεωρήθηκε το άθροισμα των δυο τους.

Η εύρεση της περιεκτικότητας των σακχάρων για το νεκταρίνι, πραγματοποιήθηκε τόσο βιβλιογραφικά, όσο και εργαστηριακά σε δείγματα νεκταρινιού της ίδιας παρτίδας με αυτά τα οποία εισήχθησαν στο θάλαμο ψυχορυσντήρησης με μέτρηση των Brix.

Η ανάλυση σακχάρων (Brix) έδειξε ότι περιέχονται 9,85gr σακ./100gr νωπού προϊόντος, σε αντίθεση με τα βιβλιογραφικά δεδομένα που παρουσιάζουν μία μέση τιμή ίση με 7,89g σακ./100g νωπού προϊόντος.

Χρησιμοποιούνται εν τέλει, τα δεδομένα από την ανάλυση σακχάρων για τον υπολογισμό των σακχάρων που συμμετέχουν ενεργά στην αναπνοή, Από την εξίσωση της πλήρους στοιχειομετρικής καύσης (εξίσωση 2) προκύπτει ότι για κάθε mole υποστρώματος που καταναλώνεται (180g), παράγονται 6 moles νερού (108g), 6 moles CO₂ (134,4L) και 2835,3 kJ υπό μορφή θερμότητας.

Από τη στοιχειομετρία προκύπτει ότι απαιτούνται $1.34 \cdot 10^{-3}$ g DML (απώλεια ξηράς ουσίας) για την παραγωγή 1 ml CO₂. Συνδυάζοντας τα δεδομένα από τη

στοιχειομετρία με τη συγκέντρωση των σακχάρων (USDA, 2016) προκύπτει ότι παράγονται 5,91 g νερού ανά 100 g νωπού προϊόντος. Ενσωματώνοντας τον αναπνευστικό ρυθμό, και με τις απαραίτητες μετατροπές μέσω της περιεχόμενης υγρασίας ώστε να μετατραπούν τα gr ξηράς ουσίας σε gr νωπού προϊόντος, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση υπολογισμού της απώλειας υγρασίας μέσω της αναπνοής:

$$WL = 0,0063784 \cdot RR \quad (25)$$

όπου WL η απώλεια νερού σε g H₂O/h·kg νωπού καρπού και RR ο αναπνευστικός ρυθμός σε $\frac{ml\ CO_2}{100g \cdot h}$.

Υπολογισμός της ενεργότητας του νερού

Παράλληλα με τις μετρήσεις των απωλειών μάζας και των αναπνευστικών ρυθμών, πραγματοποιήθηκε και μέτρηση της ενεργότητας του νερού σε τρία δείγματα για τη συσχέτισή της με τις αντίστοιχες απώλειες μάζας. Τα δείγματα στα οποία έγιναν οι μετρήσεις ήταν αποθηκευμένα σε κώδωνες, σε συνθήκες συντήρησης στους 10 °C. Σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα (ανά ημέρα), τα δείγματα έβγαιναν από τους κώδωνες και τοποθετούνταν στη συσκευή μέτρησης της ενεργότητας. Οι μετρήσεις έγιναν με το όργανο μέτρησης ενεργότητας HygroLab C1 (Rotronic AG, Bassersdorf, Schweiz) εφοδιασμένο με αισθητήριο HC2-AW (βλ. Εικόνα3.6).



Εικόνα 3.6: Συσκευή και κελί μέτρησης της ενεργότητας νεκταρινιών.

Καταγραφή των πειραματικών δεδομένων

Οι συνθήκες θερμοκρασίας και η υγρασία εντός των ψυκτικών θαλάμων και των περιεκτών, καταγράφηκαν από αισθητήρες Hobo 8H (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA), οι οποίοι συνδέονταν με σταθμό αποθήκευσης δεδομένων Hobo Micro station (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA) και φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

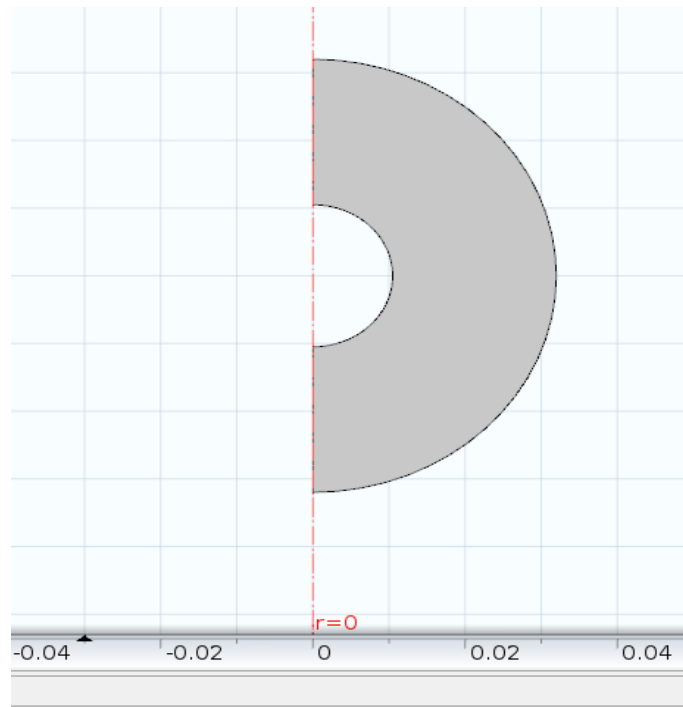
3.2 Γεωμετρική αναπαράσταση καρπού

Για την απλούστευση του προβλήματος και τον σχεδιασμό του χωρίου, έγιναν κάποιες παραδοχές αναφορικά με το σχήμα και τη γεωμετρία του προϊόντος. Ειδικότερα, θεωρήθηκε πως το νεκταρίνι έχει σφαιρικό σχήμα και αναπαρίσταται με ένα ημισφαίριο γνωστού όγκου, από το οποίο έχει αφαιρεθεί ο πυρήνας του (που θεωρήθηκε κι αυτός ότι είναι σφαιρικός).

Για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση υγρασίας υπολογίστηκε η εξωτερική ακτίνα του φρούτου, R_{ext} , η αντίστοιχη ακτίνα του πυρήνα, R_{stone} . Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του όγκου που υπολογίστηκαν τόσο στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας (ογκομέτρηση ολόκληρων καρπών) όσο και στο τέλος αυτής (ογκομέτρηση πυρήνων) για την εύρεση των αντίστοιχων ακτινών.

Με την παραδοχή αυτή, πως το σχήμα του νεκταρινιού πλησιάζει σε αυτό της σφαίρας και χωρίς την ύπαρξη σημαντικού σφάλματος, επιλύεται η παρακάτω εξίσωση(26) ως προς την ακτίνα r για κάθε δείγμα και ύστερα υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτής για κάθε επίπεδο υγρασίας. Τέλος, προκύπτουν για κάθε περίπτωση που εξετάζεται, οι αντίστοιχες τιμές \bar{R}_{ext} και \bar{R}_{stone} με βάση της οποίες σχεδιάζεται το υπολογιστικό χωρίο.

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \quad (26)$$



Εικόνα 3.7: Χαρακτηριστική γεωμετρία του προϊόντος, όπως αυτό σχεδιάστηκε στο Comsol Multiphysics.

Η αναπαράσταση του ίδιου χωρίου σε τρισδιάστατο σύστημα είναι μία σφαίρα ακτίνας R_{ext} από την οποία έχει αφαιρεθεί μία άλλη μικρότερη που έχει ακτίνα ίση με R_{stone} . Επιλέγοντας την αξονική συμμετρία στο Comsol Multiphysics, ουσιαστικά αντικαθίστανται οι τρεις διαστάσεις (x,y,z) από δύο. Αυτό απλοποιεί τις μαθηματικές εξισώσεις που εισάγονται και, κυρίως, μειώνει τον χρόνο προσομοίωσης.

3.3 Μοντέλα και αρχικές συνθήκες

Μετά από τον σχεδιασμό του χωρίου, επιλέγονται στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b το μοντέλο μεταφοράς μάζας υδρατμών μέσω διάχυσης και το κατάλληλο μοντέλο βελτιστοποίησης. Τέλος, παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες που επελέγησαν για κάθε μοντέλο και οι παράμετροι που ορίστηκαν για την επίλυσή του.

3.3.1 Διάχυση

Για να οριστεί το πρόβλημα της διάχυσης, επιλέγεται το μοντέλο Transport of Diluted Species, της καρτέλας Chemical Species Transport του Model Wizard από την επιλογή Add Physics. Στη συνέχεια, το πρόβλημα ορίζεται ως χρονικά εξαρτώμενο-Time Dependent. Στο Coordinate System επιλέγεται η καρτέλα Global και στην επιλογή Bulk Material, το None. Ο φαινόμενος συντελεστής

διάχυσης (Diffusion Coefficient), D_{eff} , εισάγεται από τον χρήστη (User Defined). Τέλος, ορίστηκαν οι εξισώσεις του χωρίου που περιγράφουν το φαινόμενο της διάχυσης στο εσωτερικό του χωρίου αλλά και στα όρια (συνοριακές συνθήκες) αυτού.

Εξισώσεις χωρίου

Οι εξισώσεις που ορίζονται στο μοντέλο διάχυσης από το πρόγραμμα δίνονται παρακάτω:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (D_{eff} \cdot \nabla c_i) = 0 \quad (28)$$

και

$$N_i = -D_{eff} \cdot \nabla c_i \quad (29)$$

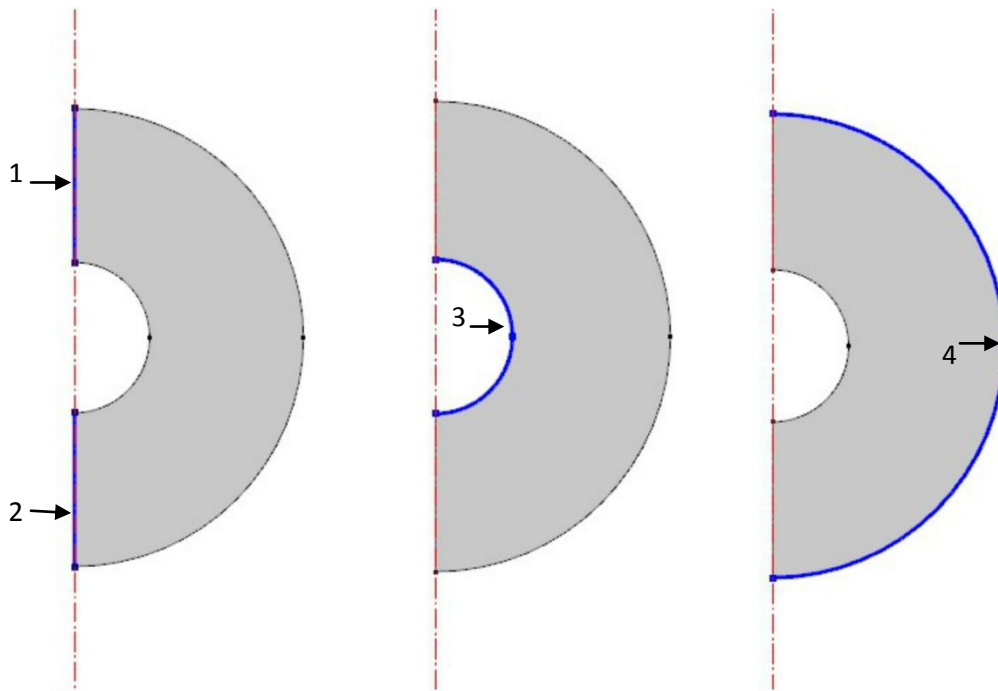
Συνοριακές Συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για το σχεδιασμό του χωρίου, χρησιμοποιείται η επιλογή της αξονικής συμμετρίας. Αυτή βρίσκει εφαρμογή ως συνοριακή συνθήκη, Axial Symmetry 1, στα όρια (1&2)(βλ. Εικόνα3.8).

Για το όριο 3, επιλέγεται η συνθήκη No Flux. Το όριο 3 αποτελεί τη διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα του καρπού και της σάρκας του. Εκεί θεωρείται δεν λαμβάνει χώρα μεταφορά μάζας. Η μεταφορά μάζας γίνεται μόνο από το εξωτερικό όριο(όριο 4) στο οποίο και εφαρμόζεται η συνθήκη Flux, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$-n \cdot N_i = k_m \cdot (c_b - c_i) \quad (30)$$

Όπου: n το είναι κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του χωρίου, k_m ο συντελεστής μεταφοράς μάζας στην επιδερμίδα και c_b η συγκέντρωση της υγρασίας στο εξωτερικό όριο.(βλ. Εικόνα3.8)



Εικόνα 3.8: Διακριτές περιοχές(όρια) στις οποίες εφαρμόζονται οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. (Comsol Multiphysics)

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, k_m , προσδιορίζεται όπως και ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης, D_{eff} , από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η συγκέντρωση της υγρασίας στην επιφάνεια του ορίου 4, c_b , υπολογίστηκε ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας ισορροπίας, M_e , για κάθε επίπεδο υγρασίας από την παρακάτω σχέση (Σέμπου, 2014):

$$c_b = \left(1 - \frac{1}{1 + M_e}\right) \cdot \frac{\rho}{M_{water}} \quad (31)$$

όπου ρ η πυκνότητα του προϊόντος, M_e η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας για δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και M_{water} η μάζα του νερού ανά mole νερού.

Στη συνέχεια, εισήχθη η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας για κάθε περίπτωση υγρασίας, όπως προσδιορίστηκε από την καμπύλη που προέκυψε σχετικό μοντέλο ισόθερμης GAB για τα δεδομένα υγρασίας που αφορούν την εξεταζόμενη περίπτωση. Με χρήση μη γραμμικής παλινδρόμησης και με βάση γνωστά δεδομένα για την τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα συντήρησης και τυπικές αρχικές τιμές για τις σταθερές της GAB ($M_o = 1.0, C = 1.0, k = 1.0$), προκύπτουν οι ζητούμενες τιμές.

Η εξίσωση GAB που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ισορροπων υγρασιών είναι:

$$M_e = \frac{(0.635541 \cdot 2.94399e - 11 \cdot 0.965526 \cdot a_w)}{(1 - 0.965526 \cdot a_w) \cdot (1 - 0.965526 \cdot a_w + 2.94399e - 11 \cdot a_w)} \quad (32)$$

Η προσαρμογή της εξίσωσης (32) με τα πειραματικά δεδομένα για τις περιεχόμενες υγρασίες ήταν σχετικά καλή με $R^2_{adj}=0.776$, $SEE=0.7$ και $MAE=0.47$

Η ισορροπη περιεχόμενη υγρασία είναι η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος η οποία παραμένει πρακτικά σταθερή από κάποια χρονική στιγμή μέχρι το πέρας της συντήρησης για συγκεκριμένες συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση και σχετική υγρασία αέρα).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση:

Πίνακας 3.2: Τιμές περιεχόμενης υγρασίας ισορροπίας σε διάφορες συνθήκες σχετικής υγρασίας κατά την ψυχοσυντήρηση.

Σχετική Υγρασία	Υγρασία ισορροπίας M_e
45,6% (Θάλαμος)	1.135
49% ($MgCl_2$)	1.206
79% ($NaCl$)	2.679
95% (H_2O)	5.000

3.3.2 Βελτιστοποίηση

Με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης οι υπολογιστικές λύσεις που έχουν βρεθεί συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο προσδιορισμός της καλύτερης λύσης, υπολογίζοντας με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο σε κάθε επανάληψη, τη διαφορά της αναζητούμενης λύσης με τα πειραματικά δεδομένα.

Για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος, επιλέχθηκε το μοντέλο Optimization, στο οποίο ορίζονται τα ακόλουθα:

- Global Least Squares 1 : Τα δεδομένα εισόδου(περιεχόμενη υγρασία και ο χρόνος συντήρησης του προϊόντος σε δευτερόλεπτα) εισάγονται με τη μορφή αρχείου κειμένου (txt), για τη δημιουργία του οποίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Curve Expert 1.4. Το πρόγραμμα αυτό λαμβάνει τα δεδομένα και πραγματοποιεί γραμμική παρεμβολή (Linear Interpolation) η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή ενός πίνακα με τις τιμές της περιεχόμενης υγρασίας ανά ώρα. Στον πίνακα αυτό προστέθηκε η επιλογή Time Column και Value Column. Στο κελί Expression συμπληρώνεται η εξίσωση υπολογισμού της περιεχόμενης υγρασίας από τα πειραματικά δεδομένα.
- Global Control Variables 1: Εδώ ορίζονται οι παράμετροι βελτιστοποίησης και οι αρχικές τους εκτιμήσεις. Για κάθε επίπεδο σχετικής υγρασίας, χρησιμοποιείται ένα ζεύγος περιπτώσεων για την εύρεση των παραμέτρων k_m και D_{eff} . Αρχικά, ως Global Control Variables ορίζονται τα μεγέθη k_m και D_{eff} των οποίων αρχικές τιμές εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και στο τέλος της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε μορφή πίνακα. Οι αρχικές τιμές για τις παραμέτρους, προκύπτουν όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από την επίλυση αναλυτικών εξισώσεων. Τελικά, με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, λαμβάνονται εξ αυτών ένα ζεύγος τελικών λύσεων που αντιπροσωπεύουν τις ακριβείς τιμές των παραμέτρων k_m και D_{eff} . Στη δεύτερη περίπτωση, εισάγεται ως Global Control Variable μόνο ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, k_m , ενώ η μεταβλητή D_{eff} εισάγεται στο πρόγραμμα ως Parameter(δηλαδή έχει σταθερή τιμή), η τιμή της οποίας έχει προκύψει από αναλυτική επίλυση μαθηματικής εξίσωσης(Εξίσωση13).

Πραγματοποιούνται δε αυτές οι δύο προσομοιώσεις για κάθε συνθήκη υγρασίας για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης με εκείνα της αναλυτικής ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία τους.(βλ. Πίνακες3.3-1 ως 3.6-2).

Πίνακας 3.3-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 45.6 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
k_m	$7.5 \cdot 10^{-10}$ (m/s)
D_{eff}	$1.13 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.3-2: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 45.6 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
D_{eff}	$1.13 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.4-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 49 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
k_m	$7.5 \cdot 10^{-10}$ (m/s)
D_{eff}	$7.81 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.4-2: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 49%.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
D_{eff}	$7.81 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.5-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 79 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
k_m	$7.5 \cdot 10^{-10}$ (m/s)
D_{eff}	$3.00 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.5-2 Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 79 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
D_{eff}	$3.00 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.6-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 95 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
k_m	$7.5 \cdot 10^{-10}$ (m/s)
D_{eff}	$1.43 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)

Πίνακας 3.6-2: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 95 %.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή
D_{eff}	$1.43 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)

Solvers

Για την επίλυση του προβλήματος προσομοίωσης επιλέχθηκαν δύο αλγόριθμοι, ένας χρονικά εξαρτώμενος (Time Dependent Solver) κι ένας αλγόριθμος

βελτιστοποίησης (Optimization Solver). Για τη βελτιστοποίηση έχει επιλεγεί η μέθοδος Levenberg-Marquardt, η οποία απαιτεί να εισαχθούν στο πρόγραμμα οι αρχικές τιμές/ εκτιμήσεις των παραμέτρων βελτιστοποίησης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εκτίμηση επιφάνειας και όγκου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε δείγματα της ποικιλίας νεκταρινιών, καταγράφηκε η μάζα και υπολογίστηκε το εμβαδόν της επιφάνειας τους και ο όγκος. Το προϊόν θεωρήθηκε σφαιρικό για τη διευκόλυνση των υπολογισμών και χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που κατεγράφησαν για τον προσδιορισμό του όγκου του καρπού ως συνάρτηση της μάζας του.

Μέσω γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε:

$$V = 0.00098122 \cdot m \quad (33)$$

όπου: V είναι ο όγκος του προϊόντος (m^3) και m η μάζα του (kg). Η εξίσωση καλύπτει ένα εύρος μαζών 37 δειγμάτων από 0,105 έως 0.207 kg και αντίστοιχα όγκου από 0.0001 έως 0.0002 m^3 . Τα προβλεπόμενα δεδομένα είχαν αρκετά καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά με $R^2_{adj}=0.998$, $SEE=4.7 \cdot 10^{-6}$ και μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)= $3.8 \cdot 10^{-6}$ ($P<0.05$).

Η επιφάνεια των δειγμάτων υπολογίστηκε, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας ImageJ και υπολογίστηκε ως το άθροισμα των επιμέρους τμημάτων του φλοιού για κάθε νεκταρίνι. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας από το πρόγραμμα ImageJ αναλύθηκαν στο λογισμικό στατιστικής επεξεργασίας Statgraphics και το μοντέλο που περιγράφει ακριβέστερα τα πειραματικά δεδομένα είναι:

$$S = (0.29551 \cdot (\sqrt{m}))^2 \quad (34)$$

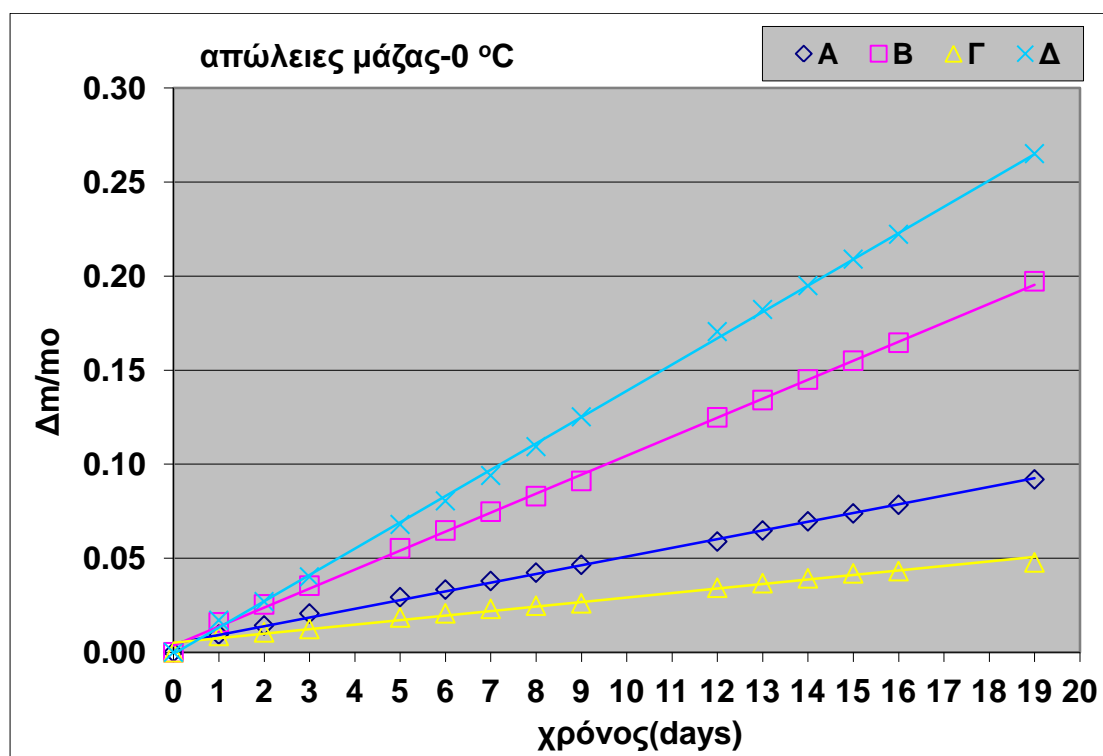
όπου: S είναι η επιφάνεια του καρπού σε (m^2) και m η μάζα του καρπού σε (kg). Τα προβλεπόμενα δεδομένα είχαν αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά με $R^2_{adj}=0.999$, $SEE=4.8 \cdot 10^{-3}$ και μέσο απόλυτο σφάλμα $3.7 \cdot 10^{-4}$ ($P<0.05$).

4.2 Απώλειες μάζας

Οι απώλειες μάζας υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα (μέτρηση της μάζας των φρούτων κατά τη διεξαγωγή του πειράματος σε τακτά χρονικά διαστήματα) και παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή $\frac{\Delta m}{m} = \frac{m_0 - m}{m_0}$ με m_0 την αρχική μάζα κάθε δείγματος και m τη μάζα του δείγματος κατά τον χρόνο μέτρησης. Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζονται οι απώλειες μάζας για κάθε περίπτωση υγρασιών συντήρησης με:

- A: σειρά δεδομένων για τα δείγματα που βρίσκονται σε υγρασία 79%
- B: σειρά δεδομένων για τα δείγματα που βρίσκονται σε υγρασία 49%
- Γ: σειρά δεδομένων για τα δείγματα που βρίσκονται σε υγρασία 95%
- Δ: σειρά δεδομένων για τα δείγματα που βρίσκονται σε μέση υγρασία θαλάμου 45.6%

Για κάθε σειρά δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων όλων των δειγμάτων που βρισκότουσαν στις ίδιες συνθήκες υγρασίας συντήρησης. Οι μετρήσεις μάζας πραγματοποιούνταν καθημερινά.



Διάγραμμα 4.1: Απώλειες μάζας νεκταρινιών συναρτήσει του χρόνου συντήρησής στους 0 °C και σε 4 επίπεδα σχετικής υγρασίας. Τα σημεία αντιστοιχούν στις πειραματικές τιμές και οι γραμμές στις προβλεπόμενες.

Παρατηρείται ότι οι απώλειες μάζας των καρπών στις τέσσερις διαφορετικές συνθήκες σχετικής υγρασίας αυξάνονται γραμμικά με το χρόνο συντήρησης. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι καρποί που βρίσκονταν σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 45,6% (συντήρηση σε συνθήκες θαλάμου) εμφάνισαν μεγαλύτερες απώλειες μάζας (έφτασαν στο τέλος της συντήρησης το 30%) στο ίδιο χρονικό διάστημα συντήρησης λόγω του υψηλότερου ελλείμματος πίεσης υδρατμών. Διαπιστώνεται, όπως και ήταν αναμενόμενο, ότι μετά τη σειρά Δ, ακολουθεί η Β με απότομες απώλειες μάζας και ύστερα από αυτή η Α και τελευταία η Γ. Για τις περιπτώσεις Α και Γ, σχετική υγρασία μεγαλύτερη του 80% οι απώλειες υγρασίας που σημειώθηκαν ήταν μέσα στα πλαίσια των επιτρεπόμενων για διατήρηση της εμπορικής αξίας του τελικού προϊόντος.

Εν κατακλείδι, σε χαμηλότερη σχετική υγρασία οι τελικές απώλειες ήταν σημαντικά μεγαλύτερες για τον ίδιο χρόνο συντήρησης.

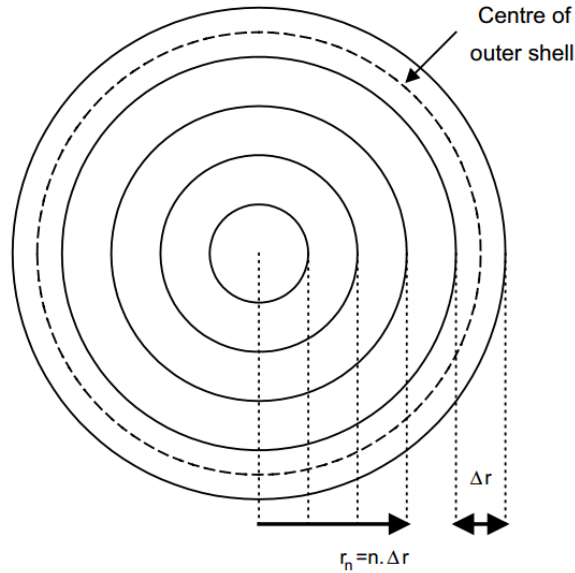
4.3 Φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} και συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς μάζας, k_m , και του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης D_{eff} και η διαμόρφωση αυτών σε κάθε περίπτωση υγρασίας του αέρα συντήρησης. Ακόμη, γίνεται σύγκριση των τιμών που προέκυψαν κατά την προσομοίωση με μόνη μεταβλητή προς βελτιστοποίηση το k_m και αυτών που προέκυψαν για την προσομοίωση με δύο μεταβλητές προς βελτιστοποίηση, k_m και D_{eff} . Τέλος, για τις τιμές του D_{eff} γίνεται μία περαιτέρω αξιολόγηση η οποία αφορά τη διαφορά μεταξύ των αρχικών εκτιμήσεων που προέκυψαν από την επίλυση αναλυτικής εξίσωσης και αυτών που υπολογίστηκαν αριθμητικά.

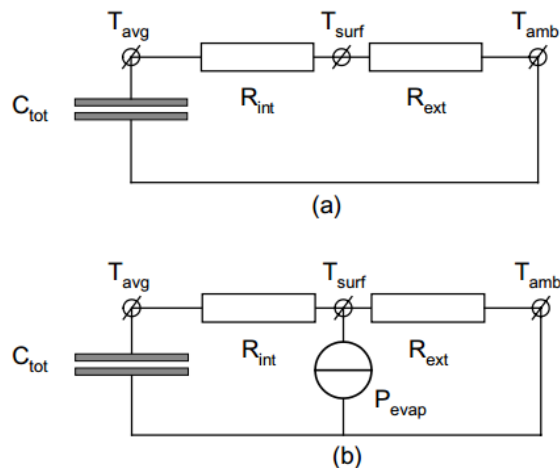
Αντίσταση στην κίνηση του νερού

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, ερμηνεύονται ακολουθώντας την ανάλυση του Van der Sman (2002). Σύμφωνα με αυτή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο για την περιγραφή του φαινομένου της ψύξης τροφίμων κυλινδρικού σχήματος με ταυτόχρονη εξάτμιση νερού από την επιφάνειά τους. Το απλοποιημένο μοντέλο για τη μεταφορά θερμότητας και μάζας, είναι ένας κύλινδρος ο οποίος αποτελείται από δύο διακριτούς και ομόκεντρους δακτυλίους διαφορετικής ακτίνας και απείρου μήκους. Ο εξωτερικός αντιπροσωπεύει το κέλυφος (shell) και ο εσωτερικός τον πυρήνα

(core) (βλ.Εικ.11). Η αντίσταση της μεταφοράς του νερού από το κέντρο του κυλίνδρου προς την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους παραλληλίζεται με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που διαθέτει αντιστάσεις σε σειρά, και οι οποίες εμποδίζουν την κίνηση του ρεύματος(βλ.Εικ.12). Το παραπάνω μοντέλο γενικεύτηκε για εφαρμογή σε τρόφιμα σφαιρικού σχήματος, όπως είναι η περίπτωση των νεκταρινιών.



Εικόνα 4.1: Παρουσίαση της υποδιαίρεσης κυλινδρικού τροφίμου σε χαρακτηριστικά υποχωρία ορισμένης ακτίνας. (Van der Sman ,2002)



Εικόνα 4.2: Παρουσίαση του ηλεκτρικού αναλόγου για την κατανόηση της επίδρασης των συντελεστών μεταφοράς μάζας και θερμότητας στο πρόβλημα της ψύξης τροφίμων με ταυτόχρονη εξάτμιση νερού από την επιφάνειά τους. (Van der Sman ,2002)

Το ισοζύγιο θερμότητας , με μόνο ακτινική μεταβολή της θερμοκρασίας του φρούτου, είναι:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = h_{ext}(T - T_{amb}) + H_{vap} \cdot k_{tot}(c_{sat}(T) - c_{amb}) \quad (35)$$

Όπου h_{ext} είναι σταθερός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο εξωτερικό οριακό στρώμα, T_{amb} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα, H_{vap} η ενθαλπία εξάτμισης, k_{tot} ο συνολικός σταθερός συντελεστής μεταφοράς μάζας, c_{amb} η συγκέντρωση των υδρατμών στον περιβάλλοντα αέρα και $c_{sat}(T)$ η συγκέντρωση των υδρατμών στον περιβάλλοντα αέρα σε συνθήκες κορεσμού, η οποία αφορά το οριακό στρώμα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία που έχει αυτό σε κάθε χρονική στιγμή.

Ο συντελεστής k_{tot} εμπεριέχει τον συντελεστή k_{ext} , που αφορά την μεταφορά μάζας στο εξωτερικό οριακό στρώμα και τον k_{skin} , που αφορά τη μεταφορά μάζας στην επιδερμίδα στην περίπτωση που το προϊόν δεν είναι αποφλοιωμένο.

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής μεταφοράς μάζας μέσω της επιδερμίδας είναι αδύνατον να υπολογιστεί. Εδώ ο συντελεστής k_{skin} θεωρείται αμελητέος, δηλαδή :

$$k_{tot} = k_{ext} \quad (36)$$

Η παραπάνω παραδοχή, σημαίνει πως για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και για τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, οι τιμές k_m που θα παρουσιαστούν για την αντίσταση της επιδερμίδας στην μεταφορά νερού, αντιστοιχούν στη συνολική σταθερά k_{tot} .

Φαινόμενος Συντελεστής Διάχυσης

Η αριθμητική επίλυση του Νόμου Fick, απετέλεσε ένα μέσο εκτίμησης του μεγέθους του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης D_{eff} , οι τιμές του οποίου εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική επίλυση του προβλήματος.

Η εξίσωση με την οποία έγιναν οι αρχικοί υπολογισμοί είναι η εξ (13).

Παρατηρείται ότι στην εξ(13) χρησιμοποιούνται πεπερασμένες διαφορές τόσο στον αριθμητή, όσο και στον παρονομαστή του κυρίως κλάσματος. Οι πεπερασμένες διαφορές για την απώλεια της υγρασίας (MR) υπολογίζονται με

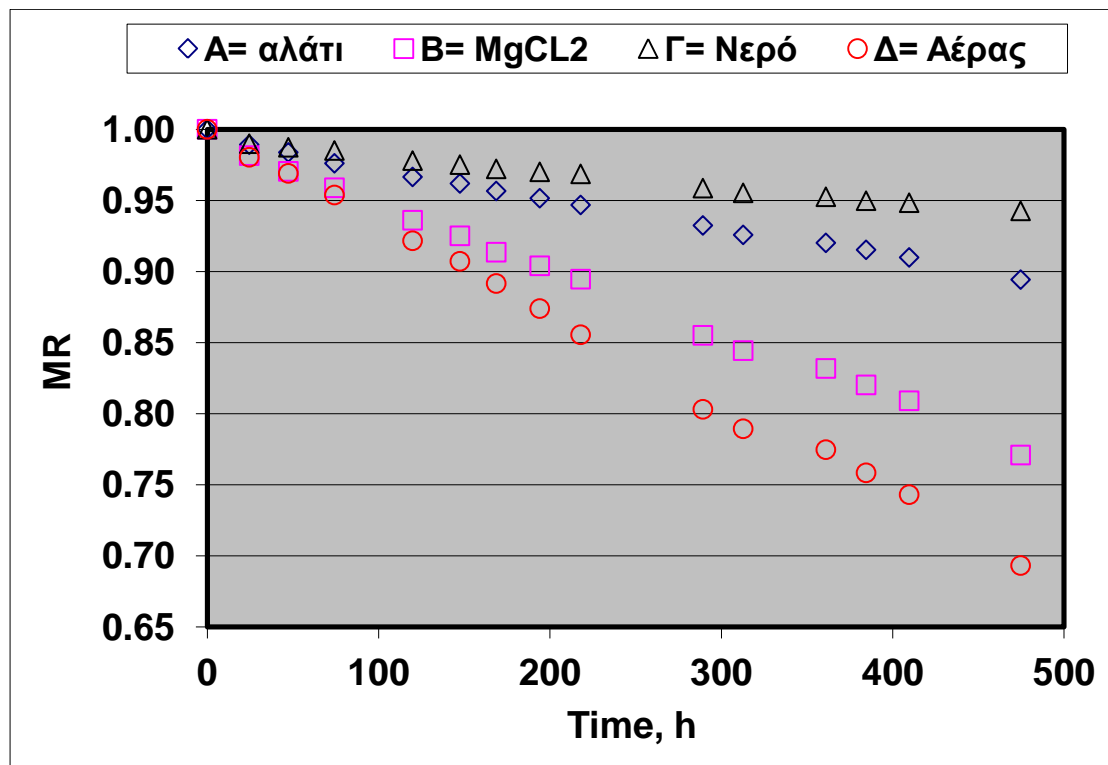
βάση τα πειραματικά δεδομένα των απωλειών μάζας, του βάρους του φρούτου (νωπό και ξηρή μάζα), το βάρος του πυρήνα και τη χρήση των σχέσεων:

$$MC_{db} = \frac{MC_w - MC_d - m_k}{MC_d} \quad (37)$$

$$MR = \frac{MC_{db}}{MC_{dbin}} \quad (38)$$

Όπου MC_{db} η περιεχόμενη υγρασία σε ξηρή βάση, MC_w η μάζα του νωπού προϊόντος, MC_d η μάζα της ξηράς ουσίας, m_k η μάζα του κουκουτσιού, MR η αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία και MC_{dbin} η αρχική τιμή υγρασίας.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε σειρά μετρήσεων.



Διάγραμμα 4.2: Μείωση της αδιάστατης περιεχόμενης υγρασίας νεκταρινιών συναρτήσει του χρόνου συντήρησής στους 0 °C και σε 4 επίπεδα σχετικής υγρασίας.

Στο διάγραμμα 2, η αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία ακολουθεί πτωτική πορεία καθ'όλο το χρονικό διάστημα συντήρησης, με πιο έντονη την μείωση της υγρασίας για τα δείγματα που βρίσκονταν σε συνθήκες θαλάμου (αέρας). Αυτό

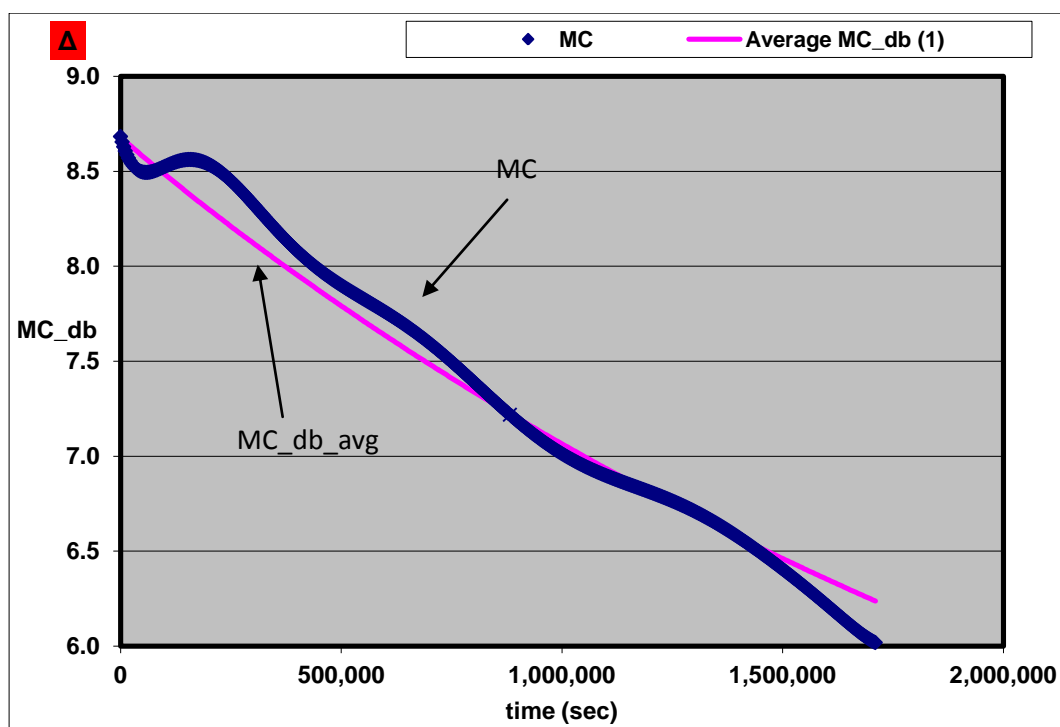
όπως και η συνολική εικόνα του γραφήματος, είναι αναμενόμενα για τους λόγους που αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.2.

4.3.1 Συντήρηση σε σχετική υγρασία θαλάμου(45,6%)

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, για τον συντελεστή k_m και το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης του νερού D_{eff} για τη συντήρηση νεκταρινιών σε θερμοκρασία 0°C και σχετική υγρασία αέρα ίση με 45,6%.

Περιεχόμενη υγρασία

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η περιεχόμενη υγρασία συναρτήσει του χρόνου συντήρησης, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις και το υπολογιστικό μοντέλο:



Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 45.6%. Με δείκτη MC απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα και με MC_db_avg τα προβλεπόμενα.

Όπως παρατηρείται, η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών από τις πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ μικρή και το σφάλμα που υπολογίζεται ισούται με 0,3%.

Στο διάγραμμα 3 παρατηρείται ότι στους αρχικούς χρόνους, υπάρχει μία εμφανής απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των προβλέψεων του μοντέλου Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί σε κάποιο βαθμό, από το γεγονός ότι τα δείγματα που βρίσκονταν στην υγρασία του θαλάμου, βρίσκονταν εκτός κελιού και κατά συνέπεια οι συνθήκες συντήρησής τους, διαταράσσονταν από την είσοδο στους θαλάμους για τη λήψη μετρήσεων.

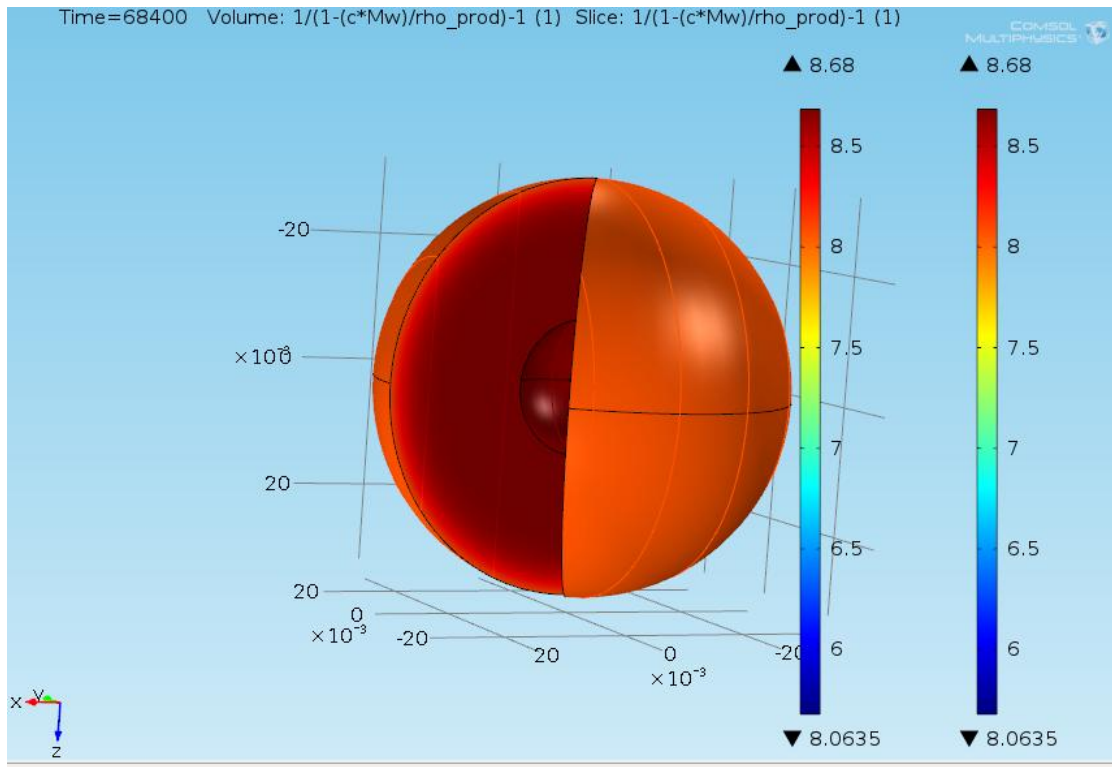
Συντελεστής διάχυσης και συντελεστή μεταφοράς μάζας

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης D_{eff} και για το συντελεστή μεταφοράς μάζας k_m .

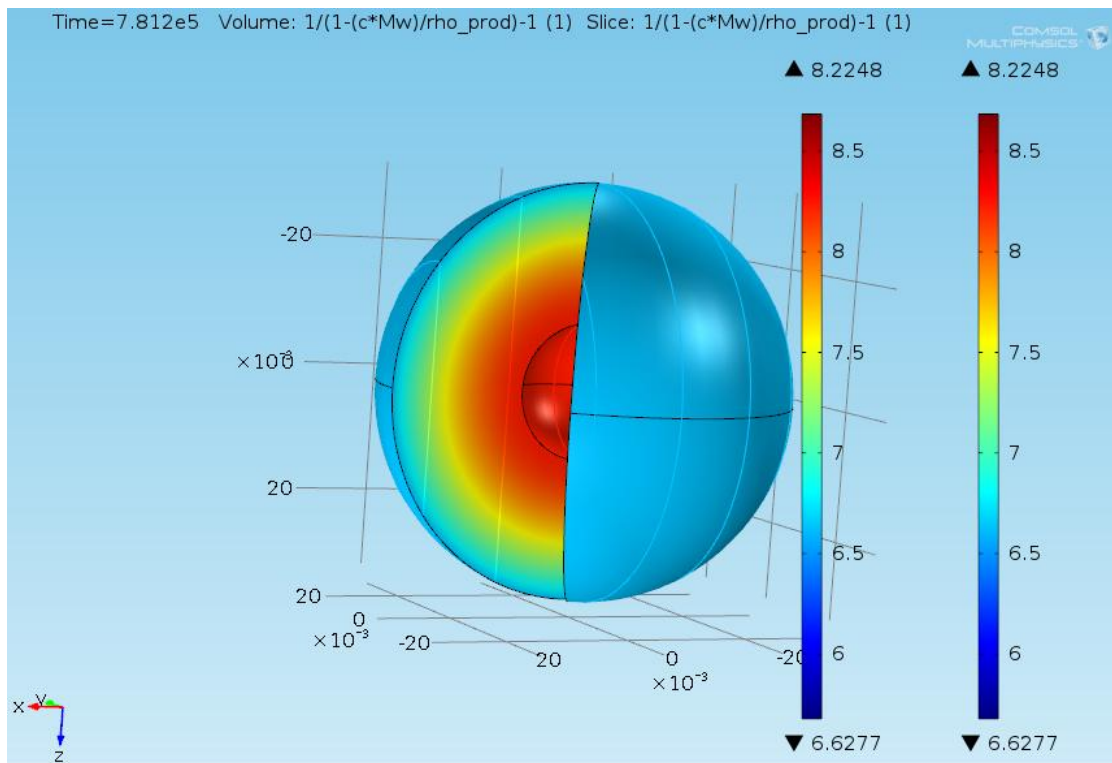
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 45.6%.

D_{eff}		k_m	
Αναλυτική λύση	Αριθμητική λύση	Βελτιστοποίηση k_m	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
$1.13 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)	$1.06 \cdot 10^{-10}$ (m ² /s)	$9.12 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	$6.29 \cdot 10^{-10}$ (m/s)

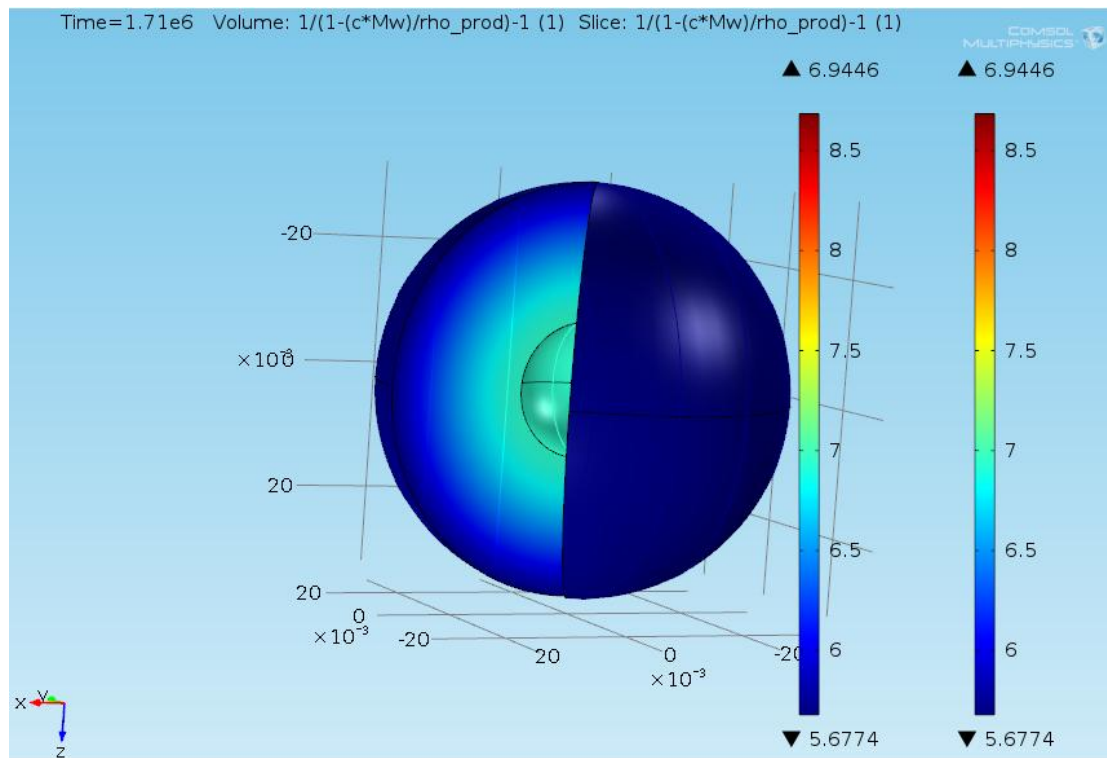
Εν συνεχεία, παρατίθενται τα στιγμιότυπα για χαρακτηριστικούς χρόνους συντήρησης. Με τη βοήθεια του Comsol Multiphysics 4.3b, εξάγονται επιλεγμένες εικόνες, από ένα σύνολο 25 στιγμιότυπων. Συγκεκριμένα, επιλέγεται μία εικόνα που αντιστοιχεί στο 2^ο στιγμιότυπο και σε αρχικούς χρόνους ψύξης, μία που αντιστοιχεί σε χρονική στιγμή κοντά στο ήμισυ του συνολικού χρόνου συντήρησης (12^ο στιγμιότυπο) και μία που αντιστοιχεί σε χρόνο ίσο με τον χρόνο συντήρησης (25^ο στιγμιότυπο). Σε καθένα από αυτά, απεικονίζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας, με τη βοήθεια χρωματικών διαβαθμίσεων. Σύμφωνα με την αριθμητική και χρωματική κλίμακα που βρίσκεται στο αριστερό μέρος κάθε εικόνας, με έντονο κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύεται η υψηλή περιεκτικότητα του φρούτου σε νερό και αυτή η εικόνα απαντάται στα πρώτα στάδια της συντήρησης. Με τη πάροδο του χρόνου και την συνεχώς αυξανόμενη απώλεια ύδατος, τα στιγμιότυπα αποκτούν μπλε και γαλάζιες αποχρώσεις, με το τελευταίο διάγραμμα να αποτελεί την εικόνα που αντιπροσωπεύει το φρούτο όταν η περιεχόμενη υγρασία του ισούται με την υγρασία στο τέλος της συντήρησης



Εικόνα 4: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=19h$) κατά τη συντήρηση.



Εικόνα 4.4: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=9 d$) κατά τη συντήρηση.



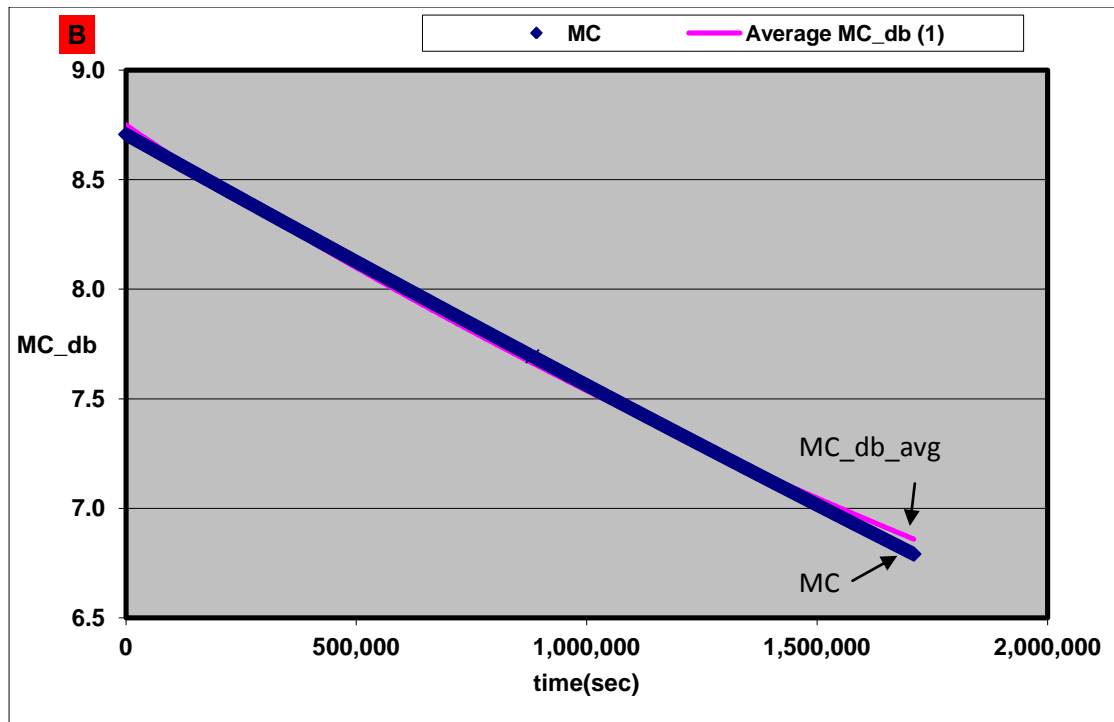
Εικόνα 5: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=20$ d) κατά τη συντήρηση.

4.3.2 Συντήρηση σε σχετική υγρασία 49%

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, για τον συντελεστή k_m και το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης του νερού D_{eff} για τη συντήρηση νεκταρινιών σε θερμοκρασία 0°C και σχετική υγρασία αέρα ίση με 49%.

Περιεχόμενη υγρασία

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η περιεχόμενη υγρασία συναρτήσει του χρόνου συντήρησης, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις και το υπολογιστικό μοντέλο:



Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 49%. Με δείκτη MC απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα και με MC_db_avg τα προβλεπόμενα.

Η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών από τις πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ μικρή και το σφάλμα που υπολογίζεται είναι 0,04%.

Αξίζει να σημειωθεί η διαφοροποίηση του διαγράμματος 3 με αυτό που αφορά την περίπτωση συντήρησης σε σχετική υγρασία 49%. Στο Διάγραμμα 4 η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών περιεχόμενης υγρασίας είναι σαφώς καλύτερη από αυτή στο Διάγραμμα 3 καθώς εδώ τα φρούτα βρίσκονται κλεισμένα σε ειδικό κελί και σε σταθερές συνθήκες υγρασίας και χωρίς την επίδραση της ταχύτητας του αέρα συντήρησης, ο οποίος εν προκειμένω θεωρείται ακίνητος.

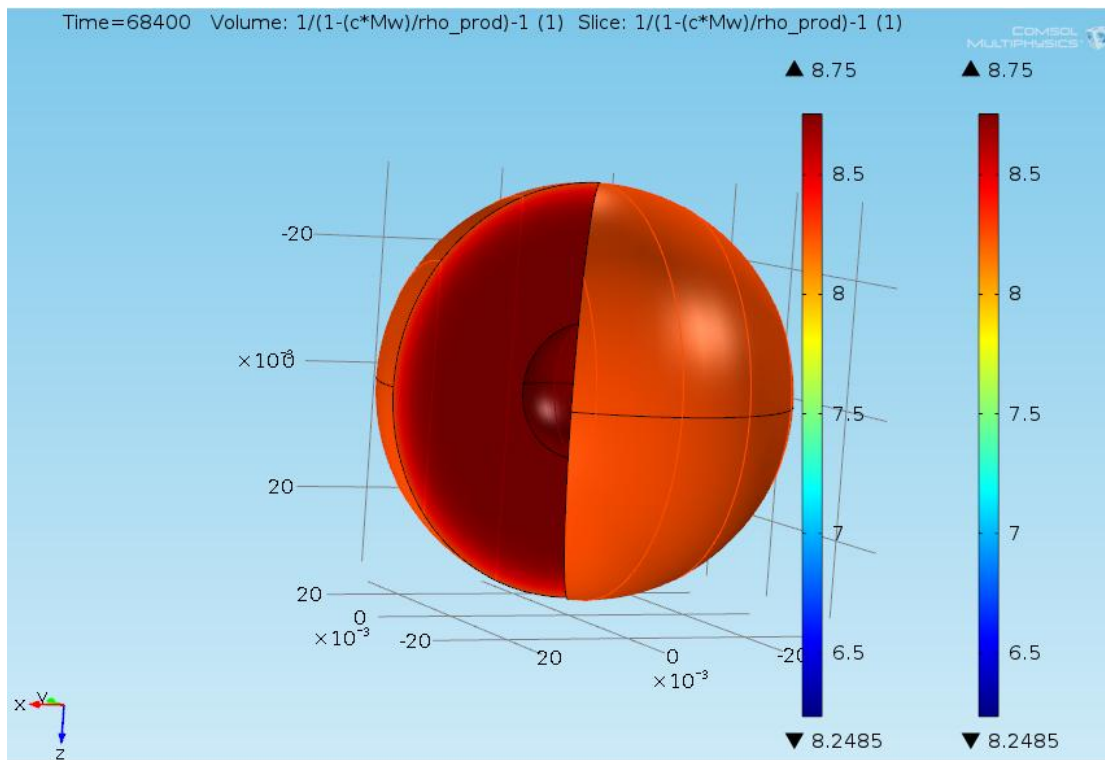
Συντελεστής διάχυσης και συντελεστής μεταφοράς μάζας

Αντίστοιχα, προσδιορίστηκαν ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m .

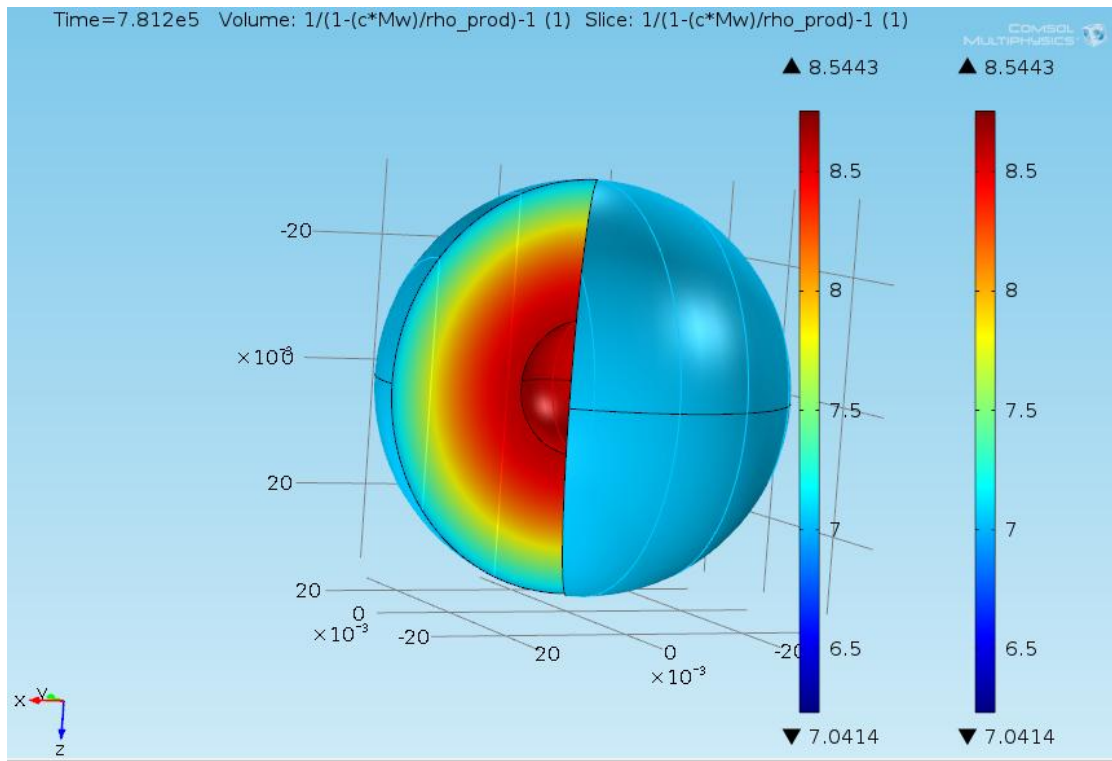
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 49%.

D_{eff}		k_m	
Αναλυτική λύση	Αριθμητική λύση	Βελτιστοποίηση k_m	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
$7.81 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)	$7.91 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)	$4.58 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	$4.60 \cdot 10^{-10}$ (m/s)

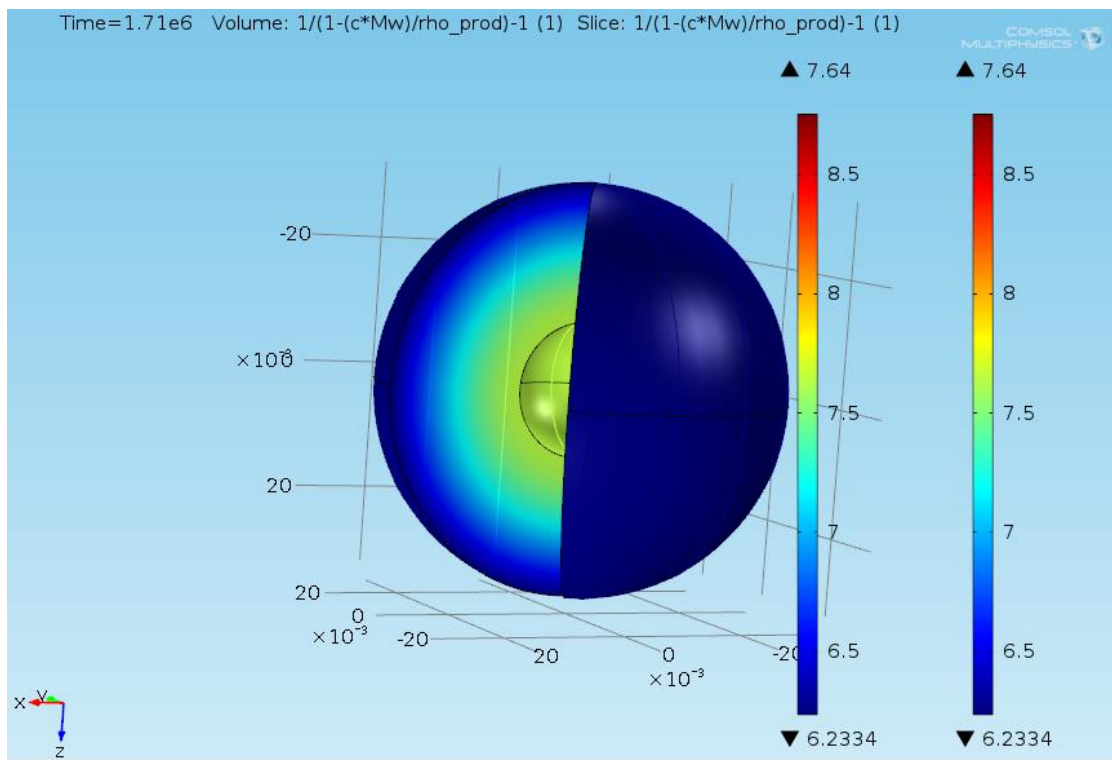
Με ανάλογο τρόπο όπως στην προηγούμενη περίπτωση, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη συντήρηση σε συνθήκες υγρασίας 49%. Στην περίπτωση αυτή, αναμένεται τα στιγμιότυπα για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές να παρουσιάζουν αρκετή ομοιότητα με την προηγούμενη περίπτωση, λόγω της μικρής διαφοράς συνθηκών υγρασίας που υπήρχε μεταξύ των δύο. Μικρή εξαίρεση αποτελεί το στιγμιότυπο για το πέρας της συντήρησης.



Εικόνα 6: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=19h$) κατά τη συντήρηση.



Εικόνα 4.7: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=9 d) κατά τη στη συντήρηση.



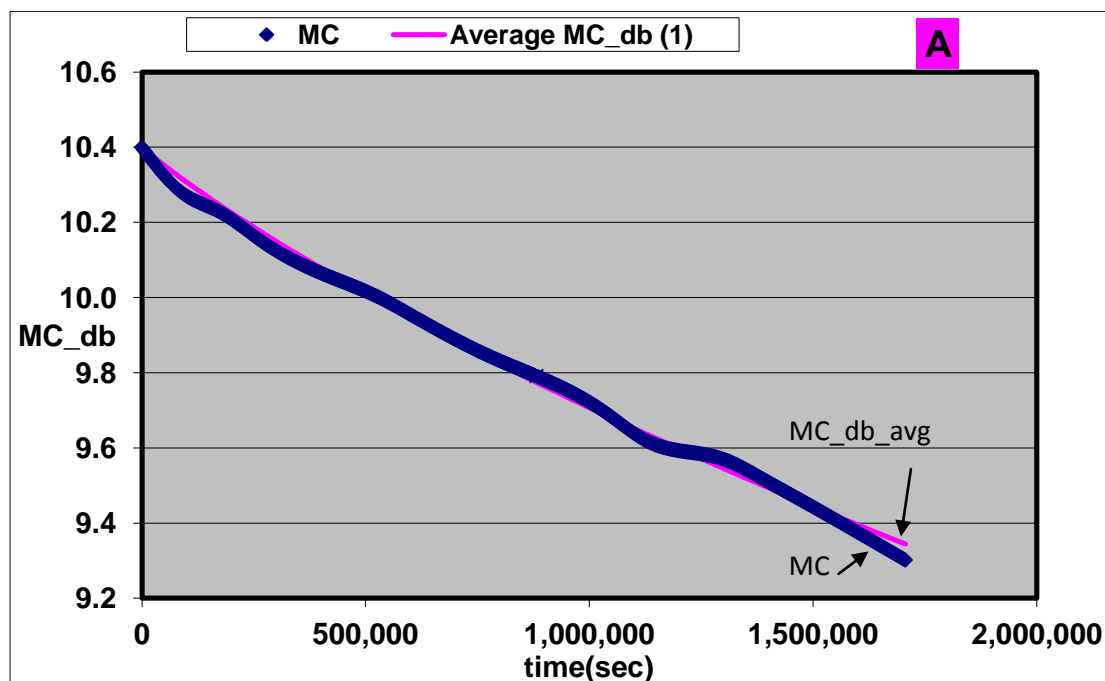
Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=20 d) κατά τη συντήρηση.

4.3.3 Συντήρηση σε σχετική υγρασία 79%.

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, για τον συντελεστή k_m και το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης του νερού D_{eff} για τη συντήρηση νεκταρινιών σε θερμοκρασία 0°C και σχετική υγρασία αέρα ίση με 79%.

Περιεχόμενη υγρασία

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η περιεχόμενη υγρασία συναρτήσει του χρόνου συντήρησης, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις και το υπολογιστικό μοντέλο:



Διάγραμμα 4.5: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 79%. Με δείκτη MC απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα και με MC_db_avg τα προβλεπόμενα.

Η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών από τις πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ μικρή και το σφάλμα που υπολογίζεται είναι 0,03%.

Συντελεστής διάχυσης και αντίσταση της επιδερμίδας

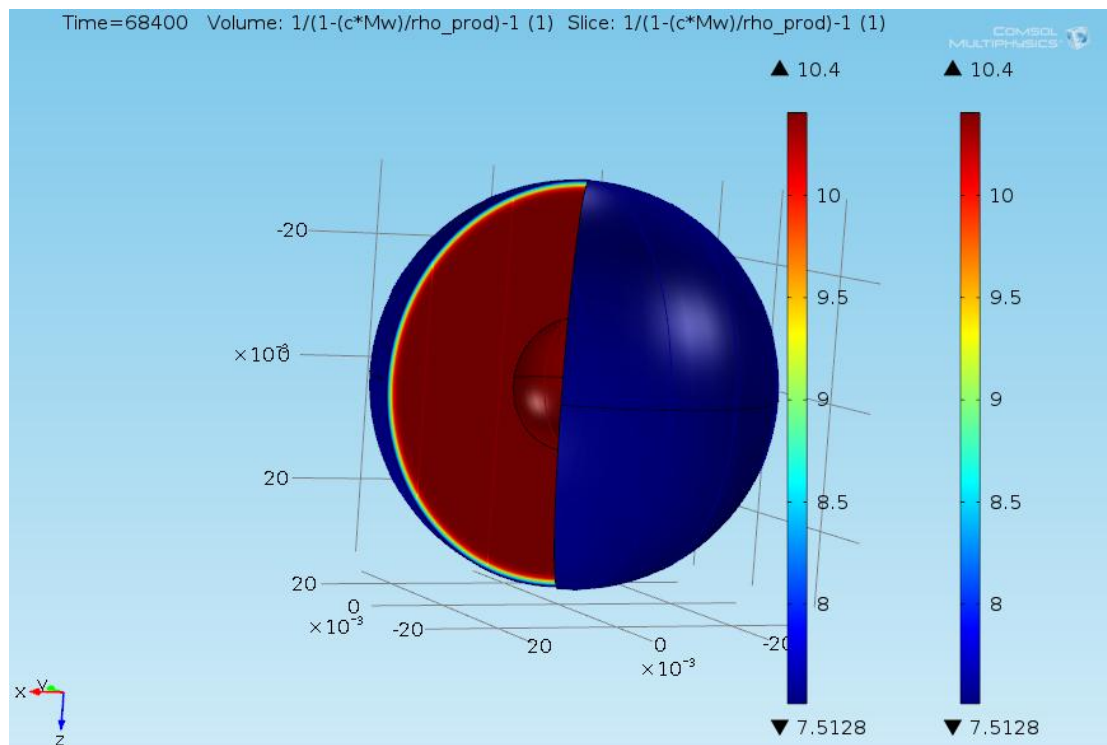
Αντίστοιχα, προσδιορίστηκε ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m .

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 79%.

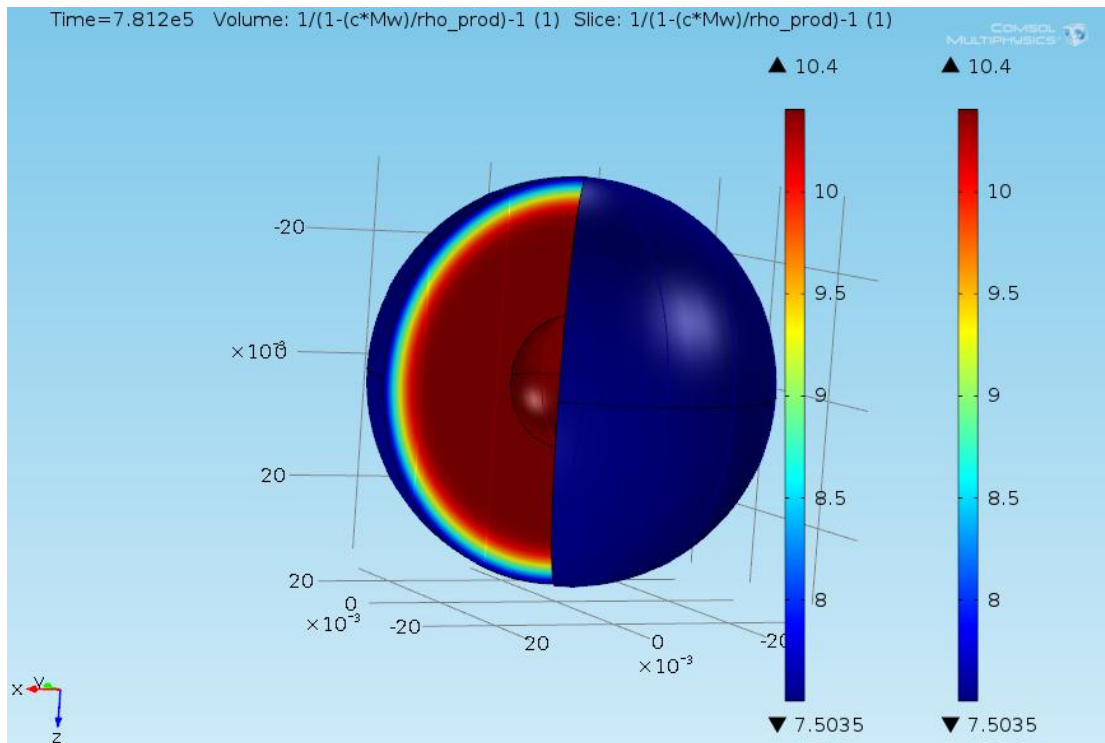
D_{eff}		k_m	
Αναλυτική λύση	Αριθμητική λύση	Βελτιστοποίηση k_m	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
$3.00 \cdot 10^{-12} (m^2/s)$	$2.93 \cdot 10^{-12} (m^2/s)$	$4.79 \cdot 10^{-10} (m/s)$	$4.72 \cdot 10^{-10} (m/s)$

Παρουσιάζονται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα για τη συντήρηση των δειγμάτων σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 79%, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

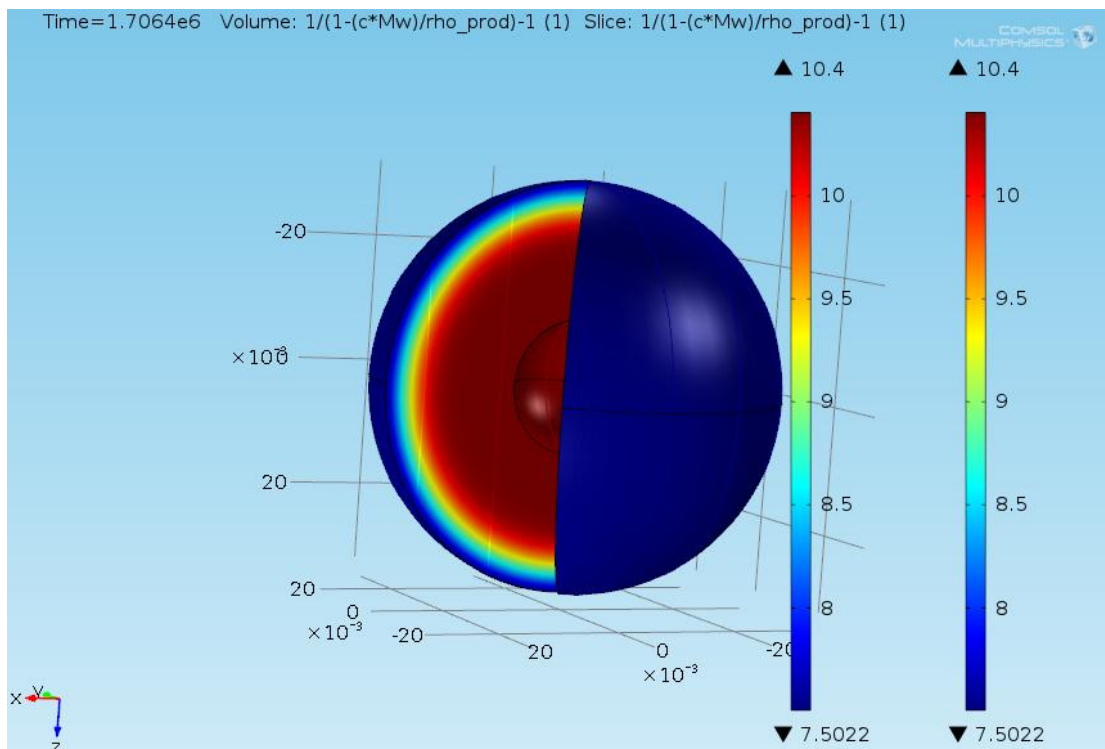
Σαφώς και η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ πιο ήπια σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις και αυτό είναι αναμενόμενο.



Εικόνα 4.9: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=19h$) κατά τη συντήρηση.



Εικόνα 4.10: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=9$ d) κατά τη συντήρηση.



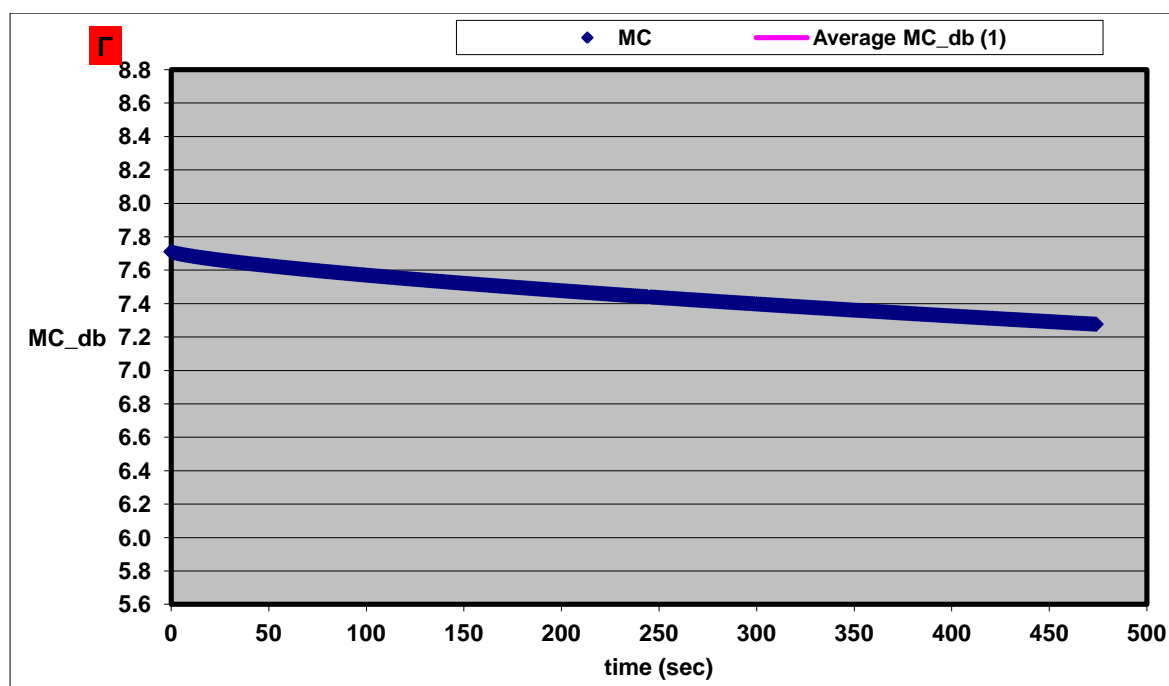
Εικόνα 4.11: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=20$ d) κατά τη συντήρηση.

4.3.4 Συντήρηση σε σχετική υγρασία 95%

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος, για τον συντελεστή k_m και το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης του νερού D_{eff} για τη συντήρηση νεκταρινιών σε θερμοκρασία 0°C και σχετική υγρασία αέρα ίση με 95%.

Περιεχόμενη υγρασία

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η περιεχόμενη υγρασία συναρτήσει του χρόνου συντήρησης, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις και το υπολογιστικό μοντέλο:



Διάγραμμα 4.6: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 95%.

Η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών από τις πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ μικρή και το σφάλμα που υπολογίζεται είναι 0,006%. Στην περίπτωση αυτή, η ταύτιση των πειραματικών δεδομένων με τις προβλεπόμενες τιμές είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την οπτική διάκριση της μίας σειράς δεδομένων από την άλλη (Διάγραμμα 6).

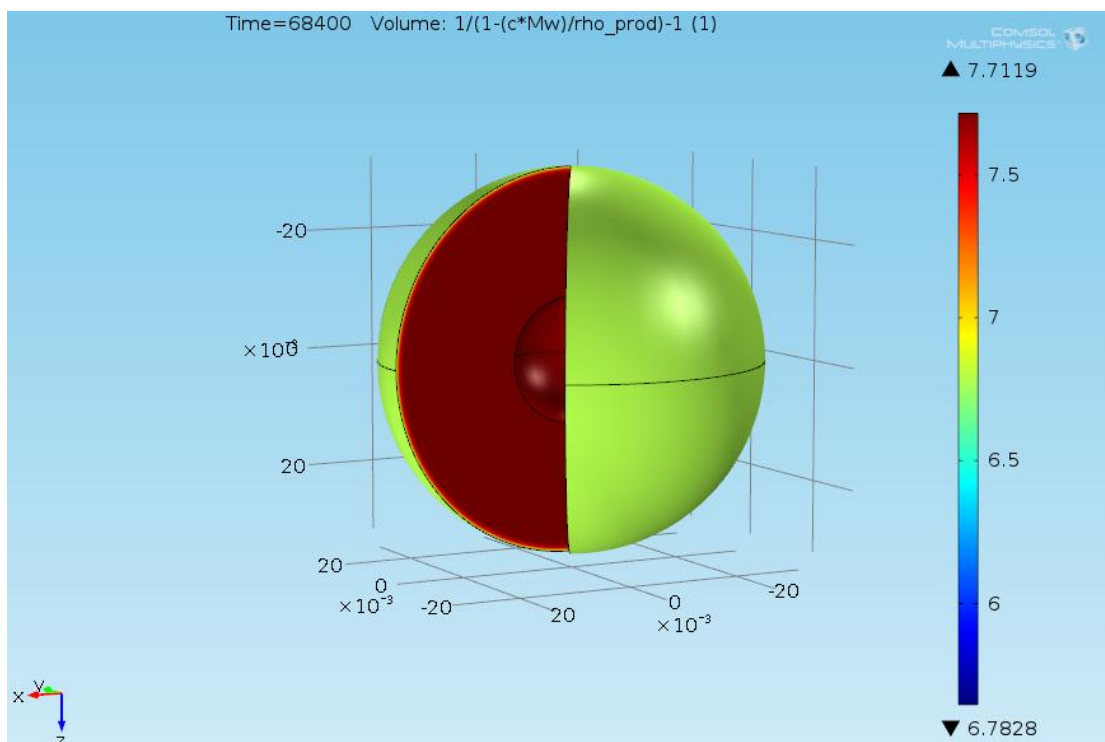
Συντελεστής διάχυσης και αντίσταση της επιδερμίδας

Αντίστοιχα, προσδιορίστηκε ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης D_{eff} και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m .

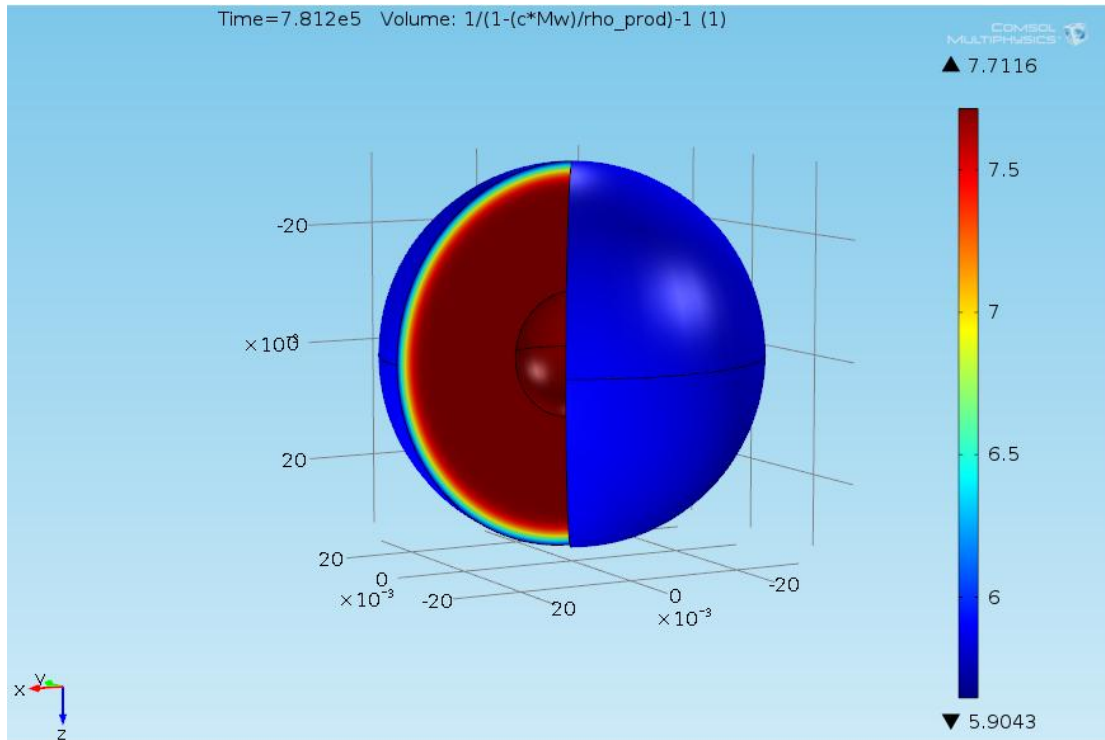
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 95%.

D_{eff}		k_m	
Αναλυτική λύση	Αριθμητική λύση	Βελτιστοποίηση k_m	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
$1.43 \cdot 10^{-12} \text{ (m}^2/\text{s)}$	$2.48 \cdot 10^{-12} \text{ (m}^2/\text{s)}$	$4.99 \cdot 10^{-09} \text{ (m/s)}$	$1.73 \cdot 10^{-09} \text{ (m/s)}$

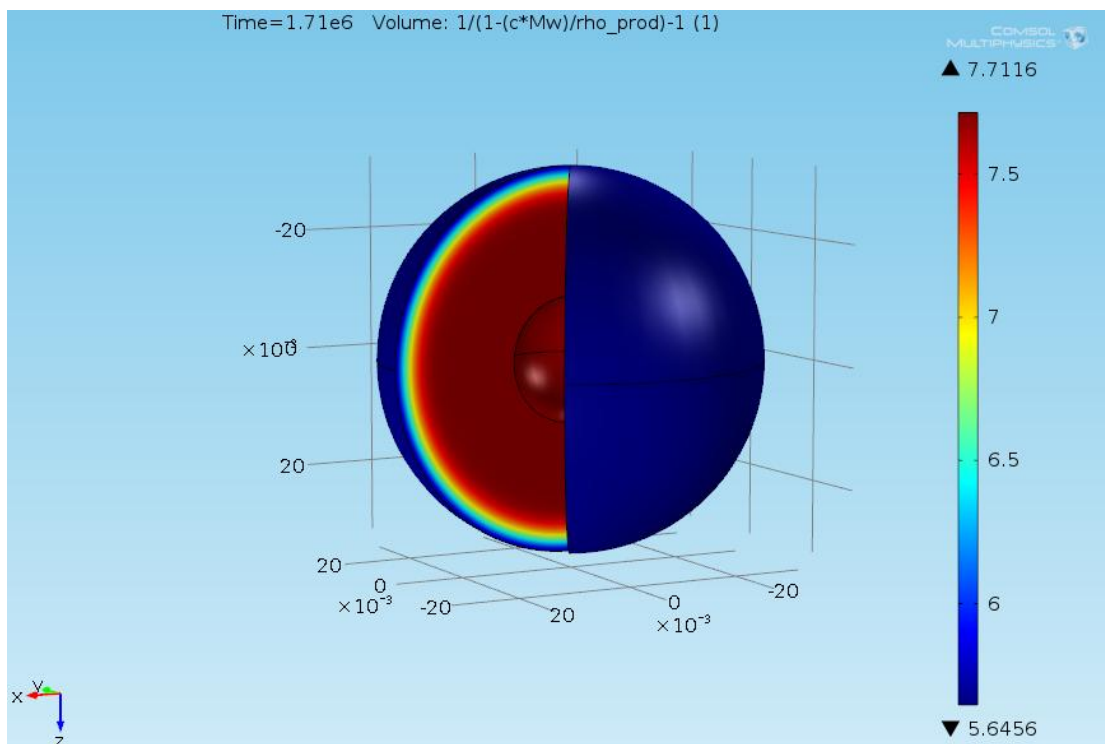
Τέλος, παρουσιάζονται και σε αυτή την περίπτωση τα στιγμιότυπα για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές κατά τη συντήρηση.



Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την $t=19h$) κατά τη συντήρηση.



Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=9 d) κατά τη συντήρηση.



Εικόνα 4.14: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=20 d) κατά τη συντήρηση.

4.4 Αναπνοή, υπολογισμός, προτυποποίηση και ποσοτικοποίηση παραγόμενου νερού

Ο υπολογισμός του αναπνευστικού ρυθμού αποτελεί το πιο ευαίσθητο τμήμα του πειράματος καθώς το φαινόμενο είναι συνεχές και διαφοροποιείται σε ένταση και έκταση σε κάθε επίπεδο υγρασίας που εξετάστηκε. Οι αναπνευστικοί ρυθμοί κατεγράφησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος για όλα τα δοκίμια και για κάθε περίπτωση συντήρησης.

Σημείο άξιο παρατήρησης απετέλεσε το κλιμακτηριακό μέγιστο (κλιμακτηριακή κρίση), δηλαδή η χρονική στιγμή κατά την οποία μετράται ο πιο έντονος αναπνευστικός ρυθμός για κάθε περίπτωση. Πριν από το σημείο αυτό, ο αναπνευστικός ρυθμός ακολουθεί τυπικά αυξητική τάση ενώ μετά από αυτό φθίνει σταδιακά. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μπορούσαν να διακοπούν μόνο μετά την κλιμακτηριακή κρίση και εφόσον οι καρποί είχαν υποστεί αλλοιώσεις τέτοιες που θα επηρέαζαν την αξιοπιστία των μετρήσεων (τραυματισμοί, ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνειά τους κ.α.)

Σε συνθήκες συντήρησης 0°C, δεν είναι πάντοτε εύκολος ο προσδιορισμός του κλιμακτηριακού μεγίστου. Ορισμένες φορές ακολουθείται από μία σταθερή πορεία μείωσης αυτού συναρτήσει του χρόνου. Η λήψη συχνότερων μετρήσεων τις αναπνευστικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας (μέτρηση αναπνοής σε πυκνότερα χρονικά διαστήματα ιδιαίτερα στις χαμηλότερες θερμοκρασίες συντήρησης), θα μπορούσε να δώσει καλύτερη εικόνα της κλιμακτικής κρίσης.

Για την αξιολόγηση των αναπνευστικών ρυθμών, υπολογίστηκε ο μέσος αναπνευστικός ρυθμός και συγκρίνεται με βιβλιογραφικά δεδομένα τα οποία βρίσκονται εντός των ορίων 0.2-0.3 ml CO₂/100g h για ενδεικνυόμενες συνθήκες αποθήκευσης των νεκταρινιών, 0 °C έως -1 °C και σχετική υγρασία θαλάμου RH=90-95%. Ειδικότερα, οι μέσοι όροι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.5: Μέσοι αναπνευστικοί ρυθμοί για κάθε σχετική υγρασία συντήρησης.

Συνθήκες Υγρασίας	Αναπνευστικός ρυθμός (ml CO ₂ /100gr h)
Δ(αέρας: 45.6%)	0.37±0.10
Β (MgCl ₂ : 49%)	0.30±0.06
Α(NaCl : 79%)	0.24±0.04
Γ(H ₂ O : 95%)	0.32±0.06

Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση Δ, στην οποία όμως οι συνθήκες συντήρησης δεν ενδείκνυνται έτσι κι αλλιώς για την αποθήκευση και διατήρηση ασυσκευάστων οπωρολαχανικών λόγω της χαμηλής σχετικής υγρασίας. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται σε εμπορικούς θαλάμους με την εφαρμογή ψεκασμού νερού υπό την μορφή νέφους (νεφελοψεκαστές). Η περίπτωση Α βρίσκεται εντός των συνιστώμενων συνθηκών συντήρησης. Τέλος, για την περίπτωση Γ, η οποία και αντιπροσωπεύει τις βέλτιστες συνθήκες συντήρησης, παρατηρείται πως ο μέσος αναπνευστικός ρυθμός είναι ελαφρώς πιο πάνω από τα αποδεκτά όρια. Αυτό οφείλεται πιθανότατα σε πειραματικό σφάλμα κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Προτυποποίηση της αναπνοής

Οι αναπνευστικοί ρυθμοί που κατεγράφησαν για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, εισάγονται σε ειδικό στατιστικό πρόγραμμα, στο οποίο πραγματοποιείται ανάλυση της διακύμανσης (Ανοva), τα αποτελέσματα της οποίας καταδεικνύουν εάν και πόσο σημαντική είναι η επίδραση της σχετικής υγρασίας συντήρησης, στην μεταβολή του αναπνευστικού ρυθμού δηλ. η ανάπτυξη αναπνευστικού στρες. Στα τέσσερα επίπεδα υγρασίας που εξετάστηκαν, αποδείχθηκε ότι υπάρχει σημαντική επίδραση της σχετικής υγρασίας στον αναπνευστικό ρυθμό.

Για την προτυποποίηση του αναπνευστικού ρυθμού του νεκταρινιού, τα δεδομένα από τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται εν συνεχεία, για την πραγματοποίηση ανάλυσης παλινδρόμησης στο στατιστικό εργαλείο Statgraphics από την οποία και προκύπτει ότι ο αναπνευστικός ρυθμός και η σχετική υγρασία συντήρησης, για σταθερή θερμοκρασία συντήρησης 0 °C, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$RR = (0.34511 \cdot \sqrt{RH})^2 \quad (39)$$

όπου: RR είναι ο αναπνευστικός ρυθμός και RH η σχετική υγρασία συντήρησης.

Τα προβλεπόμενα δεδομένα σε σύγκριση με τα πειραματικά παρουσίασαν αρκετά καλή συμφωνία με $R^2_{adj}=0.962$, $SEE=0.11$ και μέσο απόλυτο σφάλμα $MAE=0.09$ ($P<0.05$).

Ποσοτικοποίηση του παραγόμενου νερού

Οι απώλειες νερού όπως αυτές υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα, περιέχουν τόσο το νερό που απωλέσθηκε λόγω διαπνοής όσο και αυτό από την αναπνοή του προϊόντος. Ο διαχωρισμός αυτών των δύο για την καλύτερη μελέτη του φαινομένου δεν είναι εύκολος και απαιτεί τον υπολογισμό πρώτα του νερού

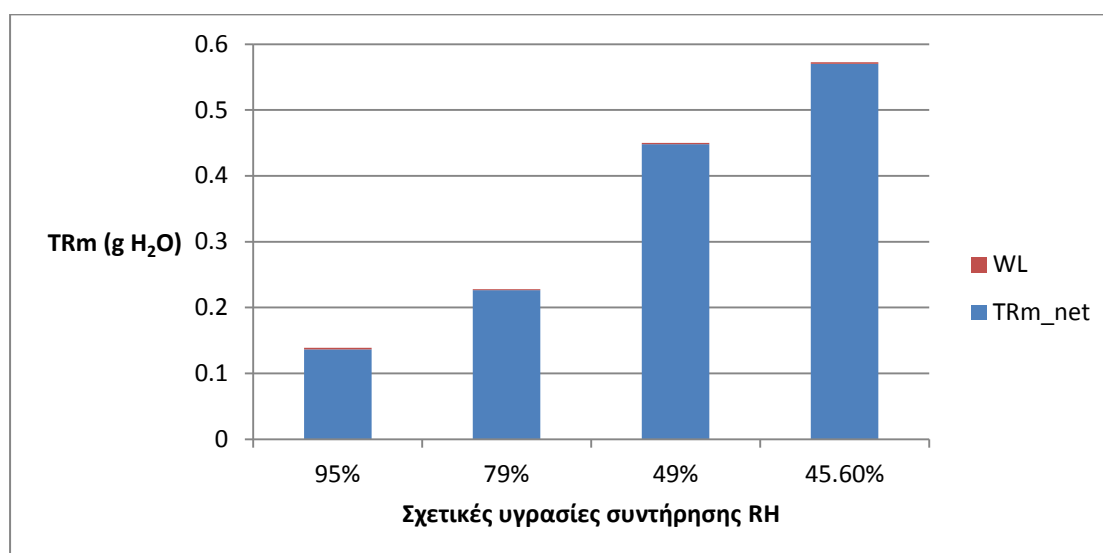
από παράγεται κατά την αερόβια αναπνοή των προϊόντων όπως αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση (25).

Αρχικά όμως, πρέπει να υπολογιστεί ο ρυθμός διαπνοής ανά μονάδα μάζας, TR_m , αξιοποιώντας τις καταγεγραμμένες απώλειες μάζας και την εξ.(23). Ο ρυθμός διαπνοής εκφράζεται σε ($g H_2O/kg \cdot h$).

Από την αφαίρεση των αντιστοιχών ποσοτήτων νερού μέσω της σχέσης

$$TR_{mnet} = TR_m - WL \quad (40)$$

($g H_2O/kg \cdot h$) είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση των επιμέρους συνεισφορών στην απώλεια νερού από το φυσικό φαινόμενο της εξάτμισης νερού λόγω του ελλείμματος πίεσης των υδρατμών και του αντίστοιχου φυσιολογικού φαινομένου απώλειας νερού λόγω αναπνοής. Στο Διάγραμμα 4.7 παρουσιάζονται αυτές οι επιμέρους απώλειες νερού για όλες τις πειραματικές περιπτώσεις.



Διάγραμμα 4.7: Ποσοτικοποίηση των απωλειών νερού κατά τη συντήρηση σε 4 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας. Με κόκκινο απεικονίζεται η συμβολή της αναπνοής στη συνολική απώλεια νερού.

Από την ποσοτικοποίηση των απωλειών νερού προκύπτει ότι οι απώλειες νερού λόγω αναπνοής εκτιμώνται στο 0.7 % επί των συνολικών απωλειών για σχετική υγρασία συντήρησης 79%, στο 0.4% επί των συνολικών για σχετική υγρασία 49%, στο 1.5% για σχετική υγρασία 95% και τέλος στο 0.4 % για σχετική υγρασία 45.6%.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα. Αφενός, οι μεγαλύτερες απώλειες νερού στο σύνολό τους απαντώνται στις περιπτώσεις που δημιουργείται μεγάλο έλλειμμα πίεσης υδρατμών (σχετικές υγρασίες 49% και 45,6%). Αφετέρου, στις περιπτώσεις με μικρό έλλειμμα υδρατμών (σχετικές υγρασίες 79% και 95%), οι

απώλειες λόγω αναπνοής, αποτελούν μεγαλύτερο μέρος επί των συνολικών (0.7% και 1.5%, αντίστοιχα).

Αυτά τα ποσοστά επαληθεύουν την αρχική υπόθεση, δηλαδή ότι σε μηδενικά ή σχεδόν μηδενικά ελλείμματα πίεσης υδρατμών (RH=95%) οι απώλειες νερού δεν σταματούν να υφίστανται και ότι σε αυτές τις συνθήκες, οι απώλειες λόγω της αναπνοής είναι αρκετά σημαντικές σε σχέση με τις συνολικές που καταγράφονται.

4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Διάχυση του νερού από το εσωτερικό του καρπού προς την επιδερμίδα και την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα

Εξετάζονται τα αποτελέσματα για την αντίσταση της επιδερμίδας, k_m , και τον φαινόμενο συντελεστή διάχυσης, D_{eff} . Ως τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται οι αναλυτικές λύσεις για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης, D_{eff} και οι αριθμητικές λύσεις από τη βελτιστοποίηση των k_m και D_{eff} στο Comsol Multiphysics 4.3b.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης και το συντελεστή μεταφοράς μάζας.

45,6% (Δ)	k_m	$6.29 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
	D_{eff}	$1.13 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)	Αναλυτική λύση
$1.06 \cdot 10^{-10}$ (m ² /s)		Αριθμητική λύση	
49% (B)	k_m	$4.60 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
	D_{eff}	$7.81 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)	Αναλυτική λύση
$7.91 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)		Αριθμητική λύση	
79% (Γ)	k_m	$4.72 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
	D_{eff}	$3.00 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)	Αναλυτική λύση
$2.93 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)		Αριθμητική λύση	
95% (Δ)	k_m	$1.73 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	Βελτιστοποίηση k_m και D_{eff}
	D_{eff}	$1.43 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)	Αναλυτική λύση
$2.48 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)		Αριθμητική λύση	

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τον παραπάνω πίνακα, είναι τα εξής:

- Με την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα συντήρησης(μείωση του ελλείμματος πίεσης υδρατμών) παρατηρείται μείωση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης, D_{eff} .
- Οι αριθμητικές και οι αναλυτικές λύσεις για το D_{eff} εμφανίζουν εγγύτητα στα υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας, ενώ για τα χαμηλά διαφέρουν κατά μία τάξη μεγέθους.
- Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του φαινομένου συντελεστή μεταφοράς μάζας D_{eff} τόσο δυσκολότερη είναι η απομάκρυνση της υγρασίας από το εσωτερικό του καρπού και προς την ατμόσφαιρα και αντίστροφα.
- Για τις τιμές που προέκυψαν για το συντελεστή μεταφοράς μάζας k_m δεν είναι δυνατό να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα.
- Ανάμεσα στις περιπτώσεις Δ και Β, ο συντελεστής k_m είναι μεγαλύτερος στην πρώτη σε σχέση με τη δεύτερη. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση Δ τα προϊόντα βρίσκονταν εκτός κελιού και ήταν εκτεθειμένα στον περιβάλλοντα αέρα σε αντίθεση με τα δοκίμια της περίπτωσης Β που βρίσκονταν μέσα σε ειδικό κελί. Επειδή η μεταφορά μάζας από την επιδερμίδα του καρπού γίνεται με συναγωγή, ο αερισμός πιθανότατα βοήθησε το φαινόμενο της απομάκρυνσης του νερού, αυξάνοντας το συντελεστή k_m .
- Οι βέλτιστες συνθήκες συντήρησης φαίνεται να είναι αυτές για σχετική υγρασία 95%, καθώς εκεί παρατηρούνται οι λιγότερες συνολικές απώλειες νερού.
- Η συμβολή του φαινομένου της αναπνοής επί των συνολικών απωλειών νερού είναι υψηλότερη στις περιπτώσεις σχετικής υγρασίας 79% και 95%.

Αναπνοή

Η κατανάλωση των σακχάρων στο εσωτερικό του καρπού είναι μία χημική διεργασία, η οποία λαμβάνει χώρα σε οποιοσδήποτε συνθήκες συντήρησης αυτού. Κατά συνέπεια, η απώλεια μάζας λόγω απομάκρυνσης του παραγόμενου από την διεργασία αυτή νερού, θα υφίσταται. Μελετώντας τους αναπνευστικούς ρυθμούς των δοκιμίων σε 4 διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι υψηλότεροι αναπνευστικοί ρυθμοί εμφανίζονται όταν οι καρποί είναι αποθηκευμένοι σε περιβάλλον χαμηλής σχετικής υγρασίας.

Όπως αναφέρθηκε, οι μεγαλύτερες συνολικές απώλειες υγρασίας παρατηρήθηκαν στις περιπτώσεις με χαμηλή σχετική υγρασία συντήρησης. Στις περιπτώσεις αυτές (Δ και Β), η συμβολή της αναπνοής επί των συνολικών

απωλειών μάζας λόγω απομάκρυνσης νερού, ήταν μικρή καθώς το κυρίαρχο φαινόμενο είναι η αφυδάτωση λόγω του ελλείμματος πίεσης υδρατμών. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις υψηλής σχετικής υγρασίας συντήρησης, η αναπνοή λαμβάνει σημαντικότερο ρόλο από ότι προηγουμένως, με το ποσοστό των απωλειών νερού που οφείλεται στο φαινόμενο σχεδόν να διπλασιάζεται. Παρόλα αυτά, ακόμη και στις περιπτώσεις αυτές, κυρίαρχος μηχανισμός φαίνεται και πάλι να είναι το έλλειμμα πίεσης υδρατμών.

Τέλος, από τα 3-D στιγμιότυπα που παρατέθηκαν, στην περίπτωση A (RH=79%) παρατηρείται η πλέον απότομη απώλεια νερού από την επιφάνεια του καρπού, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη περίπτωση όπου η απώλεια μάζας είναι πολύ πιο ήπια για τον καρπό, όπως φαίνεται (βλ. Εικόνα 16 & Εικόνα 19 & Εικόνα 21) για τους ίδιους αντίστοιχους χρόνους.

5. ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπούσε στη διερεύνηση της διάχυσης υγρασίας κατά τη συντήρηση φρούτων σε συνδυασμό με την αναπνοή των φρούτων.

Μελετήθηκε η διεργασία της ψυχοσυντήρησης νεκταρινιών και τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας που τη διέπουν. Προσδιορίστηκε ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης του νερού D_{eff} , ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_m στη διεπιφάνεια μεταφοράς μάζας για τέσσερα διαφορετικά επίπεδα σχετικής υγρασίας συντήρησης-RH (45.6%, 49%, 79%, 95%). Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης, D_{eff} , βρέθηκε να έχει τιμή στις αντίστοιχες αυτές συνθήκες ίση με $1.06 \cdot 10^{-10}$, $7.91 \cdot 10^{-11}$, $2.93 \cdot 10^{-12}$ και $2.48 \cdot 10^{-12}$ (m^2/s). Η διεργασία προσομοιώθηκε υπολογιστικά στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b. Χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα περιεχόμενης υγρασίας και αρχικές εκτιμήσεις για τα μεγέθη D_{eff} και k_m , που χρειάζονται στη μέθοδο βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, k_m , προσδιορίστηκε ίσος με $6.29 \cdot 10^{-10}$, $4.60 \cdot 10^{-10}$, $4.72 \cdot 10^{-10}$ και $1.73 \cdot 10^{-10}$ (m/s) για τις παραπάνω αναφερθείσες συνθήκες σχετικής υγρασίας, αντίστοιχα.

Τέλος, έγινε υπολογισμός και ποσοτικοποίηση του φαινομένου της αναπνοής/αναπνευστικού ρυθμού για να γίνει κατανοητή η συμβολή του επί των ολικών απωλειών νερού κατά τη συντήρηση και βρέθηκε, με γραμμική παλινδρόμηση, η μαθηματική εξάρτησή του από την σχετική υγρασία RH.

Από την εργασία προέκυψαν ποσοτικές εκτιμήσεις σχετικά με την εξάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας στο φρούτο από τις συνθήκες συντήρησής του (σχετική υγρασία περιβάλλοντα αέρα), την εξάρτηση του συντελεστή μεταφοράς μάζας

από τη σχετική υγρασία καθώς και την εξάρτηση του φαινομένου συντελεστή διάχυσης από τη σχετική υγρασία αλλά και την περιεχόμενη υγρασία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1 :Χαρακτηριστικοί κλιμακτηριακοί και μη καρποί (Salveit, 2004).....	16
Εικόνα 1.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες αναπνευστικού ρυθμού για κλημακτηριακούς και μη καρπούς.(Salveit, 2004).....	16
Εικόνα 3.1: Δείγματα σε ειδικές θήκες. Κάτω από τη σχάρα , βρίσκονται τα υπέρκορα διαλύματα αλάτων για τη ρύθμιση της σχετικής υγρασίας του αέρα συντήρησης. Η διάταξη αυτή, βρίσκεται μέσα στον περιέκτη.....	29
Εικόνα 3.2: Ηλεκτρονικός ζυγός που χρησιμοποιήθηκε KERN (μοντέλο PCB-440, Japan).....	30
Εικόνα 3.3 : Δείγματα φρούτου προς αποφλοιώση για τον υπολογισμό του μέσου εμβαδού της επιφάνειάς του προϊόντος	31
Εικόνα3.4: Τμήματα φλοιού τοποθετημένα σε κατάλληλο φόντο για τη λήψη ψηφιακής εικόνας.....	31
Εικόνα3.5: Φορητή συσκευή μέτρησης αναπνοής Riken Keiki τύπου RI-411A (RKI Instruments, Japan).....	32
Εικόνα 3.6: Συσκευή και κελί μέτρησης της ενεργότητας νεκταρινιών.....	34
Εικόνα 3.7: Χαρακτηριστική γεωμετρία του προϊόντος, όπως αυτό σχεδιάστηκε στο Comsol Multiphysics.....	36
Εικόνα 3.8: Διακριτές περιοχές(όρια) στις οποίες εφαρμόζονται οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. (Comsol Multiphysics).....	38
Εικόνα 4.1: Παρουσίαση της υποδιαίρεσης κυλινδρικού τροφίμου σε χαρακτηριστικά υποχωρία ορισμένης ακτίνας. (Van der Sman ,2002).....	45
Εικόνα 4.2: Παρουσίαση του ηλεκτρικού αναλόγου για την κατανόηση της επίδρασης των συντελεστών μεταφοράς μάζας και θερμότητας στο πρόβλημα της ψύξης τροφίμων με ταυτόχρονη εξάτμιση νερού από την επιφάνειά τους. (Van der Sman ,2002).....	45
Εικόνα 4.3: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=19h) κατά τη συντήρηση.....	50

Εικόνα 4.4: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=9 d) κατά τη συντήρηση.....	50
Εικόνα 4.5: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=20 d) κατά τη συντήρηση.....	51
Εικόνα 4.6: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=19h) κατά τη συντήρηση.....	53
Εικόνα 4.7: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=9 d) κατά τη στη συντήρηση.....	54
Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=20 d) κατά τη συντήρηση.....	54
Εικόνα 4.9: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=19h) κατά τη συντήρηση.....	55
Εικόνα 4.10: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=9 d) κατά τη συντήρηση.....	57
Εικόνα 4.11: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=20 d) κατά τη συντήρηση.....	57
Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=19h) κατά τη συντήρηση.....	59
Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=9 d) κατά τη συντήρηση.....	60
Εικόνα 4.14: Στιγμιότυπο για απώλεια περιεχόμενης υγρασίας (την t=20 d) κατά τη συντήρηση.....	60

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1: Εξεταζόμενες συνθήκες συντήρησης (σχετική υγρασία)	28
Πίνακας 3.2: Τιμές περιεχόμενης υγρασίας ισορροπίας σε διάφορες συνθήκες σχετικής υγρασίας κατά την ψυχροσυντήρηση.....	39
Πίνακας 3.3-1 : Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 45.6 %.....	41
Πίνακας 3.3-2 : Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 45.6 %.....	41
Πίνακας 3.4-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 49 %.....	41
Πίνακας 3.4-2: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 49%.....	41

Πίνακας 3.5-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 79 %.....	41
Πίνακας 3.5-2 Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 79 %.....	42
Πίνακας 3.6-1: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 95 %.....	42
Πίνακας 3.6-2: Αρχικές τιμές των μεταβλητών για σχετική υγρασία 95 %.....	42
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 45.6%.....	49
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 49%.....	52
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 79%.....	56
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα για τα μεγέθη D_{eff} και k_m για τη συντήρηση σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 95%.....	59
Πίνακας 4.5: Μέσοι αναπνευστικοί ρυθμοί για κάθε σχετική υγρασία συντήρησης.....	61
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος για το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης και το συντελεστή μεταφοράς μάζας.....	64

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 4.1: Απώλειες μάζας νεκταρινιών συναρτήσει του χρόνου συντήρησής στους 0 °C και σε 4 επίπεδα σχετικής υγρασίας.	43
Διάγραμμα 4.2: Μείωση της αδιάστατης περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησής στους 0 °C και σε 4 επίπεδα σχετικής υγρασίας.....	47
Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 45.6%.	48
Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 49%.	52
Διάγραμμα 4.5: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 79%.	55
Διάγραμμα 4.6: Μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας συναρτήσει του χρόνου συντήρησης για σχετική υγρασία 95%.....	58

Διάγραμμα 4.7: Ποσοτικοποίηση των απωλειών νερού κατά τη συντήρηση σε 4 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας.63

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahmad Shirazi, and Arthur C. Cameron (1993), Measuring Transpiration Rates of Tomato and Other Detached Fruit, *HORTSCIENCE* 28(10): 1035–1038
2. Marco Beyer, Z Steffen, Lau Z, Moritz Knoche (2005), Studies on water transport through the sweet cherry fruit surface: IX.: Comparing permeability in water uptake and transpiration, *Planta* 220: 474–485
3. O.J. Caleb , P.V. Mahajan , Fahad A. Al-Said & Umezuruike Linus Opara (2013) Transpiration rate and quality of pomegranate arils as affected by storage conditions, *CyTA - Journal of Food*, 11:3, 199-207
4. DeGroot BL, Grubmuller H, (2001), Water permeation across biological membranes: Mechanism and dynamics of aquaporin-1 and GlpF. *Science* 294:2353
5. Efremov, G.; Kudra, T.(2005) ,Model–based estimate for time–dependent apparent diffusivity. *Drying Technology*, 23, 2513–2522
6. Gavin. H.P. (2013) The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Duke*
7. Kader A., Saltveit M. (2003): *Respiration and gas exchange*. In: Bartz J., Brecht J (Eds) *Postharvest physiology and pathology of vegetables (2nd Ed, Ch. 5)*.
8. C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, E. Tsami & D. Marinos-Kouris(1992), Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables, *Journal of Food Engineering* 20 : 55-74
9. Kojiwano, Takagaki, Kurose, Komori (2013), Mass transfer velocity across the breaking air-water interface at extremely high wind speeds, *Tellus B, [S.l.]*, v. 65
10. J. Lammertyn, N. Scheerlinck, P. Jancsok, B.E. Verlinden, B.M. Nicolai, (2003), A respiration_ diffusion model for ‘Conference’ pears I: model development and validation, *Postharvest Biology and Technology* 30: 29-42
11. J. Lammertyn, N. Scheerlinck, P. Jancsok, B.E. Verlinden, B.M. Nicolai,(2003) A respiration_ diffusion model for ‘Conference’ pears II. Simulations and relation to core breakdown, *Postharvest Biology and Technology* 30 : 43_ 55
12. P.V. Mahajan , F.A.R. Oliveira, I. Macedo (2008), Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms, *Journal of Food Engineering* 84 281–288
13. TA Nguyen, T Dresselaers, P Verboven, G D’hallewin, N Culeddu, P Van Hecke, BM Nicolai (2006), Finite element modelling and MRI validation of

- 3D transient water profiles in pears during postharvest storage, *J Sci Food Agric* 86:745–756
14. T.A. Nguyen, P. Verboven, N. Scheerlinck, Stefan Vandewalle, Bart M. Nicolai (2006), Estimation of effective diffusivity of pear tissue and cuticle by means of a numerical water diffusion model, *Journal of Food Engineering* 72 :63–72
 15. T.A. Nguyen, P. Verboven, A. Schenk, Bart M. Nicolai (2007), Prediction of water loss from pears (*Pyrus communis* cv.Conference) during controlled atmosphere storage as affected by relative humidity, *Journal of Food Engineering* 83 :149–155
 16. Q. Tuan Pham, Wendy Schotsmans, Q. Tri Ho, Bert E. Verlinden, Pieter Verboven, Bart M. Nicolao (2008), Simultaneous measurement of neon diffusivity and skin resistance of 'Braeburn' and 'Jonica' apples, *Postharvest Biology and Technology* 50 :53–63
 17. W. Phomkong , G. Srzednicki & R. H. Driscoll (2006) Desorption Isotherms for Stone Fruit, *Drying Technology: An International Journal*, 24:2, 201-210
 18. Maryam Ebrahim Rezagah, Sayaka Ishida, Fumihiko Tanaka, Toshitaka Uchino, Daisuke Hamanaka, Yoshio Hikida (2013), Determination of Gas Diffusivity and Skin Resistance for Three Cultivars of Japanese Pear Using their Actual 3D Geometry, *Environ. Control Biol.*, 51 (4), 193_200
 19. D. K. Salunkhe , M. T. Wu & Abdul R. Rahman (1974) Developments in technology of storage and handling of fresh fruits and vegetables, *C R C Critical Reviews in Food Technology*, 5:1, 15-54
 20. R.G.M. van der Sman (2003), Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods, *Journal of Food Engineering* 60: 383–390
 21. Els A. Veraverbeke, Pieter Verboven, Nico Scheerlinck, My Lan Hoang, Bart M. Nicolai(2003), Determination of the diffusion coefficient of tissue, cuticle, cutin and wax of apple , *Journal of Food Engineering* 58 :285–294
 22. Els A. Veraverbeke, Pieter Verboven, Patrick Van Oostveldt, Bart M. Nicolai (2003), Prediction of moisture loss across the cuticle of apple (*Malus sylvestris* subsp. *mitis* (Wallr.)) during storage Part 1. Model development and determination of diffusion coefficients, *Postharvest Biology and Technology* 30 : 75_ 88
 23. Xanthopoulos, G., Yanniotis, S. and Lambrinos, Gr.(2009) 'Water Diffusivity and Drying Kinetics of Air Drying of Figs', *Drying Technology*, 27: 3, 502 — 512
 24. G. Xanthopoulos, E.D. Koronaki , A.G. Boudouvis (2012), Mass transport analysis in perforation-mediated modified atmosphere packaging of strawberries, *Journal of Food Engineering* 111: 326–335
 25. Yehoshua S.B. and Rodov V. (2003): *Respiration and gas exchange, Transpiration and water stress*. In: Bartz J., Brecht J (Eds) *Postharvest physiology and pathology of vegetables* (2nd Ed, Ch. 5). Marcel Dekker Inc, New York.

26. Young D.M. and Kincaid D.R. (2003) Partial Differential Equations. *Encyclopedia of Computer Science. 4: 1367-1370*
27. Μπουντουβής Α. (1992). Υπολογιστική Μηχανική με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
28. Σέμπου Α. (2014) : Προτυποποίηση και υπολογιστική προσομοίωση φαινομένων διάχυσης στη ξήρανση φρούτων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
29. Fogler (2009), *Μηχανική Χημικών Αντιδράσεων & Σχεδιασμός Αντιδραστήρων*, 4^η έκδοση, Εκδ. Τζιόλα.

Διαδίκτυο

1. <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list>

