ΜΕΛΕΤΗ της ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ κατά ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΒΕΡΙΚΟΚΟΥ ΜΕ θερμο αερα

Δ. Λέντζου, Γ. Ξανθόπουλος🖂, Ο. Γεωργιάδου, Χ. Τεμπλαλέξης & Ν-Π. Αλειφέρης

*Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα,*

🖂*xanthopoulos@aua.gr*

**Περίληψη**

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η αντίσταση του φλοιού στη μεταφορά μάζας σε ολόκληρα βερίκοκα (με και χωρίς φλοιό) κατά την ξήρανσή τους σε ρεύμα αέρα 55 και 65 oC και ταχύτητας 1.0 και 3.0 m/s. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ισοθερμοκρασιακό υπολογιστικό μοντέλο ξήρανσης πεπερασμένων στοιχείων το οποίο προσομοιώνει τη διάχυση των υδρατμών λαμβάνοντας υπόψη και τη συρρίκνωση του προϊόντος. Ο αντίστροφος ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας km αποτελεί την εξωτερική αντίσταση στη μεταφορά μάζας (rtotal). Τα δεδομένα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά μέσω του σχετικού σφάλματος για την εκτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου. Σε όλες τις περιπτώσεις το σφάλμα ήταν μικρότερο του 3.5%. Η τιμή του km και της εξωτερικής αντίστασης, αντίστοιχα, κυμάνθηκαν για τα μη αποφλοιωμένα βερίκοκα μεταξύ 1.33×10-7 έως 4.58×10-7 m/s και 21.8×105 έως 75.2×105 s/m ενώ για τα αποφλοιωμένα μεταξύ 4.78×10-7 έως 1.44×10-6 m/s και 6.9×105 έως 20.9×105 s/m.

Λέξεις κλειδιά: ξήρανση βερίκοκου, βελτιστοποίηση, αντίσταση φλοιού, μεταφορά μάζας

study of peel resistance TO MASS TRANSFER during drying of apricot with hot air

D. Lentzou, G. Xanthopoulos🖂, Ο. Georgiadou, Ch. Templalexis & Ν-P. Aleiferis

*Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Ιera Odos 75, 11855, Athens,* 🖂*xanthopoulos@aua.gr*

**ABSTRACT**

In this study the resistance of peel to mass transfer in whole apricots (peeled and unpeeled), during drying at 55 and 65 oC and 0.5, 1.0 and 3.0 m/s air velocity was investigated. An isothermal computational model of drying was developed employing finite elements to simulate water vapour diffusion considering apricot shrinkage during drying. The reverse total mass transfer coefficient is the external or surface resistance to mass transfer (rtotal). Data from simulation compared with the corresponding experimental employing the relevant error for the evaluation of the proposed model. In all cases, the error was below 3.5%. The value of km for unpeeled apricots ranged between 1.33×10-7 έως 4.58×10-7 m/s whereas for peeled between 4.78×10-7 to 1.44×10-6 m/s. Similarly, the external or surface resistance ranged for unpeeled apricots between 21.8×105 to 75.2×105 s/m and in the case of peeled between 6.9×105 to 20.9×105 s/m.

Keywords: drying apricots, optimization, peel resistance, mass transfer

**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα αποξηραμένα φρούτα αποτελούν εκλεκτό έδεσμα λόγω της θρεπτικής αξίας και της μακράς διάρκειας ζωής τους. Στη σημερινή αγορά τροφίμων τα αποξηραμένα τρόφιμα παίζουν σημαντικό ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα. (Grabowski et al., 2003). Για το λόγο αυτό οι ιδιότητές τους και ο τρόπος που επηρεάζονται από τις συνθήκες ξήρανσης αλλά και από διάφορους προ-χειρισμούς έχουν αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών (Sabarez, 2012) εκ των οποίων οι περισσότερες αφορούν τη διάχυση νερού-υδρατμών στα οπωρολαχανικά όπως μήλο (Quintero-Ramos et al., 1993), τομάτα (Xanthopoulos et al., 2012) και άλλα. Παρόλα αυτά η αντίσταση του φλοιού στη διάχυση κατά την ξήρανση δεν έχει μελετηθεί, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ενώ αντίθετα έχει μερικώς μελετηθεί σε ψυχροσυντηρούμενα προϊόντα. Η μελέτη της αντίστασης του φλοιού σύμφωνα με τους Pham et al., 2009 θεωρείται σημαντική καθώς αποτελεί το κυριότερο εμπόδιο στην ανταλλαγή αερίων. Σε μελέτες που έχουν γίνει η αντίσταση του φλοιού έχει μελετηθεί για την διάχυση αιθανίου (Pham et al., 2009) και νέον (Schotsmans et al., 2002; Pham et al., 2009). Στις μελέτες αυτές η αντίσταση του φλοιού μελετήθηκε ως προσομοίωση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος αντιστάσεων συνδεδεμένων εν σειρά (Van der Sman, 2003) θεωρώντας την αντίσταση του φλοιού ίση με το αντίστροφο του συντελεστή μεταφοράς μάζας (Pham et al., 2009).

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

**2. ΘΕΩΡΙΑ**

**2.1 Διάχυση**

Η διάχυση ακολουθεί το Ν. Fick, , και συνδέει το ρυθμό της διάχυσης, JAz (mol/m2s), με τη βαθμίδα συγκέντρωσης ως προς τη διεύθυνση z (m), όπου DAB o συντελεστής διάχυσης του συστατικού Α στο Β (m2/s) και cA η συγκέντρωση του διαχεόμενου συστατικού (mol/m3). Η ξήρανση περιλαμβάνει διαφορετικούς εσωτερικούς μηχανισμούς μεταφοράς μάζας όπως η διάχυση νερού και υδρατμού καθώς και τριχοειδή φαινόμενα. Οι μηχανισμοί αυτοί εναλλάσσονται ή και συνυπάρχουν γεγονός που καθιστά τη φυσική και μαθηματική περιγραφή τους εξαιρετικά περίπλοκη, για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (Deff) ο οποίος ενσωματώνει όλους αυτούς τους μηχανισμούς μεταφοράς μάζας (Xanthopoulos et al., 2014). Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης περιγράφεται συνήθως μέσω μιας εξίσωσης τύπου Arrhenius,  όπου Εa η ενέργεια ενεργοποίησης (J/mol), R η παγκόσμια σταθερά αερίων (J/Kmol), Do η προεκθετική παράμετρος (m2/s) και Τ η θερμοκρασία (K). Για την ενσωμάτωση και της υγρασιακής εξάρτησης του Deff έχουν προταθεί παραλλαγές της εξίσωσης Arrhenius (Xanthopoulos et al. 2009). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η σχέση  όπου ΜR το αδιάστατο υγρασιακό πηλίκο (kg/kg) και a παράμετρος που υπολογίζεται από τη βελτιστοποίηση.

**2.2 Συρρίκνωση**

Η συρρίκνωση (S) είναι ένα φαινόμενο που συνοδεύει την ξήρανση των αγροτικών προϊόντων. Εξαιτίας αυτής μπορεί να προκληθούν σημαντικές δομικές μεταβολές στο αποξηραινόμενο προϊόν και στην τελική του ποιότητα (Mayor and Sereno, 2004). Έχει αποδειχθεί ότι η συρρίκνωση εξαρτάται μόνο από την περιεχόμενη υγρασία. Η συρρίκνωση εκφράζεται μέσω της σχετικής μείωσης του όγκου του αποξηραινόμενου προϊόντος όπου Vt ο όγκος (m3) τη χρονική στιγμή t (h) και Vο o αρχικός όγκος (m3) για t=0 (Maskan, 2001).

**3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ**

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν ολόκληροι αποξηραινόμενοι καρποί βερίκοκου, ποικιλίας *Orange red*, αποφλοιωμένοι και μη. Έγινε διαλογή με βάση το μέγεθος και βάρος των δειγμάτων και η μέση αρχική περιεχόμενη υγρασία των καρπών κυμάνθηκε από 6.59 έως 8.55 kgw/kgdm ενώ η μέση διάμετρος από 19.0 έως 27.5 mm. Οι καρποί αποξηράθηκαν στις θερμοκρασίες των 55 και 65 οC και ταχύτητες 0.5, 1.0, και 3.0 m/s. Η ογκομέτρηση κατά την ξήρανση γινόταν με τη μέθοδο της εκτόπισης νερού. Με την αποφλοίωση των δειγμάτων οι καρποί (με και χωρίς φλοιό) ζυγίζονταν και τοποθετούνταν στο ξηραντήριο. Σε κάθε πειραματική σειρά (θερμοκρασία και ταχύτητα αέρα) και χειρισμό (με και χωρίς φλοιό) χρησιμοποιήθηκαν 6 δείγματα 3 εκ των οποίων προορίζονταν για ζυγίσεις και 3 για ογκομετρήσεις. Οι ζυγίσεις λάμβαναν χώρα σε ωριαία διαστήματα ενώ οι ογκομετρήσεις 2 φορές την ημέρα. Τα πειράματα τερματίζονταν όταν δεν σημειωνόταν μεταβολή βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών ζυγίσεων. Ο προσδιορισμός της ξηράς ουσίας λάμβανε χώρα σύμφωνα με το πρωτόκολλο AOAC (1997). Η ξήρανση των δειγμάτων διεξήχθη σε δύο πειραματικά ξηραντήρια τα οποία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο "Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας" του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Xanthopoulos et al., 2007). Η μέτρηση και καταγραφή των συνθηκών ξήρανσης γινόταν από θερμοϋγρασιακούς αισθητήρες Hobo 8H (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA) οι οποίοι συνδέονταν σε σταθμό αποθήκευσης δεδομένων Hobo Micro station (Onset Computer Corp. Massachusetts, USA) και είχαν διακριτική ικανότητα 0.4 οC και 0.5% και, ακρίβεια ±0.7, ±3% αντίστοιχα στη μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Οι ζυγίσεις πραγματοποιούνταν σε ηλεκτρονικό ζυγό KERN (PCB-440, Japan) με ακρίβεια ±0.01 g. Ο έλεγχος της ταχύτητας του αέρα γινόταν με ανεμόμετρο θερμαινόμενου νήματος CLIMATHERM, με ακρίβεια ±0.044 m/s και διακριτικής ικανότητας 0.1 m/s. H μέθοδος της μη-γραμμικής βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης καθώς και του συντελεστή μεταφοράς μάζας έγιναν μέσω της προσομοίωσης της ισοθερμοκρασιακής ξήρανσης και συρρίκνωσης από το πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3 (COMSOL, Inc.USA).

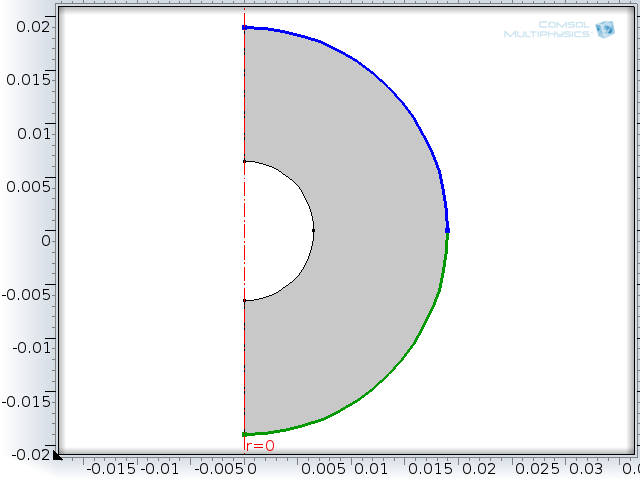
**3.1 Μέτρηση περιεχόμενης υγρασίας, όγκου και ταχύτητας συρρίκνωσης**

Η περιεχόμενη υγρασία υπολογίστηκε επί ξηράς ουσίας και ελήφθη ως ο μέσος όρος των αντίστοιχων αποξηραινόμενων δειγμάτων ανά περίπτωση ξήρανσης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η αδιάστατη περιεχόμενη υγρασία  όπου MCt η μέση περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων (kgw/kgdm) σε κάθε χρονική στιγμή και  η μέση αρχική περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων (kgw/kgdm). Οι υπολογισμοί έγιναν για τελική περιεχόμενη υγρασία MR≥0.1. Από τις ογκομετρήσεις υπολογίστηκε η φαινόμενη ακτίνα των καρπών καθώς και των πυρήνων (οι οποίοι εκτιμήθηκαν στο πέρας των πειραμάτων) θεωρώντας τα ως σφαίρες και μέσω αυτών το ποσοστό συρρίκνωσης, το οποίο κυμάνθηκε μεταξύ 48 και 62% και 48.5 και 65.6% για τα μη αποφλοιωμένα και αποφλοιωμένα δείγματα αντίστοιχα. Για την ακριβέστερη μαθηματική περιγραφή της συρρίκνωσης, θεωρήθηκε ότι η μείωση του όγκου των δειγμάτων κατά την ξήρανση είναι ίση με την ποσότητα του εξατμιζόμενου νερού (Sabarez, 2012). Βάσει της παραπάνω προσέγγισης η ταχύτητα συρρίκνωσης προσεγγίστηκε μέσω γραμμικής σχέσης, Rt=a+bt, όπου Rt η ακτίνα των δειγμάτων σε m, t ο χρόνος ξήρανσης σε s και b η κλίση της ευθείας σε m/s η οποία κλίση αντιστοιχεί στην ταχύτητα συρρίκνωσης. Η ταχύτητα συρρίκνωσης κυμάνθηκε για τα μη αποφλοιωμένα μεταξύ 2.15×10-8 και 12.7×10-8 m/s και για τα αποφλοιωμένα μεταξύ 6.34×10-8 και 31.7×10 -8 m/s.

**3.2 Περιγραφή υπολογιστικού προβλήματος**

Η προτυποποίηση του υπολογιστικού προβλήματος έγινε με τις παραδοχές ότι τα δείγματα είναι σφαίρες και ομοιογενή μέσα, η μεταφορά μάζας (νερού) εντός του προϊόντος γίνεται μέσω διάχυσης, δεν υφίσταται μεταφορά μάζας μεταξύ σάρκας και πυρήνα (no flux flow) και ότι η συρρίκνωση οφείλεται μόνο στην απώλεια υγρασίας. Η αναπαράσταση του υπολογιστικού χωρίου (Σχήμα 1) έγινε σε δύο διαστάσεις ως δύο ομόκεντροι κύκλοι ακτίνας ίσης με τη φαινόμενη ακτίνα των καρπών (εξωτερικός κύκλος) και την αντίστοιχη ακτίνα του πυρήνα (εσωτερικός κύκλος) για κάθε πειραματική σειρά. Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου επελέγησαν στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b το μοντέλο μεταφοράς μάζας μέσω διάχυσης νερού, το μοντέλο κινούμενου πλέγματος και το μοντέλο βελτιστοποίησης. Η θεμελιώδης εξίσωση διάχυσης, όπως ορίζεται στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.3b από τη σχέση , όπου Di ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (m2/s), ci η συγκέντρωση υγρασίας (mol/m3) και t ο χρόνος ξήρανσης (s), επιλύθηκε στο υπολογιστικό χωρίο Ω.

Στις συνοριακές συνθήκες, boundary conditions, (Σχήμα 1) επελέγη αξονική συμμετρία, Axial Symmetry (όρια 1,2), αδιαπέρατη στη ροή μάζας των υδρατμών μεταξύ σάρκας και πυρήνα, No flux (όρια 3,4) και ροή μάζας των υδρατμών, Flux (mol/m2s) από το εσωτερικό των αποξηραινόμενων δειγμάτων προς τον περιβάλλοντα αέρα, εξωτερικά όρια 5 και 6 του χωρίου Ω (επιφάνεια δειγμάτων) σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας  όπου **n** το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου Ω, kc,j ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (m/s), cb,j η συγκέντρωση της υγρασίας στον εξωτερικό (περιβάλλοντα) αέρα (mol/m3), ci η συγκέντρωση υγρασίας στην επιφάνεια του δείγματος (mol/m3). Ως ‘επιφάνεια του δείγματος’ θεωρήθηκε στα μη αποφλοιωμένα δείγματα ο φλοιός, ενώ στα αποφλοιωμένα η επιφάνεια της σάρκας του αποξηραινόμενου δείγματος. Στην επιφάνεια του δείγματος (όρια 5,6) ορίστηκε η ταχύτητα συρρίκνωσης, η σάρκα σε όρους υπολογιστικού χωρίου ορίστηκε να ακολουθεί τη μετατόπιση της επιφάνειας του υπολογιστικού χωρίου Ω, ενώ στη διεπιφάνεια πυρήνα-σάρκας η ταχύτητα συρρίκνωσης ισούται με μηδέν (όρια 3,4).



**Ω**

**6**

**4**

**3**

**5**

**2**

**1**

**Σχήμα 1.** Επιλογή αξονικής συμμετρίας (1,2), αδιαπέρατων (3,4) και περατών (5,6) ορίων στη μεταφορά υδρατμών από το εσωτερικό του δείγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο.

Για την προσομοίωση της συρρίκνωσης στο υπολογιστικό μοντέλο επελέγη η μέθοδος Moving Mesh (ALE) για τον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου του συρρικνούμενου υπολογιστικού χωρίου Ω. Η διακριτοποίηση του χωρίου έγινε μέσω πλέγματος τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων (free triangular finite elements) ο αριθμός των οποίων ήταν περίπου 2,850 στοιχεία, επιλογή που βασίστηκε σε λύση ανεξάρτητη του πλέγματος (grid independent solution). Για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος, επελέγη το μοντέλο Optimization και σε αυτό ορίστηκαν αρχείο με τις πειραματικές τιμές της περιεχόμενης υγρασίας επί ξηράς ουσίας και του αντίστοιχου χρόνου ξήρανσης (s) βάσει του οποίου λάμβανε χώρα η βελτιστοποίηση ενώ στη συνέχεια εισήχθησαν και οι αντίστοιχες παράμετροι βελτιστοποίησης (km, Ea, a) με τις αρχικές τους τιμές. Στη μέθοδο βελτιστοποίησης επελέγη το μοντέλο βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt ταχείας σύγκλισης για διακεκριμένες τιμές. Η μέθοδος βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt χρησιμοποιεί το κριτήριο σύγκλισης  όπου F είναι η αντικειμενική συνάρτηση και x είναι οι μεταβλητές ελέγχου. H βελτιστοποίηση του υπολογιστικού προβλήματος βασίστηκε στους παρακάτω τρείς περιορισμούς: 1) ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης Deff(10-11-10-8) m2/s (Sabarez, 2012), 2) η υπολογιζόμενη ακτίνα συρρίκνωσης να συμπίπτει με την αντίστοιχη πειραματική και 3) το μέσο σχετικό σφάλμα μεταξύ προβλεπόμενης και πειραματικής περιεχόμενης υγρασίας για κάθε πειραματική σειρά να είναι κάτω από το 3.5%.

**3.3 Υπολογισμός αντίστασης φλοιού**

Ο αντίστροφος του συντελεστή μεταφοράς μάζας (km) στην επιφάνεια του προϊόντος αποτελεί την εξωτερική ή επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας (rtotal) η οποία αποτελείται από την αντίσταση του φλοιού (rpeel) και αυτή του διαχυτικού οριακού στρώματος σε επαφή με το φλοιό του προϊόντος (rdbl). H επιφανειακή αντίσταση υπολογίστηκε ως δυο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά (), σύμφωνα με τον Van der Sman (2003). Από τον υπολογισμό της αντίστασης στη μεταφορά μάζας (rdbl) γύρω από σφαίρα διαμέτρου 2R βρέθηκε ότι αντιστοιχεί στο εύρος 6.0-7.0×102 s/m για θερμοκρασίες 55-65 oC τιμή κατά τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή της υπολογισθείσας αντίστασης του φλοιού (rpeel) και για αυτό θεωρήθηκε ότι η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας οφείλεται εξ’ ολοκλήρου στην αντίσταση του φλοιού . Έτσι η επιφανειακή αντίσταση στη μεταφορά μάζας υπολογίζεται από την σχέση όπου rpeel η αντίσταση στην εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος σε (s/m) και km ο συντελεστής μεταφοράς μάζας όπως αυτός υπολογίζεται από τη μέθοδο βελτιστοποίησης σε (m/s).

**4. Αποτελέσματα**

Σε όλες τις πειραματικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, το ΜΣΣ δεν ξεπέρασε το 3.5%. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 οι προβλεπόμενες τιμές συμφωνούν αρκετά καλά με τις αντίστοιχες πειραματικές. Οι υπολογισθείσες τιμές του Ea κυμάνθηκαν στο εύρος 66.0-72.0 kJ/mol για τα αποφλοιωμένα βερίκοκα και 82.5-86.5 kJ/mol για τα μη αποφλοιωμένα, τάση που παρατηρήθηκε σε αντίστοιχα πείραμα ξήρανσης σε αποφλοιωμένο και μη τοματάκι από τους Xanthopoulos et al. (2012) καθώς και σε πείραμα ξήρανσης σε αποφλοιωμένο και μη σύκο από την Λέντζου (2015), δηλαδή χαμηλότερες τιμές του Ea στα αποφλοιωμένα προϊόντα που συνεπάγεται αντίστοιχα χαμηλότερη απαιτούμενη ενέργεια για τη πραγματοποίηση της διάχυσης της υγρασίας στο προϊόν. Αντίστοιχα οι τιμές των km και a κυμάνθηκαν για τα αποφλοιωμένα από 4.78×10-7 έως 1.44×10-6 m/s και από 0.65 έως 1.0 kg/kg και για τα μη αποφλοιωμένα από 1.33×10-7 έως 4.58×10-7 m/s και από 1.53 έως 1.63 kg/kg ενώ ο μέσος συντελεστής διάχυσης () κυμάνθηκε μεταξύ 3.95×10-9 έως 6.94×10-9 m2/s για τα μη αποφλοιωμένα και μεταξύ 9.08×10-9 έως 1.90×10-8 m2/s για τα αποφλοιωμένα. Σε όλες τις πειραματικές περιπτώσεις οι τιμές του μέσου συντελεστή διάχυσης για τα αποφλοιωμένα δείγματα ήταν μεγαλύτερη όπως αναμενόταν από την αντίστοιχη τιμή των μη αποφλοιωμένων. Οι τιμές των μέσων  ανήκουν στο εύρος των αντιστοίχων τιμών αποξηραινόμενων αγροτικών προϊόντων (10-11-10-8 m2/s). Οι τιμές των Ea και a καθώς και του km εξαρτώνται από μια σειρά παραμέτρων που αφορούν τόσο το προϊόν (ύπαρξη φλοιού ή όχι, αποξήρανση ολόκληρου ή σε τεμάχια) όσο και τις συνθήκες ξήρανσης (ταχύτητα, θερμοκρασία και κατεύθυνση του αέρα ξήρανσης, ηλιακή ή τεχνητή ξήρανση) οπότε η υιοθέτηση των τιμών αυτών για τις ποικιλίες βερίκοκων που προορίζονται για ξήρανση αλλά και τις διάφορες συνθήκες ξήρανσης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή μετά από πειραματικές και in silico μελέτες οι οποίες θα καλύπτουν το εύρος των παραπάνω περιπτώσεων.



**Σχήμα 2.** Πειραματικές και προβλεπόμενες (pr) τιμές μη αποφλοιωμένων (MF) και αποφλοιωμένων (XF) βερίκοκων στους 55 οC και ταχύτητα αέρα 1.0 (m/s).

Ο αντίστροφος του συντελεστή μεταφοράς μάζας (km) όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί την εξωτερική (στα αποφλοιωμένα δείγματα) ή επιφανειακή (μη αποφλοιωμένα δείγματα) αντίσταση (rsurf και rpeel αντίστοιχα) στη μεταφορά μάζας. Οι τιμές του συντελεστή km και αυτές της επιφανειακής αντίστασης rpeel και rsurf παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Συντελεστής μεταφοράς μάζας (km) και η επιφανειακή αντίσταση (rsurf και rpeel) σε αποφλοιωμένα και μη βερίκοκα.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | ΧΩΡΙΣ ΦΛΟΙΟ | | ME ΦΛΟΙΟ | |  |
| Θερμοκρασία  (oC) | Ταχύτητα  αέρα (m/s) | km (m/s) | rsurf×105  (s/m) | km (m/s) | rpeel×105  (s/m) |  |
| 55 | 1.0 | 4.78×10-7 | 20.9 | 1.33×10-7 | 75.2 | 3.60 |
| 55 | 3.0 | 5.38×10-7 | 18.6 | 2.58×10-7 | 38.8 | 2.09 |
| 65 | 1.0 | 1.29×10-6 | 7.8 | 3.24×10-7 | 30.8 | 3.97 |
| 65 | 3.0 | 1.44×10-6 | 6.9 | 4.58×10-7 | 21.8 | 3.14 |

Αν και αντίστοιχες εργασίες που να υπολογίζουν την επιφανειακή αντίσταση στην κίνηση του νερού κατά την ξήρανση δεν βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε βάσει αντίστοιχων αποτελεσμάτων των Pham et al., 2009 για την κίνηση αερίων (μίγμα αέρα-αιθανίου) σε μήλα ‘*Jonica*’ κατά την ψυχροσυντήρησή τους η οποία αποσκοπούσε στη μελέτη της αντίστασης του φλοιού στην κίνηση των αναπνευστικών αερίων O2 και CO2. Αν και τα αποτελέσματά τους δεν μπορούν να θεωρηθούν άμεσα συγκρίσιμα, η τάξη μεγέθους του συντελεστή km είναι ίδια με τον αντίστοιχο συντελεστή που υπολόγισαν οι Pham et al. (2009) στο εύρος 5.0-20.0×10-7 m/s ενώ στην παρούσα εργασία κυμάνθηκε μεταξύ 4.78-14.4×10-7 m/s. Αντίστοιχες τιμές σημειώθηκαν και για την επιφανειακή αντίσταση που στην παρούσα εργασία κυμάνθηκαν μεταξύ 21.8×105-75.2×105 s/m για τα βερίκοκα με φλοιό ενώ στα αποφλοιωμένα η επιφανειακή αντίσταση, όπως αναμενόταν, ήταν αρκετά μικρότερη και κυμάνθηκε μεταξύ 6.9-20.9×105 s/m. Αν και ως απόλυτα μεγέθη, οι τιμές της επιφανειακής αντίστασης δεν μπορούν να δώσουν κάποιο φυσικό νόημα, το πηλίκο rpeel|MF/rsurf|XF όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 δείχνει ότι και στις δυο περιπτώσεις μεταξύ των 55 και 65 oC παρουσιάστηκε αύξηση της σχετικής αντίστασης.

Η αύξηση της σχετικής αυτής αντίστασης ήταν κατά 10% (η σχετική επιφανειακή αντίσταση των μη αποφλοιωμένων βερίκοκων από 3.6 φορές μεγαλύτερη των αποφλοιωμένων έγινε σχεδόν 4-πλασια) στην περίπτωση του 1.0 m/s και αντίστοιχα 50% στην περίπτωση των 3.0 m/s (η σχετική επιφανειακή αντίσταση των μη αποφλοιωμένων βερίκοκων από περίπου 2-πλάσια των αποφλοιωμένων έγινε σχεδόν 3-πλασια). Η αύξηση της σχετικής αντίστασης και στις δύο ταχύτητες βαίνει μειούμενη γεγονός που υποδηλώνει ότι η μείωση της αντίστασης στο φλοιό μέσω ειδικών χειρισμών έχει νόημα σε ηπιότερες θερμοκρασίες ξήρανσης <65 oC ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μείωση της αντίστασης της φλούδας σε υψηλές θερμοκρασίες >65 oC δεν έχει σημαντική επίδραση και αυξάνει το κόστος παραγωγής. Βέβαια για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και μικροσκοπικές παρατηρήσεις για να επιβεβαιωθούν και οπτικά οι δομικές μεταβολές του φλοιού οι οποίες οδηγούν σε αντίστοιχες μεταβολές της επιφανειακής αντίστασης.



**Σχήμα 3.** Σχετική μεταβολή της αντίστασης μεταξύ αποφλοιωμένων και μη συναρτήσει της θερμοκρασίας ξήρανσης.

**5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο υπολογιστικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να εκτιμά αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα ξήρανσης εφόσον το υπολογιζόμενο ΜΣΣ σε όλες τις περιπτώσεις δεν ξεπέρασε το 3.5%. Ο υπολογιζόμενος μέσος συντελεστής διάχυσης κυμάνθηκε μεταξύ 9.08×10-9-1.90×10-8 (m2/s) για τα αποφλοιωμένα βερίκοκα και 3.95×10-9-6.94×10-9 m2/s για τα μη αποφλοιωμένα βερίκοκα. Ο υπολογισμός του λόγου rpeel|MF/rsurf|XF έδειξε ότι μεταξύ των 55 και 65 oC παρουσιάστηκε αύξηση της σχετικής αντίστασης. Η αύξηση της σχετικής αντίστασης ήταν κατά 10% στην περίπτωση του 1.0 m/s και αντίστοιχα 50% στην περίπτωση των 3.0 m/s. Η αύξηση της σχετικής αντίστασης και στις δύο ταχύτητες τείνει να μειωθεί γεγονός που υποδεικνύει ότι η μείωση της αντίστασης στο φλοιό μέσω ειδικών χειρισμών έχει νόημα σε ηπιότερες θερμοκρασίες ξήρανσης <65 oC ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μείωση της αντίστασης της φλούδας σε υψηλές θερμοκρασίες >65 oC δεν έχει σημαντική επίδραση.

**6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

AOAC, 1997. *Official Methods of Analysis, 16th ed*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

Grabowski, S.G., Marcotte, M and Ramaswamy, S.H., 2003. *Drying of fruits, vegetables and spices.* In: A. Chakraverty, A.S. Mujumdar, G.S.V. Raghavan and H.S. Ramaswamy (eds), Handbook of postharvest technology: cereals, fruits, vegetables, tea and spices. Marcel Dekker, Inc. New York, 653-695.

Λέντζου Δ., 2015. Μελέτη της αντίστασης του φλοιού νωπών σύκων στο ρυθμό ξήρανσης με ρεύμα θερμού αέρα. Μεταπτυχιακή εργασία, Γ.Π.Α., 80 σελ. (αδημοσίευτη).

Maskan, M., 2001. *Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying*. Journal of Food Engineering, 48(2), 169-175.

Mayor L. and Sereno A.M., 2004. *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*. Journal of food engineering, 61, 373-386

Pham, Q.T., Bulens, I., Ho, T.Q., Verlinde, B.E., Verboven, P. and Nicolai, B., 2009. *Simultaneous measurement of ethane diffusivity and skin resistance of ‘Jonica’ apples by efflux experiment*. Journal of food engineering, 95, 471-478.

Quintero-Ramos, A., De La Veja, C., Hernandez, E., and Anzaldua- Morales, A., 1993. *Effect of conditions of osmotic treatment on the quality of dried apple dices.* Aiche Symposium Series, 89, 108–113.

Sabarez, H.T., 2012. *Computational modeling of the transport phenomena occurring during convective drying of prune*. Journal of food engineering, 111, 279-288.

Schotsmans, W., Verlinden, B.E., Lammertyn, J., Peirs, A., Janksok, P.T., Scheerlink, N., Nicolai, B.M., 2002. *Factors affecting skin resistance measurements in pipfruit.* Postharvest Biology and Technology, 25, 169–179.

Van der Sman, R.G.M., 2003. *Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods*. Journal of food engineering, 60, 383-390.

Xanthopoulos G., Lambrinos Gr., and Manolopoulou H. (2007): *Evaluation of thin layer Models for mushroom (Agaricus Bisporus) Drying*. Drying technology, 25: 1471-1481.

Xanthopoulos G., Yanniotis S., and Lambrinos Gr., 2009. *Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs.* Drying Technology, 27(3), 502-512.

Xanthopoulos, G., Yanniotis, S. and Boudouvis, A.G., 2012. *Numerical simulation of variable water diffusivity during drying of peeled and unpeeled tomato*. Journal of food science, 77(10), E287-E296.

Xanthopoulos G., Nastas C.V., Boudouvis A.G. and Aravantinos-Karlatos E., 2014. *Color and Mass Transfer kinetics during air drying of pretreated oyster mushrooms (Pleurotus ostreatus spp).* Drying Technology: An International Journal, 32 (1), 77-88.