



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Προσομοίωση συνθηκών ξήρανσης μανιταριών
σε ξηραντήρα με δίσκους.

Κωστάλας Νικόλαος

Επιβλέπων Καθηγήτρια: Στέγγου-Σαγιά Αθηνά

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2016

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το φαινόμενο της ξήρανσης των μανιταριών ως μια πολύπλοκη διαδικασία στη βιομηχανία, καθώς τα μανιτάρια αποτελούν ένα ευαίσθητο αγροτικό προϊόν υψηλής διατροφικής αξίας. Αρχικά, γίνεται ανάλυση της διεργασίας της ξήρανσης η οποία αποτελεί ένα ευρύ κομμάτι στη βιομηχανία τροφίμων. Ως διεργασία, διέπεται από μεγέθη όπως η υγρασία, η ταχύτητα του αέρα αλλά και ο ρυθμός ξήρανσης. Επιπλέον, γίνεται μια παρουσίαση της κατάταξης των ξηραντήρων. Παρατίθενται τα είδη τους καθώς και τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου ξηραντήρα με βάση τεχνοοικονομικά και άλλα κριτήρια, όπως η σύσταση του τελικού προϊόντος, τα τεχνικά στοιχεία του ξηραντήρα κ.α. Τέλος, αναλύεται η συμπεριφορά των αγροτικών προϊόντων στη ξήρανση για να δοθεί στη συνέχεια βαρύτητα στα μανιτάρια. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης του μανιταριού (τύπου λεπτού στρώματος) σε ξηραντήρα με ράφια, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα `code_msh` για δύο περιπτώσεις ξήρανσης. Στην πρώτη, πάνω από το ράφι είναι τοποθετημένη ακτινοβολούσα επιφάνεια, ενώ στη δεύτερη η διεργασία επηρεάζεται μόνο από τον θερμό αέρα. Τέλος, αναφέρονται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της μελέτης καθώς και ιδέες για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις – κλειδιά

Ξήρανση μανιταριών, Ξήρανση αγροτικών προϊόντων, Ξήρανση, Ξηραντήρες, Ξηραντήρας ραφιών, Ηλιακή ξήρανση, Επιλογή ξηραντήρα, Φαινόμενα διάχυσης, Κρίσιμη υγρασία, Υγρασία ισορροπίας, Τριχοειδή φαινόμενα, Καμπύλες ξήρανσης, Σταθερός ρυθμός ξήρανσης, Ελαττούμενος ρυθμός ξήρανσης, Μανιτάρια

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
Πίνακας Σχημάτων	4
Πίνακες.....	5
Κεφάλαιο 1 Βασικές Αρχές της Ξήρανσης	6
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Διεργασία Ξήρανσης	6
1.3 Γενικά Φαινόμενα στην Ξήρανση	10
Το Φαινόμενο της Συρρίκνωσης	10
Φαινόμενα Διάχυσης	10
Τριχοειδή Φαινόμενα.....	13
1.4 Υπολογισμός του Χρόνου Ξήρανσης.....	16
Περίοδος Σταθερού Ρυθμού Ξήρανσης	16
Περίοδος Ελαττωμένου Ρυθμού Ξήρανσης.....	19
Κρίσιμη Υγρασία	20
Υγρασία Ισορροπίας	21
Κεφάλαιο 2 Κυριότεροι Τύποι Ξηραντήρων / Προϊόντα προς Ξήρανση	23
2.1 Κατάταξη και Επιλογή των Βιομηχανικών Ξηραντήρων.....	23
Κατάταξη Βιομηχανικών Ξηραντήρων	23
Επιλογή Βιομηχανικών Ξηραντήρων.....	27
2.2 Προς Ξήρανση Προϊόντα / Αγροτικά Προϊόντα	31
2.3 Ξηραντήρας με ράφια (Tray Dryer).....	36
2.4 Αγροτικά Προϊόντα / Μανιτάρια	40
Κεφάλαιο 3 Υπολογιστικό Μέρος.....	46
3.1 Εισαγωγή-Ανάλυση Προβλήματος.....	46
Χρήσιμες Σχέσεις και Μεγέθη	47
Λογικό Διάγραμμα.....	50
Διάταξη Ξηραντήρα.....	54
3.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	55
Καμπύλες Ξήρανσης (χωρίς ακτινοβολία)	55
Επίδραση της Θερμοκρασίας	56

Επίδραση της Ταχύτητας.....	56
Επίδραση του Μεγέθους Ραφιού.....	60
Παρουσίαση Συγκριτικών Διαγραμμάτων	61
Ανάλυση και Σχολιασμός Συγκριτικών Διαγραμμάτων.....	62
Καμπύλες Ξήρανσης (με ακτινοβολία).....	63
Παρουσίαση Συγκριτικών Διαγραμμάτων	67
Ανάλυση και Σχολιασμός Συγκριτικών Διαγραμμάτων.....	67
Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	69
4.1 Συμπεράσματα-Συζήτηση	69
4.2 Πρόταση για Μελλοντική Εργασία	70
Παράρτημα	71
Βιβλιογραφία	74

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1 Καμπύλες ξήρανσης [4].	8
Σχήμα 2 Κατανομή υγρασίας σε πλάκα που ξηραίνεται και από τις δύο πλευρές. Ροή υγρασίας με διάχυση [12].	12
Σχήμα 3 Τυπική καμπύλη ξήρανσης στερεό [20].	12
Σχήμα 4 Κατανομή υγρασίας σε πορώδη πλάκα ξηραίνόμενη και από τις δύο πλευρές. Ροή υγρασίας με τριχοειδή φαινόμενα [12].	13
Σχήμα 5 Τριχοειδές φαινόμενο [17].	14
Σχήμα 6 Αναπαράσταση των πόρων του εδάφους σαν κυλινδρικά τριχοειδή [21].	15
Σχήμα 7 Απεικόνιση φάσεων ξήρανσης τυπικού πορώδους υλικού [22].	15
Σχήμα 8 Επίδραση του σταθερού ρυθμού ξήρανσης στην κρίσιμη υγρασία κατά την ξήρανση άμμου με υπέρθερμο ατμό [29].	21
Σχήμα 9 Καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης [17].	22
Σχήμα 10 Καμπύλες ισορροπίας υγρασιών για διάφορα στερεά [31].	22
Σχήμα 11 Διάφοροι τύποι ξηραντήρων [32].	23
Σχήμα 12 Ξηραντήρες ψεκασμού [36].	25
Σχήμα 13 Εξοπλισμός ξηραντήρα λεπτού στρώματος (thin layer) [48].	34
Σχήμα 14 Παραδείγματα από πορώδη μέσα [32].	35
Σχήμα 15 Τυπική διάταξη ξηραντήρα με δίσκους παράλληλης ροής [52].	37
Σχήμα 16 Διάταξη ξηραντήρα με περιστρεφόμενους δίσκους [56].	38
Σχήμα 17 Στοιχεία του ανυψωτικού μηχανισμού (Semi-Continuous cabinets) [57].	40
Σχήμα 18 Συμπεριφορά ξήρανσης για δείγμα 0.5 kg σε ταχύτητα αέρα 2.13 m/s [61].	43
Σχήμα 19 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετική ταχύτητα αέρα [61].	43
Σχήμα 20 Σκαρίφημα ξηραντήρα.	54
Σχήμα 21 Σκαρίφημα ραφιού ξηραντήρα.	54
Σχήμα 22 Ρυθμός ξήρανσης μανιταριών για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε σταθερή ταχύτητα 5 m/s.	55
Σχήμα 23 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 2 m/s....	55
Σχήμα 24 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 4 m/s....	56
Σχήμα 25 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60$ °C.	57
Σχήμα 26 Ρυθμός ξήρανσης μανιταριών για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60$ °C.	57
Σχήμα 27 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 1 m/s....	58
Σχήμα 28 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 5 m/s....	58
Σχήμα 29 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα °C σε θερμοκρασία $T_g = 50$ °C.	59
Σχήμα 30 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 80$ °C.	59
Σχήμα 31 Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών ξήρανσης σε συνθήκες $T_{min} - V_{min}$, $T_{max} - V_{max}$.	60

Σχήμα 32 Επίδραση του μεγέθους του δείγματος στο ράφι στο ποσοστό υγρασίας σε σταθερές συνθήκες ταχύτητας και θερμοκρασίας αέρα.	60
Σχήμα 33 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 2.13 m/s, μέγεθος ραφίου 0.5 kg, θερμοκρασία 50 °C).	61
Σχήμα 34 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 2.13 m/s, μέγεθος ραφίου 0.5 kg, θερμοκρασία 70 °C).	62
Σχήμα 35 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 2.13 m/s, μέγεθος ραφίου 0.5 kg, θερμοκρασία 90 °C).	62
Σχήμα 36 Απεικόνιση της γραμμικής σχέσης της σταθεράς του συντελεστή συναγωγικότητας h_c ύστερα από δοκιμές.	63
Σχήμα 37 Ρυθμός ξήρανσηςμανιταριών για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 5 m/s.	64
Σχήμα 38 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 5 m/s.	64
Σχήμα 39 Ρυθμός ξήρανσηςμανιταριών για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60$ °C.	65
Σχήμα 40 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60$ °C.	65
Σχήμα 41 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε σταθερή ταχύτητα 2.13m/s.	66
Σχήμα 42 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 0.5 m/s, μέγεθος ραφίου 0.05 kg, θερμοκρασία 50 °C).	66
Σχήμα 43 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 0.5 m/s, μέγεθος ραφίου 0.05 kg, θερμοκρασία 70 °C).	67
Σχήμα 44 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 0.5 m/s, μέγεθος ραφίου 0.05 kg, θερμοκρασία 80 °C).	68

Πίνακες

Πίνακας 1 Κριτήρια επιλογής ξηραντήρα [2].	29
Πίνακας 2 Ενεργότητα νερού συναρτήσει περιεκτικότητας σε υγρασία και θερμοκρασίας για βασικά φρούτα.	32
Πίνακας 3 Συνολικός χρόνος ξήρανσηςμανιταριών υπό διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης [61].	42

Κεφάλαιο 1 Βασικές Αρχές της Ξήρανσης Equation Chapter (Next) Section 1

1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τις βασικές αρχές της ξήρανσης συγκεκριμένα με: την επεξεργασία και ανάλυση της διεργασίας της ξήρανσης, την περιγραφή των φαινομένων που προκύπτουν κατά τη διεργασία και αντίστοιχα την παράθεση του υπολογισμού βασικών μεγεθών που την διέπουν, όπως του σταθερού και ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης, καθώς της κρίσιμης και της υγρασίας ισορροπίας. Καταρχήν, η διεργασία της ξήρανσης αφορά στην μεταφορά υγρασίας στο εσωτερικό του προς ξήρανση προϊόντος και χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: τη φυσική και τη μηχανική ξήρανση. Η πρώτη αναφέρεται σε φυσικές μεθόδους ξήρανσης όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η μηχανική αναφέρεται σε ξήρανση με χρήση συμβατικών υγρών ή αερίων καυσίμων είτε εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Στην επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου, γίνεται η περιγραφή των γενικών φαινομένων που μπορούν να προκύψουν κατά την διεργασία της ξήρανσης. Παρατίθενται οι καμπύλες ποσοστού υγρασίας και ρυθμού ξήρανσης οι οποίες απεικονίζουν τη σχέση υγρασίας-χρόνου και ρυθμού ξήρανσης-χρόνου αντίστοιχα. Επιπλέον, εξηγούνται τα φαινόμενα της συρρίκνωσης των υλικών κατά την ξήρανση που συνοδεύονται από μερική ή ολική αλλαγή της δομής τους, τα τριχοειδή φαινόμενα καθώς και τα φαινόμενα διάχυσης. Τέλος, στην παράγραφο του υπολογισμού του χρόνου ξήρανσης, περιγράφονται σε εκτενέστερο πλαίσιο για την περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης, η κρίσιμη υγρασία και για την περίοδο ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης, η υγρασία ισορροπίας. Γίνεται παράθεση των αντίστοιχων χαρακτηριστικών εξισώσεων και εξηγούνται αναλυτικότερα οι επιμέρους μεταβλητές και σταθερές.

1.2 Διεργασία Ξήρανσης

Όταν ένα στερεό που έχει υγρασία υποβάλλεται σε θερμική ξήρανση συμβαίνουν ταυτόχρονα δυο διαδικασίες.

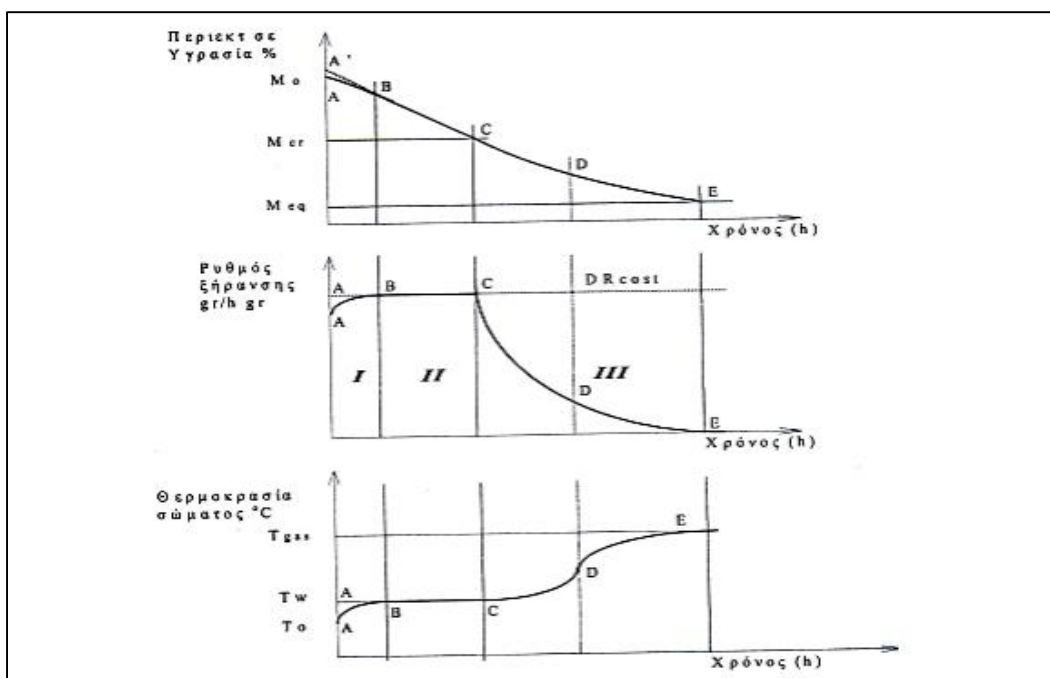
- Μεταφορά της εσωτερικής υγρασίας στην επιφάνεια λόγω διάχυσης
- Μεταφορά θερμότητας, μεταξύ επιφάνειας υλικού και θερμού αέρα.

Αρχικά, η μεταφορά υγρασίας στο εσωτερικό συμβαίνει λόγω της διαφοράς πίεσης δυο θεωρούμενων σημείων, της θερμοκρασιακής μεταβολής αλλά και των ιδιοτήτων του προς ξήρανση υλικού [1].

Η εξάτμιση της επιφανειακής υγρασίας οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του υλικού και του περιβάλλοντα αέρα. Η θερμότητα παρέχεται μέσω θερμού αέρα ή καυσαερίου στην επιφάνεια του στερεού [2]. Οι εξωτερικές συνθήκες όπως η υγρασία του αέρα, ο ρυθμός ροής και η πίεση επηρεάζουν σημαντικά τη διεργασία.

Με δεδομένο ότι ο ρυθμός ξήρανσης ενός προϊόντος δεν είναι σταθερός κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, οι φάσεις της διεργασίας είναι οι εξής [3]:

- **Η Φάση I** η οποία λέγεται και περίοδος θέρμανσης είναι συνήθως μικρής διάρκειας. Εδώ ο ρυθμός της ξήρανσης είναι αυξητικός.
- **Η Φάση II** κατά την οποία η θερμοκρασία του προϊόντος παραμένει σταθερή. Στη φάση αυτή η επιφάνεια του υλικού είναι κορεσμένη σε υγρασία και η μάζα του νερού ρέει διαμέσου του υλικού προς την επιφάνειά του ανεμπόδιστα. Ονομάζεται περίοδος σταθερού ρυθμού.
- **Η Φάση III** είναι αυτή του φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης όπου η αφαιρούμενη υγρασία είναι ποσοτικά μικρότερη από αυτήν που μπορεί να εξατμιστεί από την παρεχόμενη θερμότητα. Άρα και η θερμοκρασία του προϊόντος αυξάνεται και τείνει προς τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης. Η φάση αυτή συνδέεται με την περίοδο σταθερού ρυθμού στο σημείο C όπου η υγρασία γίνεται κρίσιμη. Είναι δυνατόν σε κάποιες περιπτώσεις να υπάρχει και δεύτερη περίοδος φθίνοντος ρυθμού.



Σχήμα 1 Καμπύλες ξήρανσης [4].

Η περίοδος ελαττούμενου ρυθμού είναι αυτή που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς η ξήρανση των περισσότερων τροφίμων και αγροτικών προϊόντων λαμβάνει χώρα σε αυτό το διάστημα [5]. Υγρασία από τα εσωτερικά στρώματα του δείγματος διαχέεται προς τα τμήματα της επιφάνειας και στη συνέχεια μεταφέρεται στο ρεύμα του αέρα. Λόγω των θερμικών αντιστάσεων στο εσωτερικό του υλικού η περίοδος αυτή διαρκεί αρκετά έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή περιεκτικότητα σε υγρασία. Ο ρυθμός ξήρανσης προσεγγίζει το μηδέν όταν στο προϊόν μένει το μικρότερο ποσοστό υγρασίας [6].

Στη βιβλιογραφία συναντάμε τη φυσική παραδοσιακή ξήρανση και τη μηχανική ξήρανση. Κατά τον Imre [7], στην φυσική παραδοσιακή ξήρανση η αφαίρεση της υγρασίας υλοποιείται μέσω της ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ξήρανση αποτελεί ξεχωριστή κατηγορία και διακρίνεται σε τρεις υποκατηγορίες [8]:

1. Την ηλιακή ξήρανση σε ελεύθερο αέρα όπου το προϊόν εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Η κίνηση του αέρα αφαιρεί την υγρασία πρώτα από την επιφάνεια του προϊόντος. Η διεργασία διαρκεί μέρες συνεπώς επανέρχεται κάποιο ποσοστό της υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου η θερμοκρασία μειώνεται [9].

2. Την άμεση ηλιακή ξήρανση κατά την οποία το προϊόν, εκτεθειμένο πάλι στην ηλιακή ακτινοβολία, είναι τοποθετημένο σε ράφι ή θάλαμο με διαφανές εξωτερικό περίβλημα. Με αυτό τον τρόπο αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες συγκριτικά με την επαφή του υλικού με τον ελεύθερο αέρα.
3. Την έμμεση ηλιακή ξήρανση, όπου ο αέρας θερμαίνεται σε έναν επίπεδο συλλέκτη και το προϊόν είναι τοποθετημένο σε ειδικό ντουλάπι. Ο αέρας ρέει στο ντουλάπι και το υλικό ξηραίνεται λόγω των φαινομένων διάχυσης και συναγωγής. Είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος από την άμεση ξήρανση καθώς επιτυγχάνονται μικρότεροι χρόνοι σε συνδυασμό με υψηλής ποιότητας τελικά προϊόντα [10].

Η μηχανική ξήρανση του Imre [7] ανήκει στην υποκατηγορία 3 της ηλιακής ξήρανσης όπου το προϊόν δεν έχει φυσική επαφή με το περιβάλλον και η απαιτούμενη ενέργεια σε αυτή τη διεργασία παρέχεται είτε από συμβατικά υγρά ή αέρια καύσιμα είτε από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Μηχανική ξήρανση προφανώς επιτυγχάνεται μέσω των αντίστοιχων συσκευών, των ξηραντήρων. Οι αντίστοιχοι ξηραντήρες είναι εξοπλισμένα με το λεγόμενο ηλιακό σύστημα το οποίο και συλλέγει θερμικά φορτία κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ηλιακό σύστημα είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται παραπάνω από μια φορά κατά τη διάρκεια της ημέρας και πέρα από το να παρέχει ζεστό νερό χρήσης, μπορεί να χρησιμεύσει και ως μέσο παροχής ενέργειας προς βελτίωση της απόδοσης του ξηραντήρα. Ανάλογα με το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, προκύπτει και η αντίστοιχη διαστασιολόγηση του ηλιακού συστήματος [11].

Η έννοια ξήρανση στερεών σημαίνει αφαίρεση μικρών ποσοτήτων υγρού από υλικό, έτσι ώστε να απομείνει τελικά μια μικρή ποσότητα νερού [12]. Στα παγωμένα υλικά οι ατμοί αφαιρούνται απευθείας από τη στερεά φάση, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εξάχνωση. Για τα αέρια, η αφαίρεση υγρασίας περιγράφεται με τις διαδικασίες της αφύγρανσης και της προσρόφησης. Η εξάτμιση αφορά στην αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων νερού από τα διαλύματα.

Επίσης κατά τους McCabe & Smith [13], όσον αφορά στη βιομηχανία, η ξήρανση είναι μια βασική διεργασία για τα τρόφιμα, τα φαρμακευτικά, τα πολυμερή, το χαρτί, τα κεραμικά κ.ά. Σημασία σε αυτήν έχει η ποιότητα του τελικού προϊόντος και ως διεργασία επιτυγχάνεται με αφαίρεση της υγρασίας θερμοκρασιακά κάτω από το σημείο βρασμού. Αποτελεί σύμφωνα με

τον ερευνητή Kemp [14] μια εντατική διαδικασία υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων, καθώς είναι αναγκαία η παροχή της απαιτούμενης θερμότητας για να απομακρυνθεί το νερό. Το ποσοστό των ενεργειακών απαιτήσεων για την ξήρανση στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες ξεπερνά το 10% της συνολικής χρήσης ενέργειας των βιομηχανιών.

1.3 Γενικά Φαινόμενα στην Ξήρανση

Το Φαινόμενο της Συρρίκνωσης

Κατά την ξήρανση, ο όγκος του προς ξήρανση προϊόντος μειώνεται εξαιτίας της αφαίρεσης μεγάλου μέρους του περιεχόμενου νερού. Η συρρίκνωση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του αρχικού όγκου του προϊόντος έως και 75% [15]. Οι συνέπειες της συρρίκνωσης είναι οι εξής:

- **Η μεταβολή της επιφάνειας του υλικού ανά μονάδα μάζας**, όπου η επιφάνεια του υλικού αλλάζει, πράγμα που ισχύει ιδιαίτερα για τα λαχανικά και τα τρόφιμα. Στα λαχανικά, κατά την ξήρανση, μεταβάλλεται το ποσοστό της επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη στον αέρα.
- **Η ανάπτυξη σκληρής στοιβάδας στην επιφάνεια (επιφανειακή σκλήρυνση)** μπορεί να εμφανιστεί σε σπάνιες περιπτώσεις όπου έχουμε ταυτόχρονη συρρίκνωση και μείωση του συντελεστή διάχυσης. Παρεμποδίζεται η κίνηση της υγρασίας προς την επιφάνεια με αποτέλεσμα να επιτείνει την ανομοιομορφία της υγρασίας στο υλικό. Η ανάπτυξη τέτοιων φαινομένων έχει αρνητικές συνέπειες στη σύσταση και την ποιότητα του προς ξήρανση προϊόντος [12].
- **Η αλλαγή της ολικής δομής** με παράδειγμα την εμφάνιση ρωγμών, διακοπών και στρεβλώσεων στο υλικό, όταν η ταχύτητα ξήρανσης είναι υψηλή. Η επιφάνεια του υλικού χάνει υγρασία πριν από το εσωτερικό τμήμα εξαιτίας της άμεσης επαφής με τον αέρα ξήρανσης. Τέτοια φαινόμενα εξομαλύνονται περιορίζοντας το ρυθμό ξήρανσης με τη ρύθμιση της υγρασίας του αέρα.

Φαινόμενα Διάχυσης

Η διάχυση μάζας είναι η σχετική κίνηση κάποιου ή κάποιων συστατικών σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά ενός μίγματος, η οποία οφείλεται σε διαφορά συγκεντρώσεων του ή των μεταφερόμενων συστατικών. Στην ξήρανση υλικών με θερμό αέρα η κίνηση της υγρασίας κατευθύνεται από τις περιοχές υψηλών συγκεντρώσεων σε χαμηλότερες, δηλαδή προς την

επιφάνεια του υλικού [16]. Σύμφωνα με το νόμο του Fick, ο ρυθμός κίνησης της υγρασίας εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση στην περίπτωση μονοδιάστατης διάχυσης:

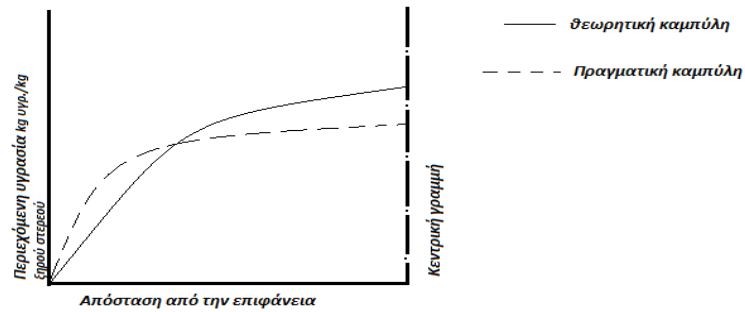
$$\frac{dX}{d\theta} = D_L \frac{\theta^2 X}{\theta x^2} \quad (1.1)$$

Όπου το θ είναι ο χρόνος σε (sec), το x είναι το πάχος του υλικού σε (m) και: X η υγρασία στον χρόνο θ σε (kg υγρού/kg ξηρού στερεού υλικού), D_L ο συντελεστής διάχυσης της υγρής φάσης για κίνηση μέσα από τη στερεή φάση σε (m^2/sec) όπου και στις απλούστερες περιπτώσεις λαμβάνεται ως σταθερό μαζί με την ξήρανση να θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα μόνο από τη μια πλευρά της πλάκας [17]. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι ο συντελεστής διάχυσης μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και με τη μείωση της υγρασίας του στερεού [12].

Οι προαναφερόμενες παραδοχές για το D_L μαζί με την επιλογή των αντίστοιχων οριακών συνθηκών αποτελούν παραδοχές ώστε η (1.1) να μπορεί να ολοκληρωθεί. Επιπλέον υποθέτοντας ότι η αρχική υγρασία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην πλάκα, κατά τους Sherwood [18] & Newman [19] ισχύει η εξίσωση:

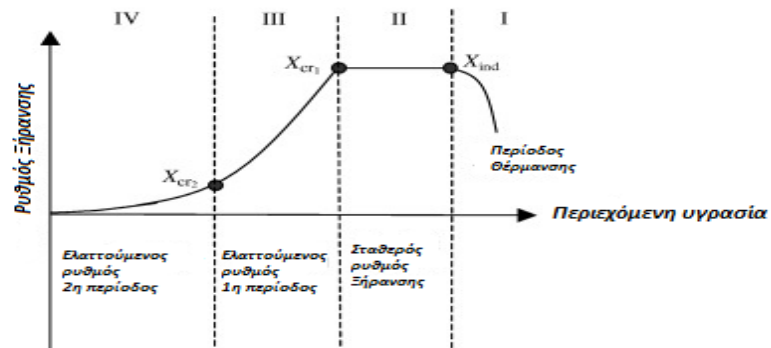
$$\frac{X - X_E}{X_C - X_E} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ e^{-D_L \theta (\pi/l)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L \theta (\pi/l)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L \theta (\pi/l)^2} + \dots \right\} \quad (1.2)$$

Όπου, το l είναι η απόσταση από την επιφάνεια ως το κέντρο της πλάκας εκφρασμένη σε (m), X_E η υγρασία κατά την ισορροπία σε (kg υγρού/kg ξηρού υλικού) και X_C η υγρασία στην αρχή της περιόδου στις ίδιες μονάδες, η οποία και ονομάζεται κρίσιμη υγρασία.



Σχήμα 2 Κατανομή υγρασίας σε πλάκα που ξηραίνεται και από τις δύο πλευρές. Ροή υγρασίας με διάχυση [12].

Στην περίπτωση της διάχυσης επομένως, ενδέχεται η αναπαράσταση της καμπύλης ρυθμού ξήρανσης (Σχήμα 2) να μην συμπίπτει με την τυπική καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης που παρουσιάζεται παρακάτω. Η καμπύλη του σχήματος 2 σχεδιάζεται με βάση τη σχέση (1.1) και αποτελεί μια παρουσίαση κατανομής της υγρασίας για τα υλικά που ξηραίνονται με διάχυση.

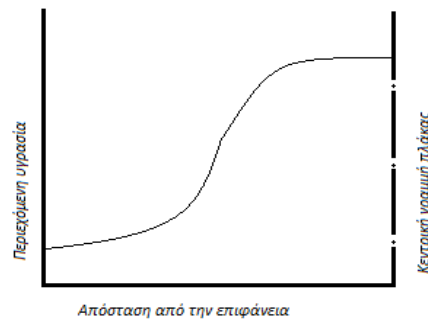


Σχήμα 3 Τυπική καμπύλη ξήρανσης στερεό [20].

Για τη διάχυση σε στερεά δεν υπάρχει κάποια ειδική σχέση που να προσεγγίζει επαρκώς όλα τα συστήματα. Αυτό οφείλεται στην ποικιλία των στερεών, στο μέγεθος του διαχεόμενου συστατικού αλλά και στη συρρίκνωση των στερεών κατά την απομάκρυνση της υγρασίας.

Τριχοειδή Φαινόμενα

Στα πορώδη στερεά η κίνηση της υγρασίας διαφοροποιείται από τους νόμους της διάχυσης ειδικά στις αρχικές φάσεις της ξήρανσης. Μια τυπική κατανομή της υγρασίας φαίνεται στο σχήμα 4.

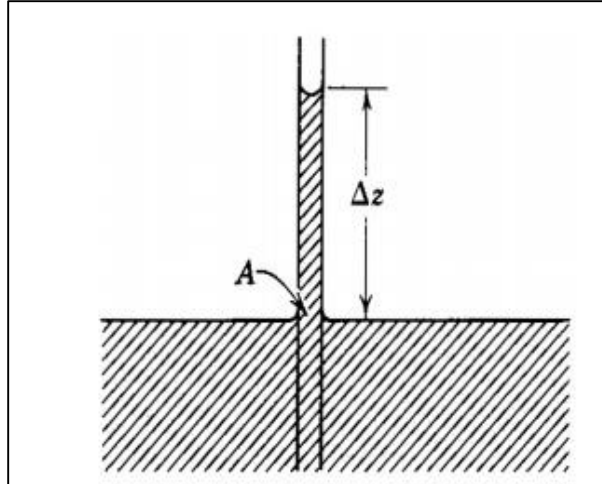


Σχήμα 4 Κατανομή υγρασίας σε πορώδη πλάκα ξηραίνόμενη και από τις δύο πλευρές. Ροή υγρασίας με τριχοειδή φαινόμενα [12].

Εδώ η κίνηση του υγρού οφείλεται στη διαφορά των υδροστατικών δυνάμεων από τα φαινόμενα επιφανειακής τάσης μεταξύ νερού και στερεού [17]. Ισχύει ότι:

$$-\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1.3)$$

Όπου ΔP είναι η πτώση πίεσης λόγω φαινομένων επιφανειακής τάσης σε (N/m^2), γ η επιφανειακή τάση της επαφής μεταξύ υγρών και αέριων φάσεων σε (N/m^2), r η ακτίνα καμπυλότητας της σφαίρας σε (m) η οποία και παίρνει θετικές τιμές όταν μια φυσαλίδα περιβάλλεται από υγρό και αρνητική όταν μια σταγόνα είναι εγκλωβισμένη σε αέριο.



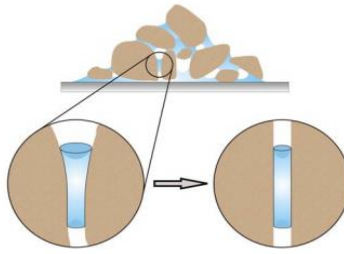
Σχήμα 5 Τριχοειδές φαινόμενο [17].

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5, η ανύψωση του υγρού στον κύλινδρο θα υπολογιστεί από τις δυνάμεις που δρουν στο σημείο A, επομένως θα έχω:

$$-\Delta P = \Delta z \cdot g(\rho_L - \rho_V) = \frac{2\gamma}{r} \rightarrow \Delta z = \frac{2\gamma}{rg(\rho_L - \rho_V)} \quad (1.4)$$

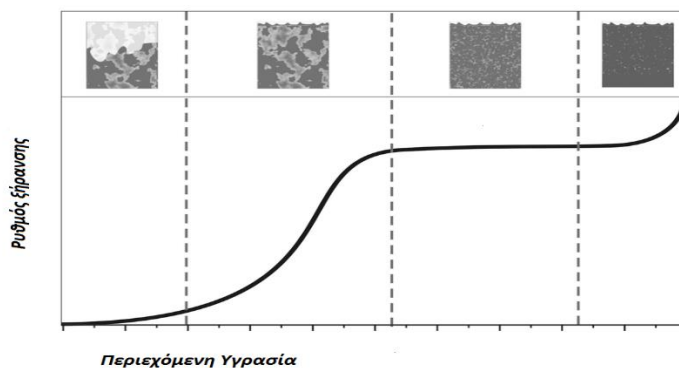
Όπου z η ανύψωση του υγρού σε (m), g η επιτάχυνση βαρύτητας σε (m/s^2), r η εσωτερική ακτίνα του κυλίνδρου σε (m) και ρ οι πυκνότητες με αντίστοιχους δείκτες L και V για υγρό και αέριο.

Οι μικροί πόροι στην επιφάνεια αναπτύσσουν μεγαλύτερες τριχοειδής δυνάμεις έτσι μπορούν να απορροφήσουν νερό από τους μεγαλύτερους που ξηραίνονται πρώτοι [12]. Όταν τα ποσοστά υγρασίας είναι χαμηλότερα, το υγρό υποχωρεί και κατευθύνεται στο εσωτερικό του υλικού ανομοιόμορφα μέχρις ότου εξατμιστεί ολόκληρη η επιφάνεια. Κατά την εξάτμιση του νερού σχηματίζονται μηνίσκοι ή κύλινδροι μεταξύ των πόρων.



Σχήμα 6 Αναπαράσταση των πόρων του εδάφους σαν κυλινδρικά τριχοειδή [21].

Έτσι και στα τελικά στάδια της ξήρανσης, η θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας τείνει στη θερμοκρασία του αέριου ρεύματος και αντίστοιχα η επιφάνεια στην οποία ακόμη εξελίσσεται η ξήρανση παραμένει στη θερμοκρασία του υγρού βολβού του ρεύματος. Το σχήμα και η κλίση των αντίστοιχων καμπυλών διαφοροποιείται σύμφωνα με τη δομή του στερεού και την ευκολία κίνησης του νερού μέσα σε αυτό. Στο τέλος της ξήρανσης, η υγρασία μεταφέρεται σε μικρούς θύλακες σε γωνίες ορισμένων πόρων [21]. Σε αυτό το σημείο ξεκινά η δεύτερη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης. Η ταχύτητα ξήρανσης καθώς και η κίνηση του υδρατμού δεν ελέγχεται πλέον από τα τριχοειδή φαινόμενα αλλά από το νόμο της διάχυσης. Η περίοδος αυτή είναι η καμπύλη με τα κοίλα προς τα άνω (Σχήμα 7). Οι καμπύλες μεταβάλλονται σε κάθε υλικό εξαιτίας της διαφορετικής σύστασης και της διαφορετικής κίνησης της υγρασίας στο εσωτερικό τους [12].



Σχήμα 7 Απεικόνιση φάσεων ξήρανσης τυπικού πορώδους υλικού [22].

1.4 Υπολογισμός του Χρόνου Ξήρανσης

Σχετικά με τον υπολογισμό του χρόνου ξήρανσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι σχέσεις αφορούν τις επιμέρους φάσεις της διεργασίας εξαιτίας των διαφορετικών φαινομένων που επιδρούν στην καθεμιά. Ο χρόνος ξήρανσης λοιπόν δίνεται από τη σχέση [23]:

$$\int_0^{\theta} d\theta = \frac{-W_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{R} \quad (1.5)$$

Όπου R είναι ο ρυθμός ξήρανσης σε (kg νερού/m²s) της στερεής επιφάνειας, W_s το βάρος του στερεού υλικού σε (kg), A η επιφάνεια ξήρανσης σε (m²), X_1 το ποσοστό υγρασίας για $\theta=0$ και X_2 το ποσοστό υγρασίας σε χρόνο θ , δηλαδή στο τελικό σημείο της περιόδου όπου η υγρασία γίνεται κρίσιμη.

Τονίζεται ότι στο κεφάλαιο, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στους συμβολισμούς των μεγεθών ανά τύπο λόγω χρησιμοποίησης διαφορετικών βιβλιογραφικών πηγών για τη συγγραφή.

Περίοδος Σταθερού Ρυθμού Ξήρανσης

Σε αυτή την περίοδο η θερμοκρασία του προς ξήρανση υλικού είναι σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία υγρής σφαίρας. Η προστιθέμενη θερμότητα καταναλώνεται με την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του προϊόντος. Η ταχύτητα ξήρανσης εξαρτάται από τους εξωτερικούς παράγοντες (θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα), την επιφάνεια ξήρανσης και το συντελεστή μεταφοράς μάζας [24]. Η εξίσωση που εκφράζει τη μεταβολή της υγρασίας είναι η παρακάτω:

$$-\frac{dw}{dt} = \frac{h_c A (T_a - T_w)}{L} = k_y A (W_w - W_a) \quad (1.6)$$

Όπου $\frac{dw}{dt}$ είναι ο ρυθμός ξήρανσης ή εξάτμισης σε (kg νερού/sec), h_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε (W/m² °C) που εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες, την ταχύτητα του αέρα και τη γεωμετρία του ξηραντήρα, A η επιφάνεια εξάτμισης σε (m²), T_a η θερμοκρασία (ξηρής σφαίρας) αέρα σε (°C), T_w η θερμοκρασία επιφάνειας εξάτμισης (υγρής σφαίρας) σε (°C), L η θερμότητα εξάτμισης του νερού σε (J/kg), k_y ο συντελεστής μεταφοράς μάζας σε (Kg/s m²) που

εξαρτάται επίσης από τις φυσικές ιδιότητες, την ταχύτητα του αέρα και τη γεωμετρία του ξηραντήρα, W_w η υγρασία κορεσμένου αέρα στη θερμοκρασία T_w σε (kg νερού/kg ξηρού αέρα), W_a η υγρασία κύριας μάζας αέρα στη θερμοκρασία T_a σε (kg νερού/kg ξηρού αέρα)

Ενώ σύμφωνα με τον καθηγητή Brennan J.G. [24], η σχέση υπολογισμού του χρόνου στην περίοδο σταθερού ρυθμού δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$t_c = \frac{(W_o - W_c) \rho_s L_s l}{h_c (\theta_\alpha - \theta_s)} \quad (1.7)$$

Όπου, W_o η αρχική περιεχόμενη υγρασία του υγρού στερεού, W_c η περιεχόμενη υγρασία στο σημείο C που τελειώνει η περίοδος σταθερού ρυθμού, ρ_s η πυκνότητα του υλικού, L_s η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης, l το πάχος της πλάκας, h_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, θ_α θερμοκρασία ξηρής σφαίρας του αέρα και θ_s η θερμοκρασία υγρής σφαίρας του αέρα.

Για την μετάδοση θερμότητας μόνο με συναγωγή από το ρεύμα αέρα ξήρανσης και για G να αντιστοιχεί στην παροχή μάζας του αέρα σε (kg/m²s) ισχύουν τα εξής:

Για ροή αέρα παράλληλη προς την επιφάνεια εξάτμισης

$$h_c = 8.85 G^{0.8} / D^{0.2} \quad (1.8)$$

Όπου D η ισοδύναμη διάμετρος του χώρου ροής σε (m). Η εξίσωση αυτή ισχύει για αριθμούς Reynolds: $2600 \leq Re \leq 22000$

Για ροή αέρα κάθετη στην επιφάνεια εξάτμισης [12]

$$h_c = 0.37 G^{0.37} \quad (1.9)$$

Η εξίσωση εκφρασμένη σε μονάδες αγγλοσαξονικού συστήματος ισχύει για παροχή $G = 800 - 4000 lb / ((hr)(sq \cdot ft))$.

Για την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία ή αγωγή ισχύει για το συντελεστή μεταφοράς μάζας και θερμότητας η προσέγγιση μέσω του αριθμού Lewis με τη σχέση:

$$Le = \frac{h_c}{k_y C_s} \quad (1.10)$$

Αυτή η σχέση ισχύει όταν οι συντελεστές επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από τις συνθήκες ροής, πράγμα που συμβαίνει κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης όπου και το $Le \cong 1$.

Στη συνέχεια, ο ρυθμός ξήρανσης ανά μονάδα μάζας ξηρού στερεού δίνεται από τη σχέση [17]:

$$\left(\frac{dw}{dt} \right)_\xi = \frac{1}{m_s} \frac{dw}{dt} \quad (1.11)$$

Όπου m_s σε (kg) η μάζα ξηρού στερεού και $\left(\frac{dw}{dt} \right)_\xi$ ο ρυθμός εξάτμισης (kg/ s kg ξηρού στερεού)

Με συνδυασμό των εξισώσεων (1.6) και (1.11) και με την υπόθεση ότι δεν υπάρχει φαινόμενο συρρίκνωσης είναι:

$$-\left(\frac{dw}{dt} \right)_\xi = \frac{h_c}{2x\rho_s L} (T_\alpha - T_w) \quad (1.12)$$

Όπου ρ_s η πυκνότητα του ξηρού στερεού.

Στην περίπτωση ξήρανσης με κυκλοφορία αέρα μέσω κλίνης [17] και με a να είναι η ανηγμένη επιφάνεια κλίνης σε (m^2/m^3), η (1.12) γίνεται:

$$-\left(\frac{dw}{dt} \right)_\xi = \frac{h_c a}{\rho_s L} (T_\alpha - T_w) \quad (1.13)$$

Το a υπολογίζεται ως εξής, (με ε το πορώδες της κλίνης):

- Για κλίνη σφαιρικών σωματιδίων διαμέτρου d_p

$$a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (1.14)$$

- Για κλίνη κυλινδρικών σωματιδίων διαμέτρου d_p και μήκους l

$$a = \frac{4(1-\varepsilon)(1+0.5d_p)}{d_p} \quad (1.15)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία ο αέρας ρέει παράλληλα σε μια επιφάνεια όπως στους ξηραντήρες με δίσκους οι συντελεστές υπολογίζονται με τις παρακάτω σχέσεις [12]:

$$j_H = \frac{h_c}{C_p G} \text{Pr}^{2/3} = \frac{k_y}{G} \text{Sc}^{2/3} = 0.11 \text{Re}_e^{-0.29} \quad (1.16)$$

με αριθμό Reynolds

$$\text{Re}_e = \frac{d_e G}{\mu} \quad (1.17)$$

και με αριθμό Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{c\mu}{k} \quad (1.18)$$

Όπου c , μ και k , η ειδική θερμότητα, το ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα του αέρα

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας k_y για αριθμούς Reynolds έως και 1000 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Sh = 2 + 0.60 \text{Re}^{0.5} \text{Sc}^{1/3} \quad (1.19)$$

Όπου Sh κατά τον Sherwood [18]

$$Sh = k_y L_e / D_u \quad (1.20)$$

με αριθμό Schmidt

$$\text{Sc} = \mu / \rho D_u \quad (1.21)$$

όπου D_u ο συντελεστής διάχυσης μάζας σε (m²/s).

Περίοδος Ελαττωμένου Ρυθμού Ξήρανσης

Κατά την περίοδο ελαττωμένου ή μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, η υγρασία έχει τιμή πάντα μικρότερη της κρίσιμης υγρασίας. Στην περίοδο αυτή, η επιφάνεια του προϊόντος δεν είναι πια κορεσμένη με νερό και ο ρυθμός της ξήρανσης μειώνεται γραμμικά σε σχέση με την υγρασία. Ο

κύριος μηχανισμός κίνησης της υγρασίας είναι η διάχυση [25]. Η εκτίμηση του χρόνου και της ταχύτητας της ξήρανσης σε αυτή τη φάση γίνεται κυρίως με μαθηματικά μοντέλα που στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις. Οι πιο θεωρητικές προσεγγίσεις στηρίζονται στην παραδοχή ότι η κίνηση της υγρασίας υπόκειται στους νόμους ενός συγκεκριμένου μηχανισμού [24].

Σύμφωνα με τους ερευνητές Hui Y.H. και Sinha N.K. [26], η σχέση που εκφράζει το χρόνο ξήρανσης στην περίοδο φθίνοντος ρυθμού είναι η εξής:

$$t = \frac{X_o - X_c}{R_c} - \frac{X_c}{R_c} \ln \frac{X_c}{X} \quad (1.22)$$

Όπου R_c ο ρυθμός ξήρανσης στη περίοδο σταθερού ρυθμού, X_c η περιεχόμενη υγρασία στο κρίσιμο σημείο C, X_o η αρχική υγρασία, X η ζητούμενη τελική περιεχόμενη υγρασία.

Στην περίπτωση που η καμπύλη ταχύτητας της ξήρανσης θεωρηθεί ευθεία γραμμή ο χρόνος ξήρανσης είναι [12]:

$$\theta = \frac{S_s(X_c - X^*)}{N_c A} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad (1.23)$$

Όπου S_s το βάρος του προς ξήρανση υλικού και A η επιφάνεια ξήρανσης

Κρίσιμη Υγρασία

Ύστερα από την περίοδο σταθερού ρυθμού όπου το νερό στην επιφάνεια έχει εξατμιστεί η ταχύτητα ξήρανσης αρχίζει να μειώνεται. Το σημείο στο οποίο η υγρασία γίνεται κρίσιμη είναι ταυτόχρονα και το σημείο που ξεκινά η περίοδος φθίνοντος ρυθμού. Η κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία X_c αυξάνει με το πάχος του προς ξήρανση υλικού και με το ρυθμό ξήρανσης [27].

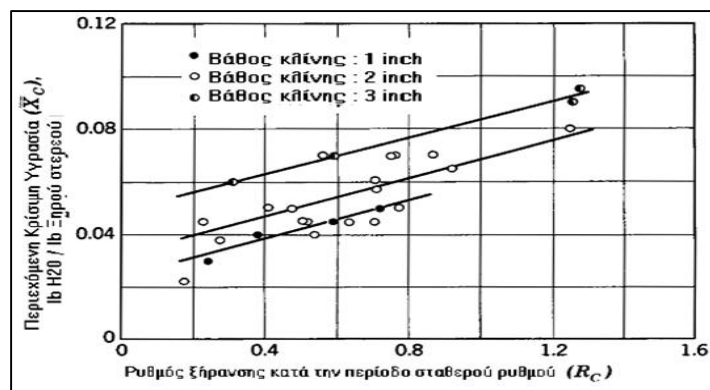
Σε περίπτωση που παρουσιάζεται παραπάνω από μια περίοδο ελαττούμενου ρυθμού, για να υπολογίσω την κρίσιμη υγρασία, εξισώνω τους ρυθμούς ξήρανσης των δύο περιόδων ώστε να καταλήξω στη σχέση:

$$K(w_c - w_e) = \frac{hA(T_a - T_w)}{L} = k_y A(w_w - w_a) \quad (1.24)$$

Όπου το K αποτελεί την εμπειρική σταθερά ξήρανσης σε (1/s) και για μία περίοδο μειούμενου ρυθμού ξήρανσης εκφράζεται από τη σχέση:

$$k = -\frac{(dw/dt)_c}{w_c - w_e} \quad (1.25)$$

Επιπλέον η κρίσιμη υγρασία εξαρτάται από την υγρασία ή τη θερμοκρασία του αέρα. Δηλαδή, με μια ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας ή μείωση της υγρασίας του αέρα, αυξάνεται ο ρυθμός ξήρανσης της περιόδου σταθερού ρυθμού, άρα και η κρίσιμη υγρασία [28]. Επιπλέον, από το σχήμα 8, διαφαίνεται η συσχέτιση του ποσοστού κρίσιμης υγρασίας με το ρυθμό ξήρανσης κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού ανά διαφορετικά πάχη στριβιάδας για την ξήρανση άμμου με υπέρθερμο ατμό.

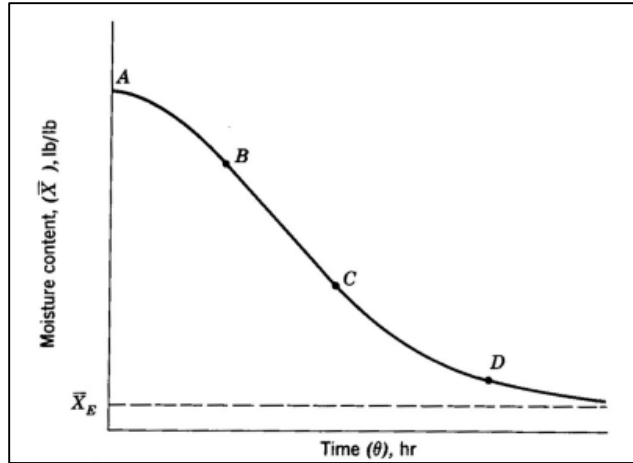


Σχήμα 8 Επίδραση του σταθερού ρυθμού ξήρανσης στην κρίσιμη υγρασία κατά την ξήρανση άμμου με υπέρθερμο ατμό [29].

Όπως φαίνεται, όσο ο ρυθμός ξήρανσης μεγαλώνει, αυξάνεται και η αντίστοιχη κρίσιμη υγρασία με βάση τις σχετικές ευθείες. Οι κουκκίδες από την άλλη πλευρά απεικονίζουν τις αντιστοιχίες ρυθμού ξήρανσης – κρίσιμης υγρασίας για δοσμένα βάρη κλίνας 1, 2 και 3 ιντσών αντίστοιχα.

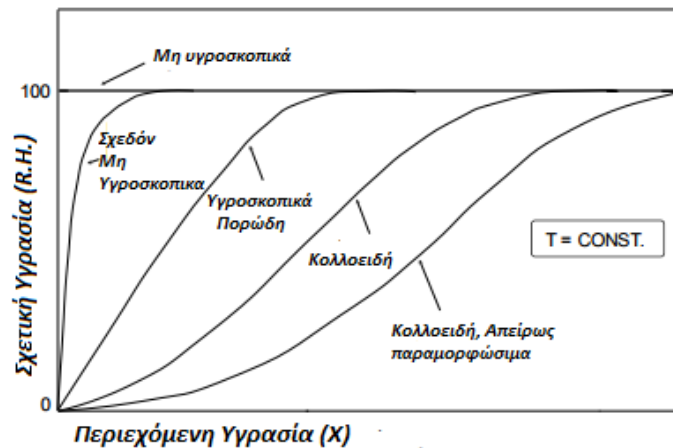
Υγρασία Ισορροπίας

Η υγρασία ισορροπίας αντιστοιχεί στην τιμή του ποσοστού υγρασίας κατά την οποία ο ρυθμός ξήρανσης τείνει στο μηδέν το οποίο και είναι το μικρότερο δυνατό ποσό υγρασίας που μπορεί να επικρατήσει στο στερεό σε δεδομένες συνθήκες ξήρανσης [5]. Μια σαφής απεικόνισή της φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη ξήρανσης:



Σχήμα 9 Καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης [17].

Στο σημείο ισορροπίας η πίεση ατμών του νερού στο εσωτερικό του προς ξήρανση υλικού είναι ίση με την επιφανειακή. Η περιεχόμενη υγρασία στο σημείο ισορροπίας επηρεάζεται από τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης ή των άλλων μέσων που έρχεται σε επαφή το υλικό [30]. Εδώ, από το σημείο D της καμπύλης και έκτοτε, η ξήρανση συμβαίνει στο εσωτερικό του στερεού και μόνο. Παραθέτουμε στη συνέχεια κάποιες τυπικές καμπύλες ισορροπίας υγρασιών για διάφορα είδη στερεών.



Σχήμα 10 Καμπύλες ισορροπίας υγρασιών για διάφορα στερεά [31].

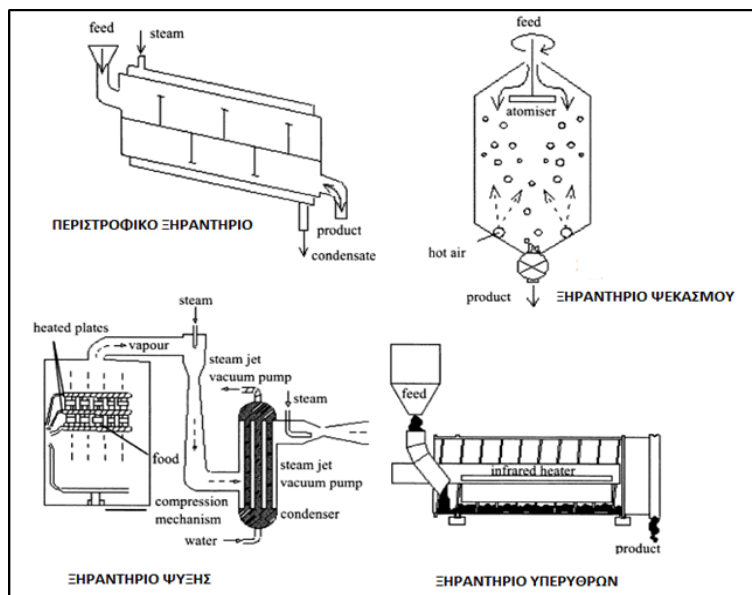
Κεφάλαιο 2 Κυριότεροι Τύποι Ξηραντήρων / Προϊόντα προς Ξήρανση

Equation Section (Next)

2.1 Κατάταξη και Επιλογή των Βιομηχανικών Ξηραντήρων

Κατάταξη Βιομηχανικών Ξηραντήρων

Με πολύ λίγες εξαιρέσεις, τα περισσότερα προϊόντα από τη σημερινή βιομηχανία υφίστανται ξήρανση σε κάποιο στάδιο παραγωγής τους. Ένα προϊόν πρέπει να είναι κατάλληλο και για μεταγενέστερη επεξεργασία και πώληση. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η υπερβολική ξήρανση είναι δαπανηρή καθώς, πέρα από το έξοδο της παραπάνω ενέργειας, το τελικό προϊόν είναι χαμηλής ποιότητας λόγω των υψηλών θερμοκρασιών της επεξεργασίας. Βαρύτητα δίνεται στις μεθόδους που αφορούν στην εξοικονόμηση ενέργειας στους ξηραντήρες.



Σχήμα 11 Διάφοροι τύποι ξηραντήρων [32].

Είναι αδύνατον να κατηγοριοποιηθούν όλα τα ξηραντήρια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σωματιδιακών προϊόντων. Συνεπώς, υπάρχουν επιμέρους κατηγοριοποιήσεις ανάλογα με τα κριτήρια που θεωρούμε σε κάθε περίπτωση. Η βασικότερη είναι σύμφωνα με τους ερευνητές Levi και Kalman [33] είναι η φυσική μορφή που έχει το προς ξήρανση υλικό πριν τη διεργασία. Ανάλογα με τη μορφή συνίστανται οι κατάλληλοι ξηραντήρες. Τα βασικά είδη είναι τα εξής:

- Υλικά υγρής μορφής: Ξηραντήρες τυμπάνου, ξηραντήρες ψεκασμού και ρευστοποιημένης κλίνης.
- Λεπτή/σκληρή/ρευστή πάστα: Ξηραντήρες εκνέφωσης, μεταφορικά ξηραντήρια, ξηραντήρες με ράφια.
- Υγρά στερεά με σωματιδιακή μορφή: Περιστροφικοί ξηραντήρες, ρευστοποιημένης κλίνης, ξηραντήρες αστραπιαίας δράσης.

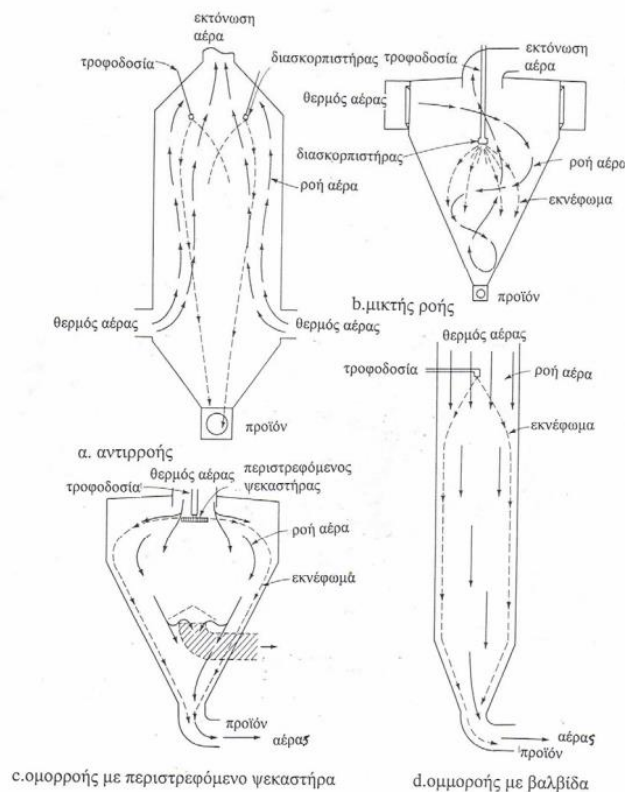
Ειδικότερα, όσον αφορά στην ξήρανση τροφίμων, οι ξηραντήρες μπορούν καταρχάς να ταξινομηθούν σε συνεχείς και σε αυτούς που αφορούν σε παραγωγή ασυνεχώς (κατά παρτίδες). Μια άλλη κατάταξη γίνεται με βάση τις φυσικές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της θερμοκρασίας και την αφαίρεση των υδρατμών. Η πιο κοινή διεργασία σε αυτή την κατάταξη υπαγορεύει την απευθείας επαφή με το θερμό αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και τον παραγόμενο υδρατμό να αφαιρείται μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα. Εναλλακτικά, θερμός αέρας προστίθεται και μέσω μεταλλικού τοιχώματος είτε με ακτινοβολία [32].

Κατά τον Keey [34], οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στην ταξινόμηση των ξηραντήρων είναι:

1. Ο τρόπος που η θερμότητα διαχέεται στο υλικό.
2. Η θερμοκρασία και πίεση της διαδικασίας με ταξινομήσεις σε υψηλή, μέση ή χαμηλή θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση ή κενό.
3. Ο τρόπος με τον οποίο το υλικό τοποθετείται στον ξηραντήρα.

Όσον αφορά στον παράγοντα 1, οι τρόποι θέρμανσης είναι η μεταφορά, η μεταβίβαση και η ακτινοβολία. Στη μέθοδο της μεταφοράς, συναντώνται οι “Convective (direct) Dryers” ή συναγωγείς (άμεσοι) ξηραντήρες στους οποίους χρησιμοποιείται κυρίως αέρας αλλά και αδρανές αέριο, αέριο άμεσης καύσης είτε υπέρθερμος ατμός. Κάποια παραδείγματα αυτών είναι οι ξηραντήρες ανακοπής αέρα (περιστροφικά ξηραντήρια, ξηραντήρια ψεκασμού), οι ξηραντήρες πρόσκρουσης και οι ξηραντήρες γεμισμένης κλίνης [2]. Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μια διαδικασία μετατροπής του υγρού προϊόντος σε σκόνη εξατμίζοντας το διαλύτη. Συγκριτικά με άλλες διαδικασίες εξάτμισης, η ξήρανση με ψεκασμό έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι τα προϊόντα μπορούν να ξηρανθούν χωρίς μεγάλες απώλειες πτητικών ή θερμικά ασταθών συστατικών. Τέτοιου είδους πλεονεκτήματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην παραγωγή

προϊόντων από τρόφιμα, όπως είναι η σκόνη γάλακτος και ο στιγμιαίος καφές [35]. Οι ξηραντήρες ψεκασμού, με το υγρό να ψεκάζεται στη ροή του θερμού αέρα, προσφέρουν μεγάλη ταχύτητα ξήρανσης και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και σε τρόφιμα που πιθανόν έχουν αλλοιωθεί λόγω μακράς έκθεσης σε θερμό ρεύμα αέρα. Από την άλλη τα περιστροφικά ξηραντήρια βασίζονται στη λειτουργία γύρω από τον κύλινδρο στον οποίο και τοποθετείται το τρόφιμο. Το θερμό ρεύμα αέρα μεταβιβάζεται στον κύλινδρο ο οποίος είτε περιστρέφεται είτε είναι στάσιμος και η μεταφορά πραγματοποιείται μέσω κοχλίας που είναι τοποθετημένος πάνω του [32].



Σχήμα 12 Ξηραντήρες ψεκασμού [36].

Στους ξηραντήρες που λειτουργούν με χρήση έμμεσης θέρμανσης, η θερμότητα για την εξάτμιση παρέχεται μέσω θερμαινόμενων επιφανειών, είτε σταθερών είτε κινούμενων, που είναι τοποθετημένες στη συσκευή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι εν λόγω συσκευές λειτουργούν είτε με συνεχή τρόπο, μη συνεχή είτε συνδυασμό τρόπων. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις ξηραντήριων στα οποία κατά τη διάρκεια της διεργασίας επιδρούν η

ακτινοβολούσα επιφάνεια αλλά και ο θερμός αέρας. Η θερμοκρασία ξήρανσης σε αυτές τις περιπτώσεις καθορίζεται από την κατάσταση δυναμικής ισορροπίας της θερμορροής από την ακτινοβολούσα επιφάνεια προς το υλικό και της θερμορροής από το υλικό προς το θερμό αέρα. Τα κόστη κεφαλαίου και χρήσης αυτών των ξηραντήρων είναι υψηλά. Οι αντίστοιχες τεχνικές είναι χρήσιμες για μονάδες παραγωγής προϊόντων υψηλής αξίας είτε για στάδια τελικής διόρθωσης και εξάτμισης της περιεχόμενης υγρασίας [2]. Ένα παράδειγμα ξηραντήρα ακτινοβολίας είναι ο ηλιακός, ο οποίος και χρησιμοποιείται σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια. Πέρα από την ηλιακή ακτινοβολία, τα ξηραντήρια θερμαίνονται και εμμέσως με ηλιακούς συλλέκτες, δεν εμφανίζουν κάποια τυποποίηση και σχεδιάζονται εμπειρικά ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο προϊόν και η μείωση του χρόνου ξήρανσης.

Η ξήρανση με χρήση μικροκυμάτων δεν επιτυγχάνει αρκετά καλά αποτελέσματα καθώς εμφανίζονται ελαττώματα στην ομοιομορφία της ξήρανσης και στον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η σημαντική μείωση της διάρκειας της ξήρανσης σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι το βασικότερο πλεονέκτημα [37]. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τους Kouchakzade και Shafeei [38] η συνδυασμένη ξήρανση μικροκυμάτων και θερμού αέρα προσέφερε μια ικανοποιητική απόδοση σε ποιότητα αλλά και σημαντική μείωση του χρόνου ξήρανσης, της τάξης του 80-90 % σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους.

Επιπλέον, σχετικά με το δεύτερο κριτήριο ταξινόμησης ως προς τη θερμοκρασία και την πίεση της διαδικασίας, οι περισσότεροι ξηραντήρες λειτουργούν σε συνθήκες κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Η λειτουργία κενού κοστολογείται ακριβά και συνίσταται μόνο στην περίπτωση που το προϊόν πρέπει να ξηρανθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες ή στην απουσία οξυγόνου είτε έχει αρώματα που παράγονται σε διεργασία μεσαίων ή υψηλών θερμοκρασιών. Η λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας τείνει να είναι περισσότερο αποτελεσματική, καθώς χαμηλές αναλογίες καυσίμου και μικρότερος εξοπλισμός μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δεδομένο στόχο τελικής περιεχόμενης υγρασίας. Οι ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Η τεχνική της ξήρανσης στερεών καυσίμων σε ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης αποτελεί μια από τις σύγχρονες μεθόδους ξήρανσης, εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού συναλλαγής θερμότητας που επιτυγχάνεται ανάμεσα στο μέσο ξήρανσης και στο προς ξήρανση υλικό.

Η ξήρανση ψύξης είναι μια ειδική περίπτωση ξήρανσης σε κενό με θερμοκρασίες χαμηλότερες του τριπλού σημείου του νερού όπου το παγωμένο νερό αναμειγνύεται απευθείας με τον ατμό. Η πολυπλοκότητα της μεθόδου και τα υψηλά κόστη λειτουργίας την καθιστούν δαπανηρή μέθοδο. Οι έρευνες που έχουν γίνει επικεντρώθηκαν στη λειτουργία κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ξήρανση ψύξης του καφέ που είναι δύο ή τρεις φορές ακριβότερη από την αντίστοιχη ξήρανση ψεκασμού [2], [33].

Το τρίτο κριτήριο που αφορά την ταξινόμηση των ξηραντήριων είναι η τοποθέτηση του υλικού σε αυτά το οποίο και αποτελεί πολύ σημαντικό κριτήριο και στην επιλογή του κατάλληλου ξηραντήρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το υλικό χρειάζεται να προπαρασκευαστεί ώστε να είναι κατάλληλο να ξηρανθεί σε κάποιο συγκεκριμένο τύπο ξηραντήρα. Μια τέτοια παραπάνω επεξεργασία προφανώς και κοστίζει παραπάνω. Όσον αφορά στο υλικό επιπλέον, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η ιδανική στρατηγική μπορεί να είναι ο συνδυασμός δύο ή παραπάνω τύπων ξηραντήριων καθώς η ευαισθησία του στη θερμότητα μεταβάλλεται καθ' όλη τη διάρκεια της ξήρανσης.

Σύμφωνα με τον Dittman [39], μια δομημένη κατάταξη ξηραντήρων είναι ο διαχωρισμός τους σε αδιαβατικούς και μη αδιαβατικούς. Οι αδιαβατικοί ξηραντήρες κατηγοριοποιούνται επιπλέον σε αυτούς που το καύσιμο ξήρανσης περνά μέσα από το υλικό ή πάνω από την επιφάνειά του. Οι μη-αδιαβατικοί κατηγοριοποιούνται με βάση την παροχή θερμότητας διαμέσου μιας επιφάνειας συναλλαγής είτε με άμεση ακτινοβολία καθώς και με τον τρόπο μεταφοράς του ατμού που μπορεί να είναι για παράδειγμα η απομάκρυνση του ατμού με κενό ή με καύσιμο.

Επιλογή Βιομηχανικών Ξηραντήρων

Προφανώς από τα παραπάνω, υπάρχει μεγάλη γκάμα επιλογής ξηραντήρων. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου ξηραντήρα για το εκάστοτε προϊόν αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση και είναι ύψιστης σημασίας καθώς ένας λάθος τύπος ξηραντήρα μπορεί να οδηγήσει σε ένα εξαιρετικά υποβαθμισμένο προϊόν. Καλό επίσης είναι να σημειωθεί ότι η επιλογή ενός συστήματος ξήρανσης πρέπει να λαμβάνει επιπλέον υπόψιν τα στάδια πριν και μετά από τη διεργασία της

ξήρανσης, δηλαδή τη μηχανική αφυδάτωση, εξάτμιση, διάλυση, τροφοδοσία και ψύξη, συλλογή προϊόντος, μερική επανακυκλοφορία εξάτμισης αντίστοιχα.

Η επιλογή ξηραντήρα δε είναι δυνατόν να βασιστεί αποκλειστικά σε ένα κριτήριο. Ένα σύνολο παραγόντων πρέπει να συνυπολογιστεί έτσι ώστε να επιτευχθεί καλής ποιότητας τελικό προϊόν. Τυπικά, η μη θερμική αφυδάτωση είναι οικονομικότερη από την εξάτμιση η οποία με τη σειρά της είναι ενεργειακά πιο αποτελεσματική από την θερμική ξήρανση. Η ζήτηση όσον αφορά στην ποιότητα του προϊόντος μπορεί να μην επιτρέπει πάντα την επιλογή της λιγότερο ακριβής επιλογής βασισμένη μόνο σε παράγοντες που έχουν να κάνουν αποκλειστικά με τη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή βιομηχανικού ξηραντήρα είναι οι προδιαγραφές ποιότητας του προϊόντος.

Για υψηλής αξίας προϊόντα, όπως φαρμακευτικά ή ορισμένα τρόφιμα, η επιλογή ξηραντήρα εξαρτάται αποκλειστικά στην αξία του αποξηραμένου προϊόντος και το κόστος ξήρανσης αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό στην τιμή πώλησής του. Από την άλλη πλευρά, για τα προϊόντα πολύ χαμηλής ή μηδενικής αξίας όπως οι λάσπες αποβλήτων, η επιλογή συστήματος ξήρανσης εξαρτάται αποκλειστικά από το κόστος ξήρανσης, οπότε και το σύστημα χαμηλότερου κόστους εφαρμόζεται για τέτοιες επιλογές. Οι ελάχιστες ποσοτικές πληροφορίες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιλογή του κατάλληλου ξηραντήρα είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Διακίνηση υλικού στον ξηραντήρα (συνεχώς/μη συνεχώς)
- ✓ Φυσικές, χημικές και βιοχημικές ιδιότητες της υγρής τροφοδότησης καθώς και των επιθυμητών προδιαγραφών του προϊόντος
- ✓ Λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα αντίθετα του ρεύματος
- ✓ Περιεχόμενη υγρασία της τροφοδότησης και του υλικού
- ✓ Κινητική της ξήρανσης και ισοθερμικές καμπύλες υγρού-στερεού
- ✓ Παράμετροι ποιότητας (φυσικές, χημικές, βιοχημικές)
- ✓ Παράμετροι ασφαλείας όπως κίνδυνος φωτιάς, έκρηξης είτε τοξικότητας
- ✓ Αξία του προϊόντος
- ✓ Ανάγκη για αυτόματο έλεγχο
- ✓ Τοξικολογικές ιδιότητες προϊόντος

- ✓ Αναλογία απόρριψης και ελαστικότητα στις προδιαγραφές χωρητικότητας
- ✓ Τύπος και κόστος καυσίμου, κόστος τροφοδότησης ηλεκτρικού ρεύματος
- ✓ Περιβαλλοντικοί κανονισμοί

Πίνακας 1 Κριτήρια επιλογής ξηραντήρα [2].

Τυπικά κριτήρια για επιλογή Βιομηχανικών Ξηραντήρων	
Φυσική μορφή τροφοδοσίας	Κοκκώδης, σωματιδίων, κρυσταλλική, υγρή, παχύρρευστη, διάλυμα, συνεχή φύλλα, περίεργα σχήματα (μικρό/μεγάλο μέγεθος)
Μέση απόδοση	Κολλώδης, άμορφη Kg/h (ξηρό/υγρό) - συνεχής Kg ανά παρτίδα (ξηρό/υγρό)
Αναμενόμενη διακύμανση στην απόδοση	
Επιλογή καυσίμου	Πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρικό ρεύμα
Διαδικασίες προ- και μετά-ξήρασης (εάν υπάρχουν)	
Προϊόντα με τροφοδότηση σωματιδίων	Μέσο μέγεθος σωματιδίου
	Κατανομή μεγέθους
	Πυκνότητα σωματιδίου
	Πυκνότητα συνολικού όγκου σωματιδίων
Περιεκτικότητα υγρασίας εισόδου-εξόδου	Ιδιότητες ενυδάτωσης
	Ξηρή βάση Υγρή βάση
Χημική/βιοχημική/микροβιολογική δραστηριότητα	
Ευαισθησία θερμότητας	Σημείο τήξης
	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης
Ισόθερμες ρόφησης	
Χρόνος ξήρασης	Καμπύλες ξήρασης
	Επίδραση των μεταβλητών της διαδικασίας
Ειδικές απαιτήσεις	Υλικό κατασκευής
	Διάβρωση
	Τοξικότητα
	Μη υδατική λύση
	Όρια ευφλεκτότητας
	Κίνδυνος πυρκαγιάς
Απαιτήσεις για χρώμα, υφή, άρωμα	
Αποτύπωμα του συστήματος ξήρασης	Διαθεσιμότητα χώρου για τον ξηραντήρα και τα παρελκόμενα

Για υψηλής αξίας προϊόντα, όπως και προαναφέρθηκε, οι προδιαγραφές ποιότητας υπερτερούν άλλων κριτηρίων όπως το οικονομικό καθώς αυτό υπερκαλύπτεται ούτως ή άλλως από την τιμή πώλησής τους. Η απόρριψη τέτοιων προϊόντων είναι σχετικά χαμηλή και σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιθανό η τροφοδότηση να τροποποιηθεί, όπως για παράδειγμα με μείωση του μεγέθους πριν την ξήραση, γεγονός που επηρεάζει την επιλογή ξηραντήρα. Εν συνεχεία, η ξήραση των τροφίμων απαιτεί προσαρμογή σε καλές πρακτικές της βιομηχανίας καθώς και αντίστοιχο σχεδιασμό, συντήρηση και λειτουργία του ξηραντήρα για την τήρηση της υγιεινής. Η κινητική της ξήρασης από την άλλη πλευρά παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή ξηραντήρα αλλά το πιο συχνό φαινόμενο είναι στις αντίστοιχες απαιτήσεις να ταιριάζουν αρκετά είδη.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετές από τις νέες τεχνικές χρησιμοποιούν υπέρθερμο ατμό ως μέσο ξήρανσης με πλεονεκτήματα τους υψηλότερους ρυθμούς ξήρανσης υπό ορισμένες συνθήκες, την καλύτερη ποιότητα ορισμένων προϊόντων είτε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας αν χρησιμοποιείται οπουδήποτε αλλού στη διαδικασία. Τέλος, η τήρηση των περιβαλλοντικών κανονισμών απαιτεί συχνά την εναλλαγή στη χρήση των ξηραντήρων. Σχετικά με αυτό, η βελτιωμένη αποτελεσματικότητα μεταφράζεται και σε καλύτερα περιβαλλοντικά συμπεράσματα στα πλαίσια των μειωμένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξειδίων του αζώτου από την καύση.

Νέοι τύποι ξηραντήρων εφευρίσκονται συνεχώς και στην Ευρωπαϊκή Ένωση ετησίως ο αριθμός φτάνει στις 80 νέες ευρεσιτεχνίες που αναμένεται να αντικαταστήσουν σταδιακά τους συμβατικούς ξηραντήρες σε μία ή δύο δεκαετίες. Συνεπώς, για την επιλογή του κατάλληλου τύπου ξηραντήρα αναγκαία καθίσταται η σχετική ενημέρωση για τις νέες εξελίξεις. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επιλογή του κατάλληλου τύπου ξηραντήρα ανά περίπτωση αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία βασισμένη σε μια ποικιλία κριτηρίων. Για τους παραπάνω λόγους, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει αυτοματοποιημένα συστήματα για τη διαδικασία αυτή. Η σωστή επιλογή αλλά και η κατάλληλη λειτουργία του ξηραντήρα σύμφωνα με τις προδιαγραφές είναι απαραίτητες συνθήκες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ποιότητα του τελικού προϊόντος καθώς και ο μεγαλύτερος δυνατός περιορισμός του κόστους [2].

Έπειτα από μια σχετική έρευνα στα εγχειρίδια προμηθευτών, πριν την επιλογή του κατάλληλου βιομηχανικού ξηραντήρα, ο μηχανικός που είναι υπεύθυνος θα πρέπει να γνωρίζει τα στοιχεία για τα παρακάτω:

Υλικό: Ποια είναι τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού όταν αυτό είναι ξηρό ή υγρό; Είναι το υλικό τοξικό, εύφλεκτο ή διαβρωτικό;

Απαιτήσεις παραγωγής: Το υλικό απαιτείται να επεξεργάζεται ανά παρτίδες; Τι ποσότητα υλικού πρέπει να επεξεργάζεται ο ξηραντήρας ανά ώρα; Πόσο χρόνο χρειάζεται να διαρκέσει η διεργασία για να επιτευχθεί ένα τελικό προϊόν υψηλής ποιότητας;

Απαιτήσεις ποιότητας στο τελικό προϊόν: Ποιες οι πιθανότητες συρρίκνωσης, παραμόρφωσης, αλλοίωσης, μόλυνσης του υλικού; Σε ποιο ποσοστό πρέπει να βρίσκεται η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία; Πόση πρέπει να είναι η τελική θερμοκρασία και πυκνότητα του προϊόντος;

Βιομηχανία: Πόσος είναι ο διαθέσιμος χώρος; Ο αέρας είναι καθαρός, υγρός ή ζεστός και πόσο; Τι καύσιμο και ενεργειακές πηγές υπάρχουν; Τι ποσοστά σκόνης, θορύβου, δονήσεων είναι επιτρεπτά στην περιοχή σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς νόμους;

2.2 Προς Ξήρανση Προϊόντα / Αγροτικά Προϊόντα

Η αγορά των αποξηραμένων φρούτων και λαχανικών είναι πολύ διαδεδομένη στις περισσότερες χώρες του κόσμου καθώς αυτό το είδος προϊόντος έχει πολλά πλεονεκτήματα στη συντήρηση καθώς και στη ποιότητα της σύστασης του [40]. Οι μέχρι στιγμής συμβατικές θερμικές μέθοδοι, όπως η ξήρανση υπό κενό, η ξήρανση με κατάψυξη και με ροή αέρα κατέληξαν σε μεγάλους χρόνους με αποτέλεσμα το προς ξήρανση υλικό να είναι αρκετή ώρα εκτεθειμένο σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Η επίδραση του μεγάλου χρόνου ξήρανσης στην ποιότητα του τελικού προϊόντος έκανε αναγκαία την περαιτέρω μελέτη για μείωση του χρόνου με συνδυασμό νέων και συμβατικών μεθόδων όπως τα μικροκύματα [37]. Παράλληλα, σύμφωνα με τους ερευνητές Chua K.J. και Chou S.K. [41] για μικρότερη παραγωγή η πιο διαδεδομένη μέθοδος ξήρανσης αγροτικών προϊόντων με αρκετά πλεονεκτήματα και στην ποιότητα και στο χρόνο είναι τα ηλιακά ξηραντήρια. Σε μικρότερο βαθμό αλλά εξίσου σημαντική είναι η ξήρανση αγροτικών προϊόντων με υπέρυθρη ακτινοβολία. Εδώ τονίζονται ιδιαίτερα οι η γνώση της συμπεριφοράς του υλικού στην ακτινοβολία καθώς και το είδος της ακτινοβολίας που εκπέμπει η πηγή [42].

Η απεικόνιση των καμπυλών ξήρανσης και η προσομοίωση της διεργασίας είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί τη χρήση εμπειρικών και θεωρητικών μοντέλων καθώς και πειραματικά αποτελέσματα για δεδομένες συνθήκες. Ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται στα πειράματα και η γνώση του είναι απαραίτητη στην τελική ποιότητα του προϊόντος είναι η ενεργότητα υγρασίας ή νερού του τροφίμου, a_w . Καθορίζει το ελάχιστο όριο υγρασίας για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Τα προϊόντα με ενεργότητα νερού κάτω από 0.7 έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από άλλα [43]. Ένας χρήσιμος πίνακας για την ενεργότητα υγρασίας σε βασικά φρούτα παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 2 Ενεργότητα νερού συναρτήσει περιεκτικότητας σε υγρασία και θερμοκρασίας για βασικά φρούτα.

Φρούτα	Χ(%)	a_w							Πηγή
		5°C	20°C	25°C	30°C	45°C	60°C	90°C	
Βερίκοκκο	7,75		0,10						<i>Ginzburg and Savina (1982)</i>
	14,79		0,35						
	24,2		0,60						
	60,2		0,90						
Ροδάκινο	10	0,46		0,46		0,50	0,66		<i>Okos et al. (1992)</i>
	15	0,52		0,52		0,59	0,71		
	20	0,60		0,60		0,65	0,75		
Λωτός	6,25			0,25					<i>Okos et al. (1992)</i>
	9,01			0,40					
	24,7			0,70					
Δαμάσκηνα	6,10		0,10						<i>Ginzburg and Savina (1982)</i>
	12,8		0,30						
	15,88		0,40						
	26,13		0,60						
	52,80		0,80						

Διεργασία ξήρανσης συναντάται και σε μη βιολογικά προϊόντα όπως το χαρτί, η άμμος, χημικές ουσίες κ.α. Οι μηχανισμοί που δημιουργούν την αντίσταση της ροής του νερού δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, πράγμα που δεν συμβαίνει με τα αγροτικά προϊόντα με τα οποία και θα ασχοληθούμε στην παρούσα παράγραφο. Η διεργασία της ξήρανσης διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή του προϊόντος [1]:

- Την ξήρανση ενός σπόρου ή τμήματος του προϊόντος
- Την ξήρανση λεπτού στρώματος του προϊόντος και
- Την ξήρανση σωρού με μεγάλο βάθος.

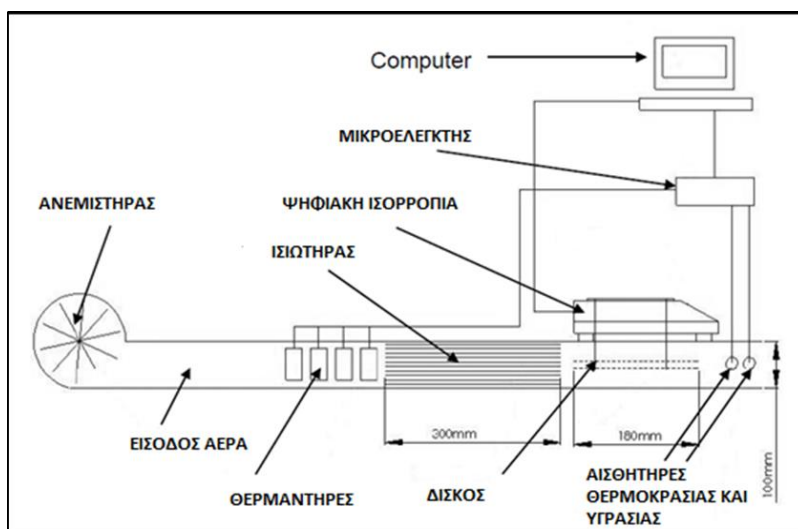
Σχετικά με την ξήρανση σπόρων, οι σπόροι πρέπει να υφίστανται ξήρανση αρκετά γρήγορα μετά τη συγκομιδή και τον καθαρισμό τους, διαφορετικά υπάρχει ο κίνδυνος σχηματισμού μούχλας ή πρόωρης εμφάνισης βλαστού λόγω της σχετικά υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία [44]. Αν η ξήρανση είναι άμεση με ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία δεν πρέπει να είναι ανώτερη των 35 °C και ειδικότερα στην περίπτωση σκούρων σπόρων που παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερη ευπάθεια σε αυτό τον τρόπο ξήρανσης. Γι' αυτό και συνίσταται ξήρανση των σπόρων σε ένα σχετικά ελεγχόμενο περιβάλλον [45]. Σημαντικό είναι να αναφερθεί επίσης ότι η υγρασία κατά τη συγκομιδή των σπόρων είναι σχετικά χαμηλή με αποτέλεσμα να μην υπάρχει περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης. Σε ό,τι αφορά στις συνθήκες της ξήρανσης, οι κύριες παράμετροι είναι η ταχύτητα και η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης. Σύμφωνα με τους Stubsgaard και Poulsen [46], κατά την περίοδο του μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, διπλασιαζόμενη της ταχύτητας, ο ρυθμός μειώνεται περίπου στο μισό. Ωστόσο υπάρχει όριο ταχύτητας για αποφυγή διασκορπισμού του προϊόντος. Αντίστοιχα και μια αύξηση της τάξης των 10 °C στην θερμοκρασία του αέρα, θα επιφέρει διπλασιασμό της ταχύτητας ξήρανσης. Οι περισσότεροι σπόροι αντέχουν θερμοκρασιακά γύρω στους 35 °C για τελική περιεχόμενη υγρασία κοντά στο 15%. Για ακόμη χαμηλότερα ποσοστά, η κατάλληλη θερμοκρασία ξήρανσης είναι γύρω στους 45 °C.

Για τον Roberts [47], οι κατάλληλες θερμοκρασίες ξήρανσης διαφοροποιούνται ανάλογα με την επιθυμητή τιμή της περιεχόμενης υγρασίας του προϊόντος. Για παράδειγμα, η βρώμη και το σιτάρι για τελική περιεχόμενη υγρασία 30%, ξηραίνονται στους 45 °C, ενώ για να επιτευχθεί ποσοστό του 18% σε υγρασία, η θερμοκρασία της ξήρανσης θα πρέπει να αυξηθεί στους 65 °C. Αντίθετα, το τριφύλλι και το μπιζέλι παρουσιάζουν περιορισμένη θερμοκρασιακή ανοχή καθώς για τελική υγρασία 20%, η θερμοκρασία ξήρανσης αντιστοιχεί στους 28 °C ενώ για μείωση υγρασίας στο 8%, η θερμοκρασία ξήρανσης προσεγγίζει τους 38 °C. Στην ξήρανση λεπτού στρώματος του προϊόντος, η μεταβολή της υγρασίας ακολουθεί το νόμο της διάχυσης και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{X - X^*}{X_o - X^*} = e^{-kt} \quad (2.1)$$

Όπου το k αντιστοιχεί στην σταθερά ξήρανσης η οποία όμως δεν είναι σταθερή ανά τις αντίστοιχες τιμές που αποκτά η θερμοκρασία και η υγρασία του προϊόντος κατά την ξήρανση.

Επιπροσθέτως, οι ξηραντήρες λεπτού στρώματος λειτουργούν με χρήση άμεσης θέρμανσης. Το προς ξήρανση υλικό είναι τοποθετημένο σε λεπτά στρώματα στο εσωτερικό του δίσκου. Η χαμηλή συμπύκνωση υγρασίας κατά την θέρμανση του υλικού οφείλεται στη συνύπαρξη των εξωτερικών κρύων σωματιδίων που έχουν εισέλθει στον ξηραντήρα με τα ήδη θερμά σωματίδια [1].

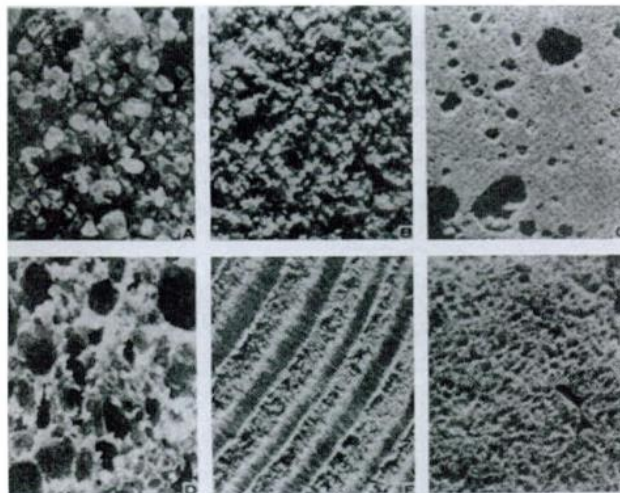


Σχήμα 13 Εξοπλισμός ξηραντήρα λεπτού στρώματος (thin layer) [48].

Κατά τη σταθερή μεταβολή της υγρασίας, δεν πραγματοποιείται μόνο μεταφορά μάζας με διάχυση αλλά και απομάκρυνση της υγρασίας υπό την επίδραση του δυναμικού της πίεσης. Μια ελάχιστη αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υλικού έχει συνέπεια μια διαφορά πίεσης αρκετή ώστε να εξατμιστεί η υγρασία. Πρακτικά, η αντίσταση που παρουσιάζει η επιφάνεια του υλικού για την απομάκρυνση της υγρασίας θεωρείται αμελητέα και η θερμοκρασία της αντίστοιχα παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία βρασμού για την πίεση λειτουργίας του ξηραντήρα [49].

Σχετικά με την ξήρανση σωρού σε μεγάλο βάθος, αναφέρεται στη βιβλιογραφία ο ξηραντήρας στατικού σωρού. Εδώ ο εσωτερικός χώρος του θαλάμου ξήρανσης είναι χωρισμένος σε διαμερίσματα με συρταρωτά ή διάτρητα πλέγματα στα οποία τοποθετείται και το υλικό. Από τη βάση του θαλάμου ξήρανσης εισέρχεται ο αντίστοιχος αέρας ξήρανσης και η έξοδος αυτού

γίνεται από το επάνω μέρος μέσω ρυθμιστικών δικλείδων που είναι τοποθετημένες σε κομβικά σημεία στο σύστημα των αεραγωγών [1]. Τα τρόφιμα (ή αγροτικά προϊόντα) είναι πορώδη και υγροσκοπικά υλικά και η δομή τους έχει ισχυρή επίδραση στη μεταφορά και σε παραμέτρους μεταφοράς. Ειδικότερα, η δομή τους έχει ισχυρή επίδραση στη διάχυση της μάζας, στην διαπερατότητα και στη θερμική αγωγιμότητα. Από την άλλη πλευρά, η επίδρασή τους στη θερμική διάχυση είναι σχετικά χαμηλή. Όσον αφορά στην πορώδη φύση των αγροτικών προϊόντων, το πορώδες μέσο είναι ένα πολυφασικό σύστημα το οποίο αποτελείται από μια στερεή φάση και μια ή περισσότερες υγρές φάσεις που καταλαμβάνουν το μέσο του πόρου. Έχουν ακανόνιστο σχήμα και η μορφή του πορώδους μέσου είναι αρκετά πολύπλοκη όπως και φαίνεται στο σχήμα 14.



Σχήμα 14 Παραδείγματα από πορώδη μέσα [32].

Οι πόροι μπορούν να ταξινομηθούν στους αλληλοσυνδεμένους που είναι προσβάσιμοι από πολλαπλές κατευθύνσεις, στους κλειστούς που είναι απομονωμένοι και συμπεριφέρονται σαν μέρος του στερεού και στους αδιέξοδους που είναι προσβάσιμοι από μια μόνο κατεύθυνση. Όσον αφορά στην υγροσκοπική φύση τους από την άλλη πλευρά, τα τρόφιμα περιέχουν μεγάλα ποσά φυσικά δεσμευμένου νερού και γι' αυτό το λόγο άλλωστε συρρικνώνονται κατά τη διεργασία της ξήρανσης. Ένας λόγος που η μοντελοποίηση της διεργασίας είναι πολύπλοκη είναι και αυτός της συρρίκνωσης του υλικού [32]. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι η αποτελεσματικότητα της ξήρανσης εξαρτάται από την έκταση στην οποία επιτυγχάνεται η

απομάκρυνση του νερού από το τρόφιμο. Το νερό βρίσκεται σε αυτά υπό μορφή ελεύθερου ή δεσμευμένου και η ποσότητά του διαφέρει από τρόφιμο σε τρόφιμο. Το δεσμευμένο έχει διαφορετικές ιδιότητες από το υπόλοιπο νερό που βρίσκεται στο τρόφιμο. Ως προς το βαθμό δέσμευσης, το δεσμευμένο νερό παρουσιάζει διαβαθμίσεις ως εξής [50]:

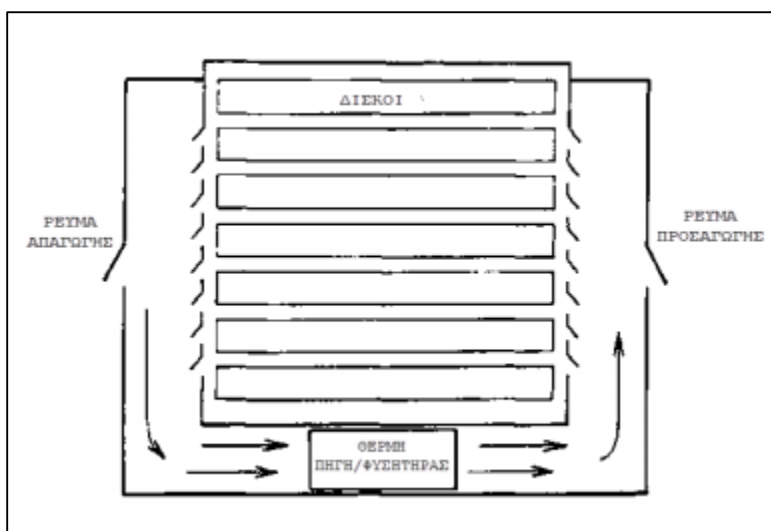
- Το πιο ισχυρά δεσμευμένο που αποτελεί μέρος των μη υδατικών συστατικών όπως π.χ. των πρωτεϊνών.
- Το γεινιάζον νερό που ανήκει στα πρώτα στρώματα που έρχονται σε επαφή με τα μη υδατικά συστατικά και είναι συνήθως συνδεδεμένο με ιοντικές ομάδες των συστατικών αυτών.
- Το πολυστρωματικό νερό που συναντάται στα επόμενα στρώματα μετά το γεινιάζον, το οποίο είναι σχετικά ανίσχυρο συνδεδεμένο μόνο με δεσμούς υδρογόνου και παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του ελεύθερου νερού.

2.3 Ξηραντήρας με ράφια (Tray Dryer)

Ο ξηραντήρας με ράφια ή δίσκους χρησιμοποιείται αρκετά σε φαρμακευτικές βιομηχανίες όπως επίσης και σε βιομηχανίες τροφίμων. Η κατασκευή του είναι σχετικά απλή και περιλαμβάνει ένα μονωμένο θάλαμο ξήρανσης που περιέχει ράφια και σε αυτά τοποθετούνται δίσκοι σε συλλογές όπου απλώνεται ομοιόμορφα το νωπό υλικό. Ο θερμαινόμενος αέρας από θερμαντήρα κυκλοφορεί στο θάλαμο με τη χρήση ενός φυσητήρα και μέρος του ανακυκλοφορεί ενώ το υπόλοιπο εξέρχεται από το θάλαμο (Σχήμα 15). Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα, πέραν του χαμηλού κόστους είναι η πολυχρηστικότητα. Οι χρόνοι ξήρανσης κυμαίνονται συνήθως από 11-48 ώρες [51].

Η θερμότητα παρέχεται από τον αέρα που διαπερνά τα ράφια με συναγωγή, αγωγή, με ακτινοβολία από θερμαινόμενα ράφια [32]. Η ξήρανση πραγματοποιείται και από τις δυο επιφάνειες ραφιών και ενδιάμεσα. Στις περιπτώσεις κακής διανομής του αέρα το τελικό προϊόν δεν έχει την αναμενόμενη ποιότητα ή καθυστερεί αρκετά να ξηρανθεί. Τα παραπάνω μπορεί να οφείλονται στην πιθανή στρεβλότητα των ραφιών [52]. Σύμφωνα με τον Baker [53], ο ξηραντήρας κενού με ράφια αποτελείται από ένα κυλινδρικό ή τετράγωνο θάλαμο που περιέχει θερμαινόμενα ράφια. Στην ξήρανση κενού χρησιμοποιείται έμμεση θέρμανση. Στους

ξηραντήρες κενού με ράφια, οι δίσκοι του υλικού τοποθετούνται σε επίπεδα ράφια, διαμέσου των οποίων κυκλοφορεί το μέσο ξήρανσης, που μπορεί να είναι ατμός ή θερμό νερό. Οι δίσκοι που περιέχουν το νωπό υλικό τοποθετούνται πάνω στα ράφια ξηραίνονται ανά παρτίδα. Η ξήρανση λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες υπό κενό και η εξατμισμένη υγρασία απομακρύνεται από το θάλαμο με αντλία κενού και συμπυκνωτή. Στον τυπικό σχεδιασμό, όλοι οι δίσκοι βρίσκονται σε ένα μοναδικό θάλαμο και το αντίστοιχο συνολικό περιεχόμενο του ξηραντήρα αντιμετωπίζεται ως μια παρτίδα. Σε εναλλακτικούς σχεδιασμούς, ο ξηραντήρας χωρίζεται σε έναν αριθμό ξεχωριστών θαλάμων κενού. Αυτό επιτρέπει την πιο ελαστική λειτουργία καθώς τα ξεχωριστά ράφια μπορούν να γεμίσουν και να αδειάσουν ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Το κέλυφος του θαλάμου πρέπει επίσης να θερμανθεί για να αποφευχθεί η συμπύκνωση. Τυπικά, οι δίσκοι θα φορτωθούν σε ένα σχετικό βάθος των 40mm που θα επιφέρει αντίστοιχα ένα ποσό των 40 kg νωπού υλικού ανά m^2 δίσκου. Οι χρόνοι ξήρανσης εξαρτώνται από το υλικό και τις συνθήκες.

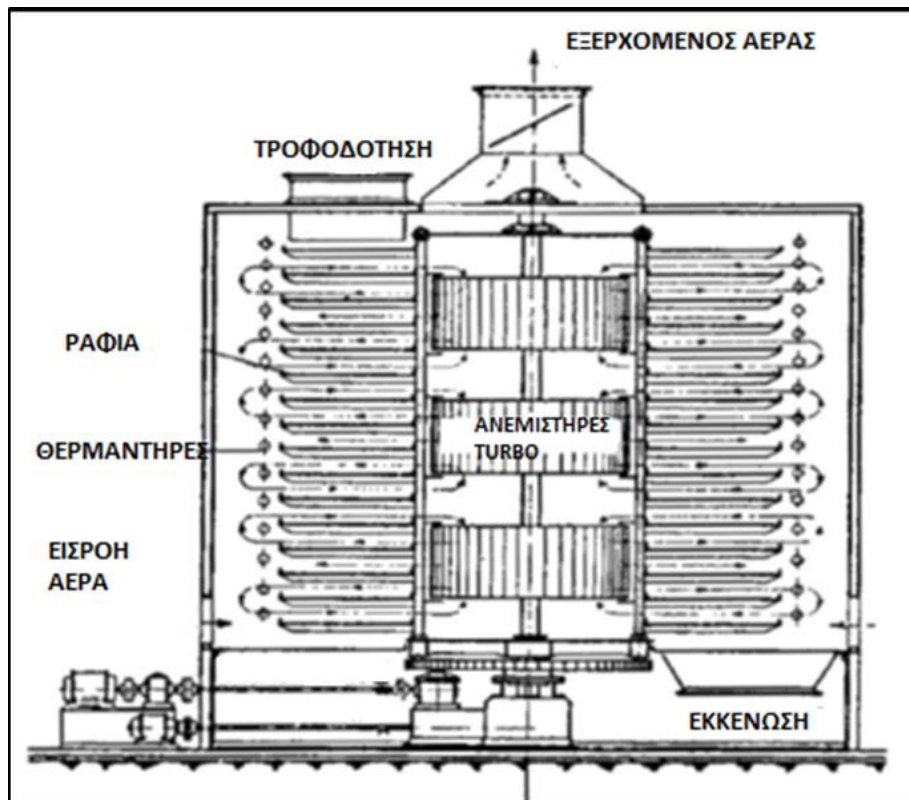


Σχήμα 15 Τυπική διάταξη ξηραντήρα με δίσκους παράλληλης ροής [54].

Οι ξηραντήρες ραφιών κενού χρησιμοποιούνται ευρέως για την ξήρανση μικρών ποσοτήτων θερμικά ευαίσθητου ή εύκολα οξειδούμενου υλικού. Είναι επίσης κατάλληλοι για υλικά που χρειάζονται πολύ προσεκτική τοποθέτηση και για περιπτώσεις που η απώλεια υλικού πρέπει να περιοριστεί. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των ξηραντήρων είναι ότι περιλαμβάνουν πολύ έντονες διεργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης, πράγμα που τους κάνει κατάλληλους μόνο για

μικρές αναλογίες παραγωγής [53]. Μια εναλλακτική λύση του ξηραντήρα με ράφια είναι η ξήρανση σήραγγας όπου τα ράφια φορτώνονται σε οχήματα. Τα οχήματα εισέρχονται με το προς ξήρανση υλικό από το ένα άκρο και εξέρχονται με το τελικό αποξηραμένο προϊόν από την άλλη άκρη. Πολλές φορές δουλεύουν δυο σήραγγες στη σειρά όπου η μία λειτουργεί με παράλληλη ροή αέρα ενώ η δεύτερη κατ' αντιρροή [12]. Ωστόσο αποτελεί φτωχό υποκατάστατο καθώς τα κόστος φόρτωσης-εκφόρτωσης είναι το ίδιο υψηλό.

Ένας άλλος ξηραντήρας ο οποίος αποτελείται από ράφια είναι ο ξηραντήρας με περιστρεφόμενους δίσκους. Τα δακτυλιοειδή ράφια είναι τοποθετημένα κάθετα το ένα πάνω στο άλλο. Στο κέντρο της συσκευής υπάρχει ανεμιστήρας με αποτέλεσμα ο αέρας ξήρανσης να εισέρχεται ακτινικά στον ξηραντήρα. Γύρω από τα ράφια είναι τοποθετημένα θερμαντικά στοιχεία [55]. Όλα αυτά εμπερικλείονται σε ένα κυλινδρικό ή εξαγωνικό κέλυφος στο οποίο υπάρχουν και οι αντίστοιχες πόρτες. Η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος είναι από 0.1 έως 1 rpm και η ταχύτητα του αέρα κυμαίνεται από 0.8 έως 3 m/s.



Σχήμα 16 Διάταξη ξηραντήρα με περιστρεφόμενους δίσκους [56].

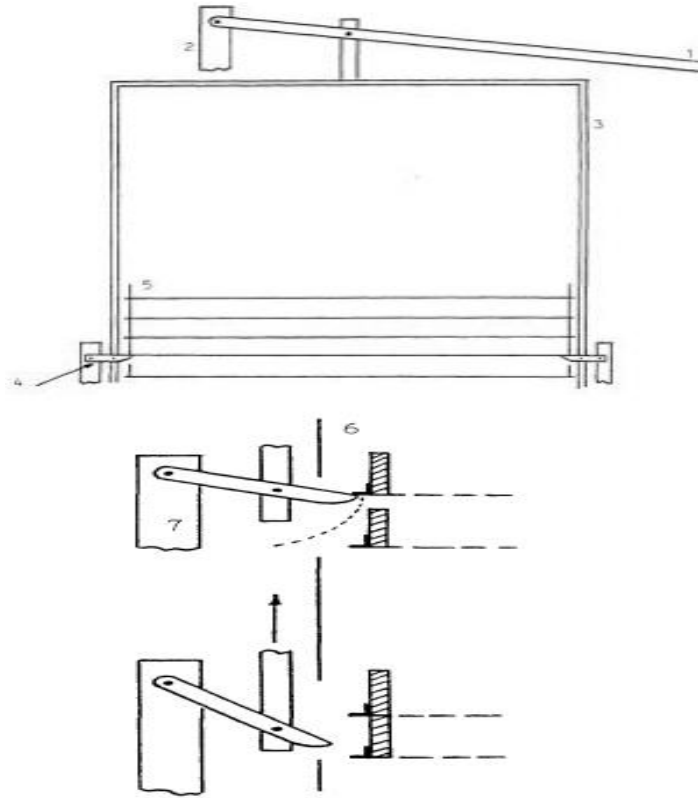
Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ο εξωτερικός αέρας κινείται από τη βάση του ξηραντήρα, κυκλοφορεί σε αυτόν και εξέρχεται από την κορυφή του. Το υλικό εισέρχεται από το άνω ράφι ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ και αντίστοιχα μέσω ενός σταθερού βραχίονα κατευθύνεται στα υπόλοιπα. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι περιστρεφόμενου του ραφιού, συναντάται ένας δεύτερος βραχίονας ο οποίος και σπρώχνει το υλικό μέσω μιας οπής στο από κάτω ράφι. Η απόσταση μεταξύ των ραφιών είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει επαφή του υλικού και με τα δυο ράφια όσο αυτό κατέρχεται μέσω του κενού. Το τελικό προϊόν εξέρχεται από το ράφι ΕΚΚΕΝΩΣΗ και απομακρύνεται. Ο εν λόγω ξηραντήρας καταλαμβάνει μικρό χώρο και είναι χρήσιμος για ξήρανση υλικών με μεγάλο εύρος εργασιών [17].

Υπάρχουν τρία είδη θαλάμου ξήρανσης (cabinets) στον ξηραντήρα δίσκων:

- Παρτίδα (**batch**): Είναι η πιο απλή και φθηνή μορφή θαλάμου. Τοποθετούνται τα ράφια και ο θερμός αέρας εισέρχεται κάτω από το πρώτο ράφι γι' αυτό το λόγο ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι πολλές φορές ξηραίνονται παραπάνω από το επιθυμητό τα προϊόντα στα χαμηλότερα ράφια.
- Ημι-συνεχείς θάλαμοι (**Semi-Continuous cabinets**): Το συγκεκριμένο είδος με ένα ανυψωτικό μηχανισμό ραφιών αντιμετωπίζει το μειονέκτημα της πιο γρήγορης ξήρανσης των προϊόντων στα χαμηλά ράφια καθώς όταν το προϊόν ξηρανθεί το ράφι αποσύρεται και παίρνει τη θέση του το επόμενο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν παράλληλα να προστεθούν νέα ράφια με υλικό προς ξήρανση. Παρακάτω φαίνεται ο ανυψωτικός μηχανισμός.

Τα στοιχεία του ανυψωτικού μηχανισμού όπως φαίνονται στο Σχήμα 17 είναι:

1. Εξωτερικός μηχανισμός ανύψωσης
2. Κύριος μοχλός ανύψωσης για υποστήριξη περιστροφής
3. Κάθετες ράβδοι ανύψωσης
4. Δάχτυλα ανύψωσης
5. Δίσκοι με γωνία φορέων με σιδερένια άκρα
6. Εσωτερικό τείχος θαλάμου ξήρανσης
7. Δάχτυλο ανύψωσης για υποστήριξη περιστροφής



• **Σχήμα 17** Στοιχεία του ανυψωτικού μηχανισμού (*Semi-Continuous cabinets*) [57].

- Θάλαμος διασταυρούμενης ροής (**Cross-Flow cabinets**): σε αυτή την περίπτωση ο αέρας εμφυσάται στο ντουλάπι από διάφορες γρίλιες ακριβώς απέναντι από τα ράφια και στη συνέχεια επανακυκλοφορεί μέσω του θερμαντήρα. Στα αρχικά στάδια της ξήρανσης όπου μεγάλο μέρος της υγρασίας έχει φύγει από το υλικό, ένα υψηλό ποσοστό του αέρα που ρέει αντικαθίσταται από φρέσκο αέρα. Αυτό το ποσοστό του αέρα συνεχώς μειώνεται καθώς η διεργασία προχωρά μέχρις ότου να μην εισέρχεται αέρας καθόλου. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει το πλεονέκτημα τα προϊόντα στα ράφια να έχουν τον ίδιο ρυθμό ξήρανσης.

2.4 Αγροτικά Προϊόντα / Μανιτάρια

Τα τρόφιμα χαρακτηρίζονται από ιδιότητες όπως η πυκνότητα, το πορώδες και η κατανομή των πόρων οι οποίες διαμορφώνουν την ποιότητα, τη γεύση και την εμφάνισή τους. Η ξήρανση είναι μια διεργασία που έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες αυτές και εκτελείται για την παραγωγή επεξεργασμένων προϊόντων [58]. Τα μανιτάρια αποτελούν ένα ευρύ ετερογενές σύνολο τροφίμων που αποτελείται από διάφορα σχήματα και μεγέθη. Στην πλειονότητά τους

αποτελούν προϊόντα υψηλής διατροφικής αξίας καθώς εμπεριέχουν συστατικά όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες αλλά και βιταμίνες. Ακόμη, έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν άχρηστες διατροφικά ουσίες σε τρόφιμα πλούσια σε πρωτεΐνες. Από την άλλη πλευρά αποτελούν και προϊόντα που επηρεάζονται σημαντικά από τις εξωτερικές συνθήκες γι' αυτό το λόγο αποφεύγεται η άμεση ξήρανση τους με ηλιακή ακτινοβολία [59].

Όσον αφορά στην ξήρανσή τους, πρόκειται για μια συνεχώς αναπτυσσόμενη διαδικασία που προσελκύει το ενδιαφέρον και της βιομηχανικής παραγωγής γενικότερα αλλά και της εμπορίας των μανιταριών. Με δεδομένο ότι το νερό αποτελεί κύριο συστατικό τους και σε αυτό βρίσκονται διαλυμένα οργανικά και ανόργανα συστατικά τους, η μείωση αυτού ή πιο σωστά της υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του χρόνου αποθήκευσης, διευκόλυνση της διαχείρισης όσον αφορά τη συσκευασία, τη διακίνηση και βελτίωση ορισμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών. Το πρωταρχικό μέλημα στη διεργασία είναι η διατήρηση της γεύσης, του αρώματος και των θρεπτικών συστατικών των μανιταριών. Η πιο δημοφιλής μέθοδος ξήρανσης μανιταριών αυτό το διάστημα είναι η ξήρανση με κατάψυξη (freeze drying) με αποτελέσματα σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής λόγω του ακριβού μηχανολογικού εξοπλισμού αλλά και ξήρανσης μικρών ποσοτήτων. Ακολουθεί σε συχνότητα η ξήρανση με χρήση υπέρθερμου αέρα που είναι και η επικρατέστερη μέθοδος ξήρανσης τροφίμων. Σύμφωνα με έρευνα της ομάδας του Motevali [58] και με γνώμονα το κριτήριο της ενεργειακής κατανάλωσης, το πιο αποδοτικό είδος ξηραντήρα είναι αυτό με τη χρήση μικροκυμάτων.

Σε πειραματική έρευνα των Aishah & Rosli [60], εξετάστηκαν τρία είδη ξήρανσης και οι επιπτώσεις τους στη θρεπτική αξία των μανιταριών. Η μέθοδος χαμηλών θερμοκρασιών και ροής θερμού αέρα μειώνει την ενεργότητα του νερού και αυξάνει τα συστατικά του μανιταριού σε πρωτεΐνη και υδατάνθρακες. Με εργαστηριακό φούρνο αερίου επιτυγχάνεται η περιεκτικότητα σε διαιτητικά στοιχεία των μανιταριών. Τέλος, με τη μέθοδο ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη ένταση του χρώματος και της φωτεινότητας καθώς και διατήρηση σε ικανοποιητικά επίπεδα των διαιτητικών στοιχείων του μανιταριού. Από την άλλη πλευρά, η ξήρανση με υπέρθερμο ατμό επιφέρει θετικά αποτελέσματα σε τεχνικοοικονομικά και ποιοτικά πλαίσια [1].

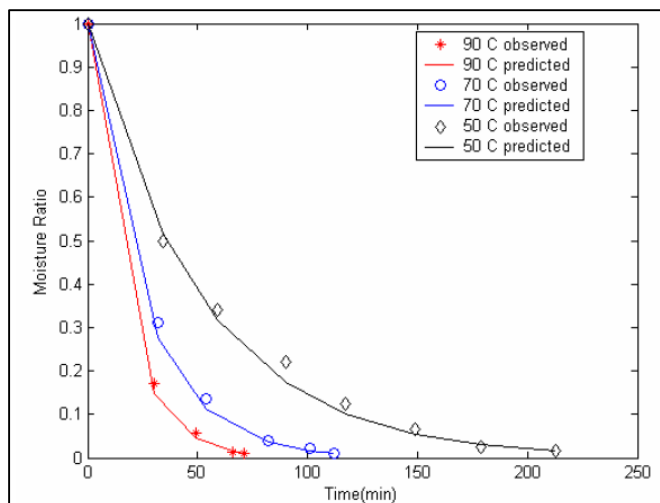
Σε πείραμα που διεξήχθη από τους Manoj et al. [61], πλήρως ώριμα γαλακτώδημανιτάρια μπήκαν στη διεργασία ξήρανσης σε ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Ταμανιτάρια κόπηκαν σε λεπτές φέτες των 5-8 mm, δεν υπέστησαν κάποια προ-διεργασία και ξηράθηκαν από μια αρχική περιεχόμενη υγρασία 90% στο τελικό ποσοστό του 10%. Οι δοκιμές έγιναν σε τρεις θερμοκρασίες ξήρανσης των 50, 70 και 90 °C σε δυο μεγέθη μερίδων 1 και 0.5 kg και σε δυο διαφορετικές ταχύτητες αέρα των 1,71 και 2,13 m/s. Η αντίστοιχη συμπεριφορά τωνμανιταριών και η ποιότητα του προϊόντος μελετήθηκαν στα πλαίσια της τελικής περιεχόμενης υγρασίας, της αναλογίας εξάτμισης, της πυκνότητας, του πορώδους, του χρώματος και της συρρίκνωσης τόσο του συνολικού φορτίου όσο και της φέτας τουμανιταριού. Όσον αφορά στο συνολικό χρόνο ξήρανσης τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω και κυμάνθηκαν από τη 1 ώρα και 11 λεπτά στις 5 ώρες και 45 λεπτά.

Πίνακας 3 Συνολικός χρόνος ξήρανσηςμανιταριών υπό διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης [61].

Velocity (m/s)	Batch size (kg)	Temperature (°C)		
		50	70	90
2.13	1	325	210	124
	0.5	213	112	71
1.71	1	345	230	154
	0.5	254	114	70

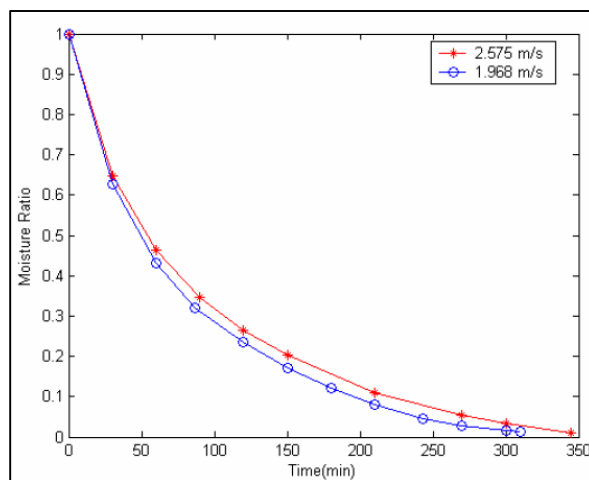
Σύμφωνα και με τον πίνακα τιμών, είναι σαφές ότι ο συνολικός χρόνος ξήρανσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας για δεδομένη ταχύτητα αέρα και μέγεθος δείγματος.

Επίσης, με σταθερή θερμοκρασία και μέγεθος δείγματος, ο χρόνος ξήρανσης μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα. Για δεδομένη ταχύτητα ξήρανσης και θερμοκρασία από την άλλη, ο συνολικός χρόνος ξήρανσης ήταν περισσότερος για το μεγαλύτερο μέγεθος δείγματος το οποίο είναι και αναμενόμενο. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες υπό σταθερές συνθήκες:



Σχήμα 18 Συμπεριφορά ξήρανσης για δείγμα 0.5 kg σε ταχύτητα αέρα 2.13 m/s [61].

Το συμπέρασμα από τις καμπύλες του σχήματος 18 είναι ότι, διατηρώντας τις υπόλοιπες συνθήκες σταθερές, η σταθερά ξήρανσης k αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης καθώς και με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα όπως παρατίθεται και από σχετικούς αριθμούς. Σχετικά με την ταχύτητα, κατά το πείραμα παρατηρήθηκε ότι υπήρξαν κάποιες μικρές διακυμάνσεις στην τιμή της σταθερής ταχύτητας του αέρα που αποδίδονται στη συρρίκνωση του υλικού. Η επίδραση της ταχύτητας ωστόσο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 19 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετική ταχύτητα αέρα [61].

Το συμπέρασμα εδώ είναι ότι η ταχύτητα δεν παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο όσον αφορά στην επίδρασή της στο ρυθμό ξήρανσης αν και σε υψηλότερες ταχύτητες αέρα, ο ρυθμός ξήρανσης είναι γενικότερα υψηλότερος. Εν συνεχεία, όσον αφορά στην επίδραση του μεγέθους του

δείγματος, συμπεραίνεται και είναι λογικό ότι ο χρόνος ξήρανσης κινείται σχεδόν ανάλογα του μεγέθους, δηλαδή όταν στο πείραμα το δείγμα μειώθηκε από το 1 kg στο μισό του, ο χρόνος ξήρανσης μειώθηκε κατά 48%. Τέλος, σχετικά με την ποιότητα του τελικού προϊόντος, τόσο ανά παρτίδα όσο και ανά φέτα, η μορφή και το μέγεθός τωνμανιταριών μετά την ξήρανση μεταβλήθηκε λόγω συρρίκνωσης.

Όσον αφορά τα ενυδατικά χαρακτηριστικά τους, μελετήθηκε η ικανότητα τωνμανιταριών να ανακτήσουν τα αρχικά χαρακτηριστικά τους μετά την ξήρανση. Αυτό που βρέθηκε είναι ότι αυτός ο αριθμός, ο οποίος και υποδεικνύει την ποιότητά τους, ήταν αυξημένος στην ξήρανση στην χαμηλότερη θερμοκρασία των 50 °C, η ταχύτητα του αέρα δεν είχε κάποια επίδραση σε αυτόν και επίσης η όποια μείωση του μεγέθους του δείγματος επιδρούσε θετικά στην αύξησή του.

Επιπλέον, σχετικά με τη σμίκρυνση, η υψηλής ποιότητας συρρίκνωση συνεπάγεται και καλύτερη αποθήκευση του προϊόντος που σημαίνει ότι με μια χαμηλή τιμή συρρίκνωσης φορτίου, ταμανιτάρια θα έχουν καλύτερη ικανότητα να ανακτήσουν το αρχικό τους μέγεθος. Το μέγεθος συρρίκνωσης φορτίου (%) αποδείχτηκε να επηρεάζεται ανάλογα μόνο από το μέγεθος του δείγματος. Η συρρίκνωση της φέτας τουμανιταριού, από την άλλη πλευρά, έδειξε ότι μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα ξήρανσης και είναι χαμηλότερη σε αντίστοιχα χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σε ό,τι αφορά στο χρώμα τωνμανιταριών, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική επίδραση με τη μοναδική σημείωση ότι το χαρακτηριστικό καφέ χρώμα τους το απέκτησαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ότι το χρώμα θεωρείται υγιέστερο σε μικρότερες ταχύτητες αέρα ξήρανσης και χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή σχετικά με την ξήρανση τωνμανιταριών με χρήση αέρα, πρώτα ο Komanwosky [62] το 1970 μελέτησε την ξήρανσή τους σε θερμοκρασίες μεταξύ 77 και 85 °C. Έκτοτε ο Riva [63] το 1991 μελέτησε την ξήρανση με θερμό αέρα αλλά και με χρήση μικροκυμάτων. Ωστόσο, το 1990 ο Yapar [64] πρότεινε την ξήρανση με θερμό αέρα σε θερμοκρασίες μεταξύ των 60 και 70 °C ώστε να αποφευχθεί η καραμελοποίηση του υλικού καθώς και προς βελτίωση της ποιότητάς του. Ο Yapar [64] με την ομάδα του πρώτα δοκίμασε την ξήρανση με εξαναγκασμένη ροή αέρα και έκτοτε με απλή θέρμανση του ξηραντήρα. Το 2000

πια ο Gurtas [65] δοκίμασε την ξήρανση τεμαχισμένων μανιταριών, χωρίς καμία προεργασία, χρησιμοποιώντας χαμηλές θερμοκρασίες των 20 με 30 °C με ποιοτικό κριτήριο την αμαύρωση των μανιταριών, τις απώλειες στο άρωμα και τη γεύση τους και την ικανότητα αφύγρανσης του υλικού. Το πείραμά του διεξήχθη έως τελική περιεχόμενη υγρασία μανιταριού 7% που είναι και το ιδανικό ποσοστό για την ασφαλή αποθήκευσή του [1].

Η ξήρανση με χρήση υπέρθερμου ατμού, από την άλλη πλευρά, αναφέρθηκε πρώτη φορά το 1908 από το Γερμανό επιστήμονα Hausbrand. Το 1920 ακολούθησε ο Karrer ο οποίος και περιέγραψε την ξήρανση ανόργανων υλικών με χρήση υπέρθερμου ατμού σε τροποποιημένο λέβητα.

Κεφάλαιο 3 Υπολογιστικό Μέρος Equation Section (Next)

3.1 Εισαγωγή-Ανάλυση Προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζουμε με θεωρητική προσέγγιση και μοντέλα, την επίδραση α) της θερμοκρασίας β) της ταχύτητας αέρα γ) του μεγέθους του ραφιού στην ξήρανση των μανιταριών. Το είδος του μανιταριού που επιλέξαμε ονομάζεται milky mushroom και το πάχος της φέτας κυμαίνεται από 5-8mm. Ξεκινώντας αντίστροφα, επιλέχθηκαν τα εξής μεγέθη του δείγματος στο ράφι 0.5, 0.75 και 1 kg. Η ξήρανση πραγματοποιήθηκε σε ένα εύρος τιμών της θερμοκρασίας από 50-90 °C και ταχύτητες θερμού αέρα που κυμαίνονται από 1-5 m/s. Χρησιμοποιήθηκαν ακόμη τα στοιχεία των διαστάσεων του θαλάμου ξήρανσης και του ραφιού που τοποθετήθηκε το προς ξήρανση προϊόν.

Ο δίσκος τοποθετείται σε ρεύμα αέρα με τις προαναφερθείσες θερμοκρασίες, υγρασίας 0.01 kg νερού/ kg ξηρού αέρα, που ρέει παράλληλα στην ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια με ταχύτητες 1-5m/s. Στην πρώτη περίπτωση η επιφάνεια του προς ξήρανση προϊόντος εκτίθεται σε σωλήνες ατμού με θερμοκρασία ακτινοβολούσας επιφάνειας. Στη δεύτερη περίπτωση δεν υπάρχει ακτινοβολία από τους σωλήνες και η διεργασία της ξήρανσης εξαρτάται μόνο από το θερμό αέρα. Επιπρόσθετα, εξετάζεται η συνολική διεργασία της ξήρανσης (περίοδος σταθερού ρυθμού, περίοδος φθίνοντος ρυθμού). Υπολογίζουμε τον αρχικό ρυθμό ξήρανσης στη σταθερή περίοδο, όπου C το σημείο σύνδεσης με την περίοδο ελαττούμενου ρυθμού και στη συνέχεια υπολογίζουμε τον τελικό ρυθμό και χρόνο ξήρανσης των μανιταριών.

1η περίπτωση: Ξήρανση με κυκλοφορία «κατά διασταύρωση». Θερμή, ακτινοβολούσα επιφάνεια. Υπολογισμοί στην περίοδο σταθερού και ελαττούμενου ρυθμού.

Στην περίοδο σταθερού ρυθμού, ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από τις θερμικές απαιτήσεις για την εξάτμιση. Η εξάτμιση γίνεται από την πάνω επιφάνεια της οποίας το εμβαδόν είναι A και η θερμοκρασία της t_s . Ο δίσκος είναι ορθογωνικής διατομής, κατασκευασμένος από γαλβανισμένο σίδηρο. Η επιφάνεια που δε γίνεται ξήρανση είναι ίση με A_u . Η επιφάνεια ξήρανσης δέχεται τα εξής ποσά θερμότητας: θερμότητα δια συναγωγής από το αέριο ρεύμα, θερμότητα δι' αγωγής μέσω του στερεού, θερμότητα από τους σωλήνες ατμού.

Χρήσιμες Σχέσεις και Μεγέθη

1. πυκνότητα αέρα:

$$\rho_g = \left(\frac{1+Y}{u_H} \right) \quad (3.1)$$

Όπου Y η υγρασία αέρα και u_H ο όγκος μείγματος αέρα – νερού

2. όγκος μείγματος αέρα-νερού:

$$u_H = (0.00283 + 0.00456Y) \cdot (T_g + 273) \quad (3.2)$$

Όπου, T_g η θερμοκρασία του αέρα

3. συντελεστής συναγωγιμότητας:

$$h_c = 14.3G^{0.8} \quad (3.3)$$

4. συντελεστής ακτινοβολίας :

$$h_R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left((t_R + 273.15)^4 - (t_S + 273.15)^4 \right) / (t_R - t_S) \quad (3.4)$$

Όπου, ε σταθερά Stefan-Boltzmann και σ ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας ξήρανσης
σχέση Lewis για τον υγρό αέρα:

$$\frac{h_c}{k_Y C_S} = 1 \quad (3.5)$$

Όπου C_S η θερμότητα μοναδιαίας μάζας μείγματος

5. θερμότητα:

$$C_S = 1005 + 1884Y \quad (3.6)$$

6. λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης νερού:

$$\lambda_g = 3.139 \cdot 10^6 - 2336 \cdot (t_g + 273.15) \quad (3.7)$$

7. θερμότητα δια μέσου του στερεού:

$$U_K = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_C}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_u}\right) + \left(\frac{z_M}{k_M}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_u}\right) + \left(\frac{z_S}{k_S}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_m}\right)} \quad (3.8)$$

Όπου k_s η ειδική θερμική αγωγιμότητα του μανιταριού, K_m η ειδική θερμική αγωγιμότητα του υλικού του δίσκου, z_M το πάχος του δίσκου, A η επιφάνεια ξήρανσης και A_u η μη ξηραίνόμενη επιφάνεια

8. καμπύλη (α) :

$$\frac{(Y_S - Y) \cdot \lambda_S}{C_S} = \left[1 + \left(\frac{U_K}{h_C} \right) \right] \cdot (T_g - t_S) + \frac{h_R}{h_C} \cdot (t_R - t_S) \quad (3.9)$$

Η τομή της καμπύλης (α) με την καμπύλη κορεσμού του ψυχομετρικού χάρτη δίνει τα Y_S, t_S . Το απαιτούμενο αυτό βήμα για τον υπολογισμό του N_C θα εκτελεστεί μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας του προγράμματος *code_msh*. Η επαναληπτική διαδικασία λαμβάνει μια αρχική τιμή κοντά στην αναμενόμενη τιμή του t_S , προχωρά με ένα πολύ μικρό βήμα (0,0005), εκτελεί τους αναγκαίους υπολογισμούς και τερματίζει όταν $Y_{S2} = Y_S$.

Για τις συνθήκες κορεσμού παρατίθενται τα εξής:

9. Καμπύλη κορεσμού του ψυχομετρικού χάρτη:

$$Y_{S2} = \frac{0.622 \cdot p_{H_2O}}{1.0133 \cdot 10^5 - p_{H_2O}} \quad (3.10)$$

10. Μερική πίεση νερού στο σημείο κορεσμού:

$$p_{H_2O} = e^{\frac{a}{b}}, \quad (3.11)$$

Με $a = (77.345 + 0.0057 \cdot (t_S + 273)) - 7235 / (t_S + 273)$ και $b = (t_S + 273)^{8.2}$

Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η επαναληπτική διαδικασία και με δεδομένο πλέον το t_S , υπολογίζω το N_C με τον ακόλουθο τύπο :

11. Ρυθμός ξήρανσης στην περίοδο σταθερού:

$$N_c = \frac{(h_c + U_k) \cdot (t_g - t_s) + h_R \cdot (t_R - t_s)}{\lambda_s} \quad (3.12)$$

Έχοντας υπολογίσει το ρυθμό ξήρανσης N_c και λαμβάνοντας υπόψιν ότι η περίοδος φθίνοντος ρυθμού συνδέεται με αυτή του σταθερού στο σημείο όπου η υγρασία γίνεται κρίσιμη X_c , μπορώ να υπολογίσω τον αντίστοιχο ρυθμό ξήρανσης και χρόνο με τους παρακάτω τύπους.

12. Ρυθμός ξήρανσης στην περίοδο ελαττωμένου ρυθμού:

$$N = \frac{N_c (X - X^*)}{X_c - X^*} \quad (3.13)$$

Όπου X υγρασία του μανιταριού κάθε χρονική στιγμή, X^* η τελική υγρασία του μανιταριού

13. Χρόνος ξήρανσης :

$$\theta = \frac{S_s (X_c - X^*)}{N_c A} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad (3.14)$$

Όπου A η επιφάνεια ξήρανσης και S_s το μέγεθος του δείγματος στο ράφι

14. ποσοστό υγρασίας (moisture ratio):

$$MR = \frac{X - X^*}{X_c - X^*} \quad (3.15)$$

2^η περίπτωση : Ξήρανση με κυκλοφορία «κατά διασταύρωση». Η διεργασία της ξήρανσης επηρεάζεται μόνο από το θερμό αέρα (δίχως ακτινοβολούσα επιφάνεια). Υπολογισμοί στην περίοδο σταθερού και φθίνοντος ρυθμού.

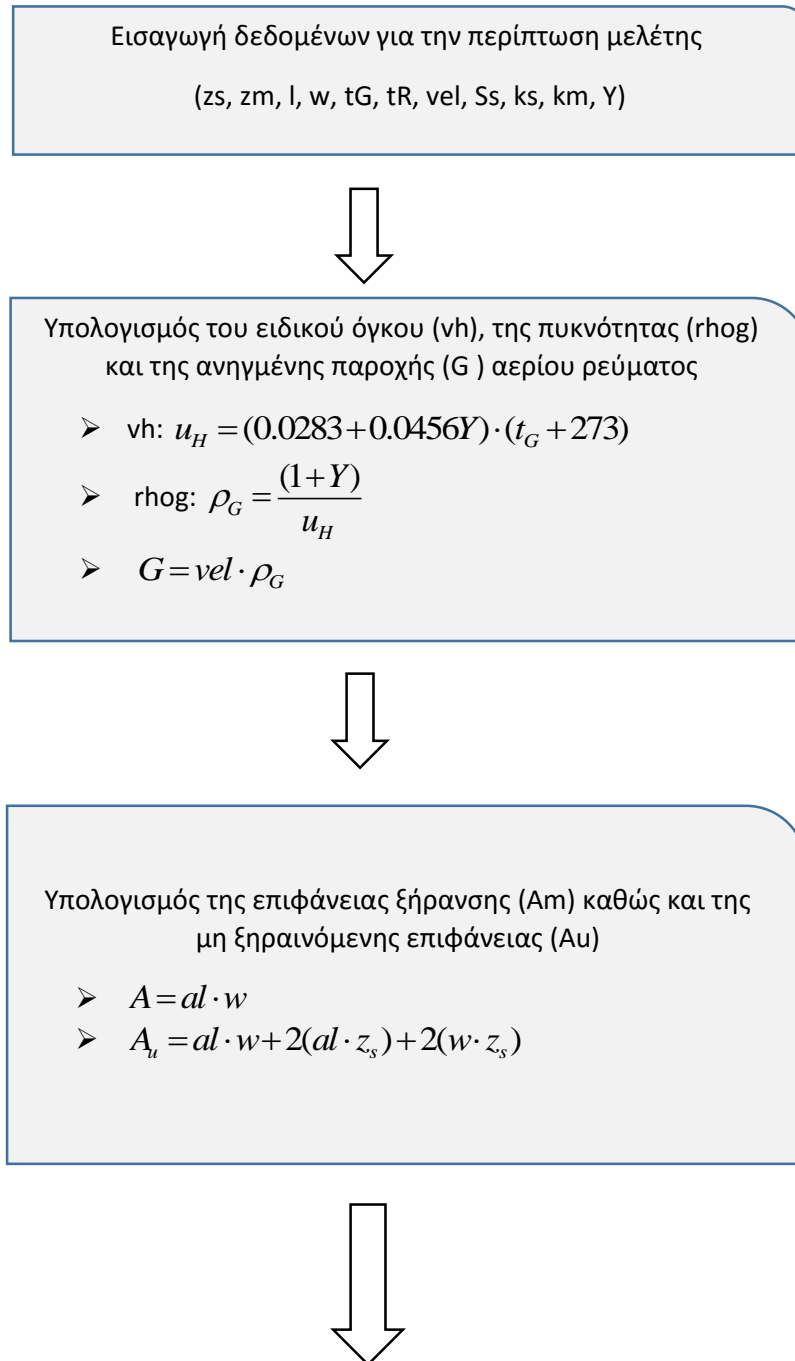
Οι υπολογισμοί σε αυτή την περίπτωση διαφοροποιούνται καθώς δεν υπάρχει ακτινοβολία και μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Συνεπώς :

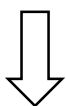
$$U_k = 0$$

$$h_R = 0$$

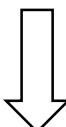
Λογικό Διάγραμμα

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του κώδικα code_msh.

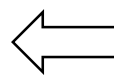
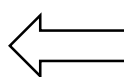




Αρχική υπόθεση για την θερμοκρασία στην επιφάνεια ξήρανσης (t_s)

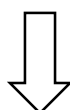


Νέα τιμή για T_s :
 $T_s = T_s + 0.00001$



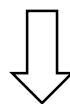
Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής (h_c) ακτινοβολίας (h_r) και συνολικού συντελεστή διαπερατότητας (U_K)

- $h_c = 14.3G^{0.8}$
- $h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left((t_R + 273.15)^4 - (t_s + 273.15)^4 \right) / (t_R - t_s)$
- $$U_K = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_c} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_u} \right) + \left(\frac{z_M}{k_M} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_u} \right) + \left(\frac{z_S}{k_S} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_m} \right)}$$



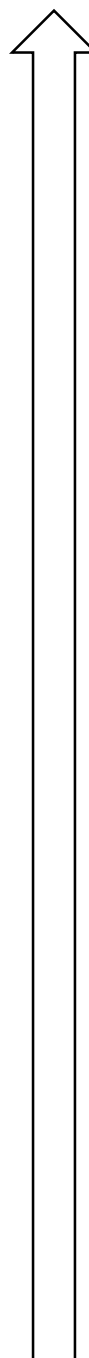
Υπολογισμός ειδικής θερμοχωρητικότητας (C_s) και λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης (q_s)

- $C_s = 1005 + 1884Y$
- $q_s: \lambda_s = 3.139 \cdot 10^6 - 2336 \cdot (t_s + 273.15)$



Υπολογισμός της υγρασίας κορεσμού (Y_s) με βάση τις τιμές της θερμοχωρητικότητας και της λανθάνουσας θερμότητας

- $$\frac{(Y_s - Y) \cdot \lambda_s}{C_s} = \left[1 + \left(\frac{U_K}{h_c} \right) \right] \cdot (t_G - t_s) + \frac{h_r}{h_c} \cdot (t_R - t_s)$$

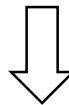




Υπολογισμός της μερικής πίεσης του νερού στο σημείο κορεσμού (p_{ws})

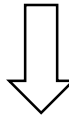
➤ p_{ws} :

$$p_{H_2O} = e^{\frac{(77.345 + 0.0057 \cdot (t_S + 273)) - 7235 / (t_S + 273)}{(t_S + 273)^{8.2}}}$$



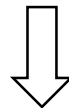
Υπολογισμός της υγρασίας κορεσμού Y_{s2} με βάση την μερική πίεση κορεσμού

$$➤ Y_{s2} = \frac{0.622 \cdot p_{H_2O}}{1.0133 \cdot 10^5 - p_{H_2O}}$$



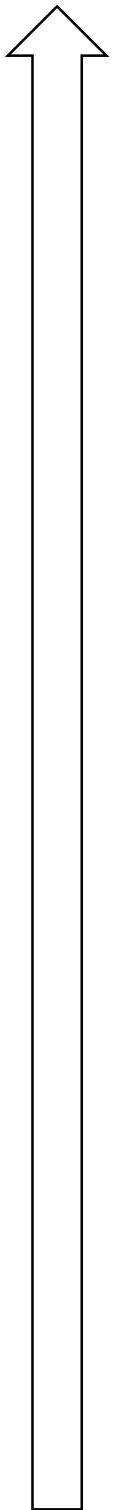
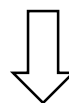
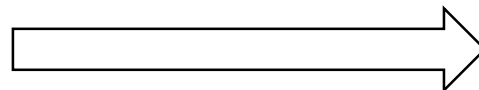
Υπολογισμός της διαφοράς

$$➤ dY = \text{abs}(Y_s - Y_{s2})$$



$dY > \text{TOL} ?$

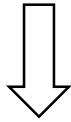
NO





Υπολογισμός του ρυθμού ξήρανσης RNC

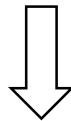
- aNc: $N_c = \frac{(h_c + U_K) \cdot (t_G - t_S) + h_R \cdot (t_R - t_S)}{\lambda_s}$
- $RNC = aNC \cdot 3600$



Προσδιορισμός της χρονικής εξέλιξης της ξήρανσης με βήμα $dx = 0.01$

Υπολογισμός του ποσοστού εξάτμισης της υγρασίας, ρυθμού ξήρανσης, χρόνου ξήρανσης. amr , aN , θ , t .

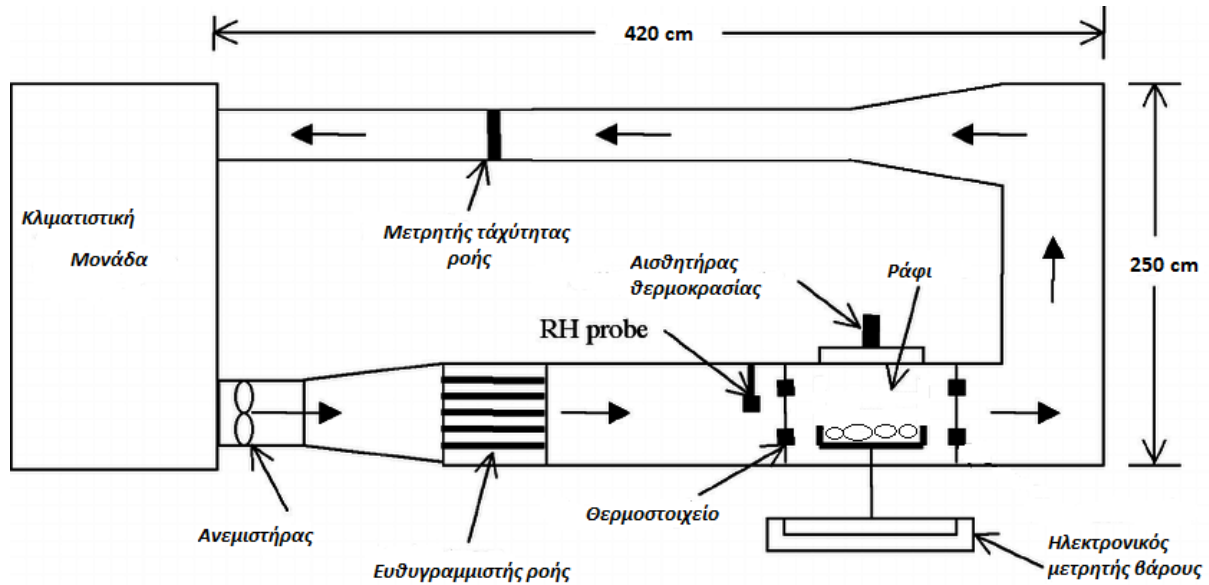
- $amr: MR = \frac{X_1 - X^*}{X_c - X^*}$
- $aN: N = \frac{N_c (X - X^*)}{X_c - X^*}$
- $\theta = \frac{S_s (X_c - X^*)}{N_c A} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*}$
- $t = t + \theta$



Καταγραφή αποτελεσμάτων σε αρχείο εξόδου

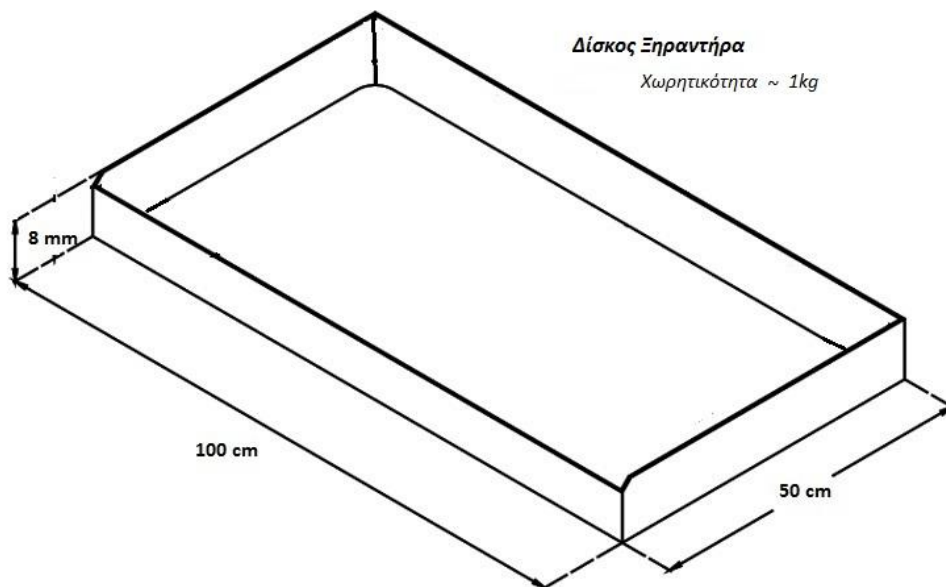
Διάταξη Ξηραντήρα

Παρακάτω παρουσιάζεται ο ξηραντήρας που χρησιμοποιήσαμε για τους υπολογισμούς μας.



Σχήμα 20 Σκαρίφημα ξηραντήρα.

Στο σχήμα 21 απεικονίζεται το ράφι το οποίο γεμίζουμε με το προς ξήρανση υλικό, στην περίπτωσή μας μανιτάρια. Το προς ξήρανσης υλικό πρέπει να είναι έως 1 kg και η μορφή του λεπτές φέτες καθώς το ύψος του είναι περιορισμένο.

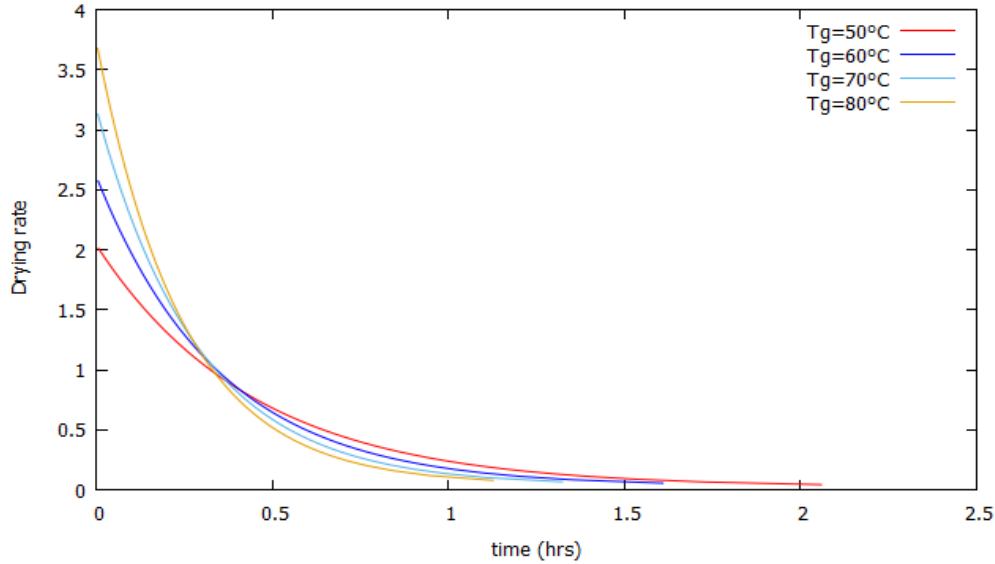


Σχήμα 21 Σκαρίφημα ραφιού ξηραντήρα.

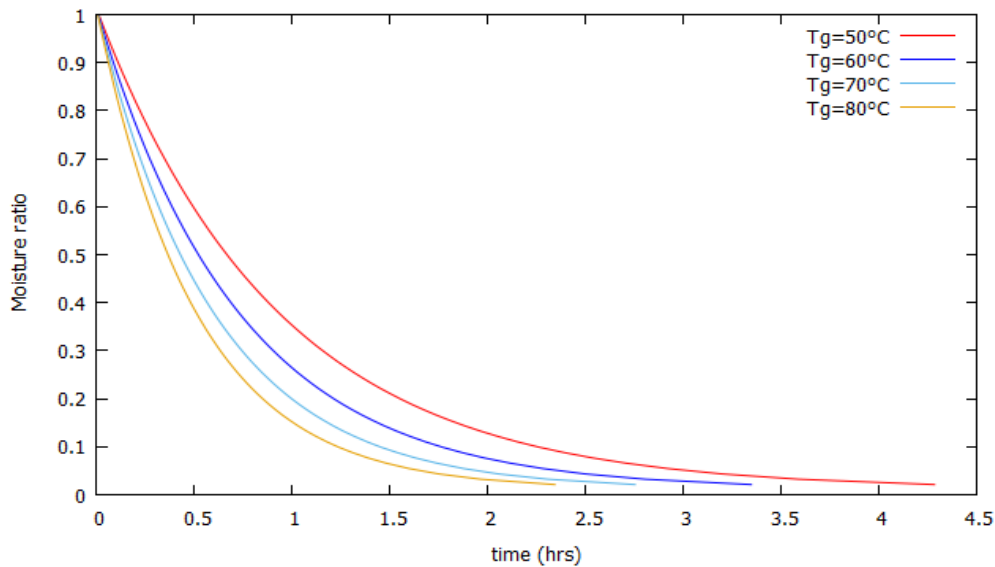
3.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Καμπύλες Ξήρανσης (χωρίς ακτινοβολία)

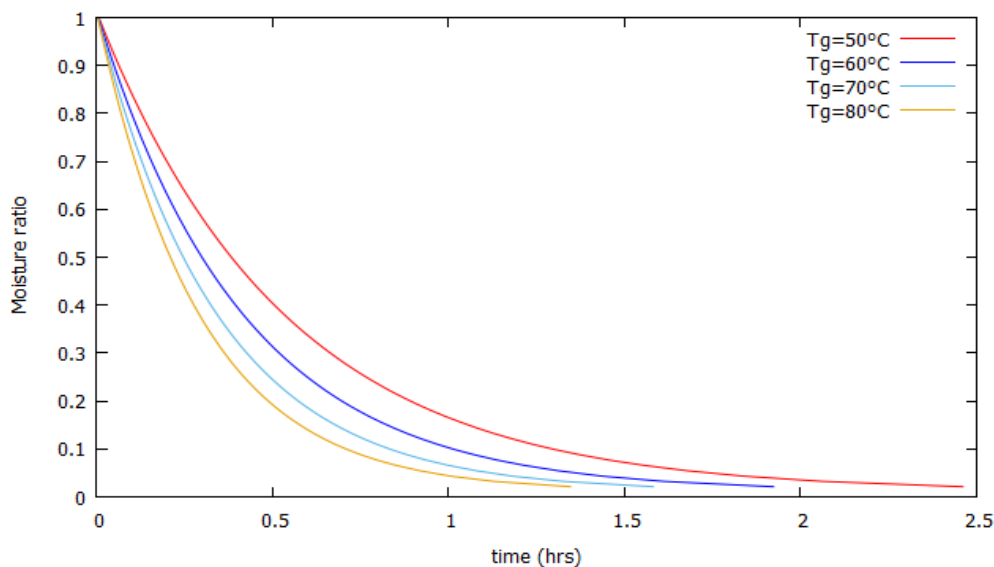
Τα σχήματα 22-36 αφορούν την **2^η περίπτωση, χωρίς ακτινοβολία**. Στα διαγράμματα 22-24 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης για θερμοκρασίες αέρα 50-80 °C σε αντίστοιχες ταχύτητες 2-5 m/s.



Σχήμα 22 Ρυθμός ξήρανσηςμανιταριών για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε σταθερή ταχύτητα 5 m/s.



Σχήμα 23 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 2 m/s.



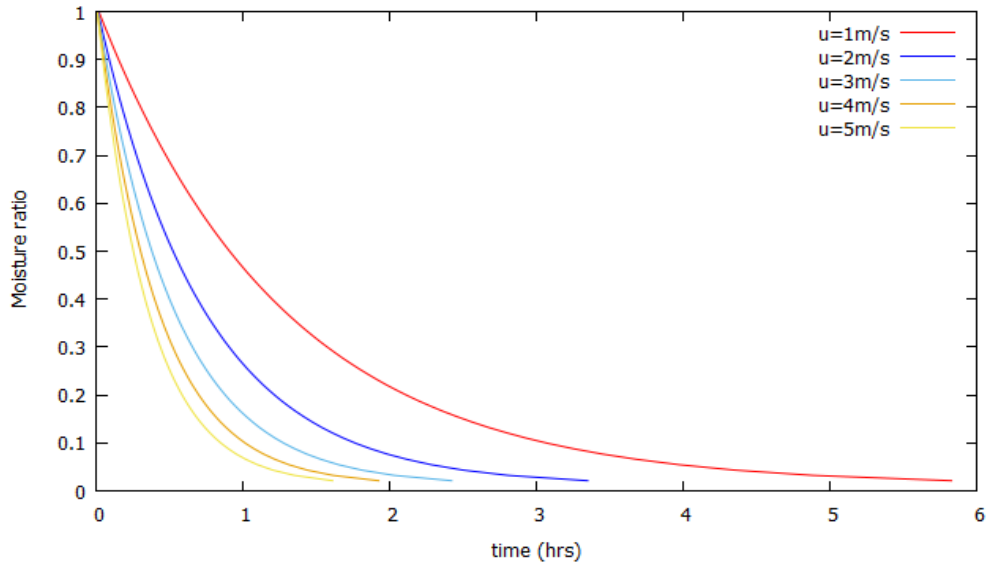
Σχήμα 24 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 4 m/s.

Επίδραση της Θερμοκρασίας

Η επίδραση της θερμοκρασιακής μεταβολής με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες αποτυπώνεται στις καμπύλες ξήρανσης στα σχήματα 23, 24. Ο ρυθμός ξήρανσης των μανιταριών αυξάνεται αντίστοιχα με τη θερμοκρασία αέρα καθώς οι καμπύλες ξήρανσης στις υψηλές θερμοκρασίες πέφτουν κάτω από αυτές με τις χαμηλότερες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης της θερμοκρασιακής μεταβολής φαίνεται αν δούμε τις ακραίες τιμές των σχημάτων 23 και 24, όπου η διαφορά στο χρόνο ξήρανσης είναι περίπου δύο ώρες για ταχύτητα αέρα 2 m/s και περίπου μία ώρα για 4 m/s. Επομένως, ο ρόλος της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα πιο σημαντικός όταν η διεργασία της ξήρανσης λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες ταχύτητες αέρα.

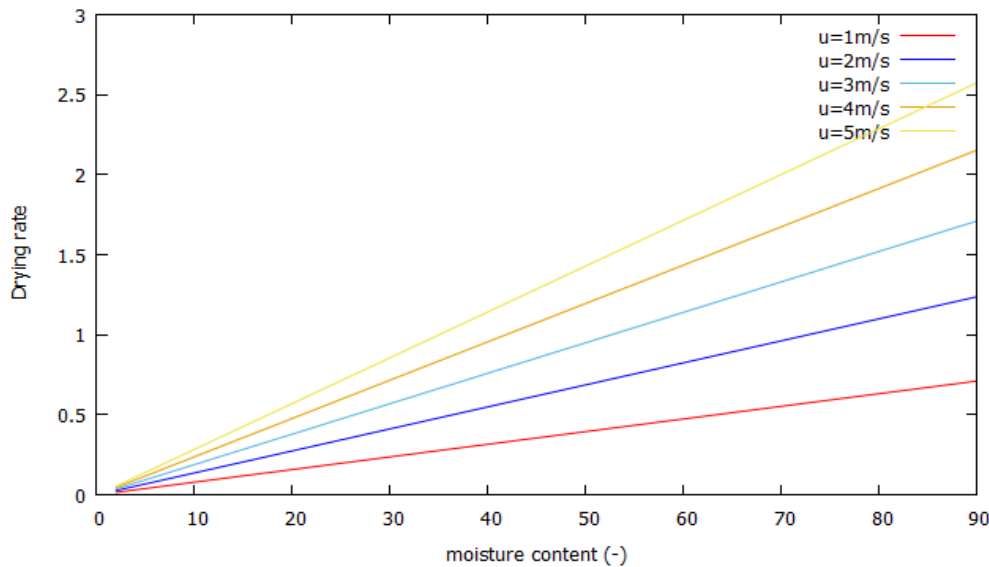
Επίδραση της Ταχύτητας

Στο σχήμα 25 εξετάζουμε την επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας στο ρυθμό ξήρανσης των μανιταριών στη θερμοκρασία των 60 °C. Παρόλο που μπορεί να σημειωθεί ότι για υψηλές ταχύτητες αέρα έχουμε γενικότερα και υψηλό ρυθμό ξήρανσης, δε μπορούμε να εξαγάγουμε ένα γενικότερο συμπέρασμα καθώς οι μεταβολές του ρυθμού ξήρανσης στις ταχύτητες από 3-5 m/s δεν είναι τόσο σημαντικές. Ωστόσο για το εύρος τιμών της ταχύτητας από 1-3 m/s παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στο ρυθμό ξήρανσης καθώς και στο χρόνο.



Σχήμα 25 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60\text{ }^\circ\text{C}$.

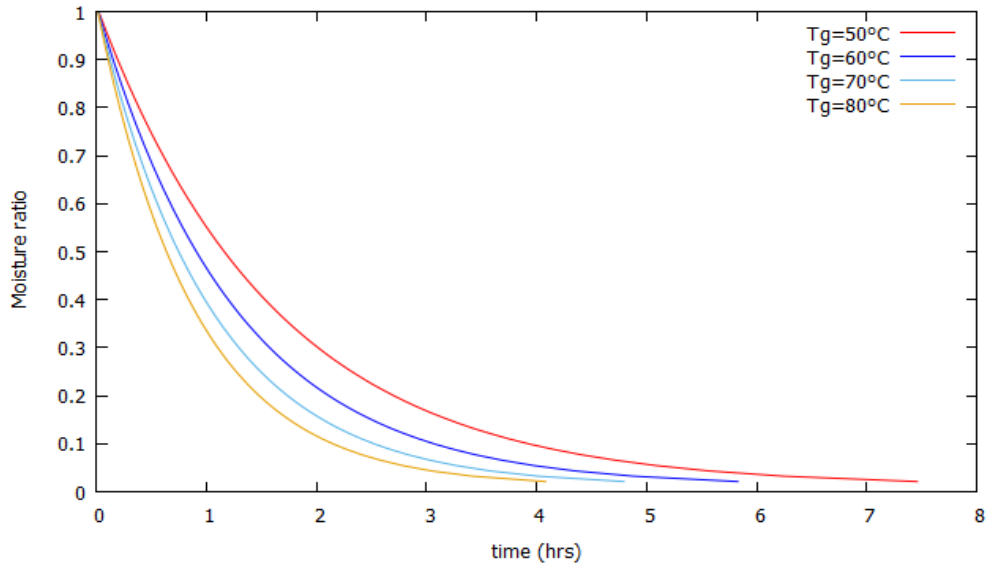
Οι αλλαγές στο ρυθμό ξήρανσης σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας σε σταθερή θερμοκρασία και με μεταβαλλόμενη ταχύτητα δίνονται στο σχήμα 26. Ο ρυθμός ξήρανσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και της ταχύτητας και μειώνεται συνεχώς με την αφαίρεση της υγρασίας από τα μανιτάρια.



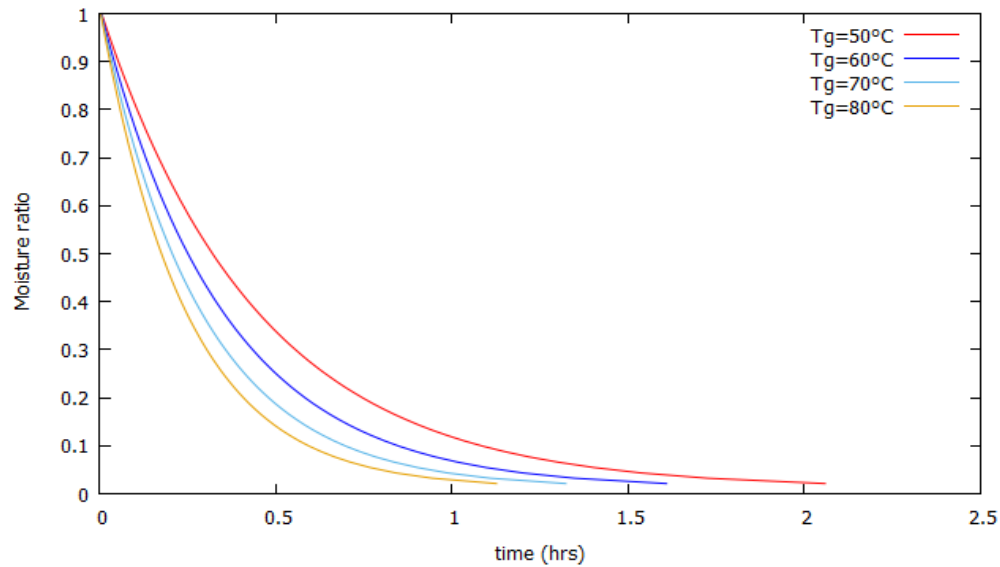
Σχήμα 26 Ρυθμός ξήρανσης μανιταριών για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60\text{ }^\circ\text{C}$.

Στα διαγράμματα 27 και 28 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης για ένα εύρος τιμών της θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσης $50\text{-}80\text{ }^\circ\text{C}$ στις ακραίες τιμές των ταχυτήτων 1 και 5 m/s αντίστοιχα. Στα σχήματα 29 και 30 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες στις ακραίες τιμές

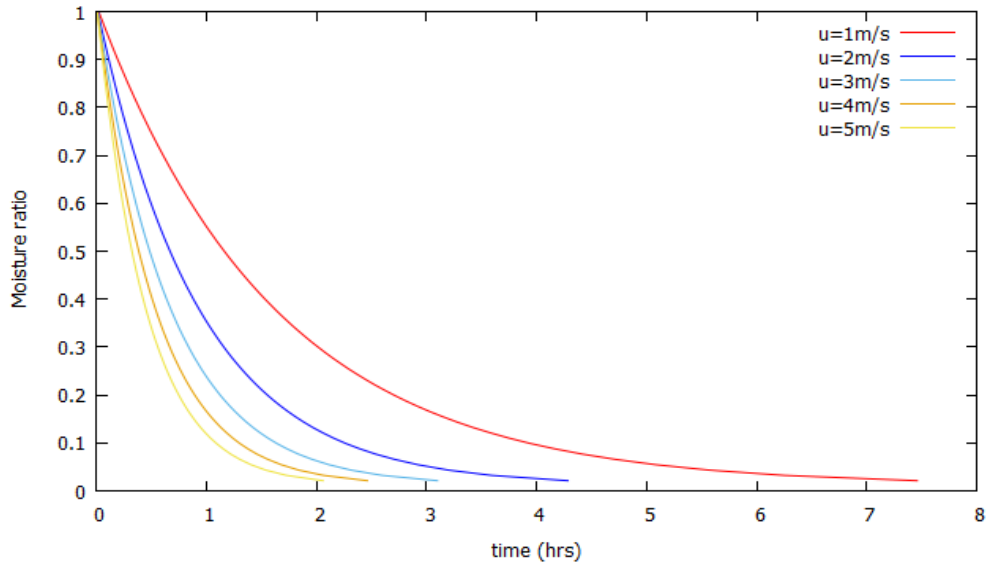
της θερμοκρασίας αέρα 50 και 80 °C για ένα εύρος τιμών της ταχύτητας 1-5 m/s. Οι σημαντικότερες μεταβολές στο ρυθμό ξήρανσης και κατ' επέκταση στο χρόνο που διαρκεί η διεργασία παρατηρούνται στα σχήματα 27 και 29, στις ελάχιστες δηλαδή τιμές ταχύτητας και θερμοκρασίας.



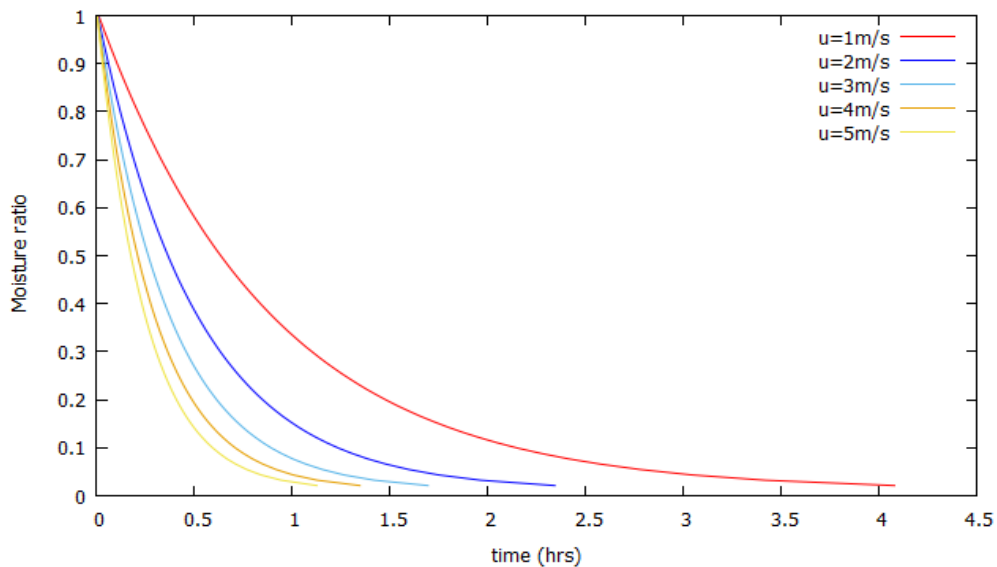
Σχήμα 27 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 1 m/s



Σχήμα 28 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 5 m/s.

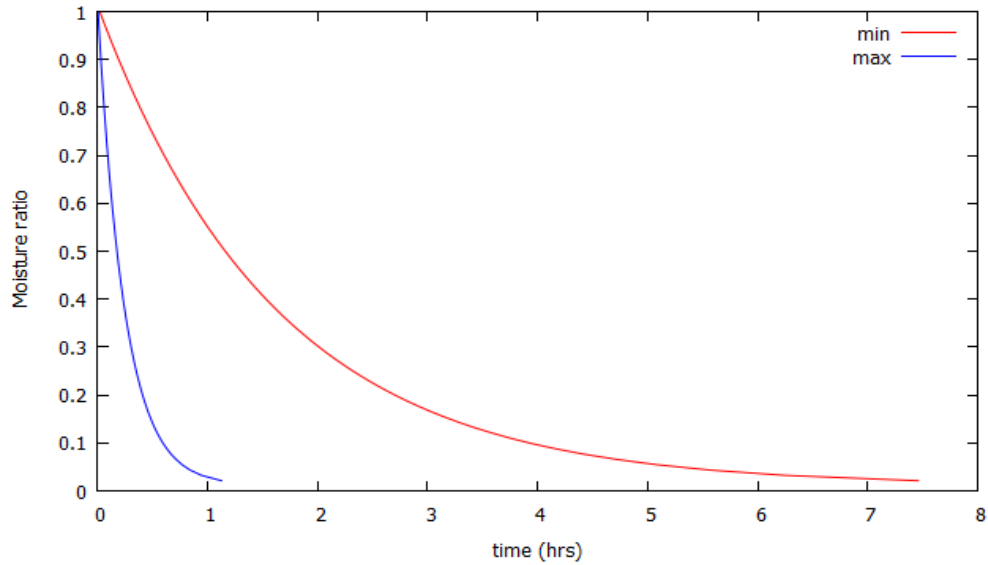


Σχήμα 29 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα °C σε θερμοκρασία $T_g = 50$ °C.



Σχήμα 30 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 80$ °C.

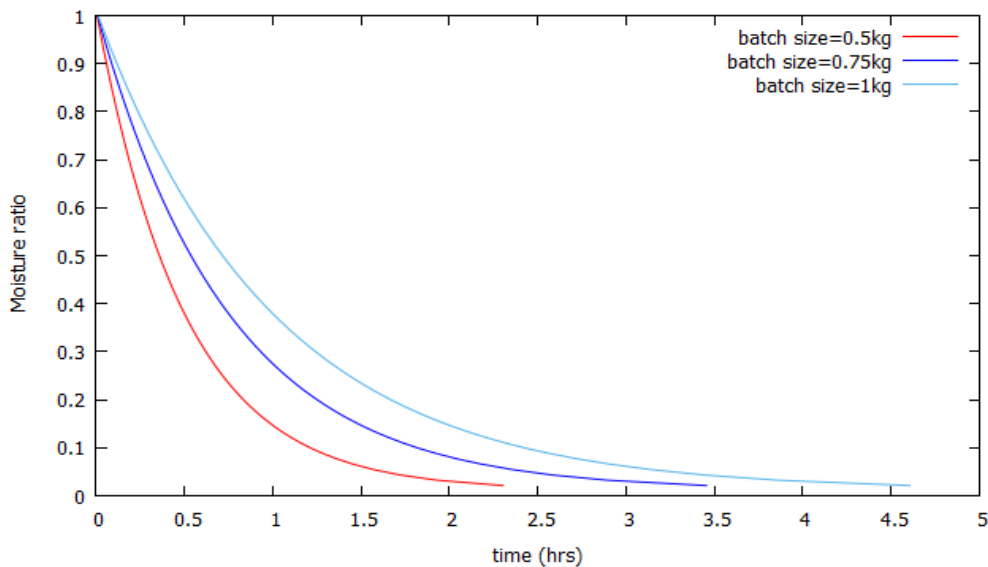
Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τη σημασία των συνθηκών της θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα ξήρανσης συγκρίνοντας τις ακραίες τιμές. Όπως διακρίνουμε στο σχήμα 31 η διεργασία μπορεί να διαρκέσει και 6 ώρες παραπάνω. Ωστόσο, οι ακραίες τιμές των συνθηκών αποφεύγονται διότι και στις δυο περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί σε σχετικά πειράματα αλλοιώσεις στη σύσταση του προς ξήρανση υλικού [60].



Σχήμα 31 Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών ξήρανσης σε συνθήκες $T_{min} - V_{min}$, $T_{max} - V_{max}$.

Επίδραση του Μεγέθους Ραφιού

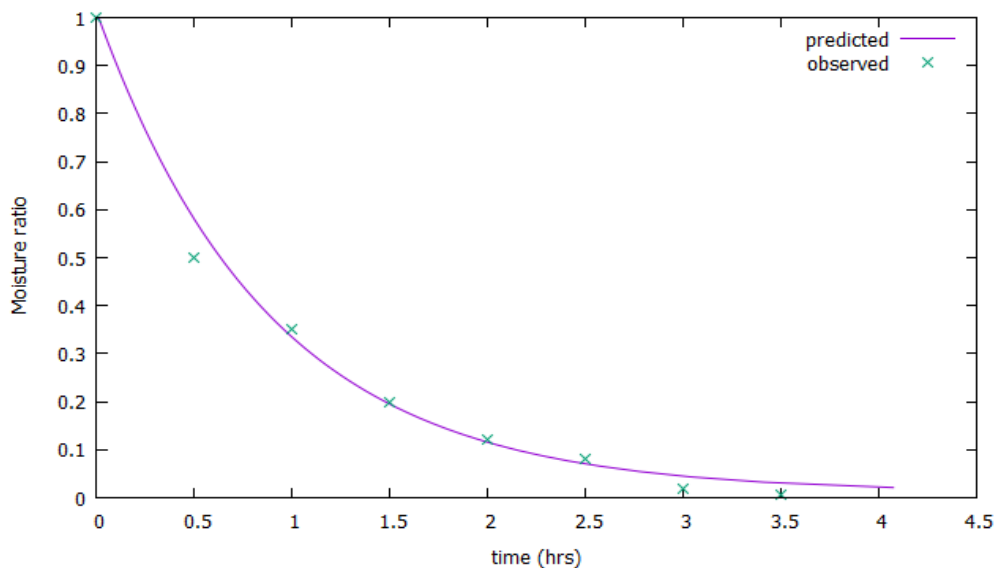
Η υγρασία τωνμανιταριών αφαιρείται πιο γρήγορα όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος του δείγματός μας στο ράφι, όπως βλέπουμε στο σχήμα 32. Για διαφορά μεγέθους 0.5 kg έχουμε 2.25 ώρες διαφορά στον χρόνο της διεργασίας.



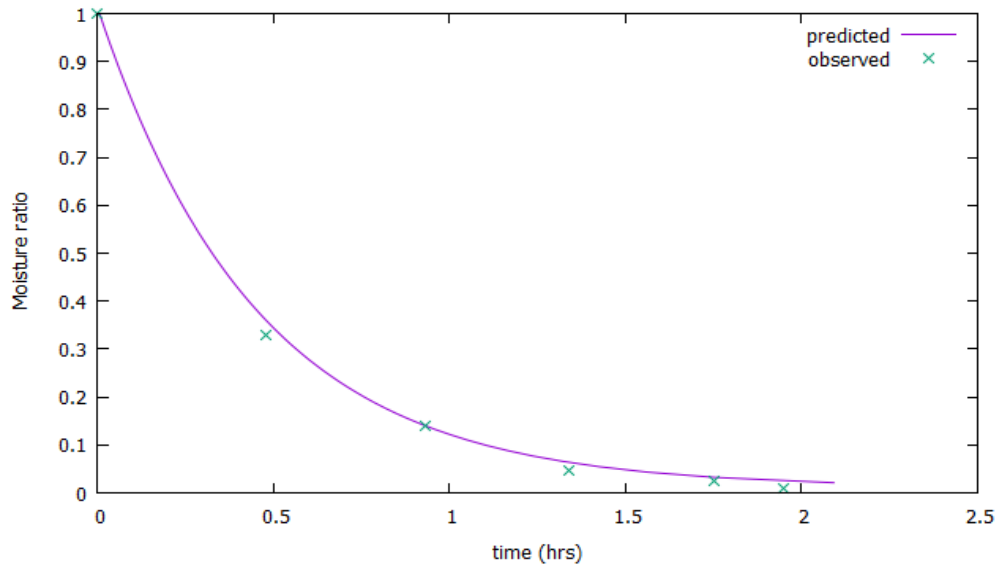
Σχήμα 32 Επίδραση του μεγέθους του δείγματος στο ράφι στο ποσοστό υγρασίας σε σταθερές συνθήκες ταχύτητας και θερμοκρασίας αέρα.

Παρουσίαση Συγκριτικών Διαγραμμάτων

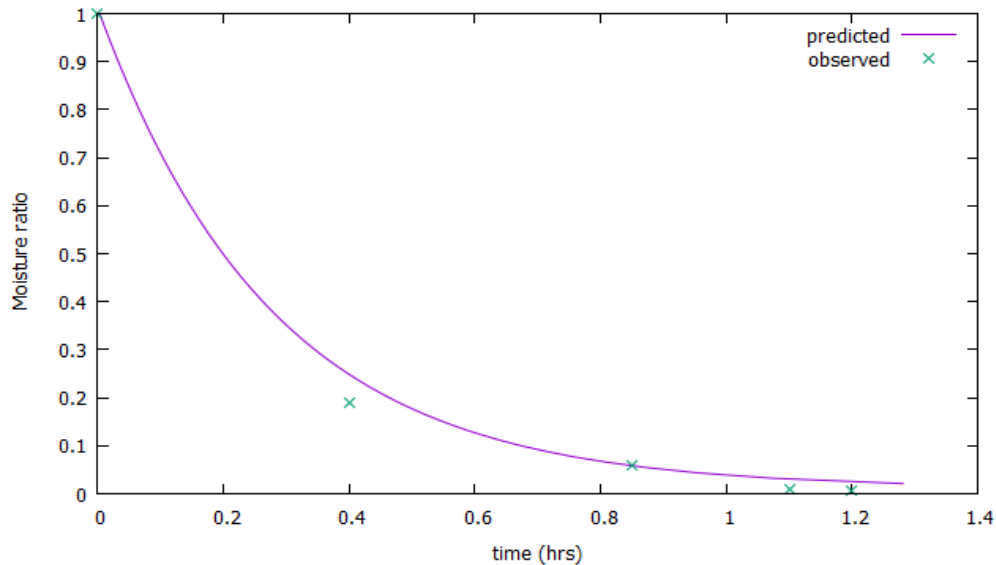
Στα παρακάτω σχήματα 33, 34, 35 γίνεται μια σύγκριση των καμπυλών που προέκυψαν από το πρόγραμμα code_msh με τα πειραματικά σημεία που παρατηρήθηκαν όπως καταγράφονται από τους ερευνητές Manoj et al. στο paper [61] που παρουσιάστηκε συνοπτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 33 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 2.13 m/s, μέγεθος ραφιού 0.5 kg, θερμοκρασία 50 °C).



Σχήμα 34 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 2.13 m/s, μέγεθος ραφιού 0.5 kg, θερμοκρασία 70 °C).



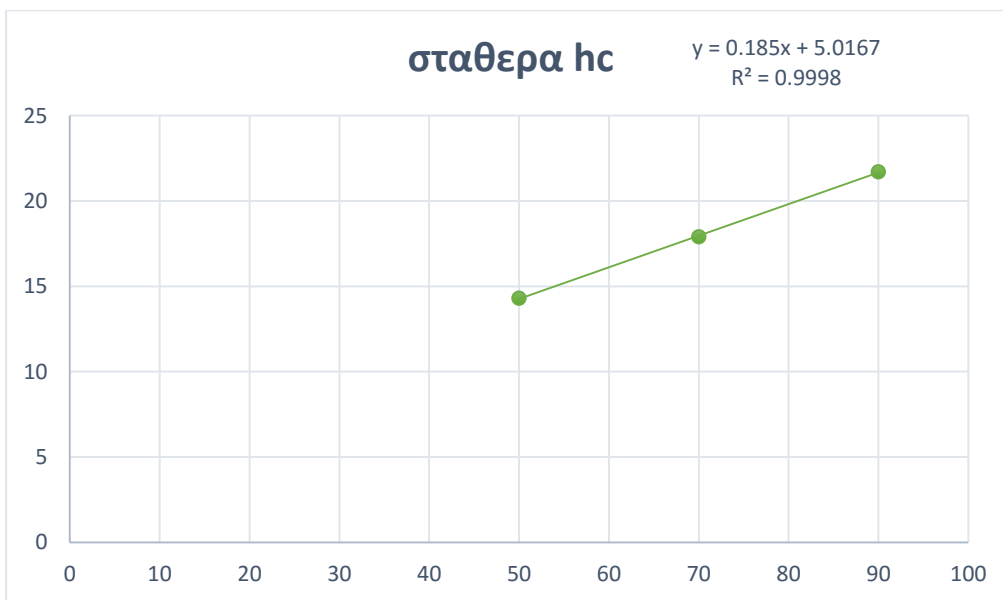
Σχήμα 35 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 2.13 m/s, μέγεθος ραφιού 0.5 kg, θερμοκρασία 90 °C).

Ανάλυση και Σχολιασμός Συγκριτικών Διαγραμμάτων

Τα παραπάνω τρία σχήματα αποτελούν τα συγκριτικά διαγράμματα των καμπυλών που προέκυψαν από τον κώδικα της παρούσης διπλωματικής εργασίας με τις καμπύλες ξήρανσης των πειραματικών μετρήσεων των Manoj et al. [61]. Αποτελούν μια πρώτη επιβεβαίωση ότι

μπορούμε με τα θεωρητικά εργαλεία που διαθέτουμε να προσεγγίσουμε όχι σε απόλυτο αλλά σε κάποιο ικανοποιητικό βαθμό τα ημι-θεωρητικά μοντέλα που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις. Οι αποκλίσεις των πειραματικών σημείων παρατηρείται κυρίως στα αρχικά στάδια της ξήρανσης όπου το ποσοστό εξατμιζόμενης υγρασίας είναι σχετικά υψηλό.

Πριν καταλήξουμε στα παραπάνω διαγράμματα εργαστήκαμε με σταθερά του συντελεστή συναγωγιμότητας το 14.3. Στη θερμοκρασία των 50 °C η απόκλιση της καμπύλης ήταν ικανοποιητική. Ωστόσο, στους 70 και 90 °C με σταθερές τις υπόλοιπες συνθήκες (ταχύτητα 2.13m/s, μέγεθος ραφιού 0.5kg) δεν είχαμε τα ανάλογα αποτελέσματα. Ήταν απαραίτητη η διερεύνηση της σταθεράς του συντελεστή συναγωγής $h_c = 14.3G^{0.8}$. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε 14.3. Στους 70 °C, εργαστήκαμε με το 17.9, ενώ στους 90 °C με το 21.7. Προέκυψε επομένως το παρακάτω σχήμα και το αντίστοιχο πολυώνυμο.

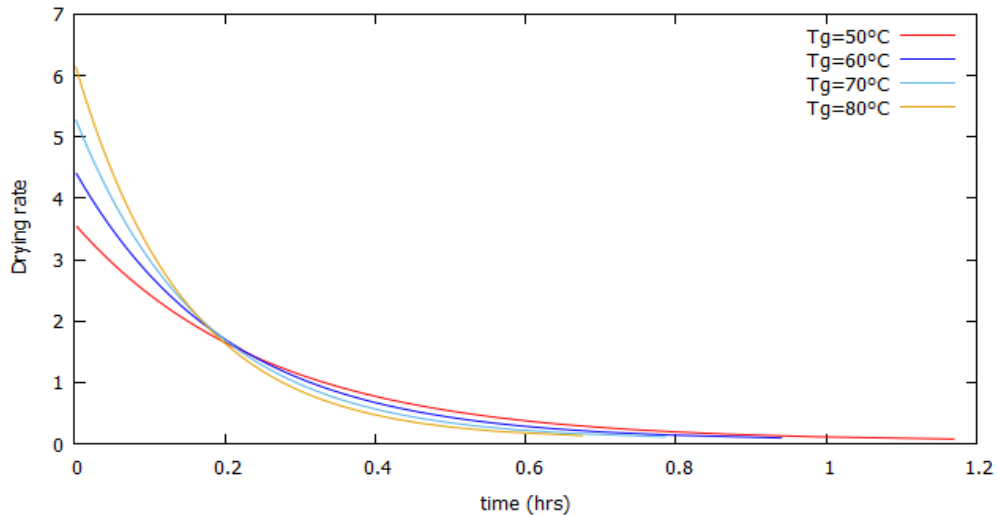


Σχήμα 36 Απεικόνιση της γραμμικής σχέσης της σταθεράς του συντελεστή συναγωγιμότητας h_c ύστερα από δοκιμές.

Καμπύλες Ξήρανσης (με ακτινοβολία)

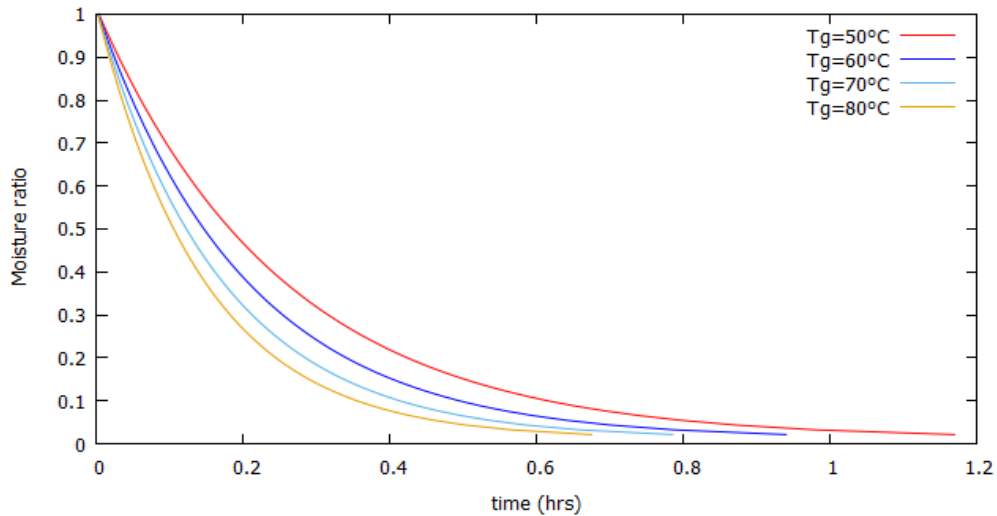
Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν την **1^η περίπτωση**, με θερμή ακτινοβολούσα επιφάνεια. Στο σχήμα 37 είναι εμφανές ότι ο ρυθμός ξήρανσης σε αυτή την περίπτωση με τη θερμή ακτινοβολούσα επιφάνεια είναι σημαντικά αυξημένος με άμεση και αντίθετη επίδραση στη

συνολική διάρκεια της ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι στη θερμοκρασία των 50 °C και για ταχύτητα 5 m/s, ο χρόνος ξήρανσης είναι σχεδόν 1.2 ώρες όταν για τις ίδιες συνθήκες, χωρίς ακτινοβολία, ξεπερνούσε τις 2 ώρες.



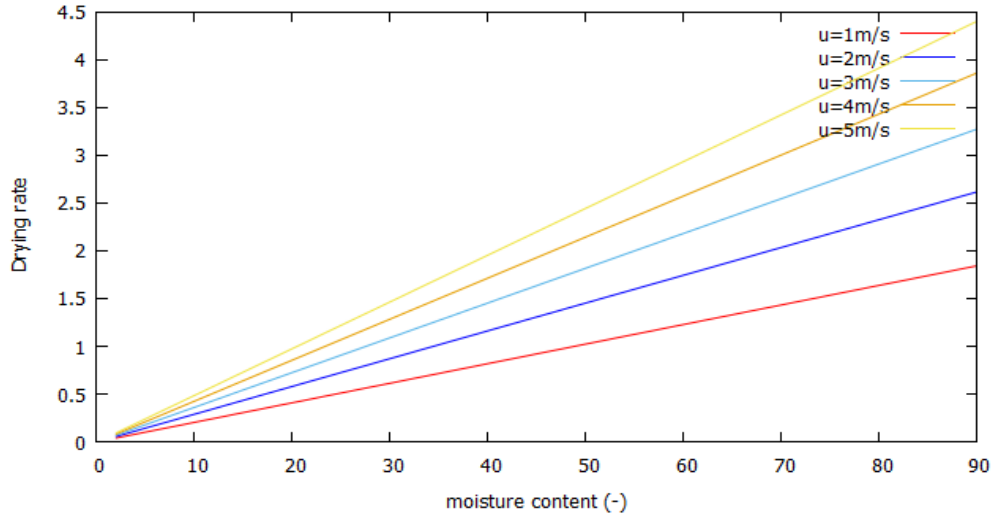
Σχήμα 37 Ρυθμός ξήρανσης μανιταριών για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 5 m/s.

Στο σχήμα 38, παρατηρούνται πολύ μικρές μεταβολές τόσο στο ρυθμό όσο και στο χρόνο ξήρανσης για μεταβολές της θερμοκρασίας της τάξης των 10 °C σε σταθερή ταχύτητα 5 m/s.

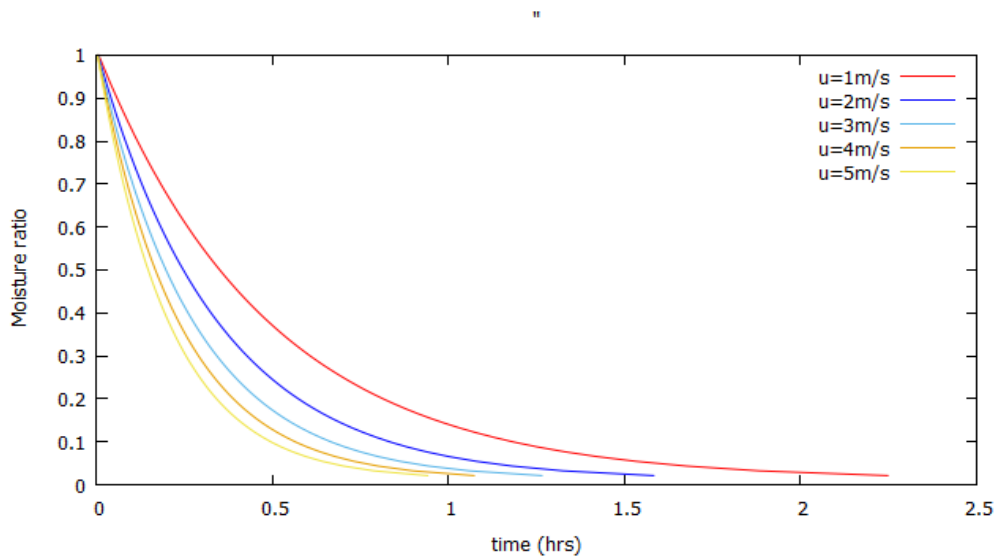


Σχήμα 38 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε ταχύτητα 5 m/s.

Στο σχήμα 39 παρατηρούμε ότι στις χαμηλότερες ταχύτητες αέρα ξήρανσης αντιστοιχούν μικρότερες ταχύτητες ξήρανσης.



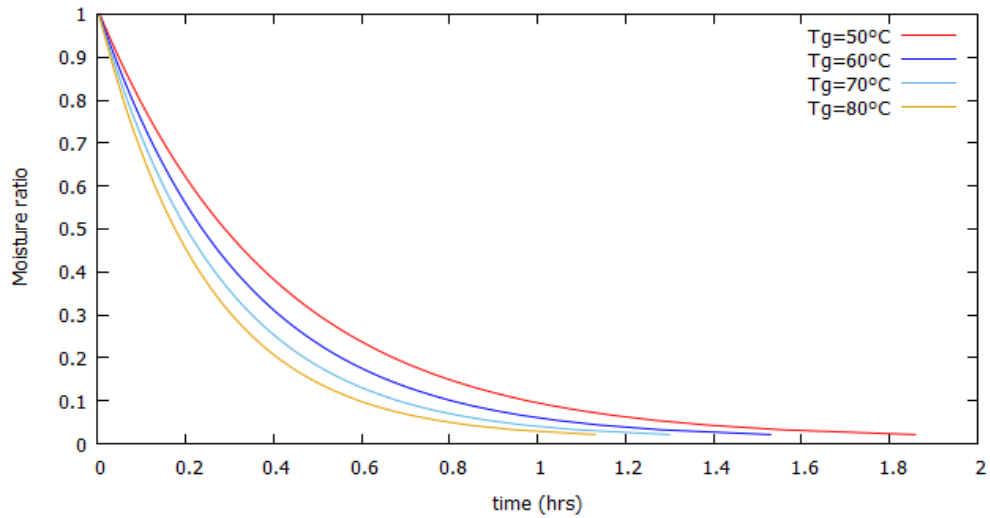
Σχήμα 39 Ρυθμός ξήρανσης μανιταριών για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60\text{ }^\circ\text{C}$.



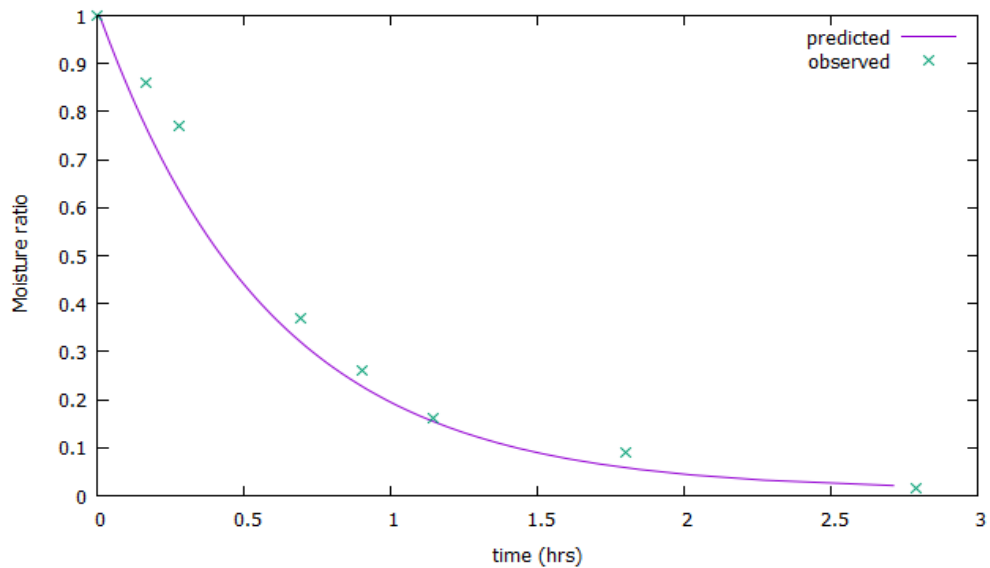
Σχήμα 40 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές ταχύτητες αέρα σε θερμοκρασία $T_g = 60\text{ }^\circ\text{C}$.

Μειώνοντας την ταχύτητα αέρα στα 2.13 m/s παρατηρούμε μια μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας αλλά εξακολουθούν οι μεταβολές στις καμπύλες να μην είναι αξιοσημείωτες, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 41. Τέλος, στο σχήμα 40 είναι εμφανής η επίδραση της

ταχύτητας αέρα ειδικά στις χαμηλότερες τιμές της με επιπτώσεις στο συνολικό χρόνο της τάξης της μιας ώρας.



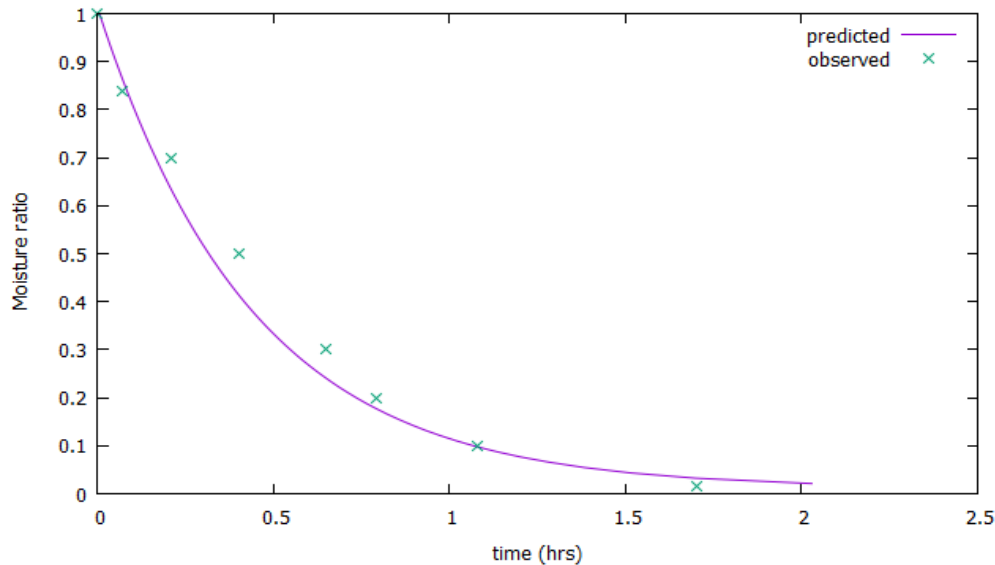
Σχήμα 41 Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C αέρα σε σταθερή ταχύτητα 2.13m/s.



Σχήμα 42 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 0.5 m/s, μέγεθος ραφίου 0.05 kg, θερμοκρασία 50 °C).

Παρουσίαση Συγκριτικών Διαγραμμάτων

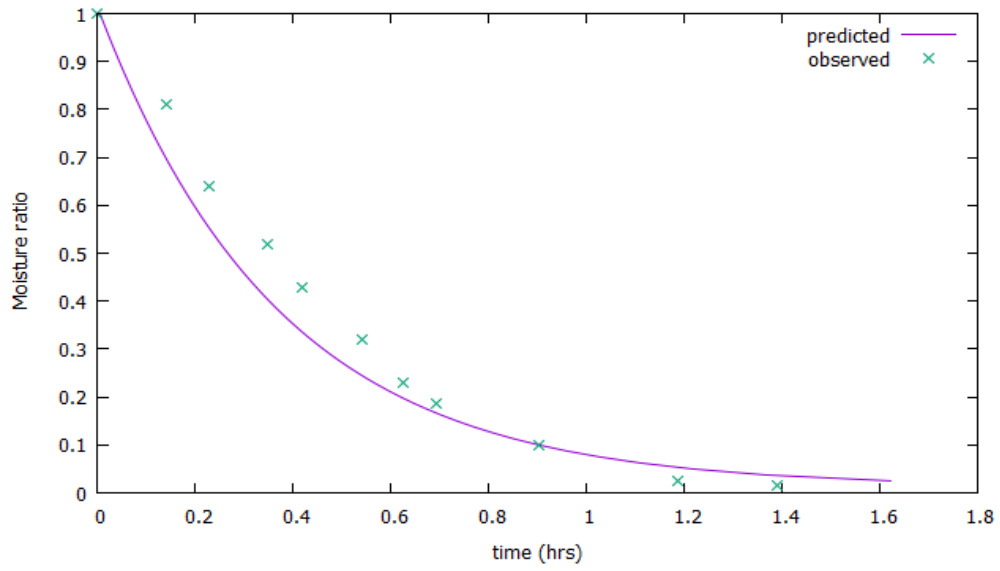
Στα παρακάτω σχήματα 42, 43, 44 γίνεται μια σύγκριση των καμπυλών που προέκυψαν από το πρόγραμμα `msh_code` με τα πειραματικά σημεία που παρατηρήθηκαν όπως καταγράφονται από τους Darvishi et al. [66].



Σχήμα 43 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 0.5 m/s, μέγεθος ραφιού 0.05 kg, θερμοκρασία 70 °C).

Ανάλυση και Σχολιασμός Συγκριτικών Διαγραμμάτων

Στα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι μπορούμε να επιτύχουμε σχετικά μικρές αποκλίσεις από τις καμπύλες που έχουν διαμορφωθεί ύστερα από πειραματικές μετρήσεις. Η διερεύνηση της κατάλληλης σταθεράς του συντελεστή συναγωγιμότητας ήταν απαραίτητη, όπως και στην περίπτωση της ξήρανσης χωρίς ακτινοβολία. Στο σχήμα 42 και για 50 °C εργαστήκαμε με το 1.47, στο επόμενο για 70 °C με 3.37 και τέλος στο διάγραμμα 44 για 80 °C με το 3.49. Οι μικρές αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στην τοποθέτηση της ακτινοβολούσας επιφάνειας, δηλαδή την απόσταση από την επιφάνεια των μανιταριών, το υλικό του δίσκου που χρησιμοποιείται, τις ιδιότητες του μανιταριού.



Σχήμα 44 Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού υγρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο ξήρανσης για σταθερές συνθήκες (ταχύτητα 0.5 m/s, μέγεθος ραφιού 0.05 kg, θερμοκρασία 80 °C).

Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

4.1 Συμπεράσματα-Συζήτηση

Η αποτελεσματικότητα της παραπάνω προσέγγισης αποδεικνύεται: (α) από τη συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις και (β) από την πρόβλεψη, μέσω της υπολογιστικής προσομοίωσης, εξαιρετικά πολύπλοκων φαινομένων που δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά από τις πειραματικές μετρήσεις. Η εφαρμογή των τεχνικών υπολογιστικής προσομοίωσης στη μηχανική των τροφίμων μπορεί να δώσει χρήσιμες απαντήσεις σε πολύπλοκα προβλήματα που ούτε αναλυτικές ούτε εμπειρικές προσεγγίσεις δίδουν [67].

Μπορούμε να πούμε ότι σε πρώτο στάδιο μέσα από τις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, απεικονίζονται αρκετά ικανοποιητικά οι καμπύλες ξήρανσης των μανιταριών σε συνάρτηση με το χρόνο καθώς και ο ρυθμός εξάτμισης της υγρασίας στις διάφορες φάσεις της διεργασίας. Επιπρόσθετα, η απόκλιση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τα αντίστοιχα πειραματικά είναι σχετικά μικρή. Ειδικότερα, με τις δοκιμές στη σταθερά του συντελεστή συναγωγιμότητας πετύχαμε μια ακόμη μικρότερη απόκλιση. Οι συγκρίσεις και οι δοκιμές έγιναν με σκοπό την εύρεση της κατάλληλης σταθεράς και μιας πολυωνυμικής συνάρτησης σε σχέση με τη θερμοκρασία αέρα.

Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα και τις μεταβολές των συνθηκών ξήρανσης, παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της ταχύτητας θερμού αέρα και στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις είναι αξιοσημείωτη στις χαμηλές θερμοκρασίες 50-70 °C. Αντίστοιχα, σημαντικές μεταβολές στις καμπύλες όταν αλλάζουμε τη θερμοκρασία αέρα έχουμε στις μικρές ταχύτητες 1-3 m/s. Στις υψηλές τιμές είτε της θερμοκρασίας είτε της ταχύτητας θα αποφεύγαμε να εξάγουμε κάποιο συμπέρασμα διότι υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης της σύστασης του μανιταριού. Επίσης, προκύπτει από τα διαγράμματα ότι ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη διεργασία σημαντικά είναι το μέγεθος του δείγματος στο ράφι. Με την αύξηση του μεγέθους μεγαλώνει και ο χρόνος που χρειάζονται τα μανιτάρια να ξηρανθούν μέχρι την επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία.

Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι η ακτινοβολούσα επιφάνεια επιταχύνει σημαντικά το ρυθμό εξάτμισης της υγρασίας από τα μανιτάρια καθώς πέρα από τη θερμότητα δια συναγωγής από

το αέριο ρεύμα η επιφάνεια ξήρανσης δέχεται και θερμότητα από κατ' ευθείαν ακτινοβολία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα μπορούσε να υπάρξει κίνδυνος αλλοίωσης των συστατικών τουμανιταριού καθώς η θερμότητα που παράγεται λόγω της ακτινοβολίας είναι υψηλή όμως προσέξαμε και ρυθμίσαμε αυτήν την παράμετρο και η θερμοκρασία ακτινοβολίας δεν ξεπερνά τους 110 °C.

4.2 Πρόταση για Μελλοντική Εργασία

Προτείνεται:

- Η περαιτέρω μελέτη του συγκεκριμένου θεωρητικού μοντέλου ξήρανσης και σε άλλα αγροτικά προϊόντα.
- Ο συνδυασμός αυτού με την ήδη υπάρχουσα γνώση των ημι θεωρητικών και πειραματικών μοντέλων προσομοίωσης.
- Η ενδεδειγμένη μελέτη στην επίδραση των συνθηκών ξήρανσης στη σύσταση τωνμανιταριών.
- Η μελέτη για την αντοχή τωνμανιταριών σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Η διερεύνηση της σταθεράς του συντελεστή συναγωγιμότητας σε σχέση και με τους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της ξήρανσης.
- Η επέκταση του μοντέλου για μεγαλύτερες ποσότητεςμανιταριών και για περισσότερα ράφια.
- Η σύγκριση και με άλλες μεθόδους ξήρανσης.

Παράρτημα

```
program code_msh
  implicit double precision (a-h, o-z)
C
  open (10, file='res50.dat')
  open (11, file='res60.dat')
  open (12, file='res70.dat')
  open (13, file='res80.dat')
  open (20, file='resv1.dat')
  open (21, file='resv2.dat')
  open (22, file='resv3.dat')
  open (23, file='resv4.dat')
  open (24, file='resv5.dat')
C
  zs=10.d0/1000.d0
  zm= (1.d0/32.d0)*0.0254d0
  al=1.d0
  w=0.5d0
  sigma=5.67d0/10.d0**(8)
  e=0.94d0
C
  do i=1,4
C
  tG=50.d0+(i-1)*10.d0
  tR=110.d0
  vel=4.d0
  Ss=0.5d0
  aks=0.53d0
  akm=26.d0*1.7308d0
  Y=0.01d0
  vh=(0.00283d0+0.00456d0*Y)*(tG+273.d0)
  rhog=(1.d0+Y)/vh
  G=vel*rhog
  A=al*w
  Am=A
  Au=al*w+2.d0*(al*zs)+2.d0*(w*zs)
  err=0.00001d0
  ts=10.d0
  dy=1.d0
C
  do while (dy.gt.err)
  ts=ts+0.0005d0
  hc=14.3d0*G**0.8d0
  hR= e*sigma*((tR+273.15d0)**4-(ts+273.15d0)**4)/(tR-ts)
  Uk= A*( 1.d0/(hc*Au)+zm/(akm*Au)+zs/(Am*aks) )
  Uk=1.d0/Uk
  Cs=1005.d0+1884.d0*Y
  qls=3.139d0*10**6-2336.d0*(ts+273.d0)
  Ys=Cs*((1.d0+Uk/hc)*(tG-ts)+hr*(tR-ts)/hc)/qls+Y
  pws=dexp(77.345d0+0.0057d0*(Ts+273.d0)-7235.d0/(Ts+273.d0))/
  (Ts+273.d0)**8.2d0
  Ys2=0.622d0*pws/(1.0133d0*10**5-pws)
  dy=dabs(Ys2-Ys)
  enddo
```



```

C
aNc = ((hc+Uk)*(tG-ts)+hR*(tR-ts))/qls
rNc=aNc*A*3600.D0
xc=0.9d0
xastro=0.001d0
x1=xc
dx=0.01d0
x2=x1-dx
t=0.d0

C
do while (x2.ge.xastro)
amr= (x1-xastro)/(xc-xastro)
aN=aNc*amr
thita=Ss*(xc-xastro)*dlog((x1-xastro)/(x2-xastro))/(aNc*A)
t=t+thita

C
if(i.eq.1) write(10,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0,amr
if(i.eq.2) write(11,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0,amr
if(i.eq.3) write(12,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0,amr
if(i.eq.4) write(13,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0,amr

C
x1=x2
x2=x1-dx

C
enddo
enddo

C
do i=1,5
C
vel=1.d0+(i-1)
tG=60.d0
tR=110.d0
e=0.94d0
sigma=5.67d0/10.d0**(8)
Ss=0.5d0
aks=0.53d0
akm=26.d0*1.7308d0
Y=0.01d0
vh=(0.00283d0+0.00456d0*Y)*(tG+273.d0)
rhog=(1.d0+Y)/vh
G=vel*rhog
A=al*w
Am=A
Au=al*w+2.d0*(al*zs)+2.d0*(w*zs)
err=0.00001d0
ts=10.d0
dy=1.d0

C
do while (dy.gt.err)
ts=ts+0.0005d0
hc=14.3d0*G**0.8d0

C
hR= e*sigma*((tR+273.15d0)**4-(ts+273.15d0)**4)/(tR-ts)
Uk= A*( 1.d0/(hc*Au)+zm/(akm*Au)+zs/(Am*aks) )
Uk=1.d0/Uk

C
Cs=1005.d0+1884.d0*Y

```

```

qls=3.139d0*10**6-2336.d0*(ts+273.d0)
Ys=Cs*(1.d0+Uk/hc)*(tG-ts)+hr*(tR-ts)/hc)/qls+Y

pws=dexp(77.345d0+0.0057d0*(Ts+273.d0)-7235.d0/(Ts+273.d0))/
1      (Ts+273.d0)**8.2d0
Ys2=0.622d0*pws/(1.0133d0*10**5-pws)
dy=dabs(Ys2-Ys)

C
enddo

C
aNc = ((hc+Uk)*(tG-ts)+hr*(tR-ts))/qls
rNc=aNc*A*3600.D0
xc=0.9d0
xastro=0.001d0
x1=xc
dx=0.01d0
x2=x1-dx
t=0.d0

C
do while (x2.ge.xastro)
amr= (x1-xastro)/(xc-xastro)
aN=aNc*amr
thita=Ss*(xc-xastro)*dlog((x1-xastro)/(x2-xastro))/(aNc*A)
t=t+thita

C
if(i.eq.1) write(20,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0, amr
if(i.eq.2) write(21,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0, amr
if(i.eq.3) write(22,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0, amr
if(i.eq.4) write(23,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0, amr
if(i.eq.5) write(24,*) t/3600.d0, x1*100, aN*3600.d0, amr

C
x1=x2
x2=x1-dx

C
enddo
enddo

C
close(10)
close(11)
close(12)
close(13)
close(20)
close(21)
close(22)
close(23)
close(24)

C
stop
end

```

Βιβλιογραφία

- [1 A. Δημητριάδης, Ξήρανση Μανιταριών με Χρήση Υπέρθερμου Ατμού και Θερμού Αέρα
] (Διδακτορική διατριβή), Θεσσαλονίκη: Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., 2005.
- [2 A. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying (4th Ed), Florida: CRC Press, 2014.
]
- [3 B. Μπελεσιώτης και Ε. Δεληγιάννη, Μέθοδοι και Συστήματα Ξήρανσης - Αρχές Διεργασιών
] Ξήρανσης, Αθήνα: ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ", 2009.
- [4 Σ. Μπαμπαλής, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης, «Διερεύνηση της χρήσης Ηλιακής Ενέργειας
] για την κάλυψη μέρους των Θερμικών ανγκών κατά τη Μηχανική Ξήρανση,» σε 7ο Εθνικό Συνέδριο
IHT, Πάτρα, 2002.
- [5 A. Steggou-Sagia και D. Fragkou, «Influence of Drying Conditions and Mathematical Models on the
] Thin Layer Drying of Mushrooms,» σε 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and
Analysis, Copenhagen, 2014.
- [6 G. Xanthopoulos, G. Lambrinos και Η. Manolopoulou, «Evaluation of Thin-Layer Models for
] Mushrooms (*Agaricus bisporus*) Drying,» *Drying Technology*, τόμ. 25, pp. 1471-1481, 2007.
- [7 L. Imre, Solar Drying in Handbook of Industrial Drying (Mujumdar, A.S., Ed), New York: Marcel
] Dekker, 1987.
- [8 Π. Χαρώνης, Ηλιακά Ξηραντήρια, Αθήνα: Ίων, 1989.
]
- [9 W. Weiss και J. Buchinger, «Solar Drying,» Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, 2009.
]
- [1 M. Sontakke και S. Salve, «Solar Drying Technologies: A review,» *International Refereed Journal of
0] Engineering and Science (IRJES)*, τόμ. 4, αρ. 4, pp. 29-35, 2015.
- [1 J. Duffie και B. W, Solar Energy Thermal Processes, New York: John Wiley & Sons, 1980.
1]
- [1 A. Στέγγου-Σαγιά, Συσκευές και εγκαταστάσεις Θερμικών Διεργασιών, Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ, 2010.
2]
- [1 W. McCabe και S. J.C, Unit Operations of Chemical Engineering (3rd Ed), New York: McGraw Hill,
3] 1976.

- [1 I. Kemp, «Modern Drying Technology Volume 4: Energy Savings, First Edition,» Wiley-VCH , London, 4] 2012.
- [1 W. Hansen, «Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste,» *J. Am. Ceram. Soc.*, τόμ. 70, 5] αρ. 5, pp. 323-28, 1987.
- [1 X. Παρασκευά και Ν. Σπαρτινός, «Διάχυση Υγρών και Αερίων,» Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα. 6]
- [1 Θ. Καραπάντσιος, «Παράδοση: Ξήρανση Κεφάλαιο 9,» 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: 7] <http://www.chemeng.ntua.gr/courses/trbio/files/KEF9%20%20Drying.pdf>. [Πρόσβαση 1 Ιούλιος 2016].
- [1 T. Sherwood, *Application of Theoretical Diffusion equations to Drying of Solids*, Transylvania: AIChE, 8] 1929.
- [1 A. Newman, *The Drying of Porous Solids: Diffusion and Surface emission equation*, Transylvania: 9] AIChE, 1931.
- [2 P. N.G, C. Law και S. Tasirin, «Thin layer Method Analysis of Spouted Bed Dried, Malaysian puddy- 0] Characteristic Drying Curves,» *Journal of Food Process Engineering*, τόμ. 29, αρ. 4, pp. 414-428, 2006.
- [2 D. Or και M. Tuller, «CAPILLARITY,» 13 September 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: 1] http://www.engr.uconn.edu/enviro/phys/pdf/vadose_pdf/Capillarity_revised01.pdf. [Πρόσβαση 25 may 2016].
- [2 M. Velasco, E. Silletta, C. Gomez, M. Strumia, S. Stapf, G. Monti, C. Mattea και R. Acosta, «Spatially 2] Resolved Monitoring of Drying of Hierarchical Porous Organic Networks,» *Langmuir*, τόμ. 32, αρ. 8, February 2016.
- [2 Σ. Γιαννιώτης, «Βασικές Διεργασίες Μηχανικής Τροφίμων-Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών,» 3] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://docplayer.gr/5288029-Vasikes-diergasies-mihanikis-trofimon.html>. [Πρόσβαση 29 Απρίλη 2016].
- [2 J. Brennan και A. Grandison, *Food Processing Handbook, 2nd Edition, Volume 2*, Wiley-VCH, 2011. 4]
- [2 T. Varzakas και C. Tzia, *Food Engineer Handbook*, CRC Press, 2014. 5]
- [2 N. Sinha και Y. Hui, *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing*, London: Blackwell Publishing 6] Ltd, 2011.
- [2 A. Mersmann, M. Kind και J. Stichlmair, *Thermal Separation Technology*, Heidelberg: Springer, 2011. 7]

- [2 A. Ζουμπούλης, Θ. Καραπάντσιος και Μ. Π, Στοιχεία Φυσικών Διεργασιών, Αθήνα : Τζιόλα, 2009.
8]
- [2 Θ. Καραπάντσιος, «Διάλεξη: Φυσικές Διεργασίες - Ξήρανση,» 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available:
9] http://eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/dry/ch08_xiransi_A4.pdf. [Πρόσβαση 1 Ιούλιος 2016].
- [3 U. Shivhare, S. Arora, J. Ahmed και V. Raghavan, «Moisture sorption isotherms for mushrooms,»
0] *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, τόμ. 37, αρ. 1, pp. 133-7, 2004.
- [3 A. Mujumdar, «Industrial Transfer Processes,» 2011/12. [Ηλεκτρονικό]. Available:
1] http://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/ME5202_2011_Mujumdar.pdf.
[Πρόσβαση 17 March 2016].
- [3 V. Plentey, Focus on Engineering Research and Developments, New York: Nova Science Publishers,
2] 2007.
- [3 A. Levy και H. Kalman, Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids, London: Elsevier,
3] 2001.
- [3 R. Keey, Introduction to Industrial Drying Operations (1st Ed.), New York: Pergammon Press, 1978.
4]
- [3 S. Saleh, «CFD Simulations of a Co-current Spray Dryer,» *World Academy of Science, Engineering
5] and Technology*, τόμ. 4, αρ. 2, 13 February 2010.
- [3 C. Perry και C. Chilton, Chemical Engineer's Handbook (5th Ed), New York: McGraw Hill, 1973.
6]
- [3 M. Zhang, J. Tang, A. Mujumdar και S. Wang, «Trends in Microwave-related Drying of Fruits and
7] Vegetables,» *Trends in Food Science & Technology*, τόμ. 17, αρ. 1, pp. 524-534, 2006.
- [3 A. Kouchakzade και S. Shafeei, «Modeling of microwave-convective drying of pistachios,» *Energy
8] Conversion and Management*, τόμ. 5, αρ. 1, pp. 2012-2015, 2010.
- [3 F. Dittman, «How to Classify a Drying Process,» *Chemical Engineering*, pp. 106-108, 17 January 1977.
9]
- [4 T. Funebo και T. Ohlsson, «Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom,» *Journal of
0] Food Engineering*, τόμ. 38, αρ. 3, pp. 353-367, 1998.
- [4 K. Chua και S. Chou, «Low Cost Drying Methods for Developing Countries,» *Trends in Food Science &
1] Technology*, τόμ. 14, pp. 519-528, 2003.
- [4 D. Barrett και L. Somojyi, Processing Fruits Science and Technology (2nd Ed), London: Taylor &
2] Francis , 2004.

- [4 W. Rodel, «Water activity and its measurement in food,» σε *Instrumentation and sensors for the*
3] *Food Industry*, Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2001, pp. 453-462.
- [4 L. H. Schmidt, «Guide to handling of tropical and subtropical forest seed. Danida Forest Seed
4] Centre,» University of Copenhagen, Copenhagen, 2000.
- [4 McCormack, «Principles and practices of seed harvesting, processing and storage: an organic seed
5] production manual for seed growers in the Mid-Atlantic and Southern U.S Ph.D.,» 2004.
[Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5598ea235dbbbd51138b45aa&assetKey=AS%3A273807267303428%401442292147645>. [Πρόσβαση 1 July 2016].
- [4 F. Stubsgaard και K. Poulsen, «Seed Moisture and Drying Principles LECTURE NOTE C-5 - JULY 1995,»
6] University of Copenhagen, Copenhagen, 1995.
- [4 E. Roberts, *Viability of Seeds*, London: Chapman & Hall, 1972.
7]
- [4 E. Mirzaee, S. Rafiee και A. Keyhani, «). Evaluation and Selection of Thin-layer Models for Drying
8] Kinetics of Apricot,» *CIGR Journal*, τόμ. 12, αρ. 2, pp. 111-116, 2010.
- [4 J. C. Chu, A. Lane και C. D., *Evaporation of Liquids into their Superheated Vapors*, Ind.& Eng.
9] Chemistry, 1953.
- [5 B. Ωραιοπούλου, «Διάλεξη 2: Τρόφιμα,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available:
0] <http://www.chemeng.ntua.gr/courses/trbio/?page=material>. [Πρόσβαση 1 Ιούλιος 2016].
- [5 D. Parikh, «Solid Drying: Basics and Applications,» DPharma Group Inc. , 1 April 2014. [Ηλεκτρονικό].
1] Available: <http://www.chemengonline.com/solids-drying-basics-and-applications/?printmode=1>.
[Πρόσβαση 1 July 2016].
- [5 K. Jayaraman και D. Das Gupta, «Drying of Foods and Vegetables,» σε *Mujmdar A.S. Handbook of*
2] *Industrial Drying (3rd Ed)*, Taylor & Francis, 2006, pp. 606-633.
- [5 C. Baker, *Industrial Drying of Foods*, London: Blackie Academic & Professional, 1997.
3]
- [5 B. Dutta, *Principles of Mass Transfer and Separation Process*, New Delhi: Prentice-Hall of India,
4] 2007.
- [5 A. Mujumdar, «Drying: Principles and Practice,» σε *International Workshop on Drying of Food and*,
5] Bangkok, 2011.
- [5 Y. Wang, «Energy-efficient Industrial Dryers of Berries,» University of Gavle, Gavle, 2013.
6]

- [5] I. T. D. Group, «Tray Dryers,» 28 February 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available:
7] http://library.uniteddiversity.coop/Food/Food_Production_and_Processing/tray_dryers.pdf.
[Πρόσβαση 2 July 2016].
- [5] A. Motevali, S. Minaei, M. Khoshtaghaza και H. Amirnejat, «Comparison of Energy Consumption and
8] Specific Energy Requirements of different methods of Drying Mushroom slices.,» *Elsevier*, τόμ. 36,
αρ. 2011, p. 6433e6441, 2011.
- [5] L. Gothandapani, K. Parvathi και J. Kennedy, «Evaluation of different Methods of Drying on the
9] Quality of Oyster Mushroom,» *Drying Technology*, τόμ. 15, αρ. 6-8, pp. 1995-2004, 1997.
- [6] M. Aishah και W. Rosli, «Effect of Different Drying Techniques on the Nutritional Values of Oyster
0] Mushroom,» *Sains Malaysiana*, τόμ. 42, αρ. 7, pp. 937 - 941, 2013.
- [6] K. Manoj, S. Anupama, Deepti και Vipul, «Effect of Drying Conditions on Mushroom Quality,»
1] *Journal*, τόμ. 4, αρ. 1, pp. 90-98, 2009.
- [6] M. Komanowsky, F. Talley και R. Eskew, « Air drying of cultivated mushrooms,» *Food technology*,
2] τόμ. 24, pp. 1020-1024, 1970.
- [6] M. Riva, A. Schiraldi και L. F. Cesare, «Drying of Agaricus bisporus mushrooms by,» *Lebensmittel-*
3] *Wissenschaft und-Technologie*, τόμ. 24, pp. 479-483, 1991.
- [6] S. Yapar, S. Helvacı και S. Peker, « Drying Behavior of Mushroom Slices,» *Drying*, τόμ. 8, αρ. 8, pp.
4] 77-79, 1990.
- [6] S. F. Gurtas και O. Evranuz, «Low temeperature mushroom drying with desiccant dehumidifiers,»
5] *Drying Technology*, τόμ. 18, p. 433–445, 2000.
- [6] H. Darvishi, H. Adel και G. Najafi, «Far-Infrared Drying Characteristics of Mushroom Slices,»
6] *Chemical Product and Process Modeling*, τόμ. 8, αρ. 2, 2013 .
- [6] B. Xia και D. Sun, «Applications of computational fluid dynamics,» *Computers and Electronics in*
7] *Agriculture*, τόμ. 34, αρ. 2002, p. 5–24, 2002.