



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

**ΞΗΡΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ**  
**ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**  
**ΖΕΡΒΟΣ ΑΡΘΟΥΡΟΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013**

## Ευχαριστίες

Με αφορμή την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Αρθούρο Ζερβό για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Κάραλη για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξή του.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ", το οποίο διαθέτει πλούσια ερευνητική δραστηριότητα και εμπειρία στον τομέα εφαρμογών της θερμικής ηλιακής ενέργειας γενικά, καθώς και μακροχρόνια πείρα στην ξήρανση γεωργικών προϊόντων μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής πιλοτικών και πειραματικών ξηραντηρίων.

Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Προϊστάμενο του Εργαστηρίου, Δρ. Βασίλη Μπελεσιώτη, για την συμβολή του στον προσδιορισμό ενός τόσο πρωτότυπου θέματος και την μοναδική ευκαιρία που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την παρούσα διπλωματική εργασία στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου.

Επιπλέον θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Δρ. Γεώργιο Πανάρα, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε. Η καθοδήγηση και η συμβολή του ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου για τον Δρ. Σταμάτη Μπαμπαλή για τις καίριες παρατηρήσεις του γύρω από το αντικείμενο της ξήρανσης, καθώς και σε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου για την συνεργασία, την καλή τους διάθεση και συναδελφικότητα.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

Θεόδωρος Διαμαντόπουλος

## Περίληψη

Οι συμβατικές μέθοδοι ξήρανσης δεν ανταποκρίνονται για μια σειρά γεωργικών προϊόντων τα οποία εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία ως προς τις συνθήκες ξήρανσής τους. Τα θερμοευαίσθητα αυτά προϊόντα ξηραίνονται σε ειδικά κατασκευασμένα ξηραντήρια, των οποίων το υψηλό κόστος τους δεν επιτρέπει την χρήση τους από μικρούς και μεσαίους παραγωγούς που απαρτίζουν και τη μεγαλύτερη μερίδα παραγωγής τους. Για τον παραπάνω λόγο το ενδιαφέρον στρέφεται στην κατασκευή διατάξεων χαμηλού κόστους οι οποίες θα παράγουν ανώτερης ποιότητας τελικό αποξηραμένο προϊόν.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η εφαρμογή στέρεων αφυγραντικών μέσων στην διεργασία της ξήρανσης θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων δίνοντας έμφαση στην περίπτωση των φαρμακευτικών και αρωματικών φυτών. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων που εξασφαλίζουν την ποιοτική ξήρανση των προϊόντων αυτών, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που επιφέρει η χρήση των αφυγραντικών μέσων στην ξήρανσή τους.

Αρχικά παρουσιάζονται τα μεγέθη και οι κύριες εξισώσεις βάσει των οποίων μοντελοποιείται η διεργασία της ξήρανσης στα γεωργικά προϊόντα. Ακολουθεί μία βιβλιογραφική διερεύνηση στην ξήρανση τόσο των συνήθων αλλά κυρίως των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων η οποία επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των συνθηκών καθώς και των συνηθέστερων μεθόδων ξήρανσης των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων.

Εν συνεχεία, αφού παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι τύποι ξηραντηρίων που βρίσκουν εφαρμογή στην ξήρανση των γεωργικών προϊόντων, διερευνάται η χρήση των αφυγραντικών μέσων στην διεργασία της ξήρανσης έτσι όπως αυτή συναντάται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Στη βάση της υφιστάμενης εμπειρίας, όπως αποτυπώθηκε από τη βιβλιογραφική διερεύνηση, αλλά και των δυνατοτήτων των συσκευών αφύγρανσης, επιχειρείται ο σχεδιασμός ενός συμβατικού και ενός ξηραντηρίου με συσκευή αφύγρανσης με στόχο την θεωρητική διερεύνηση και την σύγκριση των δύο ξηραντηρίων στην περίπτωση της ξήρανσης θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων. Αρχικά εξετάζεται η ξήρανση ενός αρωματικού φυτού, της μέντας και στη συνέχεια ενός θερμοευαίσθητου γεωργικού προϊόντος, του σπόρου της ελαιοκράμβης.

Για τη διερεύνηση της απόδοσης των ξηραντηρίων, αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο. Το μοντέλο ενσωματώνει κατάλληλες προσεγγίσεις για τα εμπλεκόμενα υποσυστήματα, συμπεριλαμβάνοντας προσέγγιση για την ξήρανση του υπό εξέταση προϊόντος, ενώ για την περίπτωση του

ξηραντηρίου με αφυγραντικά μέσα, υιοθετείται κατάλληλη προσέγγιση για τη λειτουργία του τροχού αφύγρανσης.

Τέλος εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης θερμικής ηλιακής ενέργειας στην περίπτωση της ξήρανσης με αφυγραντικά μέσα, μέσω της διερεύνησης χρήσης συλλεκτών αέρα στο υπό εξέταση ξηραντήριο.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την προηγούμενη ανάλυση, εστιάζοντας στην μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη της χρήσης αφυγραντικών μέσων στην ξήρανση των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων.

## **Abstract**

Conventional drying methods do not conform to a variety of agricultural products which exhibit high sensitivity to the drying conditions. These heat-sensitive products are dried in specially designed dryers, whose high cost does not allow their use by small and medium-sized producers which form the largest portion of their production. For all the above reasons, the interest focuses on the manufacturing of low cost dryers which will deliver dried product of high final quality.

This thesis examines the implementation of solid desiccant media in the process of drying heat-sensitive agricultural products, putting emphasis on the case of medicinal and aromatic plants. The aim of this study is to investigate the parameters which ensure the qualitative drying of these products, as well as the effect of the use of dehumidifying means in their drying.

Initially, the parameters and the main equations for the modeling of agricultural products drying are presented. Then, a literature survey in the drying of both ordinary but mainly heat-sensitive agricultural products takes place; the survey focuses on the identification of the conditions and the most common methods applied for the drying of the respective products.

Thereafter, the most common types of dryers that find application in drying agricultural products are presented, while also, on the basis of the relevant literature, the use of desiccant media in the drying process is investigated.

On the basis of the existing experience, as reflected through the literature survey, and the capabilities of the dehumidification devices, the design of a conventional dryer, as well as of a dryer with dehumidification device is implemented, aiming at the theoretical investigation and comparison of the two set-ups with regard to the case of heat-sensitive agricultural products drying. Two case studies are presented; this of an aromatic plant, the peppermint, as well as that of a heat-sensitive agricultural product, the seed of canola.

In order to investigate the efficiency of these dryers, a suitable model is developed. The model integrates appropriate approaches for the involved subsystems, including an approach for the drying of the product, while for the case of drying with desiccant media, a suitable approach for the operation of the dehumidification wheel is adopted.

Finally, the potential of solar thermal energy utilization in the case of drying with desiccant media is examined, through the investigation of the use of air collectors on the relevant dryer.

In the last part of the thesis, the conclusions of the previous analysis are presented, focusing on future research and the development of the use of desiccant media in the drying of heat-sensitive agricultural products.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Σύμβολα</b> .....	<b>9</b>
<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης</b> .....	<b>13</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
1.2 Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ .....	13
1.3 ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΟΦΗΣΗΣ .....	13
1.3.1 Δραστικότητα υγρασίας .....	13
1.3.2 Μαθηματικές εκφράσεις των ισόθερμων καμπύλων ρόφησης- εκρόφησης .....	15
1.4 ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ .....	16
1.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ .....	18
1.5.1 Εισαγωγή .....	18
1.5.2 Μοντέλα με μοριακή διάχυση.....	18
1.5.2.1 Γενικά .....	18
1.5.2.2 Πλάκα απείρου μήκους.....	19
1.5.2.3 Προϊόν σφαιρικής γεωμετρίας .....	20
1.5.3 Ημιεμπειρικά μοντέλα .....	21
<b>2 Ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων</b> .....	<b>23</b>
2.1 ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΥΝΗΘΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ.....	23
2.1.1 Εισαγωγή .....	23
2.1.2 Ξήρανση Σταφίδας.....	23
2.1.2.1 Μέθοδοι ξήρανσης.....	23
2.1.2.2 Συνθήκες ξήρανσης.....	25
2.1.3 Ξήρανση σύκων .....	25
2.2 ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΑ ΦΥΤΑ .....	26
2.2.1 Εισαγωγή .....	26
2.2.2 Ξήρανση Αρωματικών και Φαρμακευτικών Φυτών .....	26
2.2.3 Προϋποθέσεις κατά την ξήρανση .....	27
2.2.4 Μέγιστη τελική περιεκτικότητα σε υγρασία .....	28
2.2.5 Ξήρανση σε μικρές και μεσαίες παραγωγές.....	29
2.2.5.1 Ηλιακή ξήρανση.....	29
2.2.5.2 Ξήρανση σε σκιερό μέρος.....	29
2.2.5.3 Ξήρανση σε βιομηχανική κλίμακα .....	30
2.2.6 Βιβλιογραφική Διερεύνηση στην Ξήρανση Αρωματικών και Φαρμακευτικών Φυτών.....	30
2.3 ΣΠΟΡΟΙ .....	31
2.3.1 Ξήρανση σπόρων.....	31
2.3.2 Συνθήκες ξήρανσης .....	32
2.3.3 Μέθοδοι ξήρανσης .....	32
<b>3 Τύποι ξηραντηρίων</b> .....	<b>33</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	33
3.2 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΑ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ .....	33
3.3 ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ.....	34
3.4 ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ ΘΑΛΑΜΩΝ ΜΕ ΔΙΣΚΟΥΣ.....	35
3.5 ΗΛΙΑΚΑ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ .....	36
3.6 ΛΥΟΦΙΛΙΩΣΗ (ΚΡΥΟΑΦΥΔΑΤΩΣΗ) .....	36
3.7 ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ .....	37

<b>4 Εφαρμογή αφυγραντικών υλικών στην ξήρανση .....</b>	<b>39</b>
4.1 ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ .....	39
4.2 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ .....	40
4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΣΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ .....	42
4.3.1 Εισαγωγή .....	42
4.3.2 Βιβλιογραφική Διερεύνηση.....	43
<b>5 Μελέτη περίπτωσης: Σχεδιασμός και μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου Μέντας .....</b>	<b>48</b>
5.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΞΗΡΑΝΣΗΣ .....	48
5.1.1 Εισαγωγή .....	48
5.1.2 Σχεδιασμός θαλάμου για την ξήρανση μέντας.....	48
5.1.3 Συνθήκες λειτουργίας.....	50
5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕΝΤΑΣ ΜΕ ΡΕΥΜΑ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ.....	50
5.2.1 Εισαγωγή .....	50
5.2.2 Υφιστάμενα μοντέλα στην ξήρανση μέντας με θερμό αέρα.....	51
5.2.3 Επιλογή Μοντέλου .....	52
5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ .....	56
5.3.1 Περιγραφή της διάταξης .....	56
5.3.2 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντηρίου .....	56
5.3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	60
5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ ...	63
5.4.1 Περιγραφή της διάταξης .....	63
5.4.2 Μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης. .....	64
5.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	68
5.4.4 Σύγκριση με την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου .....	69
<b>6 Μελέτη περίπτωσης: Σχεδιασμός και μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου Ελαιοκράμβης.....</b>	<b>71</b>
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
6.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ ΜΕ ΡΕΥΜΑ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ .....	71
6.2.1 Υφιστάμενα μοντέλα .....	71
6.2.2 Επιλογή Μοντέλου .....	72
6.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ .....	74
6.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΤΡΟΧΟ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ .....	76
6.4.1 Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς.....	76
6.4.2 Παραμετρική διερεύνηση της λειτουργίας του ξηραντηρίου με τη συσσκευή αφύγρανσης.....	80
6.4.2.1 Εισαγωγή.....	80
6.4.2.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_a$ .....	80
6.4.2.3 Μεταβολή της υγρασίας περιβάλλοντος $w_a$ .....	84
6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ .....	86
6.5.1 Χρόνος ξήρανσης .....	86
6.5.2 Απαιτούμενη ενέργεια .....	87
6.5.3 Συμπεράσματα από την εφαρμογή των δύο διατάξεων .....	89
<b>7 Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας στην ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με αφυγραντική διάταξη.....</b>	<b>90</b>
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	90



7.2	ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ.....	90
7.3	ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΙΑΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ .....	92
7.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	93
7.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ .....	98
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>99</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>103</b>

## Σύμβολα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα κύρια σύμβολα που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

$A$	Επιφάνεια	[m <sup>2</sup> ]
$a_w$	δραστικότητα υγρασίας	[-]
$c_p$	ειδική θερμοχωρητικότητα	[J/(kgK)]
$D_{ef}$	συντελεστής διάχυσης	[m <sup>2</sup> /s]
$F_1, F_2$	μεταβλητές συνδυασμένου δυναμικού	[-]
$G$	ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	[W/ m <sup>2</sup> ]
$h_g$	ειδική ενθαλπία εξατμίσεως νερού	[J/kg]
$\dot{m}$	μάζα ρευστού ανά χρονικό βήμα	[kg]
$MR$	αδιάστατος λόγος υγρασίας	[-]
$N_p$	αριθμός συλλεκτών σε παράλληλη συνδεσμολογία	[-]
$\eta_{hx}$	βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας	[-]
$\eta_o$	συντελεστής οπτικής απόδοσης ηλιακού συλλέκτη	[-]
$\eta_{sol}$	βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη	[-]
$P$	ισχύς	[kW]
$Q$	θερμική ενέργεια	[J]
$SEC$	ειδική κατανάλωση ενέργειας	[MJ/kg]
$T$	Θερμοκρασία	[°C]
$U$	συντελεστής απωλειών συλλέκτη	[W/( m <sup>2</sup> K)]

$w$	απόλυτη υγρασία	[g/kg]
$X$	περιεκτικότητα σε υγρασία (ξ.β.)	[-]
$X_e$	υγρασία ισορροπίας (ξ.β.)	[-]
$X_o$	αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία (ξ.β.)	[-]
$\Delta T$	θερμοκρασιακή διαφορά	[K]
$\Delta \tau$	χρονικό βήμα	[sec]

### Δείκτες

$\alpha$	Περιβάλλον
$air$	Αέρας
$dr$	υποδηλώνει τις συνθήκες του ρεύματος ξήρανσης (θερμοκρασίας ή υγρασίας)
$h$	θερμική πηγή
$i$	$i=1,2,7$ , υποδηλώνει την αντίστοιχη συνάρτηση δυναμικού $F_i$
$in$	θέση εισόδου σε συσκευή του συστήματος
$out$	θέση εξόδου σε συσκευή του συστήματος
$reg$	Αναγέννηση
$sf$	ηλιακό πεδίο
$tot$	υποδηλώνει συνολική ποσότητα (μάζας ή ενέργειας)
$w$	Νερό

## Εισαγωγή

Η επιτυχής διεργασία αφαίρεσης, μέχρι ενός επιθυμητού ορίου, της περιεχόμενης υγρασίας ενός γεωργικού προϊόντος πραγματοποιείται μέσω της ξήρανσης. Η διεργασία της ξήρανσης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας μεταποίησης των γεωργικών προϊόντων, καθώς εξασφαλίζει την συντήρησή τους. Η απομάκρυνση της υγρασίας από το νωπό προϊόν συμβάλλει στην αποφυγή της ανάπτυξης και προσβολής του από μικροοργανισμούς, επιτρέποντας την αποθήκευσή του για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Η ξήρανση είναι μία θερμική κατά βάση διεργασία η οποία χαρακτηρίζεται από την ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας μεταξύ του νωπού προϊόντος και του μέσου ξήρανσης. Στην περίπτωση των γεωργικών προϊόντων το μέσο ξήρανσης είναι ο αέρας, ο οποίος προθερμαίνεται προ της εισόδου στον θάλαμο ξήρανσης με σκοπό εν συνεχεία, την αφαίρεση της επιθυμητής ποσότητας υγρασίας από το προϊόν έτσι ώστε να καταστεί ασφαλής η αποθήκευσή του. Οι συνθήκες ξήρανσης δηλαδή η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης αποτελούν τις παραμέτρους οι οποίες καθορίζουν την διάρκεια της διεργασίας αλλά και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Μια μεγάλη κατηγορία γεωργικών προϊόντων όπως τα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά, οι σπόροι κ.α. εμφανίζουν περιορισμούς στην ξήρανσή τους σε σχέση με τα συνήθη προς ξήρανση γεωργικά προϊόντα. Τα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά που ευδοκιμούν στον ελλαδικό χώρο εμφανίζουν μοναδικά ποιοτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα αντίστοιχα καλλιεργούμενα σε άλλες χώρες, γεγονός που επαληθεύεται από την όλο και αυξανόμενη εξαγωγή των προϊόντων αυτών στην Ευρώπη αλλά και στις ΗΠΑ. Το μεγαλύτερο όμως μέρος της παραγωγής τους συντελείται από μικρούς και μεσαίους παραγωγούς όπου το υψηλό κόστος των αποξηραντών που ειδικεύονται σε θερμοευαίσθητα προϊόντα, οδηγεί στην χρησιμοποίηση συμβατικών μεθόδων ξήρανσης, οι οποίες υποβαθμίζουν το τελικό προϊόν. Η ανάπτυξη διατάξεων με χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργικό κόστος, που να αποδίδουν ανώτερης ποιότητας τελικά προϊόντα θα συντελέσει στην τόνωση της ανταγωνιστικότητας σε έναν πολλά υποσχόμενο κλάδο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων, δίνοντας έμφαση στην ξήρανση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών με χρήση αφυγραντικών μέσων. Αν και στη σχετική βιβλιογραφία έχει διερευνηθεί με θετικά αποτελέσματα η χρήση των αφυγραντικών μέσων σε εφαρμογές όπως ο κλιματισμός, η χρήση τους στην ξήρανση και ειδικότερα στην ξήρανση

θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων αποτελεί ένα αντικείμενο τεχνολογικής εφαρμογής το οποίο βρίσκεται σε πρωτόλειο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.

# 1 Μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης

## 1.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές προσεγγίσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία για τη μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης.

## 1.2 Η διεργασία της ξήρανσης

Η διεργασία της ξήρανσης αναφέρεται στην αφαίρεση της περιεχόμενης υγρασίας από ένα στέρεο μέσο. Η επιτυχία της διεργασίας εξαρτάται από την ποιότητα του τελικού προϊόντος η οποία εκτιμάται από πολλές και διαφορετικές παραμέτρους. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι κυριότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την ποιοτική αξιολόγηση καθώς και για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του στέρεου μέσου στη διεργασία της ξήρανσης.

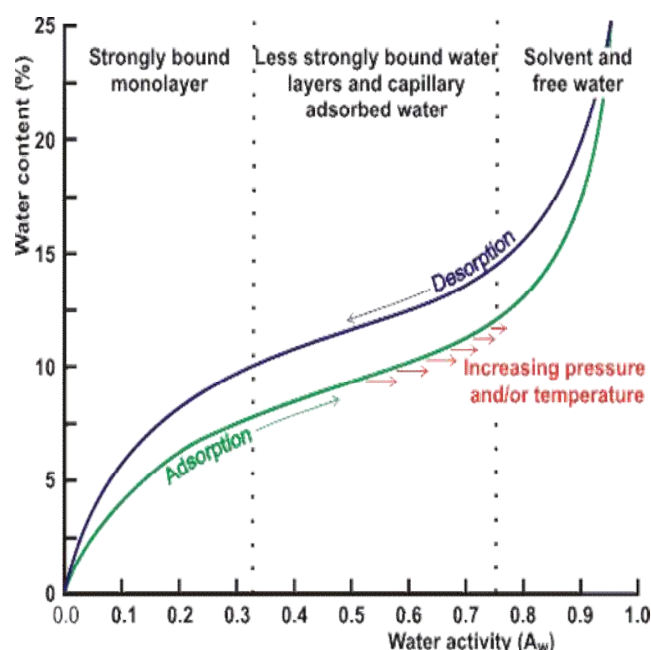
## 1.3 Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης

### 1.3.1 Δραστικότητα υγρασίας

Οι ισόθερμες καμπύλες ρόφησης είναι οι καμπύλες που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ένα συγκεκριμένο προϊόν προσλαμβάνει ή αποβάλλει την περιεχόμενη υγρασία στο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Οι ισόθερμες καμπύλες προσδιορίζονται όταν η υγρασία του υλικού βρίσκεται σε ισορροπία με τους υδρατμούς του αέρα ξήρανσης. Αν ένα προϊόν ξηραίνεται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα υπό σταθερή θερμοκρασία, η περιεχόμενη υγρασία του σταθεροποιείται σε ένα σημείο που ονομάζεται σημείο ισορροπίας της υγρασίας. Στο σημείο αυτό η υγρασία της επιφάνειας του προϊόντος έχει ατμοποιηθεί τόσο όσο η πίεση ατμού του νερού να είναι ίση με την μερική πίεση του υδρατμού του αέρα για την επικρατούσα θερμοκρασία. Για διαφορετικές τιμές της σχετικής υγρασίας του αέρα ξήρανσης η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος "ισορροπεί" σε διαφορετικές τιμές. Τα σημεία ισορροπίας της υγρασίας  $X$  του υλικού σε σχέση με την σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης  $\Phi$  για σταθερή θερμοκρασία δίνονται με τη μορφή καμπύλων, των ισόθερμων καμπύλων ρόφησης. Στα τρόφιμα οι καμπύλες συσχετίζουν την περιεχόμενη υγρασία του τροφίμου με την δραστικότητα ή ενεργότητα του νερού του τροφίμου  $a_w$ . Η ενεργότητα του νερού του τροφίμου ορίζεται ως το κλάσμα της μερικής τάσης ατμών του νερού του τροφίμου  $p$  προς της μερική τάση ατμών του απιονισμένου νερού  $p_0$  στην ίδια θερμοκρασία και ισούται με

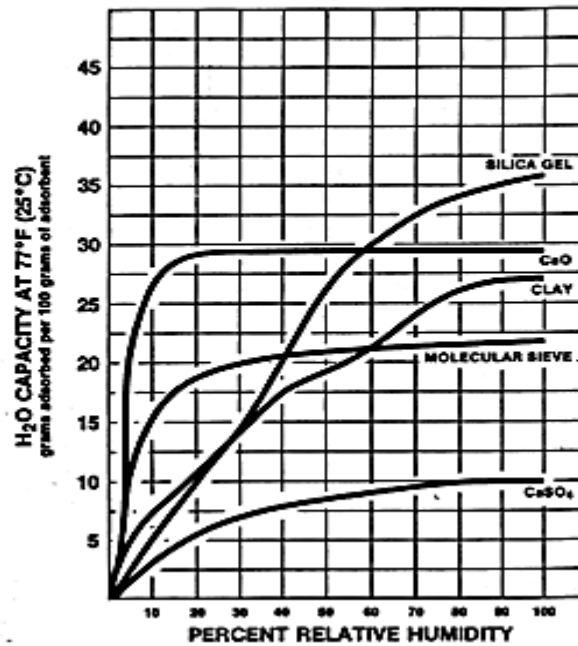
την σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης, διαιρεμένη δια 100, στο σημείο ισορροπίας. Η δραστικότητα σχετίζεται με τη χημική, μικροβιακή και ενζυμική σταθερότητα των τροφίμων και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συντήρηση συγκεκριμένων κατηγοριών τροφίμων. Από τις ισόθερμες καμπύλες εξακριβώνεται το σημείο ισορροπίας κατά την εκρόφηση της υγρασίας, στην πορεία της ξήρανσης, ή της προσρόφησης κατά την ύγρανση. Γνωρίζοντας την ισόθερμη καμπύλη ενός προϊόντος για την θερμοκρασία που θα αποθηκευτεί μπορούμε να προσδιορίσουμε την τελική περιεχόμενη υγρασία του για συγκεκριμένη τιμή της δραστικότητάς του κατά την οποία η αποθήκευσή του θα είναι ασφαλής. Οι ισόθερμες καμπύλες λοιπόν καθορίζουν το σημείο όπου τόσο από οικονομική άποψη όσο και από τις προκαθορισμένες ιδιότητες του τελικού προϊόντος, μπορεί ή πρέπει να σταματήσει η ξήρανση.

Σε αρκετές περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο σχ. 1.1, παρατηρείται υστέρηση στην καμπύλη προσρόφησης. Όταν η περιεχόμενη τελική υγρασία του αποξηραμένου προϊόντος είναι μικρότερη από την υγρασία ισορροπίας στις συνθήκες αποθήκευσης, το προϊόν θα απορροφήσει νερό από τον αέρα αυξάνοντας έτσι την περιεχόμενη υγρασία του. Αντίθετα η υγρασία του μειώνεται όταν η τιμή της είναι μεγαλύτερη από την υγρασία ισορροπίας. Με την βοήθεια των καμπύλων ρόφησης, αποφεύγουμε την ενυδάτωση του προϊόντος, εντός του θαλάμου αποθήκευσης, διατηρώντας την σχετική υγρασία του θαλάμου σε τέτοια επίπεδα έτσι ώστε η υγρασία ισορροπίας να είναι ίση με την τελική περιεχόμενη υγρασία του.



**Σχήμα 1.1** - Ισόθερμη ρόφησης-εκρόφησης τυπικού τροφίμου

Figure 2: Equilibrium capacity (H<sub>2</sub>O) of various adsorbents.



**Σχήμα 1.2** - Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης υδατμού στους 25 °C για διάφορα αφυγραντικά μέσα

Οι ισόθερμες καμπύλες ρόφησης βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλες κατηγορίες υγροσκοπικών υλικών πέρα των τροφίμων. Σε μία τέτοια κατηγορία ανήκουν και τα αφυγραντικά μέσα. Για την επιλογή του κατάλληλου αφυγραντικού μέσου είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστή η συμπεριφορά του υλικού για διάφορες τιμές της σχετικής του υγρασίας (σημείο κορεσμού κτλ.) πληροφορίες οι οποίες αντλούνται από την ισόθερμη καμπύλη ρόφησης του (σχ. 1.2).

### 1.3.2 Μαθηματικές εκφράσεις των ισόθερμων καμπύλων ρόφησης-εκρόφησης

Τα φαινόμενα της ρόφησης και της εκρόφησης μπορούν να περιγραφούν και θεωρητικά με μαθηματικές εξισώσεις (πιν. 1.1). Οι μαθηματικές αυτές εξισώσεις είτε έχουν κάποια θεωρητική βάση είτε είναι εμπειρικές. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η θεωρία BET. Η θεωρία BET θεωρεί ότι στην υγροσκοπική επιφάνεια των πόρων με την αύξηση της πίεσης σχηματίζονται στοιβάδες από προσροφούμενα μόρια νερού το πάχος των οποίων αυξάνει. Η θεωρία αποτελεί προέκταση για πολλαπλές στρώσεις μορίων της θεωρίας Langmuir η οποία αναφέρεται για μια μόνο στρώση μορίων (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη, 2009). Παραλλαγή της θεωρίας BET αποτελεί η εξίσωση GAB η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στα τρόφιμα. Άλλες χρησιμοποιούμενες εξισώσεις δεν έχουν το πλεονέκτημα της εξίσωσης GAB η οποία βασίζεται στη θεωρία του Langmuir και στο νόμο



του Raoult, καθώς είναι εμπειρικές. Οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Oswin, Peleg, Smith κα. οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στα τρόφιμα παρόλο που είναι εμπειρικές εμφανίζουν σε ορισμένες περιπτώσεις καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα από ότι η εξίσωση GAB (Andrade et al., 2010).

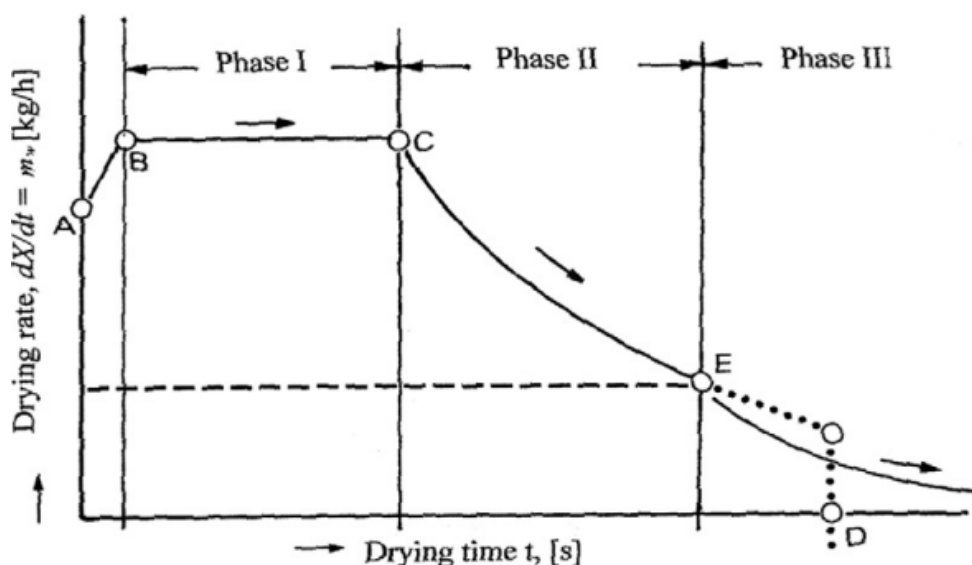
Όνομα Μοντέλου	Μαθηματική Έκφραση
BET	$Xe = \frac{(XMCa_w) [1 - (n+1)a_w^n + na_w^{n+1}]}{(1-a_w) [1 - (C-1)a_w - Ca_w^{n+1}]}$
GAB	$Xe = \frac{XMCKa_w}{(1-Ka_w) [1 - Ka_w + CKa_w]}$
Oswin	$Xe = A \left( \frac{a_w}{1-a_w} \right)^B$
Peleg	$Xe = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$
Smith	$Xe = K_1 + K_2 \ln(1-a_w)$

**Πίνακας 1.1** - Συνήθη μοντέλα και οι μαθηματικές τους εκφράσεις για την μοντελοποίηση των ισόθερμων καμπύλων απορρόφησης-εκρόφησης υγροσκοπικών υλικών

#### 1.4 Φάσεις της Ξήρανσης

Για την κατανόηση της φυσικής διεργασίας της ξήρανσης, δηλαδή των φαινομένων που διέπουν την απομάκρυνση της υγρασίας από ένα νωπό προϊόν, απαραίτητη είναι η γνώση της συμπεριφοράς του προϊόντος κατά τη διάρκεια της ξήρανσης κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η απομάκρυνση της υγρασίας σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή ο ρυθμός ξήρανσης, εμφανίζει διάφορα στάδια-φάσεις κατά τη διάρκεια της διεργασίας, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο όχι μόνο την κατανόηση της επίδρασης των συνθηκών ξήρανσης στο προϊόν αλλά και των μηχανισμών που συμβάλουν στην εξέλιξη του φαινομένου. Οι Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη (2009) διαχωρίζουν την ξήρανση σε τρεις ζώνες ή φάσεις (σχ. 1.3). Η φάση I είναι αυτή του σταθερού ρυθμού ξήρανσης. 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. Η

φάση II είναι αυτή του φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης όπου η επιφάνεια του υλικού είναι ακόρεστη σε υγρασία, δηλαδή η ποσότητα του νερού που ρέει από το εσωτερικό στην επιφάνεια του υλικού δεν επαρκεί για τον κορεσμό της, έχοντας ως αποτέλεσμα την σταδιακή ξήρανση της. Τέλος στη φάση III ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται σε σχέση με την φάση II και βαίνει μειούμενος ωστόσο η υγρασία του υλικού αποκτήσι την τιμή της υγρασίας ισορροπίας, για τις συγκεκριμένες συνθήκες ξήρανσης. Η φάση αυτή συναντάται κυρίως σε υγροσκοπικά υλικά.



**Σχήμα 1.3** - Μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης σε σχέση με το χρόνο και οι αντίστοιχες φάσεις ξήρανσης

Για τον υπολογισμό της διάρκειας της ξήρανσης καθίσταται απαραίτητη η γνώση, όπως είναι φυσικό, της μεταβολής του ρυθμού ξήρανσης, δηλαδή των φάσεων που εμφανίζονται, κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Ο ρυθμός ξήρανσης μας εξηγεί τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια της ξήρανσης άρα και των χρησιμοποιούμενων μοντέλων που θα εφαρμοστούν για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας του υλικού καθ όλη τη διάρκεια της ξήρανσης καθώς και του συνολικού χρόνου για την πραγματοποίηση της διεργασίας. Στην πράξη κατά την ξήρανση των περισσότερων υλικών εμφανίζεται αποκλειστικά η φάση II (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη, 2009).

## **1.5 Μοντέλα για τον προσδιορισμό της κινητικής της ξήρανσης**

### *1.5.1 Εισαγωγή*

Η διαδικασία της τοποθέτησης του νωπού προϊόντος σε λεπτά στρώματα για την ξήρανσή του ονομάζεται ξήρανση λεπτού στρώματος (thin layer drying). Στην πράξη επιδιώκεται η ξήρανση σε λεπτά στρώματα ώστε να μεγιστοποιείται η μεταφορά μάζας και θερμότητας μεταξύ του υλικού και του μέσου πρόσδοσης θερμότητας.

Ως κινητική της ξήρανσης χαρακτηρίζεται η συμπεριφορά του προς ξήρανση υλικού κατά την διάρκεια της διεργασίας, δηλαδή η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του σε σχέση με τον χρόνο. Η κινητική της ξήρανσης του προϊόντος, περιγράφεται από διάφορα μοντέλα ξήρανσης των οποίων οι συντελεστές τους εξαρτώνται από τις συνθήκες ξήρανσης και προσδιορίζονται πειραματικά.

Για τη δεύτερη φάση ξήρανσης, η οποία είναι και η κυρίαρχη για την πλειονότητα των γεωργικών προϊόντων, τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την περιγραφή της κινητικής της ξήρανσης ανήκουν κυρίως σε δύο κατηγορίες, τα ημιεμπειρικά και τα μοντέλα διάχυσης.

Τα ημιεμπειρικά μοντέλα και τα μοντέλα διάχυσης χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την εκτίμηση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας του ξηρατηρίου, τα πρώτα λόγω της ευκολίας υπολογισμού τους και τα δεύτερα λόγω της φυσικής ερμηνείας που παρέχουν.

### *1.5.2 Μοντέλα με μοριακή διάχυση*

#### *1.5.2.1 Γενικά*

Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν τον δεύτερο νόμο του Fick για τη διάχυση. Ανάλογα τη γεωμετρία του νωπού προϊόντος και του τρόπου τοποθέτησης του σε λεπτό στρώμα η διαφορική εξίσωση παίρνει διαφορετικές εκφράσεις οι οποίες με ορισμένες παραδοχές επιδέχονται αναλυτικές λύσεις. Οι παραδοχές αυτές είναι (Cranck, 1975):

- Αρχικά η περιεχόμενη υγρασία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην μάζα του προϊόντος.
- Η μεταφορά μάζας είναι συμμετρική ως προς τον άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας του λεπτού στρώματος ή του ίδιου του προϊόντος.

- Κατά την έναρξη της ξήρανσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία της επιφάνειας του προϊόντος ακαριαία λαμβάνει την τιμή της υγρασίας ισορροπίας.
- Η αντίσταση της επιφάνειας στη μεταφορά μάζας είναι αμελητέα σε σύγκριση με την εσωτερική αντίστασή του.
- Η μεταφορά μάζας περιγράφεται με τον μηχανισμό διάχυσης.
- Ο συντελεστής διάχυσης είναι σταθερός για τις συγκεκριμένες συνθήκες του αέρα ξήρανσης και η συρρίκνωση του προϊόντος θεωρείται αμελητέα.

#### 1.5.2.2 Πλάκα απείρου μήκους

Θεωρώντας μία πλάκα νωπού προϊόντος πάχους  $2L$  με ομοιόμορφα κατανομημένη αρχική υγρασία  $X_0$ , υπόκειται σε ξήρανση με σταθερές συνθήκες του αέρα ξήρανσης και περιγράφεται από το νόμο του Fick για τη διάχυση από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (1.1)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και συνοριακές συνθήκες:

Ομοιόμορφη αρχική υγρασία:  $X(z, 0) = X_0$

Περιεκτικότητα σε υγρασία στην επιφάνεια ίση με την υγρασία ισορροπίας:  
 $X(z, t) = X(L, t) = X_e$

Η μέση περιεχόμενη υγρασία ανά χρονική στιγμή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \int_0^L X(z, t) dz \quad (1.2)$$

Εισάγοντας τον αδιάστατο μέσο λόγο υγρασίας για τις παραπάνω αρχικές οριακές συνθήκες η εξίσωση (1.1) γίνεται:

$$MR = \frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(- (2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2}\right) \quad (1.3)$$

Σύμφωνα με τους Lopez et al. (2000) για μεγάλους χρόνους ξήρανσης χρησιμοποιείται μόνο ο πρώτος όρος της εξίσωσης 1.3 .

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2}\right) \quad (1.4)$$

Συνήθως από τα πειραματικά δεδομένα υπολογίζεται η κλίση ( $k_o$ ) που προκύπτει από την γραφική παράσταση της  $\ln(MR)$  με τον χρόνο (Doymaz, 2005).

$$k_o = \frac{-\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \quad (1.5)$$

### 1.5.2.3 Προϊόν σφαιρικής γεωμετρίας

Αντιστοίχως για προϊόντα σφαιρικής γεωμετρίας ακτίνας  $r_o$  η εξίσωση διάχυσης του Fick παίρνει την ακόλουθη μορφή (Brooker et al., 1974):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left( \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1.6)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και συνοριακές συνθήκες:

$$\text{Ομοιόμορφη αρχική υγρασία: } X(z, 0) = X_o$$

Περιεκτικότητα σε υγρασία στην επιφάνεια ίση με την υγρασία ισορροπίας:  
 $X(z, t) = X(L, t) = X_e$

Εισάγοντας τον αδιάστατο μέσο λόγο υγρασίας MR για τις παραπάνω οριακές συνθήκες και παραδοχές η εξίσωση (1.6) δίνει την ακόλουθη λύση (Cranck, 1975):

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp\left(-i^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2}\right) \quad (1.7)$$

όπου οι όροι της σειράς για  $i \geq 2$  αποκόβονται.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2}\right) \quad (1.8)$$

### 1.5.3 Ημιεμπειρικά μοντέλα

Τα ημιεμπειρικά μοντέλα είναι εξισώσεις εκθετικής μορφής οι οποίες περιλαμβάνουν ορισμένες σταθερές. Οι σταθερές αυτές περιέχουν όλοι την πληροφορία της επίδρασης των συνθηκών ξήρανσης στο προϊόν καθώς και την συμπεριφορά του κατά την εξέλιξη του φαινομένου χρονικά.

Πρώτος ο Lewis (1921) υπέθεσε ότι ο ρυθμός μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας σε σχέση με το χρόνο είναι ανάλογος με την διαφορά της μέσης περιεκτικότητας της υγρασίας του προϊόντος από την υγρασία στο σημείο ισορροπίας του. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται εκθετικό, λογαριθμικό ή σχέση Newton καθώς η σχέση είναι ανάλογη με τον νόμο ψύξης του Newton.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k(\bar{X} - X_e) \quad (1.9)$$

όπου:

- $k$  : σταθερά ξήρανσης σχετιζόμενη με της συνθήκες του αέρα ξήρανσης
- $\bar{X}$  : μέση περιεκτικότητα σε υγρασία (ξ.β.)
- $X_e$  : υγρασία ισορροπίας (ξ.β.)

Ολοκληρώνοντας την σχέση (1.9) προκύπτει η σχέση του Lewis:

$$MR = \exp(-kt) \quad (1.10)$$

Πέρα από την σχέση που πρότεινε ο Lewis, έχουν προταθεί και άλλες εξισώσεις από τις οποίες επιλέγεται αυτή που εμφανίζει την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα. Στη βιβλιογραφία οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον είναι οι ακόλουθες (Akcrinar, 2005; Kane, 2009):

Η εξίσωση του Page:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (1.11)$$

Η τροποποιημένη εξίσωση του Page:

$$MR = \exp(-(kt)^n) \quad (1.12)$$

Η εξίσωση των Henderson και Pabis:

$$MR = a \exp(-kt) \quad (1.13)$$

Η λογαριθμική εξίσωση:

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (1.14)$$

## 2 Ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων

### 2.1 Ξήρανση συνήθων γεωργικών προϊόντων

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Στην Ελλάδα η ξήρανση των γεωργικών προϊόντων πραγματοποιείται κυρίως σε φρούτα. Τα φρούτα που ξηραίνονται κατά κόρον είναι οι σταφίδες και τα σύκα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία γύρω από την ξήρανση των προϊόντων αυτών καθώς και οι συνήθεις μέθοδοι ξήρανσής τους.

#### 2.1.2 Ξήρανση Σταφίδας

##### 2.1.2.1 Μέθοδοι ξήρανσης

Οι συνηθέστερες μέθοδοι ξήρανσης της σταφίδας είναι :

- Ξήρανση με άμεση ηλιακή ακτινοβολία με χρήση φαινομένου θερμοκηπίου.



**Εικόνα 2.1** – Ξήρανση με άμεση ηλιακή ακτινοβολία, με χρήση πλαστικού σταφιδόπανου, μαύρης Κορινθιακής σταφίδας.

Πηγή: Belessiotis and Delyannis, 2011



- Ξήρανση με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.



**Εικόνα 2.2** – Ξήρανση σταφίδας με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.  
Πηγή: Belessiotis and Delyannis, 2011

- Ξήρανση σε σκιερό μέρος.



**Εικόνα 2.3** – Ξήρανση σταφίδας υπό σκιά. Πηγή: Belessiotis and Delyannis, 2011

- Ξήρανση με ρεύμα θερμού αέρα σε βιομηχανική κλίμακα.

Η ξήρανση με άμεση ηλιακή ακτινοβολία με χρήση φαινομένου θερμοκηπίου έγκειται στο κάλυμμα της απλωμένης σταφίδας με πλαστικά σταφιδόπανα. Όμως αν παρατηρήσουμε την περίοδο κατά την οποία γίνεται ο τρύγος και η ξήρανση της σταφίδας καταλήγουμε στο συμπέρασμα (Σταματόπουλος, 2006) ότι η χρήση του σταφιδόπανου έχει ως βασικό στόχο την προστασία από ξαφνική βροχή και όχι την επίτευξη πιο αποτελεσματικής ή γρηγορότερης ξήρανσης. Και αυτό γιατί, όταν οι

καιρικές συνθήκες το επιτρέπουν, οι παραγωγοί, δεν χρησιμοποιούν σταφιδόπανα, επιλέγοντας έτσι την άμεση ηλιακή ξήρανση, έναντι της άμεσης με φαινόμενο θερμοκηπίου.

Εξαιτίας των ειδικών χαρακτήρων που εμφανίζει η κάθε ποικιλία σταφίδας και του καθοριστικού ρόλου που παίζει στην ποιότητά της η μέθοδος ξήρανσης, αποφεύγεται η ξήρασή της με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Σχετικές εργασίες (Σταυρακάκης, 1986) έδειξαν ότι σταφίδες που παράγονται με έκθεση στον ήλιο, είναι ποιοτικά κατώτερες των αποξηραμένων με άλλες μεθόδους. Καθώς λοιπόν η σταφίδα είναι ένα σημαντικό εγχώριο αλλά και εξαγωγίμο προϊόν κρίνεται αναγκαία η ξήρανση της σε όσο το δυνατόν ελεγχόμενες συνθήκες τόσο σε βιομηχανική κλίμακα, αλλά και στο πλαίσιο μικρής ή μεσαίας παραγωγής μέσω ηλιακών ή άλλων ξηραντηρίων.

#### *2.1.2.2 Συνθήκες ξήρανσης*

Το ασφαλές περιεχόμενο υγρασίας για την συντήρηση της σταφίδας είναι της τάξης του 17 με 18 % σε ξηρή βάση. Στην άμεση ξήρανση των σταφίδων η μέγιστη θερμοκρασία είναι πάνω από 45 °C, σημειώνοντας πως χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν επαρκούν για ικανοποιητική ξήρανση. Η ξήρανση της σταφίδας σε μηχανικά ξηραντήρια γίνεται για υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που χρησιμοποιούνται στην άμεση ξήρανση, με μέγιστο επιτρεπόμενο όριο τους 77 °C (Sawhney et al., 2009).

#### *2.1.3 Ξήρανση σύκων*

Σύμφωνα με την Διεθνή Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), η Ελλάδα είναι η τέταρτη μεγαλύτερη παραγωγός χώρα σύκων παγκοσμίως. Η παραγωγή τους οργανώνεται γύρω από συνεταιρισμούς στους οποίους ανήκουν οι παραγωγοί. Οι συνεταιρισμοί αυτοί είναι υπεύθυνοι για την συσκευασία και την εμπορία του τελικού αποξηραμένου από τους παραγωγούς προϊόντος.

Η ξήρανση των σύκων όπως και των σταφίδων γίνεται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία στις λεγόμενες λιάστρες αφού πρώτα έχουν υποστεί λεύκανση και παραμένουν εκεί 9 – 12 ημέρες ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες μέχρι να ξεραθούν πάρα πολύ καλά. Το βράδυ πρέπει τα σύκα να σκεπάζονται γιατί υπάρχουν έντομα που προσβάλλουν τον αποξηραμένο καρπό και προκαλούν σοβαρές ζημιές (Αγροτικός Συνεταιρισμός Ταξιάρχη, 2008).



**Εικόνα 2.4** – Ξήρανση σύκων σε λιάστρες. Πηγή: Δούκα και Λυδάκης, 2011

## **2.2 Αρωματικά και Φαρμακευτικά Φυτά**

### *2.2.1 Εισαγωγή*

Στην ελληνική χλωρίδα συναντάται μία μεγάλη ποικιλία αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών. Χαρακτηριστικά αναφέρονται 500-600 είδη (Παπαναγιώτου κ.α., 2001; Σκρουμπής, 1998). Η καλλιέργειά τους καθίσταται ιδιαίτερος ελκυστική και ανταγωνιστική καθώς χάρη της μορφολογίας και του κλίματος του ελλαδικού χώρου επιτυγχάνονται ανώτερες ποιότητες παγκοσμίως. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο κρόκος ή σαφράν στην Κοζάνη και το δίκταμο στην Κρήτη. Τα σημαντικότερα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά που καλλιεργούνται σήμερα στην Ελλάδα είναι οκτώ: βασιλικός, γλυκάνισος, δίκταμος, κρόκος, μάραθος, μέντα, ρίγανη, τσάι του βουνού (Δόρδας, 2009).

### *2.2.2 Ξήρανση Αρωματικών και Φαρμακευτικών Φυτών*

Η μεταποίηση των αρωματικών φυτών καταλαμβάνει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην αλυσίδα παραγωγής λόγω της άμεσης επίδρασής της στην ποιότητα και στην ποσότητα των ενεργών συστατικών του τελικού προς πώληση προϊόντος (Silva, 2000). Για να προβεί το φυτικό υλικό σε οποιαδήποτε μεταποίησή του (απόσταξη, εκχύλιση) με σκοπό την δημιουργία ενός τελικού και συνάμα εμπορεύσιμου προϊόντος πρέπει να συντηρηθεί. Η συνηθέστερη μέθοδος συντήρησης είναι η ξήρανση ή αφυδάτωση. Η ξήρανση πέρα από την συντήρηση των φυτών, μπορεί να επιταχύνει την παραγωγή καθώς και να διευκολύνει την εμπορία τους με ταυτόχρονη μείωση του βάρους και του όγκου αυτών, έχοντας θετικά αποτελέσματα στην μεταφορά και στην αποθήκευσή τους (Calixto, 2000).

Για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω η ξήρανση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών πρέπει να γίνει γρήγορα και απαιτεί αφ' ενός μεν υψηλές θερμοκρασίες αφετέρου δε άμεση και αποτελεσματική απομάκρυνση των υδρατμών (Πολυσιού, 2008). Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των φαρμακευτικών και αρωματικών φυτών προσδιορίζονται από την περιεχόμενη υγρασία τους. Η ξήρανση συντελεί στην μείωση της περιεχόμενης υγρασίας του φυτού με σκοπό την εμπόδιση ενζυμικής και μικροβιακής δραστηριότητας παρατείνοντας κατά συνέπεια την διάρκεια ζωής του. Ωστόσο επειδή είναι μια θερμική διεργασία υπάρχουν απώλειες αιθέριων ελαίων και πτητικών ουσιών, καθώς και κίνδυνος αλλοίωσης θερμοευαίσθητων ουσιών που περιέχονται στο φυτό. Τα περισσότερα φαρμακευτικά φυτά ξηραίνονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 30 και 60 °C. Φυτά που περιέχουν αιθέρια έλαια ή πτητικές ουσίες πρέπει να ξηραίνονται σε θερμοκρασίες κάτω των 40 °C. Οι συνθήκες ξήρανσης θα πρέπει να προσδιορίζονται πειραματικά για κάθε τέτοιο φυτό, καθώς ο αργός ρυθμός ξήρανσης μπορεί να προκαλέσει επιβλαβή αποτελέσματα λόγω της δράσης ενζύμων, μυκήτων και βακτηρίων κατά την διάρκεια της ξήρανσης. Αντίθετα ταχύτατη ξήρανση προκαλεί σκλήρυνση των επιφανειακών κυττάρων εμποδίζοντας την εξάτμιση του νερού που βρίσκεται μέσα στο φυτό, υποβοηθώντας τις δράσεις των ενζύμων (Sharapin, 2000). Για το λόγο αυτό χρειάζονται κατάλληλοι ξηραντήρες στους οποίους να εξασφαλίζονται τέτοιες τιμές θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας του αέρα ξήρανσης έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη επίδραση στην ποιότητα των ενεργών συστατικών του φυτού.

### *2.2.3 Προϋποθέσεις κατά την ξήρανση*

Κατά την ξήρανση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις:

- Η τελική περιεχόμενη υγρασία του αποξηραμένου φυτού πρέπει να ταυτίζεται με την υγρασία ισορροπίας για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του αέρα κατά την αποθήκευσή του, καθώς πιθανή ενυδάτωση μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της δραστικότητάς του.
- Όσο το δυνατό ελάχιστη μείωση των ενεργών συστατικών, του χρώματος της γεύσης και του αρώματος.
- Η ύπαρξη μικροβίων θα πρέπει να είναι κάτω των προδιαγεγραμμένων ορίων, χωρίς την προσθήκη χημικών προσθέτων (Oztekin and Martinov, 2007).

#### 2.2.4 Μέγιστη τελική περιεκτικότητα σε υγρασία

Για διάφορα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά υπάρχει ένα ανώτατο όριο σε περιεχόμενη υγρασία που να πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις όπως βρίσκεται σε διάφορα βιβλία φαρμακολογίας. Ορισμένα παραδείγματα δίνονται στον πίνακα (πιν. 2.1) που ακολουθεί (Rocha et al., 2011) :

<b>ΕΙΔΟΣ</b>	<b>ΜΕΡΗ</b>	<b>W % υ.β.</b>
<i>Althaea officinalis</i> L.	Ρίζες	10
<i>Arnica montana</i> L.	Άνθη	10
<i>Calendula officinalis</i> L.	Άνθη	12
<i>Chamomilla recutita</i> [L.] Rauschert	Άνθη	12
<i>Coriandrum sativum</i> L.	Σπόροι	10
<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.	Σπόροι	8
<i>Hypericum perforatum</i> L.	Βότανο	10
<i>Levisticum officinale</i> Koch	Φύλλα	12
<i>Malva silvestris</i> L.	Φύλλα	12
<i>Melissa officinalis</i> L.	Φύλλα	10
<i>Mentha x piperita</i> L.	Φύλλα	11
<i>Plantago lanceolata</i> L.	Βότανο	10
<i>Valeriana officinalis</i> L.	Ρίζες	12
<i>Verbascum phlomoides</i> L.	Βότανο	12

**Πίνακας 2.1** - Μέγιστη τελική περιεχόμενη υγρασία (υ.β.) για διάφορα φαρμακευτικά φυτά. Πηγή: European Pharmacopoeia, 2005

Από τον πιν. 2.1 παρατηρούμε ότι για να διατηρηθεί το προϊόν μετά την ξήρανση η περιεχόμενη υγρασία του θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 8 και 12% (υ.β.).

## 2.2.5 Ξήρανση σε μικρές και μεσαίες παραγωγές

### 2.2.5.1 Ηλιακή ξήρανση

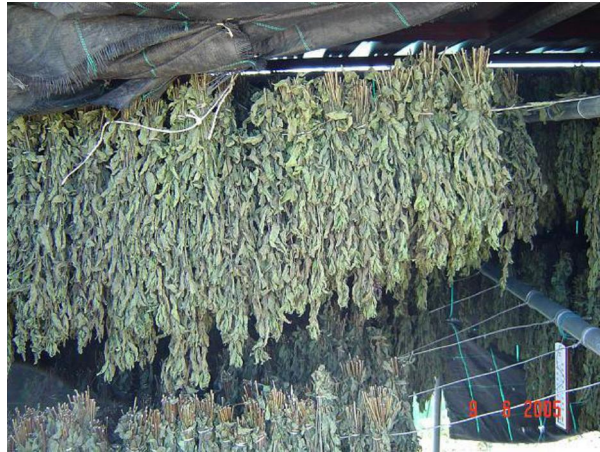
Η ηλιακή ξήρανση χρησιμοποιείται για μικρές και μεσαίες ποσότητες σοδειάς. Ο τρόπος ξήρανσης είναι συνήθως άμεσος δηλαδή με άμεση έκθεση του προϊόντος στην ηλιακή ακτινοβολία. Η παραδοσιακή αυτή μέθοδος ξήρανσης έχει αρκετά μειονεκτήματα εξ αιτίας της αδυναμίας της να πετύχει τα υψηλά πρότυπα ποιότητας που διέπουν κυρίως τα φαρμακευτικά φυτά. Εκτεταμένη ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί δυσμενή αποτελέσματα στην ποιότητα και οδηγεί σε απώλειες αιθέριων ελαίων αλλά και σε αλλαγές χρώματος στα υπό ξήρανση φυτά (Rocha et al., 2011). Συνεπώς παρά την απλότητα της διαδικασίας αυτής και του μηδενικού κόστους ξήρανσης, βλέποντας τις ευαισθησίες που έχουν τα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά συμπεραίνουμε πως χρειαζόμαστε μία μέθοδο ξήρανσης με όσο το δυνατόν ελεγχόμενες συνθήκες ξήρανσης.



**Εικόνα 2.5** - Ξήρανση αρωματικών φυτών στη Βουλγαρία. Πηγή: Πολυσιού, 2008

### 2.2.5.2 Ξήρανση σε σκιερό μέρος

Αποτελεί την συνηθέστερη μέθοδο ξήρανσης σε μικρή κλίμακα των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών. Ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας χρησιμοποίησης αυτής της μεθόδου είναι οι ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης μούχλας και εντόμων στη σοδειά λόγω της υψηλής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την περίοδο συγκομιδής.



**Εικόνα 2.6** - Ξήρανση λεβάντας σε υπόστεγο. Πηγή: Αναστόπουλος, 2012

#### 2.2.5.3 Ξήρανση σε βιομηχανική κλίμακα

Πέρα από τις μικρές και μεσαίες παραγωγές όπου η ξήρανση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών γίνεται με άμεση ηλιακή ξήρανση ή με τοποθέτηση των σε σκιερό μέρος, για μεγαλύτερες παραγωγές οι μέθοδοι ξήρανσης που συναντάμε είναι η ξήρανση με λυοφιλιωτές και με μικροκύματα. Παρόλα αυτά επειδή οι δύο παραπάνω μέθοδοι έχουν υψηλό κόστος εξετάζεται η εφαρμογή άλλων μεθόδων ξήρανσης όπως παραλλαγές ξηραντηρίων συναγωγής, πιλοτικές εφαρμογές ηλιακών ξηραντηρίων, ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους, περιστροφικά ξηραντήρια κτλ.

#### 2.2.6 Βιβλιογραφική Διερεύνηση στην Ξήρανση Αρωματικών και Φαρμακευτικών Φυτών.

Στη βιβλιογραφία συναντάμε μεμονωμένες περιπτώσεις ξήρανσης αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών μέσω πειραματικών διατάξεων οι οποίες δεν βρίσκουν εφαρμογή στην βιομηχανία. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό είτε των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης, με σκοπό την καλύτερη ποιότητα του αποξηραμένου φυτού, είτε τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του υπό τις εξετάζουσες συνθήκες ξήρανσης. Στόχος της έρευνας πάνω στην ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών είναι η εύρεση μεθόδων οι οποίες να επιφέρουν όσο το δυνατό καλύτερη ποιότητα τελικού προϊόντος, δεδομένης της ευαισθησίας του, σε συνδυασμό με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Οι Harbourne et al. (2009) υπολογίζουν τον ρυθμό ξήρανσης και το περιεχόμενο των χρήσιμων ουσιών για φαρμακευτική χρήση των φύλλων ενός συγκεκριμένου είδους ιτιάς (*Salix alba*) και σπειραίας (*Filipendula ulmaria*) για ξήρανση με λυοφιλίωση, για ξήρανση με αέρα σε δίσκους και σε κλίβανο για δύο θερμοκρασίες 30 και 70 °C. Καταλήγουν στο

συμπέρασμα ότι η ξήρανση με αέρα σε δίσκους στους 30 °C επιφέρει την λιγότερη απώλεια αιθέριων ελαίων.

Οι Belghit et al. (1999) ξηραίνουν μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής φασκόμηλο (*Salvia officinalis*) για διάφορες συνθήκες ξήρανσης. Για τις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης υπολογίζουν τον ρυθμό και την κινητική της ξήρανσης του φασκόμηλου με στόχο το σχεδιασμό συμβατικών και ηλιακών ξηραντηρίων.

Οι Akpınar et al. (2006) υπολογίζουν την καμπύλη ξήρανσης φύλλων μαϊντανού (*Petroselinum crispum* L.), για ξήρανση με εξαναγκασμένη συναγωγή, για συγκεκριμένες θερμοκρασίες αέρα, ταχύτητας 1 m/s, και για ξήρανση με άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Οι Argyropoulos et al. (2011) πραγματοποίησαν ξήρανση μελισσόχορτου (*Melissa officinalis* L.) με θερμό αέρα διαφόρων θερμοκρασιών και ειδικής υγρασίας κρατώντας σταθερή την ταχύτητά του. Η θερμοκρασία του αέρα κυμαινόταν από 30 έως 70 °C ενώ η ειδική του υγρασία από 15 έως 30 g/kg. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι παρόλο που η ξήρανση στους 30 °C διατηρεί το χρώμα και τις φαρμακευτικές ιδιότητες του φυτού, η ξήρανση είχε πολύ μεγάλη διάρκεια. Αντιθέτως υψηλές θερμοκρασίες ξήρανσης οδηγούν σε απώλεια των δραστικών ουσιών, του αιθέριου ελαίου καθώς και σε χρωματική υποβάθμιση του μελισσόχορτου. Η διερεύνηση κατέδειξε ότι για την διατήρηση των θερμοευαίσθητων ουσιών και του χρώματος του φυτού οι 40°C αποτελούν το ανώτατο θερμοκρασιακό όριο, ενώ η επίδραση της υγρασίας του αέρα στην ποιότητα του αποξηραμένου προϊόντος κρίθηκε αμελητέα.

## **2.3 Σπόροι**

### *2.3.1 Ξήρανση σπόρων*

Μία άλλη κατηγορία προϊόντων ξήρανσης που εμφανίζουν ευαισθησία στην ξήρανσή τους είναι οι σπόροι. Οι σπόροι πρέπει να ξηραίνονται σχετικά γρήγορα μετά τον καθαρισμό τους. Αργός ρυθμός ξήρανσης μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό μούχλας ή ακόμα και σε πρόωρη εμφάνιση βλαστού. Στην περίπτωση της άμεσης ξήρανσης με ηλιακή ακτινοβολία η θερμοκρασία δεν πρέπει να ξεπερνά τους 35 °C πόσο μάλλον και στην περίπτωση σπόρων σκούρου χρώματος οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε αυτόν τον τρόπο ξήρανσης. Αντιθέτως συνίσταται η ξήρανσή τους σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον όπως και στην περίπτωση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών (McCormack, 2004 ).



### 2.3.2 Συνθήκες ξήρανσης

Πέρα από την ιδιαιτερότητα που εμφανίζει το κάθε προϊόν προς ξήρανση ως προς την συμπεριφορά του για συγκεκριμένες συνθήκες ξήρανσης, οι κύριες παράμετροι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διεργασία αυτή ανεξάρτητα της φυσιολογίας του είναι η ταχύτητα και η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης. Σύμφωνα με τους Stubsgaard and Poulsen (1995), κατά τη φάση του μειούμενου ρυθμού ξήρανσης (φάση II), όταν η ταχύτητα του αέρα διπλασιάζεται τότε ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται περίπου στο μισό. Παρόλα αυτά υφίσταται ένα ανώτατο όριο στην τιμή της ταχύτητας καθώς ενδέχεται να προκληθεί διασκορπισμός του προϊόντος. Παρομοίως αύξηση κατά 10 °C της θερμοκρασίας του αέρα διπλασιάζει σχεδόν την ταχύτητα ξήρανσης. Η θερμοκρασιακή ανοχή των σπόρων διαφέρει από είδος σε είδος παρόλα αυτά για τους περισσότερους κοινούς σπόρους, ασφαλής θερμοκρασία ξήρανσης είναι στους 35 °C για περιεχόμενη υγρασία 15 % (υ.β.). Για μικρότερο ποσοστό τελικής περιεχόμενης υγρασίας, η θερμοκρασία ξήρανσης θα πρέπει να αυξηθεί στους 45 °C.

Ο Roberts (1972) αναφέρει μερικές ασφαλείς θερμοκρασίες ξήρανσης για τυπικά γεωργικά προϊόντα. Οι θερμοκρασίες αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με την επιθυμητή τελική τιμή της περιεχόμενης υγρασίας του προϊόντος σε υγρή βάση. Ειδικότερα, για δημητριακά όπως η βρώμη και το σιτάρι για τελική περιεχόμενη υγρασία 30 και 18 % η θερμοκρασία ξήρανσης θα πρέπει να αυξηθεί από 45 °C στους 65 °C. Αντιθέτως, αναφέρει ότι το μπιζέλι και το τριφύλλι εμφανίζουν περιορισμένη θερμοκρασιακή ανοχή. Πιο συγκεκριμένα για τελική περιεχόμενη υγρασία άνω των 20 %, η θερμοκρασία ξήρανσης περιορίζεται στους 28 °C, ενώ για μείωση της περιεχόμενης υγρασίας κατά 8 %, η θερμοκρασία θα πρέπει να αυξηθεί τους 38 °C.

### 2.3.3 Μέθοδοι ξήρανσης

Οι συνηθέστερες μέθοδοι ξήρανσης που συναντώνται για τους σπόρους είναι :

- Ξήρανση με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.
- Ξήρανση σε θαλάμους τύπου θερμοκηπίου.
- Ξήρανση σε σκιερό μέρος.
- Ηλιακά ξηραντήρια με εξαναγκασμένη κυκλοφορία.
- Ξήρανση με υπέρθερμο ατμό σε θάλαμο ρευστοποιημένης κλίνης, σε βιομηχανική κλίμακα.

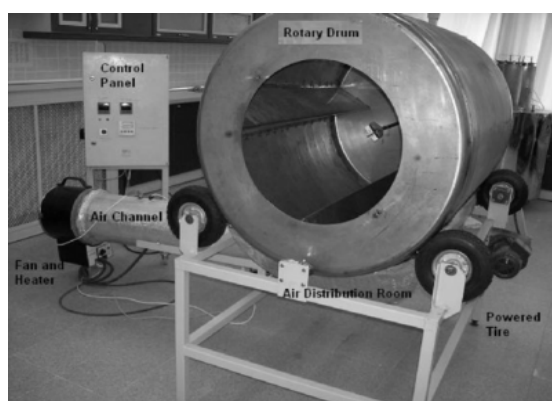
## 3 Τύποι Ξηραντηρίων

### 3.1 Εισαγωγή

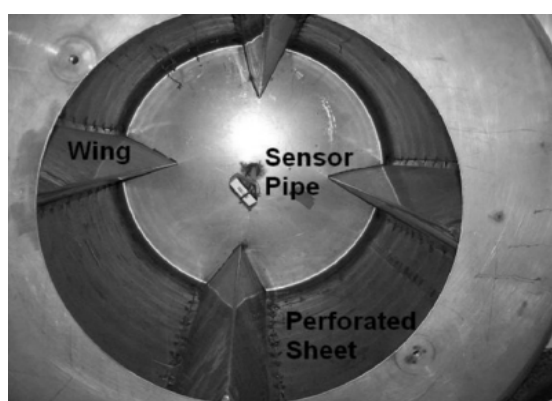
Το είδος του ξηραντηρίου καθορίζεται από την μορφή του νωπού προϊόντος και τα επιθυμητά τελικά χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνηθέστερες διατάξεις που συναντώνται στη ξήρανση γεωργικών προϊόντων.

### 3.2 Περιστροφικά Ξηραντήρια

Είναι ξηραντήρια τα οποία συναντώνται συνήθως στην χημική και μεταλλουργική βιομηχανία χρησιμοποιούνται όμως και στην ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Το ξηραντήριο αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο σωληνωτό κύλινδρο (τύμπανο) από τον οποίο διέρχεται θερμός αέρας κατά ομορροή ή κατ' αντιστροφή σε σχέση με την εισαγωγή του νωπού προϊόντος (εικ. 3.1). Στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου προσαρμόζονται μεταλλικά πτερύγια διαφόρων διατάξεων και γεωμετρικών σχημάτων με στόχο την μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής του στερεού με τον αέρα, την κυκλοφορία και την ανάμιξη του (εικ. 3.2).



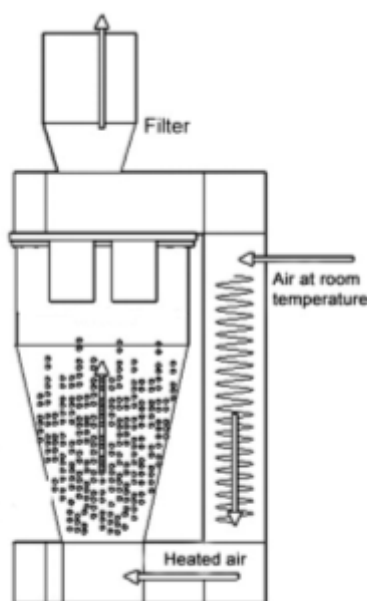
**Εικόνα 3.1** - Περιστροφικό πιλοτικό ξηραντήριο



**Εικόνα 3.2** - Εσωτερική όψη τυμπάνου (διακρίνονται τα μεταλλικά πτερύγια)

### 3.3 Ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης

Είναι μια μέθοδος ξήρανσης που συναντάμε συχνά στην βιομηχανία. Εντός του θαλάμου ξήρανσης, θερμός αέρας διέρχεται διαμέσου του υλικού προκαλώντας την αιώρησή του (εικ. 3.3). Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται ταχύτεροι ρυθμοί ξήρανσης για αυτό το λόγο θεωρείται αρκετά οικονομική μέθοδος σε σχέση με άλλες τεχνικές ξήρανσης, κατάλληλη για θερμικά ευαίσθητα προϊόντα καθώς τα εμποδίζει από ενδεχόμενη υπερθέρμανσή τους (Gilbert et al., 1980; Giner et al., 1987). Κριτήριο για την επιτυχή ξήρανση είναι η ικανότητα αιώρησης του νωπού προϊόντος, το οποίο θα πρέπει να έχει κοκκώδη μορφή. Το νωπό προϊόν θα πρέπει να έχει ένα άνω όριο στην κοκκομετρία του ώστε να επιτευχθεί η αιώρησή του. Αν και συνήθως τέτοιου είδους ξηραντήρια χρησιμοποιούνται για βιομηχανικά και φαρμακευτικά προϊόντα, επεξεργάζονται και αρκετά είδη τροφίμων όπως σιτάρι, σόγια κτλ. Για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων σχετικά μεγάλου μεγέθους, όπως αρακάς, ρεβίθια κτλ που δεν ρευστοποιούνται εύκολα υπάρχουν ειδικά διαμορφωμένες κλίνες. Οι συνήθεις θερμοκρασίες του ζεστού αέρα κυμαίνονται από 60 έως 90 °C με χρόνο ξήρανσης από 0.5 έως 100 λεπτά (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη, 2009).

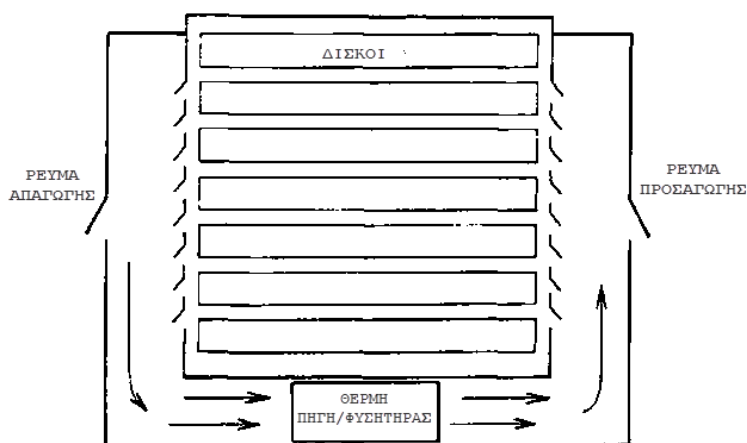


**Εικόνα 3.3** - Τυπική διάταξη ξηραντηρίου ρευστοποιημένης κλίνης

### 3.4 Ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους

Τα ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους χρησιμοποιούνται αρκετά σε βιομηχανική κλίμακα. Είναι ξηραντήρια απλής κατασκευής. Το νωπό υλικό απλώνεται ομοιόμορφα σε δίσκους τύπου τελάρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ο ένας πάνω από τον άλλο σε ράφια μέσα σε έναν καλά μονωμένο θάλαμο ξήρανσης. Ο αέρας ξήρανσης θερμαίνεται από έναν θερμαντήρα ενώ η κυκλοφορία του διασφαλίζεται με τη χρήση ενός φυσητήρα. Ένα μέρος του αέρα ξήρανσης ανακυκλοφορεί ενώ το υπόλοιπο εξέρχεται από το θάλαμο (εικ. 3.4). Η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του αέρα μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα με το προς ξήρανση προϊόν ρυθμίζοντας την ροή του αέρα, τον ρυθμό ανακυκλοφορίας του και την ισχύ του θερμαντήρα. Βάνες εκτροπής του αέρα και συστήματα κατανομής του καθ ύψος του θαλάμου χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της ανακυκλοφορίας και της ταχύτητάς του. Για να επιτευχθεί ομοιόμορφη ξήρανση πρέπει να υπάρχει ομοιόμορφη ροή αέρα στους δίσκους καθώς οποιαδήποτε εμφάνιση διαταραχής της ροής προκαλεί ανομοιομορφία στην ξήρανση των προϊόντων (Dutta, 2007).

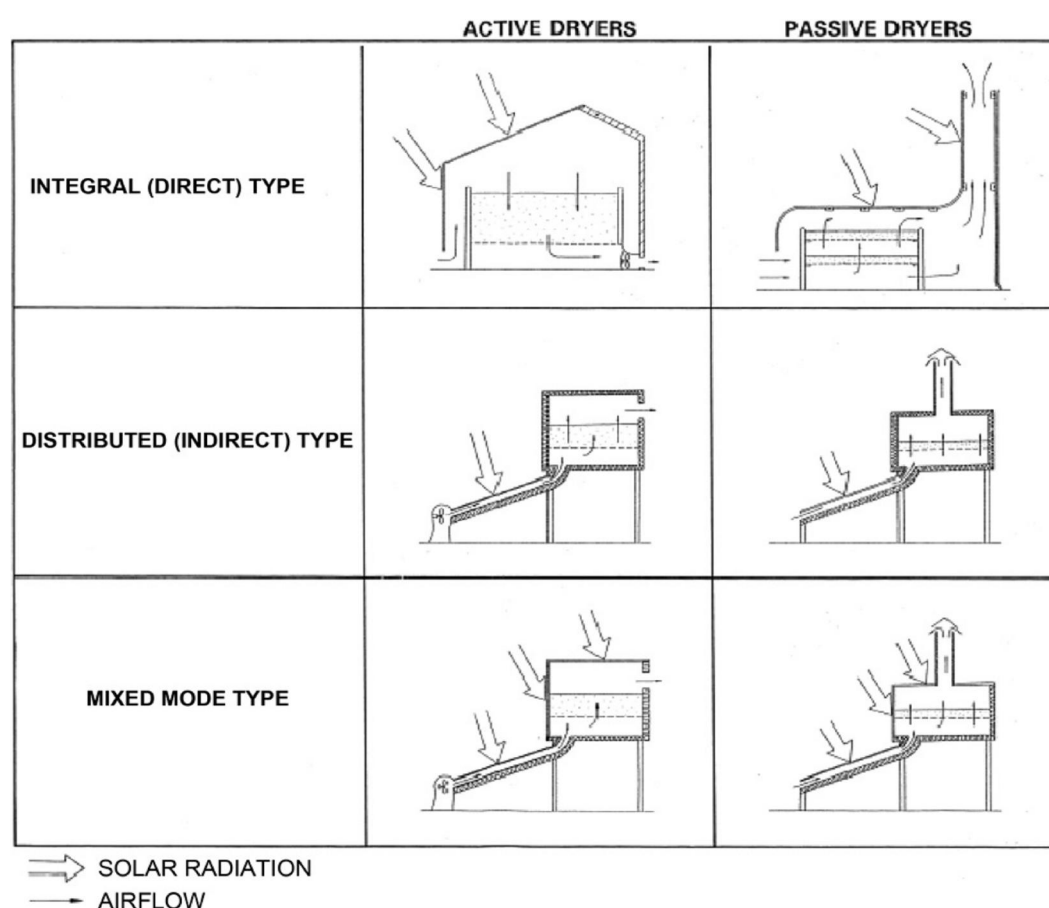
Τα ξηραντήρια θαλάμου με δίσκους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ροή του αέρα. Στα ξηραντήρια παράλληλης ροής όπου ο αέρας ξήρανσης διέρχεται παράλληλα από τα τελάρια, και στα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής, όπου ο αέρας ξήρανσης διέρχεται κάθετα σε αυτά. Τα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής εμφανίζουν μικρότερο κύκλο λειτουργίας καθώς ο αέρας ξήρανσης έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερη επιφάνεια προϊόντος.



**Εικόνα 3.4** - Τυπική διάταξη ξηραντηρίου με δίσκους (παράλληλης ροής)

### 3.5 Ηλιακά Ξηραντήρια

Τα ηλιακά ξηραντήρια χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια. Είναι ξηραντήρια μικρής δυναμικότητας, που θερμαίνονται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία ή έμμεσα από ηλιακούς συλλέκτες. Ανάλογα με την κυκλοφορία του αέρα εντός του ξηραντηρίου διακρίνονται σε ηλιακά ξηραντήρια φυσικής και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (εικ. 3.5). Τα ηλιακά ξηραντήρια δεν εμφανίζουν κάποια τυποποίηση στην κατασκευή τους καθώς είναι εγκαταστάσεις που σχεδιάζονται και συναρμολογούνται εμπειρικά με στόχο την βελτίωση του τελικού προϊόντος και την μείωση του χρόνου ξήρανσης σε μικρές και μεσαίες παραγωγές (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη, 2009).



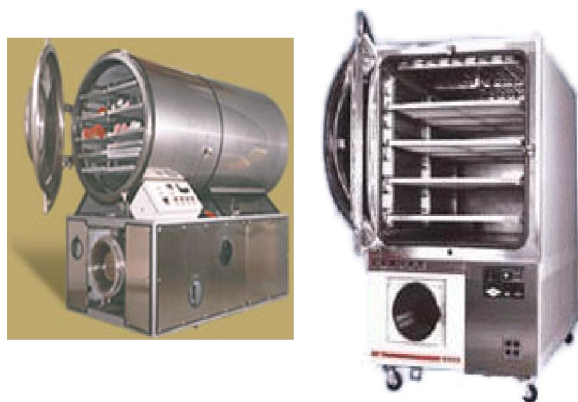
**Εικόνα 3.5** - Τύποι ηλιακών ξηραντηρίων Πηγή: Daguenet, 1985

### 3.6 Λυοφιλίωση (Κρυοαφυδάτωση)

Η λυοφιλίωση είναι μια μέθοδος ξήρανσης κατά την οποία το νερό αφαιρείται από το φυτό μέσω της εξαχνώσεως του. Η εξαχνωση πραγματοποιείται μόνο όταν η τάση ατμών του νερού και η θερμοκρασία του διατηρούνται κάτω από το τριπλό σημείο, για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μια αντλία κενού.

Η διαδικασία της ξήρανσης με κρυοαφυδάτωση επιτελείται σε τρία στάδια: 1) κατάψυξη του προς ξήρανση τροφίμου σε θερμοκρασίες της τάξης των -70 °C, 2) πρωτογενής ξήρανση και 3) δευτερογενής ξήρανση. Κατά το στάδιο της πρωτογενούς ξήρανσης μειώνεται η πίεση στο χώρο του θαλάμου ξήρανσης με αποτέλεσμα ο πάγος που έχει δημιουργηθεί κατά το προηγούμενο στάδιο να εξαχνώνεται. Στο τέλος της πρωτογενούς ξήρανσης όλο το ελεύθερο νερό έχει απομακρυνθεί. Για την απομάκρυνση και του δεσμευμένου νερού, στο τέλος της διαδικασίας ρυθμίζεται η λειτουργία της αντλίας κενού στο μέγιστο ώστε να απομακρυνθεί και το δεσμευμένο νερό.

Το πλεονέκτημα της λυοφιλίωσης έναντι άλλων μεθόδων είναι ότι το άρωμα και η γεύση του προς ξήρανση προϊόντος καθώς και οι πτητικές του ουσίες επηρεάζονται ελάχιστα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ υψηλό κόστος μηχανολογικού εξοπλισμού καθώς και η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Για το λόγο αυτό η λυοφιλίωση είναι μια μέθοδος που συναντάται σε μεγάλες βιομηχανίες τροφίμων και φαρμακοβιομηχανίες (Γαρδέλη, 2009).



**Εικόνα 3.6** - Λυοφιλιωτές για την ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών. Πηγή: Πολυσιού, 2008

### **3.7 Ξηραντήρια με χρήση μικροκυμάτων**

Είναι ξηραντήρια που χρησιμοποιούν μικροκύματα για την ξήρανση του νωπού προϊόντος εντός θαλάμου. Η ξήρανση με μικροκύματα από μόνη της, παρά τον ταχύτατο ρυθμό ξήρανσης που μπορεί να πετύχει, εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα όπως ανομοιόμορφη ξήρανση, μη ελεγχόμενη θερμοκρασία κα., για αυτό το λόγο συνήθως συνδυάζεται και με άλλες μεθόδους ξήρανσης (Zhang, 2006). Η σύζευξη μικροκυμάτων με θερμό αέρα, η χρήση των μικροκυμάτων ως βοηθητική μέθοδος ξήρανσης κατά την λυοφιλίωση, την οσμωτική αφυδάτωση κτλ., αποτελούν ορισμένες από

τις χρησιμοποιούμενες υβριδικές μεθόδους που στόχο έχουν την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, του χρόνου ξήρανσης, την καλύτερη ποιότητα του αποξηραμένου προϊόντος καθώς και την δυνατότητα ξήρανσης μίας ποικιλίας προϊόντων με μία μόνο διάταξη.

## 4 Εφαρμογή αφυγραντικών υλικών στην ξήρανση

### 4.1 Αφυγραντικά Υλικά

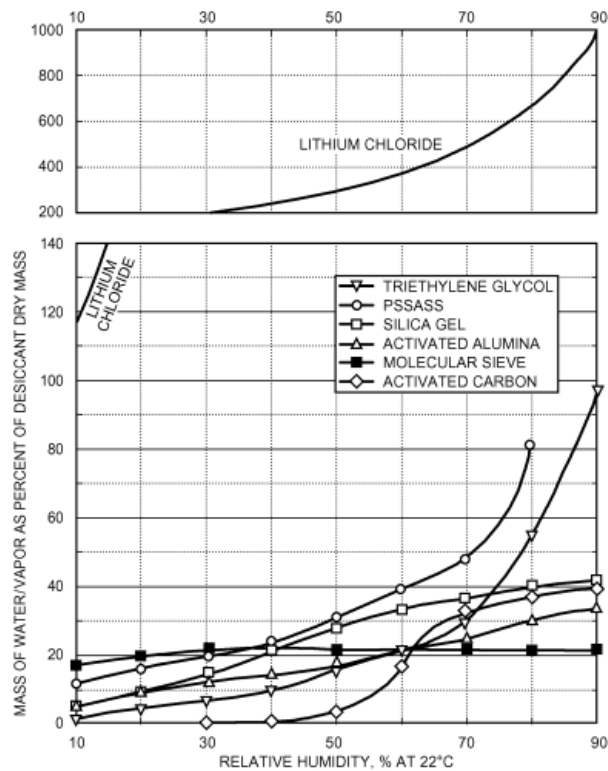
Ως αφυγραντικά υλικά χαρακτηρίζονται τα υλικά τα οποία έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να κατακρατούν υγρασία σε πολύ μεγάλο ποσοστό σε σχέση με το ξηρό τους βάρος. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αφυγραντικών υλικών σε σχέση με άλλα υλικά που απορροφούν υγρασία είναι η ικανότητά τους να την κατακρατούν. Ειδικότερα σημειώνεται ότι τα αφυγραντικά υλικά έχουν την δυνατότητα απορρόφησης της υγρασίας σε ποσοστό 10 μέχρι και 1100% ενώ μπορούν να κατακρατούν την υγρασία και σε συνθήκες ξηρού αέρα. Τα αφυγραντικά υλικά μπορούν να είναι υγρά ή στερεά.

Αναφερόμενοι σε στερεά ξηραντικά μέσα, η διεργασία της αφύγρυνσης οφείλεται στη χημική έλξη που αναπτύσσεται λόγω διαφοράς στην πίεση των υδρατμών. Ο υγρός αέρας εμφανίζει υψηλή πίεση υδρατμών, σε αντίθεση με τη χαμηλή πίεση υδρατμών του ξηραντικού μέσου, οφειλόμενη στον περιορισμένο αριθμό μορίων νερού στην επιφάνεια του. Αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, συνεπάγεται αύξηση της επιφανειακής πίεσης των υδρατμών. Συνεπώς η τάση εξίσωσης των πιέσεων προκαλεί το φαινόμενο της αφύγρυνσης του αέρα, απορρόφησης της υγρασίας από το απορροφητικό μέσο.

Τα αφυγραντικά μέσα εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά κατά την ψύξη και την θέρμανσή τους. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της θερμοκρασίας του ξηραντικού μέσου οδηγεί σε μείωση της αφυγραντικής του ικανότητας. Ανάλογα με το αφυγραντικό μέσο, για θερμοκρασίες της τάξης των 50 με 250 °C το ποσοστό κατακράτησης της υγρασίας μειώνεται σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε η υγρασία που είχε απορροφηθεί, να αποδεσμεύεται. Η θέρμανση του αφυγραντικού μέσου με στόχο την απομάκρυνση της υγρασίας που έχει απορροφήσει, ονομάζεται αναγέννηση. Επακόλουθη ψύξη του αφυγραντικού υλικού οδηγεί σε εκ νέου ικανότητά του για απορρόφηση της υγρασίας (ASHRAE, 2009).

Η επιλογή του αφυγραντικού υλικού εξαρτάται από την συμπεριφορά του για όλο το εύρος σχετικών υγρασιών. Η συμπεριφορά του υλικού διαγράφεται στις καμπύλες ρόφησης και εκρόφησης του για διάφορες θερμοκρασίες (σχ. 4.1). Το επιθυμητό αφυγραντικό υλικό εμφανίζει μεγάλη ικανότητα απορρόφησης για όλο το εύρος σχετικής υγρασίας και χαμηλή θερμοκρασία αναγέννησης.



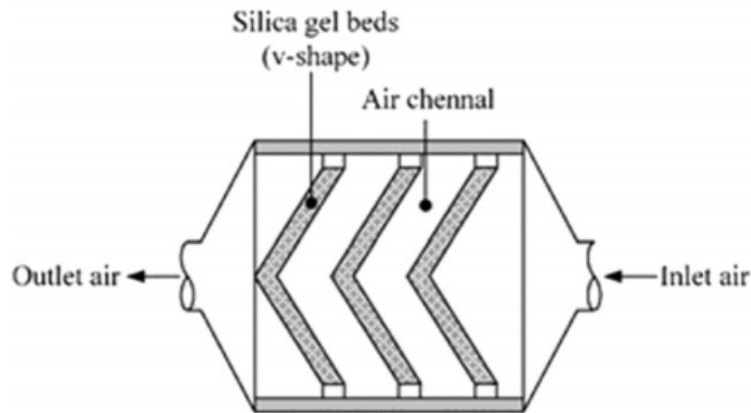


**Σχήμα 4.1** - Καμπύλες ρόφησης διάφορων αφυγραντικών υλικών για τους 22 °C

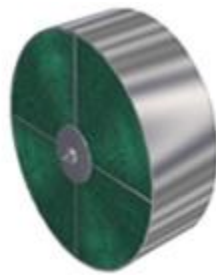
Την εργασία θα απασχολήσει η περίπτωση των στερεών αφυγραντικών μέσων, τα οποία θεωρούνται τεχνολογικά πιο ώριμα και εμφανίζουν μεγαλύτερη χρήση σε σχέση με τα αντίστοιχα υγρά μέσα (La et al., 2010; Henning, 2007).

## 4.2 Συσσκευές Αφύγρανσης

Για την επιτυχή αφύγρανση του αέρα ξήρανσης το επιλεγμένο αφυγραντικό υλικό πρέπει να εγκιβωτιστεί σε ένα κατάλληλο κέλυφος έτσι ώστε να λάβουν χώρα κατά τον δυνατό βέλτιστο τρόπο η αφύγρανση του αέρα και η αναγέννηση του υλικού. Στη βιβλιογραφία συναντάμε δύο βασικές προτεινόμενες συσκευές αφύγρανσης στέρεου αφυγραντικού υλικού, τις στρωματοποιημένες συσκευές (packed beds) (εικ. 4.1) και τον τροχό αφύγρανσης (εικ. 4.2) (Enteria and Mizutani, 2013). Το βασικό μειονέκτημα των στρωματοποιημένων συσκευών είναι η διακοπτόμενη λειτουργία τους. Για την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος αυτού γίνεται εγκατάσταση δύο συσκευών η μία από τις οποίες χρησιμοποιείται για την προσρόφηση ενώ η άλλη αναγεννάται. Στο τέλος του κύκλου γίνεται αντιμετάθεση των λειτουργιών (San and Jiang, 1994). Η χρησιμοποίηση όμως δύο συσκευών αφύγρανσης αφενός αυξάνει το κόστος της διάταξης αφετέρου την καθιστά πιο πολύπλοκη.

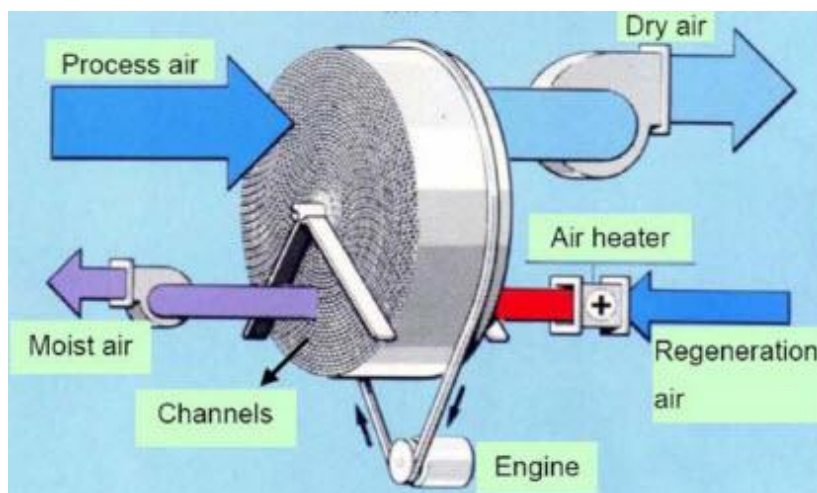


**Εικόνα 4.1** - Στρωματοποιημένη συσκευή αφύγρανσης



**Εικόνα 4.2** - Τροχός αφύγρανσης

Οι τροχοί αφύγρανσης πλεονεκτούν έναντι των στρωματοποιημένων συσκευών καθώς προσφέρουν συνεχή λειτουργία, μεγάλη επιφάνεια επαφής και χαμηλή πτώση πίεσης. Τα βασικά στοιχεία του τροχού αφύγρανσης είναι το κέλυφος το οποίο περιέχει το στέρεο πλέγμα όπου ενσωματώνεται το αφυγραντικό υλικό (εικ. 4.2), το σύστημα ιμάντα κινητήρα για την περιστροφή του τροχού καθώς και το πλαίσιο που εμπεριέχει τα παραπάνω στοιχεία (Πανάρας, 2010). Καθώς ο τροχός περιστρέφεται διέρχονται δύο αντίρροπα ρεύματα αέρα, το ρεύμα αφύγρανσης και το ρεύμα αναγέννησης (εικ. 4.3).



**Εικόνα 4.3** - Ρεύματα λειτουργίας τροχού αφύγρανσης

## 4.3 Εφαρμογή Αφυγραντικών Μέσων στην Ξήρανση

### 4.3.1 Εισαγωγή

Πολλές συμβατικές θερμικές μέθοδοι ξήρανσης όπως η ξήρανση με θερμό αέρα, η ξήρανση κενού και η λυοφιλίωση καταλήγουν σε χαμηλούς ρυθμούς ξήρανσης κατά την δεύτερη φάση της ξήρανσης (φάση II) (Clary et al. 2005; Zhang et al. 2003, 2005). Η χαμηλή τιμή στον ρυθμό ξήρανσης έχει ως συνέπεια την αύξηση της διάρκειας της διεργασίας. Για να αντιμετωπισθεί το παραπάνω πρόβλημα εφαρμόζονται κατά την φάση αυτή σχετικά υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε υποβάθμιση του τελικού αποξηραμένου προϊόντος.

Παρόλο που η ξήρανση με μικροκύματα ή σε συνδυασμό με άλλες συμβατικές μεθόδους, χρησιμοποιείται για την αποφυγή του ανωτέρου προβλήματος, η υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας όπως και στην περίπτωση της λυοφιλίωσης, του μεγάλου αρχικού κόστους και της πολυπλοκότητας της κατασκευής αποτελούν τροχοπέδη για την εφαρμογή τους. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι μέχρι και σήμερα το 85% των βιομηχανικών ξηραντηρίων είναι ξηραντήρια συναγωγής (Mujumdar, 2007).

Η ύπαρξη των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων καθιστά τις συνήθεις συνθήκες ξήρανσης ακατάλληλες. Αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά, σπόροι, δημητριακά κτλ. αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι της παγκόσμιας γεωργικής παραγωγής το οποίο χρήζει ιδιαίτερη μεταχείριση κατά την ξήρασή του. Για τον παραπάνω λόγο πλήθος μελετών έχουν πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό των καλύτερων ποιοτικών χαρακτηριστικών τους υπό τις συνήθεις μεθόδους ξήρανσης.

Σύμφωνα με τους Fiegel et al. (2010) κατά την ξήρανση λαχανικών με ξηραντήρια συναγωγής παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας του νερού που εξατμίζεται και της συγκέντρωσης των πτητικών ουσιών. Πιο συγκεκριμένα κατά την πρώτη φάση ξήρανσης, όπου απομακρύνεται το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας από το νωπό υλικό, παρατηρείται ότι η συνολική συγκέντρωση των πτητικών ουσιών μειώνεται και συνεχίζει να μειώνεται με μειούμενο ρυθμό όσο η ξήρανση βρίσκεται στη δεύτερη φάση του φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση της θερμότητας με στόχο την αφαίρεση της περιεχόμενης υγρασίας από το νωπό προϊόν πέρα από την υποβάθμιση του χρώματος, της υφής και των βιταμινών του, συντελεί και στην αφαίρεση των περιεχόμενων χημικών συστατικών του προϊόντος.

Η χρήση των αφυγραντικών μέσων στην ξήρανση αποτελεί μία πρόσφατη τεχνολογική εφαρμογή. Για το λόγο αυτό η έρευνα γύρω από την ξήρανση γεωργικών προϊόντων και δη των θερμοευαίσθητων είναι περιορισμένη. Παρόλα αυτά οι ήδη υπάρχουσες μελέτες φανερώνουν μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογική εφαρμογή για την παραγωγή ανώτερης ποιότητας τελικού προϊόντος μέσω της μείωσης της χορηγούμενης θερμότητας στο υλικό λόγω της αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης. Ενδεικτικά, οι Kozuke et al. (2006) παρατήρησαν ότι η χρήση των αφυγραντικών μέσων συντελεί στην διατήρηση του χρώματος του προϊόντος άρα και στην βελτίωση της ποιότητάς του.

#### *4.3.2 Βιβλιογραφική Διερεύνηση*

Τα συνήθη στέρεα αφυγραντικά υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στην ξήρανση είναι ο μπεντονίτης, το χλωριούχο ασβέστιο και η πυριτική γέλη (Misha et al., 2012). Σε πολλές εφαρμογές συναντάμε τον συνδυασμό των παραπάνω υλικών λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς που έχουν για την εκάστοτε εφαρμογή.

Τα χρησιμοποιούμενα υγρά αφυγραντικά υλικά είναι συνήθως διαλύματα νερού με χλωριούχο λίθιο, βρωμιούχο λίθιο, χλωριούχο ασβέστιο και άλλα σύνθετα υλικά. Με τη χρήση του υγρού αφυγραντικού μέσου επιτυγχάνονται χαμηλές θερμοκρασίες αναγέννησης, υψηλά ποσοστά αφαίρεσης της υγρασίας σε σχέση με τα στέρεα υλικά και ικανότητα απορρόφησης ανόργανων και οργανικών προσμίξεων. Το κυριότερο μειονέκτημα της χρήσης υγρού αφυγραντικού υλικού είναι ότι το ρεύμα απαγωγής μεταφέρει ένα μέρος του αφυγραντικού υλικού γεγονός που καθιστά απαγορευτική τη χρήση του σε εφαρμογές όπως η ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Για τον παραπάνω λόγο και δεδομένης της δυσκολίας διαχείρισης του υλικού έναντι των στερεών αφυγραντικών

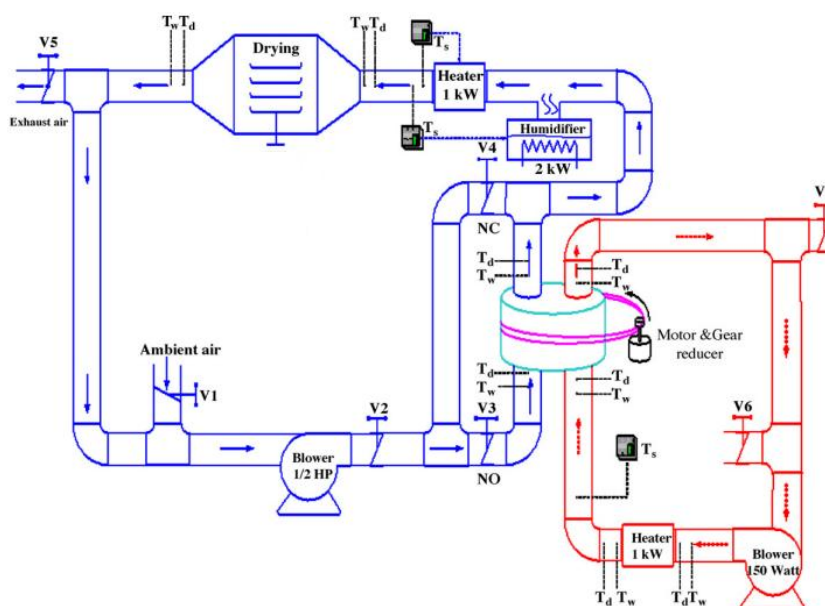
μέσων, η χρήση των υγρών αφυγραντικών υλικών απαιτεί πιο πολύπλοκες διατάξεις (Gandhidasan, 2012).

Οι Thoruwa et al. (1996) χρησιμοποιούν μπεντονίτη και συνδυασμό μπεντονίτη και χλωριούχου ασβεστίου, λόγω του χαμηλού κόστους απόκτησης και της χαμηλής θερμοκρασίας αναγέννησης, η οποία κυμαίνεται στους 45 °C. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά κρίνουν τα υλικά αυτά κατάλληλα για την χρήση σε ηλιακά ξηραντήρια μικρής δυναμικότητας όπου η αναγέννηση του αφυγραντικού υλικού πραγματοποιείται κατά την διάρκεια της ημέρας ενώ το ξηραντήριο συνεχίζει την λειτουργία του και την διάρκεια της νύχτας μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την συνολική διάρκεια της ξήρανσης. Μειονέκτημα των παραπάνω υλικών είναι η μικρή διάρκεια ζωής και μειωμένη ικανότητα απορρόφησης του σε σχέση με άλλα αφυγραντικά μέσα.

Η πυριτική γέλη (silica gel) αποτελεί το πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό σε εμπορικό επίπεδο κυρίως σε εφαρμογές κλιματισμού. Στη περίπτωση της ξήρανσης έχουν κατασκευαστεί πιλοτικές διατάξεις οι οποίες κάνουν χρήση της πυριτικής γέλης και των αντίστοιχων συσκευών που βρίσκουν εφαρμογή στον κλιματισμό, επιφέροντας σημαντικά αποτελέσματα στην συνολική διάρκεια της διεργασίας και στην τελική ποιότητα του τελικού προϊόντος (Misha et al., 2012). Η θερμοκρασία αναγέννησης της πυριτικής γέλης που αναφέρεται στη βιβλιογραφία έχει ως κατώτατη τιμή τους 60 °C και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και τους 150 °C (Πανάρας, 2010).

Οι Madhiyanon et al. (2007) χρησιμοποίησαν ένα τροχό αφύγρανσης συζευγμένο με ένα συμβατικό ξηραντήριο θαλάμου σε δίσκους για την ξήρανση καρύδας (σχ. 4.2). Πραγματοποίησαν δοκιμές για συγκεκριμένες συνθήκες του αέρα ξήρανσης για να συγκρίνουν τη συμβατική μέθοδο ξήρανσης με αυτή του τροχού αφύγρανσης. Πέρα από την επίδραση που έχει η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης ως προς τον χρόνο ξήρανσης και την ποιότητα του τελικού προϊόντος, η υγρασία του αέρα, συμπεραίνουν, έχει καθοριστικό ρόλο στην διεργασία. Διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα και την θερμοκρασία του αέρα κατά την ξήρανση και για διαφορετικούς βαθμούς ανακυκλοφορίας, παρατήρησαν ότι στο συνδυασμένο σύστημα επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι ρυθμοί ξήρανσης οι οποίοι μειώνονται στη συνέχεια και προσεγγίζουν στο τελευταίο στάδιο της ξήρανσης αυτούς του συμβατικού τρόπου ξήρανσης με θερμό αέρα. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή της ξήρανσης όπου η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος είναι υψηλή, η χρήση αφυγραντικού μέσου επέφερε αύξηση του ρυθμού ξήρανσης κατά 30 με 35%, ενώ ο χρόνος ξήρανσης μειώθηκε κατά 25% σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο. Τέλος παρατηρούν ότι ακόμα και για ήπιες για την καρύδα θερμοκρασίες ξήρανσης, η σχετική υγρασία είναι ένα σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του χρώματος της.

Μειονέκτημα αποτελεί η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 40 με 80% που οφείλεται στην αναγέννηση του τροχού.



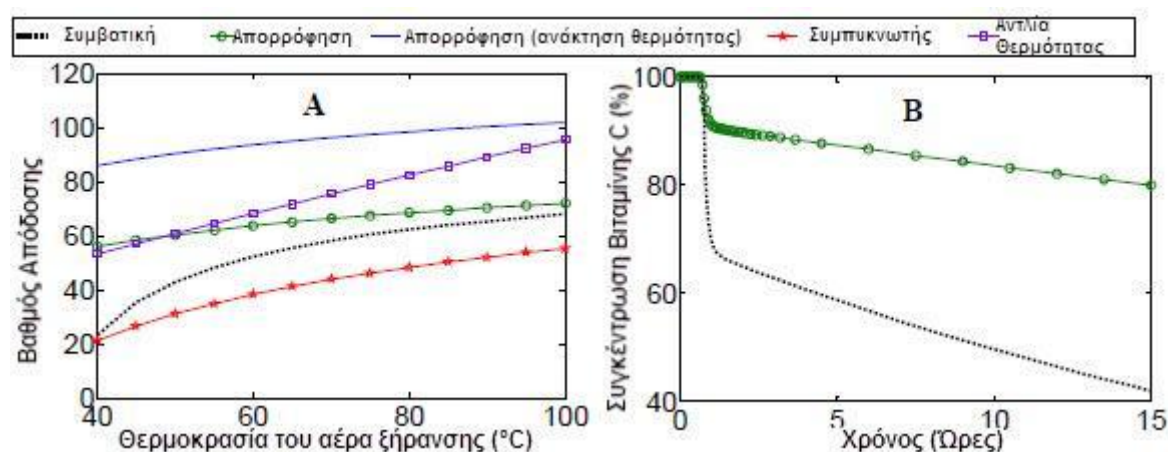
**Σχήμα 4.2** – Σχηματικό διάγραμμα ξηραντηρίου συναγωγής με τροχό αφύγρανσης

Με κριτήριο την εμφάνιση και την ικανότητα ενυδάτωσης των μανιταριών οι Seyhan and Enranuz (2000) προσδιορίζουν τις βέλτιστες συνθήκες ξήρανσης με χρήση αφυγραντικού μέσου. Κατά την ξήρανση με θερμό αέρα τα προβλήματα του ροδίσματος, της απώλειας γεύσης και της ικανότητας ενυδάτωσης πρέπει να αποφευχθούν, έτσι η ανάγκη χρήσης χαμηλών θερμοκρασιών ξήρανσης με μικρό περιεχόμενο υγρασίας του αέρα είναι αναγκαία. Έχοντας χαμηλή θερμοκρασία και υγρασία του αέρα ξήρανσης πετυχαίνουν βέλτιστη ποιότητα όσον αφορά την εμφάνιση και την ικανότητα ενυδάτωσης των μανιταριών.

Οι Krokida et al. (2002) αναγνωρίζοντας ως κύριες παραμέτρους του αέρα ξήρανσης την θερμοκρασία, την ταχύτητα και την υγρασία του, ξηραίνουν για διάφορες τιμές των παραμέτρων αυτών μια πληθώρα λαχανικών με στόχο την μελέτη της επίδρασής τους στην κινητική της ξήρανσης. Η θερμοκρασία του αέρα κυμάνθηκε από 65–85 °C, η σχετική υγρασία από 20–40% και η ταχύτητα του από 1.5 με 2.5 m/s. Συμπεραίνουν ότι η θερμοκρασία έχει την μεγαλύτερη επιρροή στον χρόνο ξήρανσης και ακολουθούν η υγρασία και η ταχύτητα του αέρα. Ενδεικτικά η επίδραση της υγρασίας κατά την ξήρανση του σπανακιού επιφέρει μείωση του συνολικού χρόνου ξήρανσης κατά 33 %.

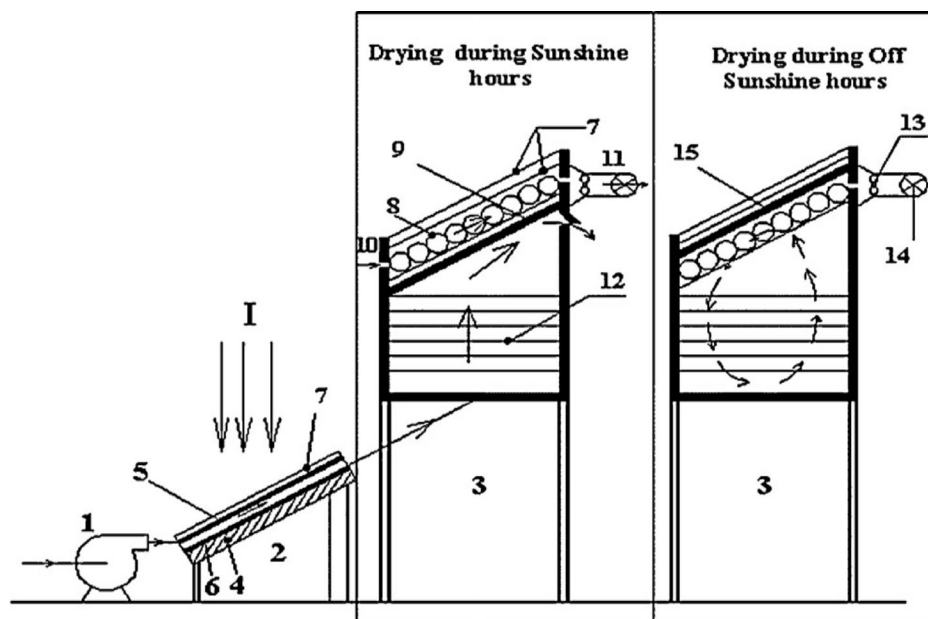
Οι Antonellis et al. (2000) μοντελοποίησαν διάφορες διατάξεις ξήρανσης με χρήση συμπυκνωτή ή τροχού αφύγρανσης για την αφύγρανση του αέρα με σκοπό να εκτιμήσουν ποία είναι η ενεργειακά αποδοτικότερη. Συμπεραίνουν ότι για αρκετές περιπτώσεις η χρήση του τροχού αφύγρανσης οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το συμπυκνωτή, ανάλογα με τον λόγο του αισθητού και του λανθάνοντος φορτίου του ξηραντηρίου, της τάξης του 70 με 80%.

Οι Atuonwu et al. (2011) μελετούν την αποδοτικότητα της συνολικής διαδικασίας ξηράνσεως λαμβάνοντας υπ' όψιν την ενεργειακή κατανάλωση η οποία μπορεί να χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του αφυγραντικού μέσου ή για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας έχοντας επιπλέον σαν παράμετρο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός προς ξήρανση προϊόντος. Η αποδοτικότητα της ξήρανσης αξιολογείται με τον βαθμό απόδοσης του ξηραντηρίου ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας εξατμίσεως του νερού προς την καταναλισκόμενη ενέργεια. Συμπεραίνουν ότι με τη χρήση αντλίας θερμότητας και αφυγραντικών μέσων στα ξηραντήρια επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις έναντι των συμβατικών (σχ. 4.3A). Τα συμβατικά ξηραντήρια για να πετύχουν την ίδια απόδοση πρέπει να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες το οποίο οδηγεί σε φθορά του προϊόντος, έτσι για την ίδια κατανάλωση ενέργειας η χρήση αφυγραντικού μέσου εμφανίζει μικρότερη φθορά του προϊόντος σε σχέση με τα συμβατικά ξηραντήρια. Έχουμε λοιπόν διατήρηση των θρεπτικών συστατικών καθώς η ξήρανση πραγματοποιείται σε ήπιες συνθήκες. Κατά την ξήρανση κολοκύθας με αφυγραντικό μέσο παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση βιταμίνης C έναντι της συμβατικής μεθόδου για το ίδιο διάστημα ξήρανσης (σχ. 4.3B).



**Σχήμα 4.3 - Βαθμοί απόδοσης διαφόρων διατάξεων ξήρανσης (A) - Συγκέντρωση βιταμίνης C κατά την διάρκεια ξήρανσης σε συμβατικό και σε ξηραντήριο με αφυγραντικό μέσο (B)**

Οι Shanmugam et al. (2005) μελέτησαν την εγκατάσταση στέρεου αφυγραντικού μέσου σε ηλιακό ξηραντήριο εξαναγκασμένης συναγωγής. Η αναγέννηση του αφυγραντικού μέσου πραγματοποιούταν κατά την διάρκεια της ημέρας, ενώ την νύχτα γινόταν ανακυκλοφορία του αέρα στο θάλαμο ξήρανσης και ξήρανση αυτού διαμέσου του αφυγραντικού μέσου (σχ. 4.4). Αποτέλεσμα της προσθήκης αυτής ήταν η μείωση του χρόνου ξήρανσης και καλύτερευση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.



**Σχήμα 4.4** - Ηλιακό ξηραντήριο εξαναγκασμένης συναγωγής με στέρεα αφυγραντικά μέσα



## **5 Μελέτη περίπτωσης: Σχεδιασμός και μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου Μέντας**

### **5.1 Σχεδιασμός του θαλάμου ξήρανσης**

#### *5.1.1 Εισαγωγή*

Ο θάλαμος ξήρανσης σχεδιάζεται βάσει της χωρητικότητάς του σε νωπό προϊόν, δηλαδή της δυναμικότητας που επιθυμούμε να έχει το ξηραντήριο. Επομένως η συνολική ποσότητα του τελικού προϊόντος που επιθυμούμε να παράγουμε ανά κύκλο λειτουργίας του ξηραντηρίου είναι ανάλογη των διαστάσεων του θαλάμου ξήρανσης. Ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του προς ξήρανση προϊόντος και τη συμπεριφορά του κατά την ξήρανση, καθορίζονται οι συνθήκες του αέρα ξήρανσης που θα επικρατήσουν στον θάλαμο, άρα και ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση της διεργασίας.

Στη βιβλιογραφία δεν συναντάμε πρακτικές για τον σχεδιασμό ξηραντηρίων. Η έρευνα επικεντρώνεται γύρω από την διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών πιλοτικών ως επί των πλείστων ξηραντηρίων με στόχο τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης. Εν ολίγοις συμπεραίνουμε ότι ο σχεδιασμός ενός ξηραντηρίου δεν εμπίπτει σε γενικούς κανόνες, έχει όμως ως κύριες παραμέτρους την επιθυμητή δυναμικότητα και τον συνολικό χρόνο ξήρανσης, οι οποίες καθορίζουν την παραγωγή του τελικού προϊόντος ανά κύκλο λειτουργίας και επομένως την οικονομικότητα της διεργασίας.

#### *5.1.2 Σχεδιασμός θαλάμου για την ξήρανση μέντας*

Οι θάλαμοι ξήρανσης των ξηραντηρίων συναγωγής είναι δυνατόν να ταξινομηθούν ανάλογα με την κατεύθυνση του αέρα ξήρανσης σε σχέση με το νωπό προϊόν, και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα ξηραντήρια παράλληλης ροής, όπου ο θερμός αέρας διέρχεται παράλληλα από το τελάρο, και τα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής, όπου ο θερμός αέρας διέρχεται κάθετα από το τελάρο.

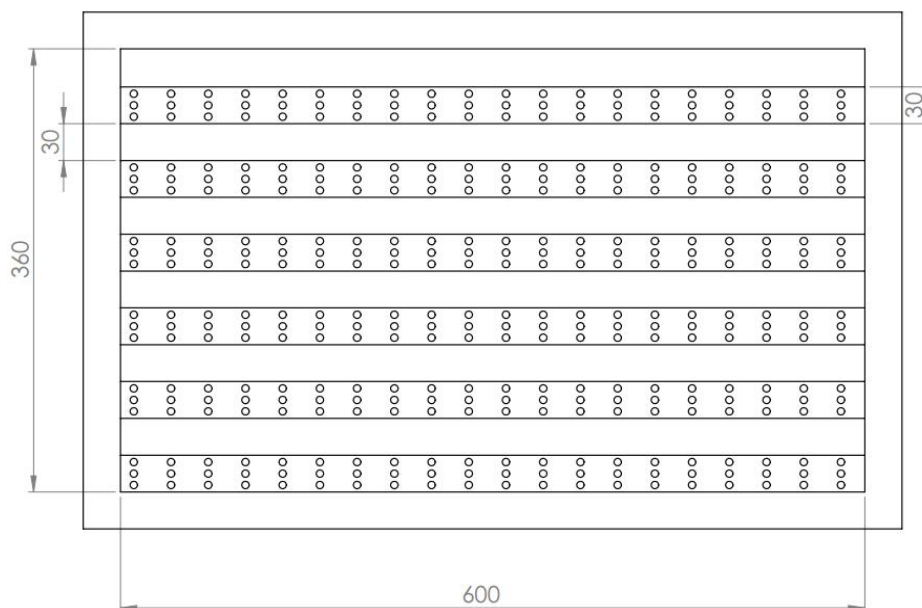
Στην πράξη τα περισσότερα ξηραντήρια συναγωγής είναι παράλληλης ροής, καθώς ο σχεδιασμός ενός εγκάρσιου ξηραντηρίου εμφανίζει αρκετές κατασκευαστικές δυσκολίες όπως:

- Μεγάλη πτώση πίεσης.

- Πολυπλοκότητα κατασκευής προς αποφυγή διασκορπισμού του προϊόντος.
- Τραυματισμό των ευπαθών προϊόντων λόγω αιώρησής τους, κατηγορία στην οποία ανήκει η μέντα.
- Μειωμένη δυναμικότητα λόγω κορεσμού του αέρα σε υγρασία καθ ύψος.

Η ανομοιομορφία της ξήρανσης που εμφανίζεται στην παράλληλη ροή του αέρα προς το προϊόν (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη, 2009), αντιμετωπίζεται επιτυχώς με τη χρήση διάτρητων τελάρων και με υψηλές ταχύτητες ροής. Για τους παραπάνω λόγους στη παρούσα εργασία η ροή του αέρα επιλέχθηκε να είναι παράλληλη προς το προϊόν.

Ο θάλαμος του ξηραντηρίου επιλέχθηκε να έχει διαστάσεις 100x60x36cm (μήκος x πλάτος x ύψος). Έξη τελάρια διαστάσεων 100x60x3cm το καθένα, τοποθετούνται κάθετα σε απόσταση 3cm μεταξύ τους (σχ. 5.1). Οι εν λόγω σχεδιαστικές επιλογές πραγματοποιήθηκαν με γνώμονα τη δυνατότητα διερεύνησης κάποιων βασικών χαρακτηριστικών της διάταξης, χωρίς να αποτελεί στόχο της ανάλυσης που ακολουθεί, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του ξηραντηρίου. Το μήκος του ξηραντηρίου στην περίπτωση της ξήρανσης με θερμό αέρα είναι ανάλογο των απωλειών θερμότητας, για το λόγο αυτό δεν επιλέγεται μεγαλύτερο μήκος θαλάμου. Όσον αφορά τη διάταξη των τελάρων, για δεδομένες διαστάσεις κελύφους και πάχους τελάρων, η απόσταση, άρα και ο αριθμός των τελάρων, είναι τέτοιος που να διασφαλίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα του αέρα ανά σειρά προϊόντος. Για την ταχύτητα του αέρα υπάρχουν περιορισμοί τόσο ως προς την κατώτατη τιμή της, ώστε να διασφαλίζονται ευνοϊκές συνθήκες συναγωγής, όσο και ως προς την ανώτατη τιμή της, ώστε να αποφευχθούν τραυματισμοί προϊόντων ή αιώρησή τους, σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Η δυναμικότητα του συγκεκριμένου ξηραντηρίου δηλαδή η χωρητικότητα σε νωπό προϊόν ανά κύκλο λειτουργίας, υπολογίζεται από την μέση φαινόμενη πυκνότητα των φύλλων της μέντας, σύμφωνα με τους Park et al. (2002), για πάχος νωπού προϊόντος ίσο με 1cm (Kaya et al., 2009) και προκύπτει ίση με 1.12kg.



**Σχήμα 5.1** - Πλάγια όψη του προτεινόμενου θαλάμου ξήρανσης (διαστάσεις σε mm)

### 5.1.3 Συνθήκες λειτουργίας

Στην περίπτωση της ξήρανσης της μέντας οι συνθήκες ξήρανσης που συναντώνται στην βιβλιογραφία αφορούν θερμοκρασία αέρα που κυμαίνεται από 30 έως 60 °C και τιμές ταχυτήτων από 0.2 έως 1 m/s (Kaya et al., 2009; Park et al., 2002) για εγκάρσια ροή και 3 με 4 m/s για παράλληλη (Doymaz, 2005). Σύμφωνα με το παραπάνω εύρος ταχυτήτων και για παροχή αέρα 1200 m<sup>3</sup>/h, η ταχύτητα του αέρα ανά τετράγωνο προκύπτει ίση με 3.1 m/s. Σημειώνεται ότι η εν λόγω παροχή υιοθετήθηκε για λόγους που συνδέονται με τη βέλτιστη λειτουργία του επιλεγέντος αφυγραντικού τροχού, ζήτημα που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

## 5.2 Μοντελοποίηση ξήρανσης μέντας με ρεύμα θερμού αέρα

### 5.2.1 Εισαγωγή

Στη βιβλιογραφία η ξήρανση της μέντας με θερμό αέρα πραγματοποιείται σε λεπτά στρώματα (thin layer drying). Κατά την ξήρανσή της δεν εμφανίζεται σταθερός ρυθμός ξήρανσης αλλά φθίνων με αποτέλεσμα ο κυρίαρχος μηχανισμός ξήρανσης να είναι η διάχυση της υγρασίας από το εσωτερικό του προϊόντος προς την επιφάνειά του (Doymaz, 2005; Akpinar, 2010; Kane et al., 2009).

Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα στη σχετική βιβλιογραφία για την περιγραφή της κινητικής της ξήρανσης είναι ο δεύτερος νόμος του Fick για την διάχυση, όπου προσδιορίζεται πειραματικά ο συντελεστής διάχυσης καθώς

και μοντέλα που βασίζονται σε ημιεμπειρικές εξισώσεις των οποίων επίσης προσδιορίζονται πειραματικά οι αντίστοιχοι συντελεστές ξήρανσης.

### 5.2.2 Υφιστάμενα μοντέλα στην ξήρανση μέντας με θερμό αέρα

Οι Kaya et al. (2009) ξηραίνουν φύλλα μέντας με θερμό αέρα σε θερμοκρασίες 35, 45, 55 °C και υγρασίες 40, 55, 70 % αντίστοιχα, με εγκάρσια ροή του αέρα, για τρεις ταχύτητες 0.2, 0.4 και 0.6m/s. Για τις παραπάνω συνθήκες προσδιορίζονται πειραματικά οι καμπύλες εκρόφησης μέσω της απευθείας μέτρησης της δραστηρότητας και της υγρασίας ισορροπίας ενώ για τον υπολογισμό του λόγου υγρασίας (*MR*) χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Fick για την διάχυση.

Ο Akriņar (2005) ξηραίνει με άμεση ηλιακή ξήρανση φύλλα μέντας. Διαπιστώνει ότι κατά την ξήρασή της δεν παρουσιάζεται σταθερός ρυθμός ξήρανσης παρά μόνο φθίνων. Εφαρμόζει τόσο τον δεύτερο νόμο του Fick για την διάχυση, όσο και δώδεκα διαφορετικές ημιεμπειρικές εξισώσεις καταλήγοντας στην τροποποιημένη εξίσωση του Page με την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα.

Ο Doymaz (2005) ξηραίνει φύλλα μέντας και προσδιορίζει τις καμπύλες ξήρανσης για αέρα θερμοκρασίας 35,45,55 και 60 °C, σχετικής υγρασίας από 8 έως 40% με παράλληλη ροή του αέρα, ταχύτητας 4.1 m/s. Εφαρμόζει τέσσερις διαφορετικές ημιεμπειρικές εξισώσεις και τον δεύτερο νόμο του Fick για την διάχυση. Για τις διάφορες θερμοκρασίες προσδιορίζει τους συντελεστές διάχυσης και τους συντελεστές των τεσσάρων μοντέλων. Την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά του δεδομένα από τα τέσσερα μοντέλα την έχει το λογαριθμικό.

Οι Park et al. (2002) προσδιορίζουν τις ισόθερμες καμπύλες εκρόφησης για θερμοκρασίες 30,40 και 50°C για τέσσερα διαφορετικά μοντέλα και συμπεραίνουν ότι την καλύτερη προσαρμογή την έχει η εξίσωση του Peleg. Στη συνέχεια πραγματοποιούν ξήρανση στις θερμοκρασίες των 30,40 και 50°C για τιμές εγκάρσιας ταχύτητας ίσες με 0.5 και 1m/s. Για τα δεδομένα που προκύπτουν από τις παραπάνω συνθήκες ξήρανσης συγκρίνονται το μοντέλο διάχυσης του δεύτερου νόμου του Fick και η εμπειρική σχέση του Page όπου προσδιορίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές των μοντέλων. Το μοντέλο του Page εμφανίζει καλύτερη προσαρμογή έναντι του Fick για όλες τις συνθήκες εκτός από την περίπτωση των 50 °C και 1m/s.

Οι Kane et al. (2009) προσδιορίζουν τις ισόθερμες καμπύλες ρόφησης και εκρόφησης της μέντας για θερμοκρασίες 30, 40 και 50 °C και προσαρμόζουν την εξίσωση GAB στα πειραματικά δεδομένα. Για δύο διαφορετικές παροχές, εγκάρσιας ροής, του αέρα ξήρανσης 100 και 200 m<sup>3</sup>/h και για τέσσερις θερμοκρασίες από 40 έως 70 °C εξετάζουν την προσαρμογή δεκατριών εμπειρικών εξισώσεων. Καταλήγουν στο

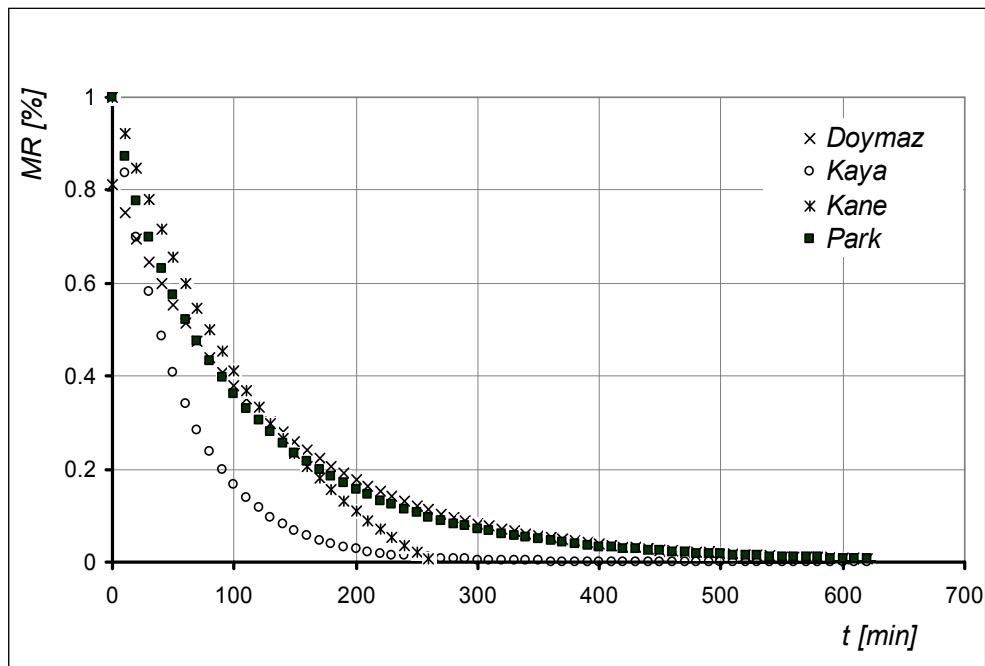
λογαριθμικό μοντέλο και σε αντίθεση με την συνηθέστερη πρακτική που ακολουθούν οι περισσότεροι ερευνητές, οι οποίοι παραθέτουν τους διάφορους συντελεστές των μοντέλων για κάθε θερμοκρασία, στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται συσχετισμός των τιμών των συντελεστών σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης.

### 5.2.3 Επιλογή Μοντέλου

Το μοντέλο που θα επιλεγεί θα πρέπει να παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού του χρόνου στον οποίο το προς ξήρανση προϊόν θα έχει φτάσει στην επιθυμητή τελική περιεχόμενη υγρασία ( $X$ ) για διάφορες συνθήκες ξήρανσης.

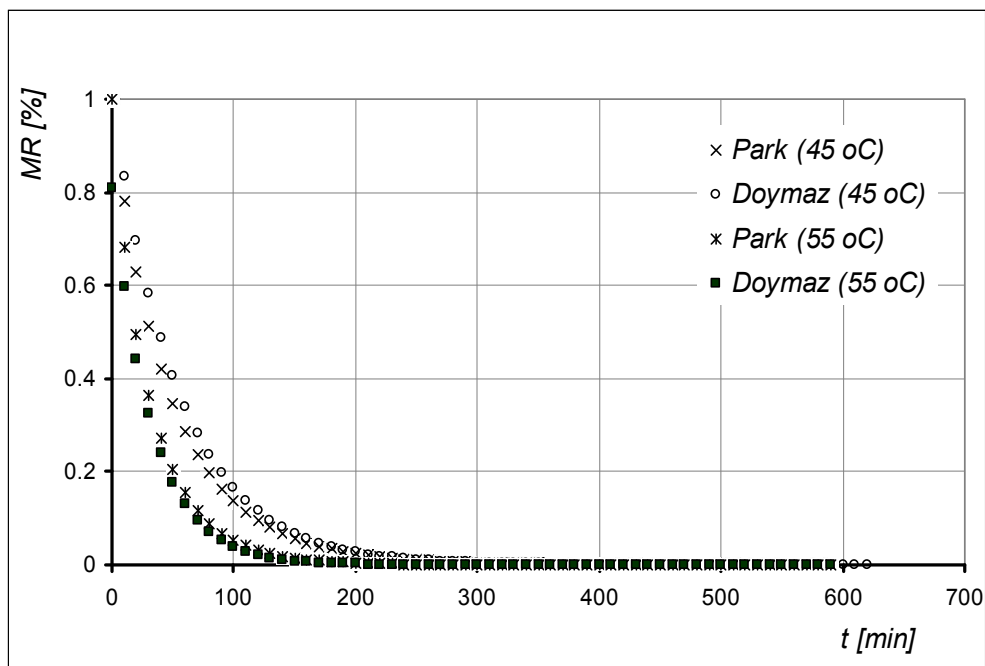
Γνωρίζοντας μόνο τον λόγο υγρασίας ( $MR$ ) ο υπολογισμός δεν είναι δυνατός καθώς απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της υγρασίας ισορροπίας ( $X_e$ ) για διάφορες τιμές της υγρασίας του αέρα ξήρανσης. Επομένως αναγκαία είναι η αναλυτική έκφραση της υγρασίας ισορροπίας για τις θερμοκρασίες που επιθυμούμε να ξηράνουμε το προϊόν. Προσαρμογή μοντέλων στις ισόθερμες καμπύλες εκρόφησης πραγματοποίησαν οι Kane et al. (2009) και οι Park et al. (2002).

Η ξήρανση σε ροή αέρα κάθετη στην επιφάνεια του προϊόντος (εγκάρσιο ξηραντήριο) οδηγεί σε διαφορετική συμπεριφορά κατά την ξήρανσή του έναντι της παράλληλης ροής. Η επίδραση της κατεύθυνσης της ροής του αέρα σε σχέση με το προϊόν και τα αποτελέσματα που επιφέρει στην ξήρανση δεν συναντάται εκτενώς στη βιβλιογραφία. Για την ίδια θερμοκρασία αέρα η εγκάρσια ροή επιφέρει μείωση του χρόνου ξήρανσης καθώς η επιφάνεια επαφής μεταξύ του αέρα και του προϊόντος είναι μεγαλύτερη. Αντιθέτως στην οριζόντια ροή η ξήρανση δεν είναι ομοιόμορφη καθώς η πλευρά που δεν έχει άμεση επαφή με τον αέρα εμφανίζει μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας. Για το λόγο αυτό γίνεται εφαρμογή διάτρητων τελάρων με στόχο την αύξηση της επιφάνειας επαφής αέρα-προϊόντος. Η μειωμένη ταχύτητα ξήρανσης κατά την εγκάρσια ροή λόγω του κινδύνου αιώρησης του προϊόντος σε σχέση με τις υψηλές ταχύτητες που εφαρμόζονται στην οριζόντια ξήρανση έχει επίδραση στους συντελεστές μεταφοράς. Για τα παραπάνω μοντέλα ξήρανσης που παρουσιάστηκαν γίνεται σύγκριση της επίδρασης της κατεύθυνσης της ροής για τις ίδιες θερμοκρασίες ξήρανσης. Σημειώνεται ότι το μοντέλο του Doymaz (2005) αναφέρεται σε παράλληλη ροή ενώ τα άλλα μοντέλα που υπεισέρχονται στην ανάλυση σε εγκάρσια.



**Σχήμα 5.2** - Σύγκριση μοντέλων ξήρανσης εγκάρσιας και παράλληλης ροής αέρα θερμοκρασίας 35 °C

Στο σχ. 5.2 παρατηρούμε ότι η καμπύλη ξήρανσης των Park et al. (2002) με εγκάρσια ροή αέρα ταχύτητας 0.5 m/s, θερμοκρασίας 35 °C είναι σχεδόν ταυτόσημη με αυτή του Doymaz (2005) για ξήρανση με οριζόντια ροή αέρα 35 °C ταχύτητας 4 m/s. Ομοίως και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες ξήρανσης (σχ. 5.3) οι καμπύλες των Park et al. (2002) και Doymaz (2005) σχεδόν ταυτίζονται.



**Σχήμα 5.3** - Σύγκριση των μοντέλων των Doymaz (2005) και Park et al. (2002) για διαφορετικές θερμοκρασίες ξήρανσης

Από την παραπάνω σύγκριση των μοντέλων μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η αυξημένη τιμή της ταχύτητας που συναντάμε στην παράλληλη ροή, έχει θετική επίδραση στον χρόνο ξήρανσης και επιφέρει συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά της ξήρανσης σε εγκάρσια ροή. Για την μοντελοποίηση της ξήρανσης της μέντας στις δύο προτεινόμενες διατάξεις που ακολουθούν, επιλέχθηκε το μοντέλο που προτείνεται από τον Doymaz (2005) για θερμοκρασίες ξήρανσης ίσες με 45, 55 και 60 °C και ταχύτητα αέρα 4 m/s.

Η υγρασία ισορροπίας λαμβάνεται από την αναλυτική έκφραση που προτείνουν οι Park et al. (2002), για τον υπολογισμό της υγρασίας σε ξηρή βάση κατά την διάρκεια της ξήρανσης.

Συνεπώς οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν κατά την μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης της μέντας για τις προτεινόμενες διατάξεις είναι οι ακόλουθες:

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ισορροπίας δίνεται από την σχέση του Peleg:

$$X_e = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (5.1)$$

όπου:

- $X_e$  : η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας
- $a_w$  : η δραστηκότητα
- $K_1, n_1, K_2, n_2$  : σταθερές που εξαρτώνται από την θερμοκρασία

Για τον αδιάστατο λόγο υγρασίας χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$MR = \frac{\delta}{\pi^2} \exp(-k \cdot t) \quad (5.2)$$

όπου:

- $k$  : σταθερά που εξαρτάται από τις συνθήκες ξήρανσης

Από τον ορισμό του λόγου υγρασίας σε συνδυασμό με την εξίσωση του Page προκύπτει η έκφραση για την περιεχόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία ανά χρονικό βήμα:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \Rightarrow X = MR(X_o - X_e) + X_e \quad (5.3)$$

όπου:

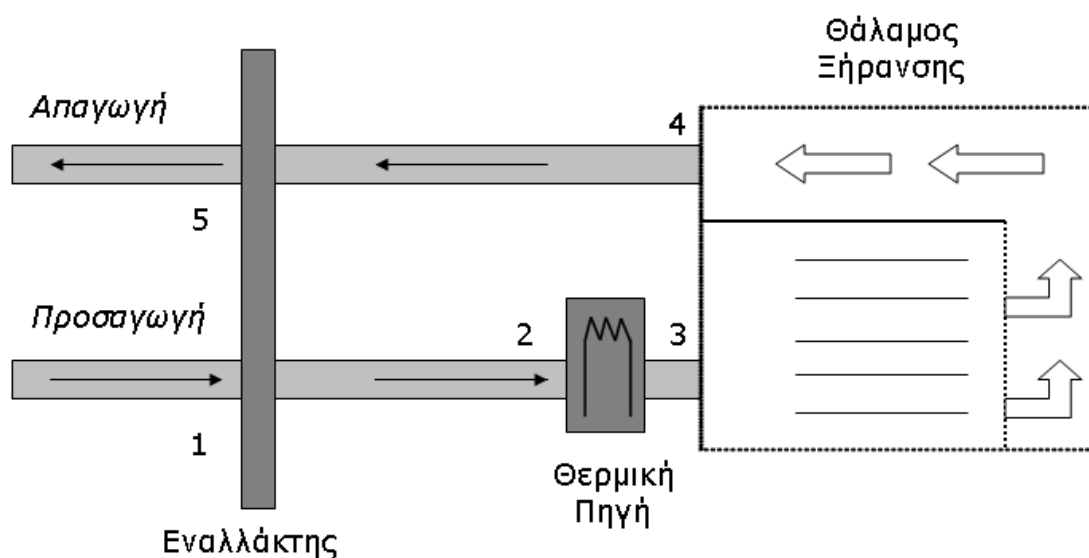
- $X_o$  : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία



## 5.3 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντηρίου

### 5.3.1 Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη του συμβατικού ξηραντηρίου (σχ. 5.4) αποτελείται από τρία κύρια μέρη (υποσυστήματα): το θάλαμο ξήρανσης παράλληλης ροής, τη θερμική πηγή που προσδίδει θερμότητα στο ρεύμα προσαγωγής, προ της εισόδου του αέρα ξήρανσης στον θάλαμο και τον εναλλάκτη αέρα-αέρα μεταξύ των ρευμάτων απαγωγής-προσαγωγής για την θερμοκρασιακή αύξηση του αέρα προσαγωγής πριν εισέλθει στην θερμική πηγή.



Σχήμα 5.4 - Διάταξη συμβατικού ξηραντηρίου

### 5.3.2 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντηρίου

Για τη μοντελοποίηση του ξηραντηρίου απαιτείται η γνώση των μοντέλων που περιγράφουν τη λειτουργία των κυρίων υποσυστημάτων. Στη συνέχεια τα μοντέλα ενσωματώνονται στο συνολικό μοντέλο ανάλογα με τη θέση των αντίστοιχων υποσυστημάτων στη συνολική διάταξη.

#### Εναλλάκτης

Για τον εναλλάκτη του συστήματος έγινε η υπόθεση ίσων τιμών θερμοχωρητικότητας παροχών στα δύο ρεύματα ενώ ο βαθμός απόδοσης θεωρήθηκε σταθερός. Ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θεωρήθηκε ίσος με 0.85, τιμή που αντιστοιχεί στην απόδοση συγκεκριμένου εμπορικού προϊόντος και έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά (Panaras et al., 2010a). Από τη σχέση αυτή υπολογίζεται η θερμοκρασία του αέρα πριν από τον θερμαντήρα (Kays et al., 1984).

$$\eta_{hx} = \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \eta_{hx} (T_4 - T_1) \quad (5.4\alpha)$$

Η θερμοκρασία  $T_5$  του απορριπτόμενου (υγρού) αέρα προς το περιβάλλον μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$T_4 - T_5 = T_2 - T_1 \quad (5.4\beta)$$

### Θερμική ενεργειακή πηγή

Θεωρούμε ότι η θερμική πηγή διασφαλίζει την έξοδο του αέρα από το ξηραντήριο σε μια καθορισμένη θερμοκρασία:

$$T_3 = ct \quad (5.5)$$

### Θάλαμος ξήρανσης

Από το ενεργειακό ισοζύγιο στο θάλαμο του ξηραντηρίου θεωρώντας ότι δεν εναλλάσσεται θερμότητα με το περιβάλλον (αδιαβατική μεταβολή) μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασιακή πτώση, ανά χρονικό βήμα, του αέρα λόγω της ενθαλπίας εξατμίσεως του νερού που αφαιρείται από το προϊόν.

$$\dot{m}_w h_g = \dot{m}_{air} c_p \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{\dot{m}_w h_g}{\dot{m}_{air} c_p} \quad (5.6)$$

όπου :

- $\dot{m}_{air}$  : η παροχή μάζας του αέρα
- $\dot{m}_w$  : η παροχή μάζας του νερού που εξατμίζεται
- $h_g$  : η ειδική ενθαλπία εξατμίσεως του κορεσμένου νερού
- $c_p$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα

- $\Delta T$  : θερμοκρασιακή πτώση του αέρα

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των ρευστών, και ειδικότερα η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα καθώς και η ενθαλπία εξατμίσεως του νερού, οι οποίες υπεισέρχονται στην παρούσα ανάλυση, υπολογίστηκαν σύμφωνα με γνωστές σχέσεις που παρατίθενται στην βιβλιογραφία (ASHRAE, 1996).

Η θερμοκρασία εξόδου από το ξηραντήριο υπολογίζεται ως εξής:

$$T_4 = T_3 - \Delta T \quad (5.7)$$

όπου:

- $T_3$  : η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του ξηραντηρίου
- $T_4$  : η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του ξηραντηρίου

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας του ξηραντηρίου και συγκριτικό μέγεθος μεταξύ προτεινόμενων διατάξεων.

Στο πλαίσιο αυτό, ένα μέγεθος που ενδιαφέρει είναι η θερμική ισχύς  $P_h$  που απαιτείται για τη θέρμανση του αέρα της ξήρανσης στα επιθυμητά επίπεδα.

Η ισχύς αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$P_h = \dot{m}_{air} c_p (T_3 - T_2) \quad (5.8)$$

όπου:

- $\dot{m}_{air}$  : η παροχή μάζας του αέρα
- $c_p$  : η θερμοχωρητικότητα του αέρα
- $T_3$  : η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του ξηραντηρίου
- $T_2$  : η θερμοκρασία του αέρα πριν την θερμή πηγή

Για την ενεργειακή αξιολόγηση του ξηραντηρίου χρησιμοποιείται αντί του βαθμού απόδοσης, η ειδική κατανάλωση ενέργειας. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας ορίζεται ως ο λόγος της καταναλισκόμενης ενέργειας προς την μάζα του νερού που αφαιρέθηκε από το προϊόν κατά την διάρκεια της ξήρανσης και δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Aghbashlo et al., 2008; Sharma et al., 2006) :

$$SEC = \frac{Q_{h,tot}}{m_{w,tot}} \quad (5.9)$$

όπου:

- $m_{w,tot}$  : η συνολική μάζα νερού που αφαιρέθηκε από το προϊόν κατά την ξήρανση
- $Q_{h,tot}$  : η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε στον θερμαντήρα κατά την διάρκεια της ξήρανσης

Η ενέργεια αυτή αποτελεί το άθροισμα της ενέργειας  $Q_h$ , η οποία καταναλώνεται σε κάθε χρονικό βήμα  $\Delta\tau$ . Η ενέργεια  $Q_h$  αποτελεί την ολοκλήρωση στο διάστημα του κάθε χρονικού βήματος της ισχύος  $P_h$ . Συνεπώς, η ενέργεια  $Q_h$  υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_h = \dot{m}_{air} c_p (T_3 - T_2) \Delta\tau \quad (5.10)$$

όπου:

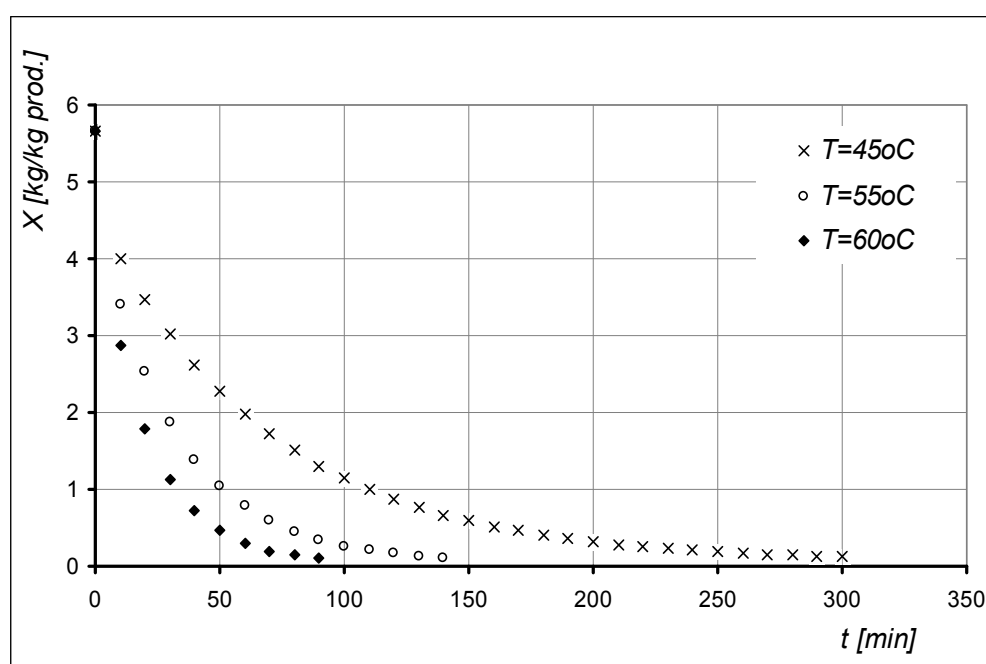
- $\Delta\tau$  : το χρονικό βήμα

Για τον υπολογισμό των ενεργειακών μεγεθών, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των θερμοκρασιών στις αντίστοιχες θέσεις του ξηραντηρίου. Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών επιλύεται αλγεβρικά το σύστημα των εξισώσεων 5.4-5.7. Για την επίλυση του συστήματος θεωρείται γνωστή η θερμοκρασία εισόδου  $T_1$  και άγνωστες οι:  $T_2, T_3, T_4, T_5$  και  $\Delta T$ .

Για την επίλυση επιλέχτηκε χρονικό βήμα  $\Delta\tau=600$  sec.

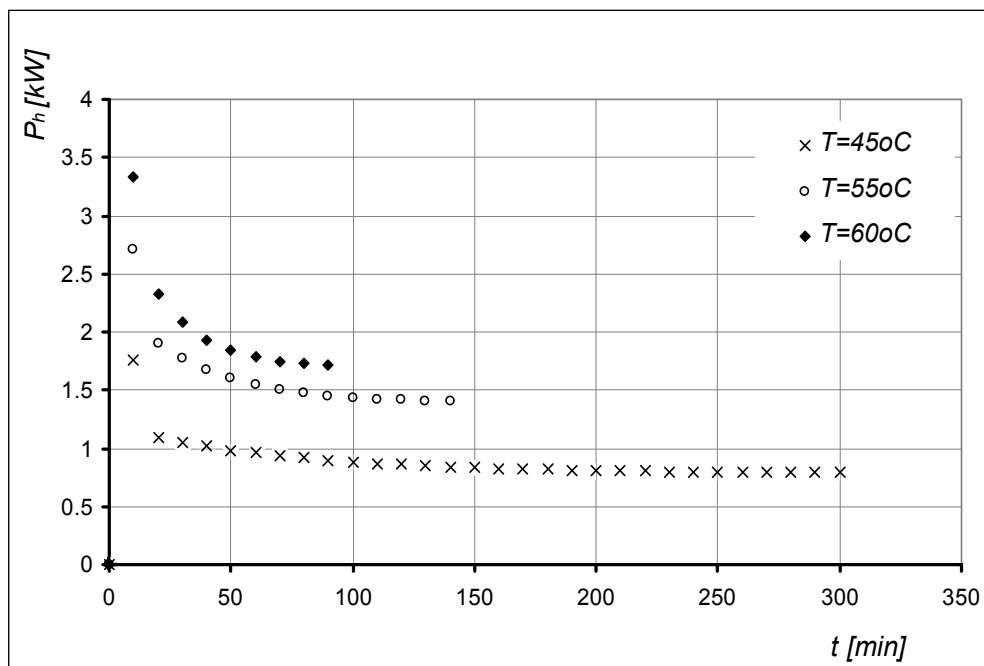
### 5.3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν εξάχθηκαν για συνθήκες περιβάλλοντος θερμοκρασίας 32 °C και υγρασίας 10 g/kg. Οι συνθήκες αυτές επιλέχθηκαν καθώς μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για το μήνα Ιούλιο για την περιοχή των Αθηνών σύμφωνα με το Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος (Μπαλαράς κα., 2006). Σημειώνεται ότι ο Ιούλιος είναι από τους βασικούς μήνες συγκομιδής της μέντας (Βικιπαίδεια, 2013). Η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία της μέντας, σε υγρή βάση, λαμβάνεται ίση με 85 % (Kaya et al., 2009; Akpinar, 2005; Doymaz 2005) ενώ η τελική ίση με 11% (υ.β.), ποσοστό στο οποίο επιτρέπεται η ασφαλή αποθήκευσή της (Tarhan et al. 2010; Doymaz, 2005).



**Σχήμα 5.5** - Καμπύλες Ξήρανσης για διάφορες θερμοκρασίες του αέρα Ξήρανσης

Στο σχ. 5.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας της μέντας σε σχέση με το χρόνο για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα Ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας Ξήρανσης επιφέρει σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου Ξήρανσης. Πιο συγκεκριμένα για θερμοκρασία Ξήρανσης 45 °C ο χρόνος Ξήρανσης υπολογίζεται στα 300 min, για 55 °C στα 140 min και για θερμοκρασία Ξήρανσης 60 °C στα 90 min.

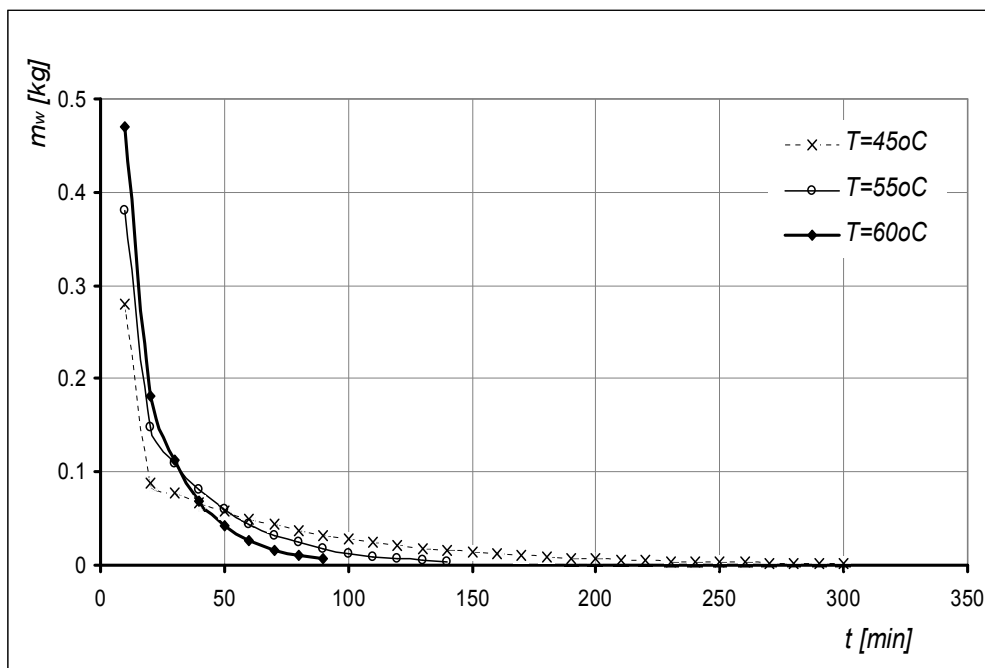


**Σχήμα 5.6** - Μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος κατά την διάρκεια της ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες ξήρανσης

Από το παραπάνω σχήμα (σχ. 5.6) παρατηρούμε ότι το επίπεδο της απαιτούμενης ισχύος ( $P_h$ ) κατά την διάρκεια της ξήρανσης είναι υψηλότερο, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της ξήρανσης.

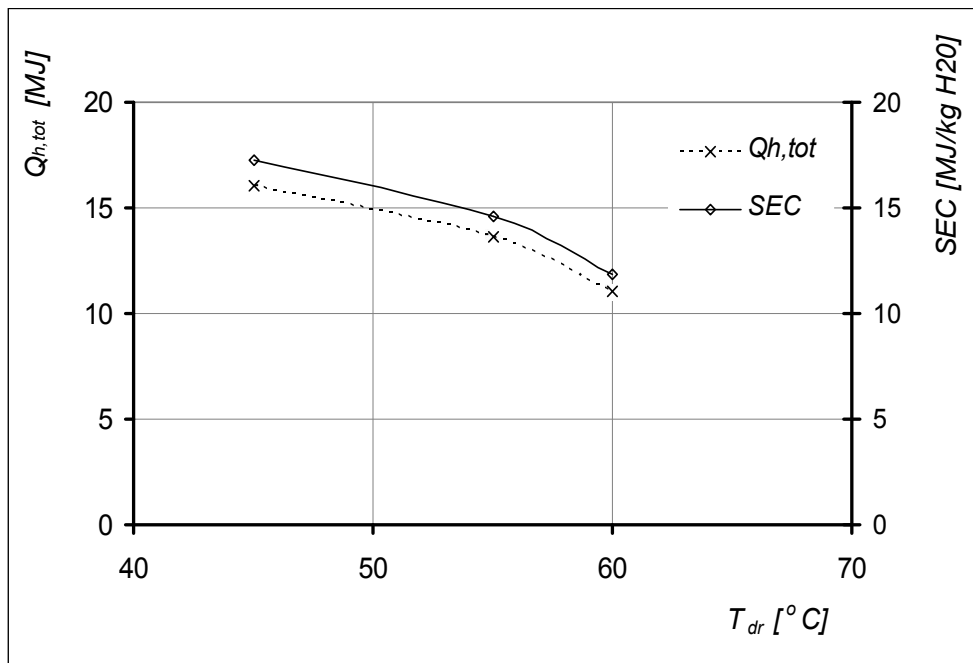
Η αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης συνεπάγει την αύξηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τη θερμική πηγή. Η χρήση του εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας συνεισφέρει στην εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας, η οποία όμως δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει τις αυξημένες απαιτήσεις που συνδέονται με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.

Σχετικά με τη φθίνουσα συμπεριφορά που παρουσιάζει η απαιτούμενη θερμική ισχύς σε σχέση με το χρόνο μπορούν να σημειωθούν τα εξής: όπως αναφέρθηκε στη διατύπωση του μοντέλου, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το θάλαμο ξήρανσης ( $T_4$ ) εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που απορροφάται, καθώς ο αέρας θερμαίνεται κατά το ποσό της θερμότητας που αντιστοιχεί στην ενθαλπία εξάτμισης της συγκεκριμένης ποσότητας νερού. Με την πάροδο του χρόνου η ποσότητα αυτή μειώνεται (σχ. 5.7), όπως και η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα διαμέσου του θαλάμου ξήρανσης. Αντίστοιχα, μεταβάλλεται, λόγω της λειτουργίας του εναλλάκτη και η θερμοκρασία στην έξοδο του ρεύματος απαγωγής ( $T_2$ ). Η μείωση της θερμοκρασίας  $T_2$  με την πάροδο του χρόνου, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης θερμικής ισχύος  $P_h$ , η οποία παρουσιάζεται στο σχ. 5.6.



**Σχήμα 5.7** – Αφαιρούμενη ποσότητα νερού από το προϊόν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες ξήρανσης

Στο σχ. 5.8 παρουσιάζεται η απαιτούμενη ενέργεια όπως και η ειδική κατανάλωση ενέργειας για διάφορες θερμοκρασίες ξήρανσης. Όπως προαναφέρθηκε, η ειδική κατανάλωση ενέργειας ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας της θερμικής πηγής προς την συνολική ποσότητα νερού που αφαιρέθηκε από το προϊόν.



**Σχήμα 5.8** - Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης

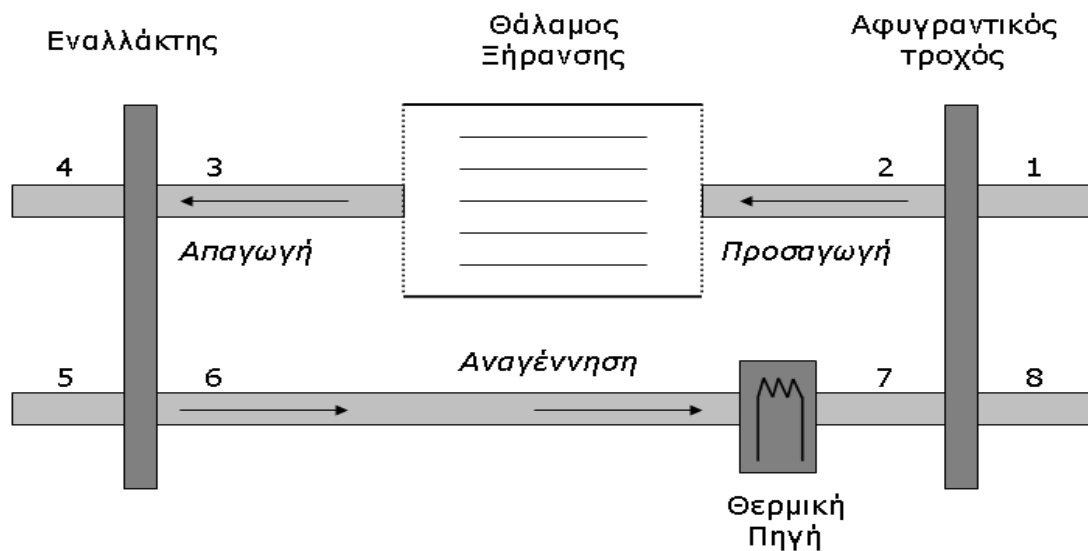
Αν και η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, η σημαντική μείωση του χρόνου ξήρανσης οδηγεί στη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Αντίστοιχη είναι και η συμπεριφορά της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς η συνολική ποσότητα του νερού που αφαιρείται από το προϊόν είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

## 5.4 Μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου με συσκευή αφύγρανσης

### 5.4.1 Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη του ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης (σχ. 5.9) αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη. Το θάλαμο ξήρανσης παράλληλης ροής όμοιο με του συμβατικού ξηραντηρίου, τη θερμική πηγή για την πρόσδοση θερμότητας στον αέρα περιβάλλοντος για την αναγέννηση του τροχού, έναν εναλλάκτη αέρα-αέρα μεταξύ των ρευμάτων απαγωγής και αναγέννησης προ της εισόδου του αέρα στη θερμική πηγή και έναν αφυγραντικό τροχό για την αφύγρανση του αέρα πριν από την είσοδο του στον θάλαμο ξήρανσης.





**Σχήμα 5.9** - Διάταξη ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης

#### 5.4.2 Μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης

Σύμφωνα και με την ανάλυση για την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου, το μοντέλο του πλήρους συστήματος αποτελείται από τα επιμέρους μοντέλα των κύριων υποσυστημάτων.

##### Τροχός αφύγρανσης

Τα φαινόμενα που διέπουν τον τροχό αφύγρανσης κατά την λειτουργία του είναι αυτά της μεταφοράς μάζας και θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων προσαγωγής και αναγέννησης.

Για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας του τροχού στη σχετική βιβλιογραφία θεωρείται αρκετά διαδεδομένη η προσέγγιση των Maclaine-Cross and Banks (1972). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, η λειτουργία του τροχού αφύγρανσης αντιμετωπίζεται σε αναλογία με αυτή ενός απλού (περιστρεφόμενου) εναλλάκτη θερμότητας (*θεωρία αναλογίας*). Η αναλογία εκφράζεται μέσω της χρήσης των μεταβλητών συνδυασμένου δυναμικού  $F_1$ ,  $F_2$  (characteristic or combined potential variables) (Maclaine-Cross, 1974; Maclaine-Cross and Banks, 1972; Banks, 1972).

Οι μεταβλητές συνδυασμένου δυναμικού για την περίπτωση χρήσης silica - gel ως αφυγραντικού μέσου και αέρα - υδρατμού ως εργαζόμενου μέσου δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις (Jurinak, 1982):

$$F_{1,i} = \frac{-2865}{(T_i + 273.15)^{1.49}} + 4.344 \left( \frac{w_i}{1000} \right)^{0.8624} \quad (5.11\alpha)$$

$$F_{2,i} = \frac{(T_i + 273.15)^{1.49}}{6360} - 1.127 \left( \frac{w_i}{1000} \right)^{0.07969} \quad (5.11\beta)$$

Η επίλυση του προβλήματος του τροχού αφύγρανσης σύμφωνα με τη θεωρία αναλογίας, βασίζεται στον ορισμό των συντελεστών απόδοσης του τροχού  $\eta_{F_1}$ ,  $\eta_{F_2}$  ως προς τις μεταβλητές  $F_1$ ,  $F_2$ , σε αναλογία με το συντελεστή απόδοσης εναλλάκτη μεταφοράς θερμότητας περιστρεφόμενου τύπου ( $\eta_{hx}$ ).

Συνεπώς οι συντελεστές απόδοσης του αφυγραντικού τροχού δίνονται από τις σχέσεις:

$$\eta_{F_1} = \frac{F_{1,2} - F_{1,1}}{F_{1,7} - F_{1,1}} \quad (5.12\alpha)$$

$$\eta_{F_2} = \frac{F_{2,2} - F_{2,1}}{F_{2,7} - F_{2,1}} \quad (5.12\beta)$$

όπου:

- $F_{1,i}$ : η τιμή της μεταβλητής συνδυασμένου δυναμικού F1 στις θέσεις  $i=1,2,7$  (βλ. σχ. 5.8) [-]
- $F_{2,i}$ : η τιμή της μεταβλητής συνδυασμένου δυναμικού F2 στις αντίστοιχες θέσεις  $i$  [-]

Οι συντελεστές απόδοσης ανάλογα με τις τιμές που παίρνουν χαρακτηρίζουν την ποιοτική λειτουργία του τροχού και παραμένουν εν γένει σταθεροί κατά την λειτουργία του (Panaras et al., 2010b). Στην παρούσα εφαρμογή οι τιμές των συντελεστών επιλέχθηκαν  $\eta_{F_1}=0.09$  και  $\eta_{F_2}=0.76$ , οι οποίες χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός συγκεκριμένου εμπορικά διαθέσιμου τροχού αφύγρανσης (Panaras et al., 2010a).

Υποθέτοντας μηδενικές απώλειες θερμότητας και μάζας στο τροχό προκύπτουν επίσης οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$T_1 - T_2 = T_8 - T_7 \quad (5.13)$$

$$w_1 - w_2 = w_8 - w_7 \quad (5.14)$$

όπου:

- $T_i$  : η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα στις αντίστοιχες θέσεις  $i$  (όπως υποδεικνύονται στο σχ. 5.8)
- $w_i$  : η απόλυτη υγρασία του ρεύματος αέρα στις αντίστοιχες θέσεις  $i$  (όπως υποδεικνύονται στο σχ. 5.8)

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που συγκροτούν το μοντέλο γίνεται αλγεβρικά. Εστιάζοντας στην περίπτωση του τροχού:

1. Με δεδομένες τις συνθήκες στη θέση 7 (θερμοκρασία αναγέννησης  $T_7$  και υγρασία ρεύματος αναγέννησης  $w_7$  η οποία είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος  $w_7 = w_1$ ), και τις συνθήκες περιβάλλοντος ( $T_1, w_1$ ) υπολογίζονται οι μεταβλητές συνδυασμένου δυναμικού  $F_{1,1}$ ,  $F_{1,7}$ ,  $F_{2,1}$  και  $F_{2,7}$  (εξ. 5.11α, 5.11β).
2. Με δεδομένους τους συντελεστές απόδοσης  $\eta_{F1}$ ,  $\eta_{F2}$  υπολογίζονται οι μεταβλητές  $F_{1,2}$  και  $F_{2,2}$  (εξ. 5.12α, 5.12β).
3. Επιλύοντας το σύστημα των δύο εξισώσεων ( $F_{1,2}$  και  $F_{2,2}$ ) προκύπτουν οι τιμές της θερμοκρασίας και της απόλυτης υγρασίας του αέρα μετά τη διέλευσή του από τον τροχό (θέση 2). Σημειώνεται ότι η επίλυση γίνεται με την εφαρμογή επαναληπτικής μεθόδου, καθώς οι εξισώσεις (5.11α, 5.11β) είναι μη γραμμικές.
4. Τέλος από τις εξισώσεις 5.13, 5.14 υπολογίζεται η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία του αέρα στη θέση 8.

Τα μοντέλα των υπόλοιπων υποσυστημάτων αντιμετωπίζονται σύμφωνα με την ανάλυση για την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου.

Ειδικότερα, η θερμοκρασία  $T_3$  στην έξοδο του θαλάμου ξήρανσης υπολογίζεται από τη σχέση 5.7.

Αντιστοίχως από την σχέση του βαθμού απόδοσης για τον εναλλάκτη θερμότητας προσδιορίζεται η θερμοκρασία εισόδου του εναλλάκτη της θερμικής πηγής  $T_6$  (βλ. σχ. 5.9):

$$\eta_{hx} = \frac{T_6 - T_5}{T_3 - T_5} \Rightarrow T_6 = T_5 + \eta_{hx}(T_3 - T_5) \quad (5.15)$$

Η θερμοκρασία αυτή ενδιαφέρει καθώς αποτελεί τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στη θερμική πηγή, και κατ' επέκταση επηρεάζει την απαιτούμενη θερμική ισχύ για τη λειτουργία του συστήματος.

Σε αντίθεση με την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου, όπου η καταναλισκόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης, στην περίπτωση του τροχού αφύγρανσης η ενέργεια που δαπανάται για την πραγματοποίηση της ξήρανσης είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του τροχού αφύγρανσης. Η ενέργεια αναγέννησης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{reg} = \dot{m}_{air} c_p (T_7 - T_6) \Delta \tau \quad (5.16)$$

Όπου:

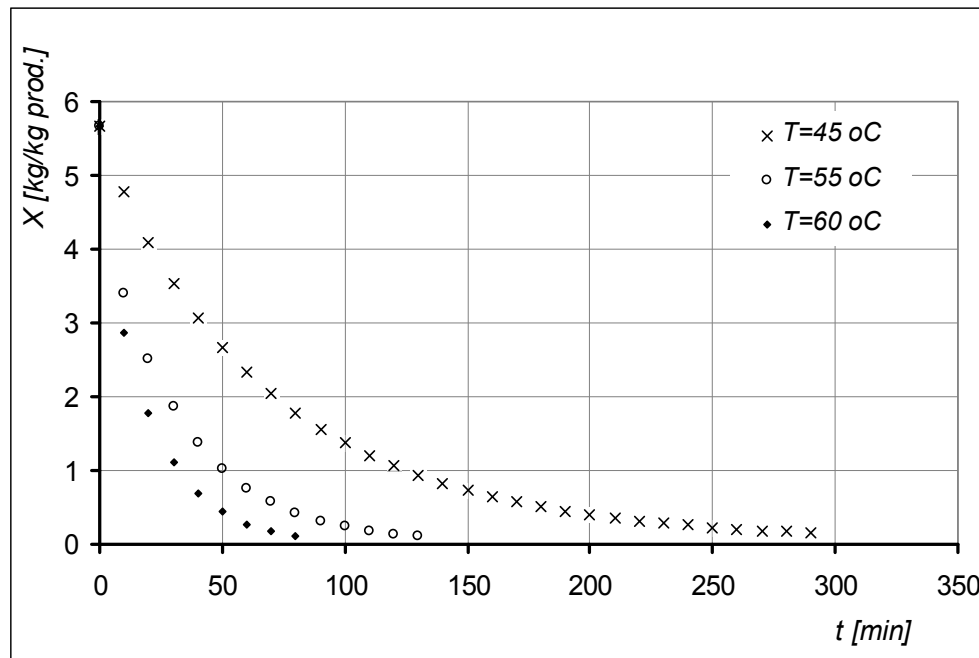
- $T_5$  : η θερμοκρασία αναγέννησης του τροχού (βλ. σχ. 5.9)
- $T_6$  : η θερμοκρασία του αέρα πριν τον θερμαντήρα (βλ. σχ. 5.9)
- $\Delta \tau$  : το χρονικό βήμα

Ομοίως υπολογίζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας ως ο λόγος της συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε για την αναγέννηση του τροχού προς την συνολική ποσότητα νερού που αφαιρέθηκε από το προϊόν

$$SEC = \frac{Q_{reg,tot}}{m_{w,tot}} \quad (5.17)$$

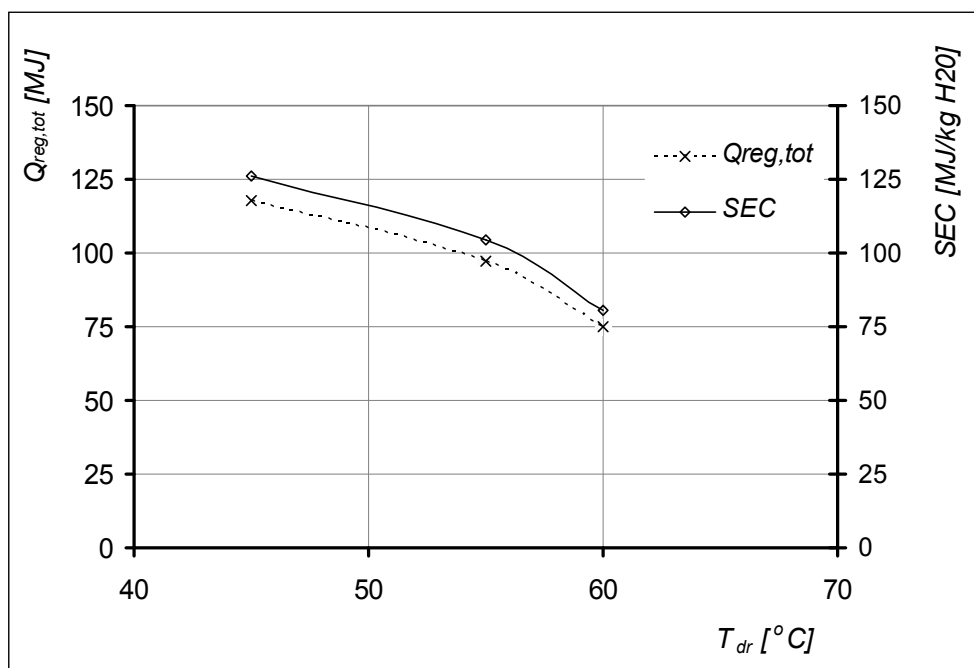
### 5.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα για να είναι συγκρίσιμα με αυτά της ξήρανσης της μέντας σε συμβατικό ξηραντήριο προέκυψαν για τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία) και για την ίδια αρχική περιεχόμενη υγρασία της μέντας. Οι χρόνοι ξήρανσης για τις διάφορες συνθήκες υπολογίστηκαν όταν η τελική περιεχόμενη υγρασία της μέντας έγινε ίση με 11% (υ.β.).



**Σχήμα 5.10** - Καμπύλες Ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης

Στο σχ. 5.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης της μέντας για θερμοκρασία ξήρανσης 45, 55 και 60 °C. Η διάρκεια της ξήρανσης για τις παραπάνω θερμοκρασίες είναι 290, 130 και 80 min αντίστοιχα.



**Σχήμα 5.11-** Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης

Στο σχ. 5.11 παρουσιάζεται η συνολική απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίηση της ξήρανσης και η ειδική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο η απαιτούμενη ενέργεια μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίστοιχη με την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου, καθώς κατ' ουσία η αύξηση της ισχύος που απαιτείται για υψηλότερες θερμοκρασίες συνοδεύεται από σημαντική μείωση του χρόνου ξήρανσης.

#### 5.4.4 Σύγκριση με την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου

Όσον αφορά τους χρόνους ξήρανσης, στην διάταξη με τον αφυγραντικό τροχό είναι ελαφρώς μειωμένοι σε σχέση με την συμβατική ξήρανση και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η υγρασία ισορροπίας, λόγω του αφυγραμένου αέρα, είναι αρκετά μικρότερη έναντι αυτής που προκύπτει για υγρασία περιβάλλοντος. Η διαφορά στις τιμές της υγρασίας ισορροπίας είναι ο λόγος που οι καμπύλες ξήρανσης των δύο διατάξεων έχουν αυτή την μικρή διαφορά, της τάξης των 10 min, καθώς οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές στο μοντέλο της κινητικής της ξήρανσης προκύπτουν για υγρασίες αέρα περιβάλλοντος και δεν περιλαμβάνουν πληροφορία για την συμπεριφορά της ξήρανσης της μέντας σε χαμηλές υγρασίες αέρα. Σε επίπεδο ενέργειας, το ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης παρουσιάζει σαφώς μεγαλύτερη θερμική ισχύ, καθώς η απαιτούμενη θερμοκρασία αναγέννησης είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία ξήρανσης, λόγω της

παρουσίας του τροχού. Στην πράξη ο τροχός δρα ως εναλλάκτης θερμότητας μειωμένης αποδοτικότητας μεταξύ των ρευμάτων προσαγωγής και αναγέννησης.

Σε κάθε περίπτωση για την επιτυχή σύγκριση των δύο διατάξεων απαραίτητη είναι η εύρεση των εξισώσεων της κινητικής της ξήρανσης που να περιλαμβάνουν χαμηλές τιμές υγρασίας του αέρα ξήρανσης κάτι το οποίο στην περίπτωση της μέντας και γενικότερα των αρωματικών φυτών και φαρμακευτικών φυτών δεν συναντάται στη βιβλιογραφία.

## **6 Μελέτη περίπτωσης: Σχεδιασμός και μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντηρίου Ελαιοκράμβης**

### **6.1 Εισαγωγή**

Ο σπόρος της ελαιοκράμβης ανήκει στην κατηγορία των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων. Το ενδιαφέρον στην καλλιέργειά της ελαιοκράμβης έγκειται στη χρησιμοποίηση του σπόρου της, πέρα από την παραγωγή ζωοτροφής, στην παραγωγή βιοκαυσίμου έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία. Οι συνθήκες ξήρανσης επηρεάζουν την χημική σύσταση του σπόρου επομένως και την τελική ποιότητα και ποσότητα του εξαγόμενου ελαίου το οποίο χρησιμοποιείται ως βιοκαύσιμο (Jakubowska et al., 2008). Στη βιβλιογραφία σε αντίθεση με τα λοιπά θερμοευαίσθητα γεωργικά προϊόντα, η κινητική της ξήρανσης του σπόρου της ελαιοκράμβης έχει προσδιοριστεί για χαμηλές τιμές απόλυτης υγρασίας του αέρα ξήρανσης, γεγονός που μας επιτρέπει τη χρησιμοποίηση των εξισώσεων αυτών στην εφαρμογή του ξηραντηρίου με τον τροχό αφύγρανσης.

Η ξήρανση της ελαιοκράμβης πραγματοποιείται σε λεπτά στρώματα (thin layer drying). Όπως και στην περίπτωση της μέντας, κατά την ξήρανσή της παρατηρείται μόνο φθίνων ρυθμός ξήρανσης. Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι αυτά του δεύτερου νόμου του Fick για σφαιρική γεωμετρία όπου προσδιορίζεται ο συντελεστής διάχυσης και ημιεμπειρικές εξισώσεις όπου υπολογίζονται οι διάφοροι συντελεστές μετά από παρεμβολή στα πειραματικά δεδομένα για τις διάφορες συνθήκες ξήρανσης.

Οι διατάξεις όπου πραγματοποιείται η διερεύνηση της ξήρανσης της ελαιοκράμβης είναι όμοιες με αυτές που προτάθηκαν για την ξήρανση της μέντας.

### **6.2 Μοντελοποίηση ξήρανσης ελαιοκράμβης με ρεύμα θερμού αέρα**

#### *6.2.1 Υφιστάμενα μοντέλα*

Οι Crisp et al. (1993) ξηραίνουν σπόρους ελαιοκράμβης με θερμό αφυγρασμένο αέρα σε θερμοκρασίες 40, 50, 60 και 70 °C, σχετικής υγρασίας 5 έως 23 % εγκάρσιας ροής, ταχύτητας 0.023 m/s. Για τις παραπάνω συνθήκες ξήρανσης υπολογίζονται πειραματικά οι καμπύλες εκρόφησης και οι καμπύλες ξήρανσης. Για τον υπολογισμό της υγρασίας ισορροπίας δεν γίνεται προσαρμογή κάποιου μοντέλου παρά μόνο μίας εμπειρικής εξίσωσης η οποία έχει ως ανεξάρτητη μεταβλητή τη δραστηκότητα, μη λαμβάνοντας υπ όψιν την επίδραση της θερμοκρασίας.



Από τα πειραματικά δεδομένα των καμπύλων ξήρανσης για τις διάφορες συνθήκες, χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Fick για σφαιρική γεωμετρία και υπολογίζεται ο συντελεστής διάχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του σπόρου. Επιπλέον εφαρμόζεται η ημιεμπειρική εξίσωση του Lewis όπου υπολογίζεται η σταθερά ξήρανσης. Την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα την έχει ο δεύτερος νόμος του Fick.

Οι Duc et al. (2011) ξηραίνουν σπόρους ελαιοκράμβης με θερμό αέρα σε θερμοκρασίες 40, 50 και 60 °C, σχετικής υγρασία 30, 45 και 60 % σε εγκάρσιο πιλοτικό ξηραντήριο με ταχύτητα αέρα 0.5 m/s. Εφαρμόζουν το δεύτερο νόμο του Fick και τέσσερις ημιεμπειρικές εξισώσεις στα πειραματικά δεδομένα, όπου υπολογίζουν τους αντίστοιχους συντελεστές για τις διάφορες συνθήκες ξήρανσης. Ο συντελεστής διάχυσης συσχετίζεται με την θερμοκρασία ξήρανσης μέσω μιας εξίσωσης τύπου Arrhenius ενώ οι συντελεστές των ημιεμπειρικών εξισώσεων προκύπτουν συναρτήσει της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσης. Η ημιεμπειρική εξίσωση του Page, εμφανίζει την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα.

Οι Zare et al. (2011) υπολογίζουν τις ισόθερμες καμπύλες ρόφησης και τις καμπύλες ξήρανσης για την ξήρανση σπόρων ελαιοκράμβης με αφυγρασμένο αέρα θερμοκρασίας 40, 45, 50, 55 °C και απόλυτης υγρασίας 5, 10, 15, 20 g/kg, σε εγκάρσιο ξηραντήριο με ταχύτητα αέρα 0.4 m/s. Εφαρμόζουν τέσσερις ημιεμπειρικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό των καμπύλων ρόφησης και τρεις ημιεμπειρικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό των καμπύλων ξήρανσης. Καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα εμφανίζει η εξίσωση του Smith για τις καμπύλες ρόφησης και η εκθετική εξίσωση για τις καμπύλες ξήρανσης, οι συντελεστές της οποίας εκφράζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα ξήρανσης.

### 6.2.2 Επιλογή Μοντέλου

Η επιλογή του μοντέλου πραγματοποιείται βάσει των συνθηκών ξήρανσης της ελαιοκράμβης στην διάταξη προς μελέτη και της καταλληλότητας των προτεινόμενων εξισώσεων να περιγράψουν τόσο την επίδραση της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας του ρεύματος ξήρανσης στη διεργασία. Οι Crisp et al. (1993) αν και πραγματοποιούν την ξήρανση της ελαιοκράμβης σε αφυγρασμένο αέρα, η σχετική υγρασία του αέρα δεν εκφράζεται ως παράμετρος ούτε στον συντελεστή διάχυσης, όπου ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η θερμοκρασία του σπόρου, ούτε κατά την εφαρμογή της εξίσωσης του Lewis, όπου η υγρασία σε ξηρή βάση και η θερμοκρασία του σπόρου είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές της σταθεράς

της ξήρανσης. Οι Duc et al. (2011) εκφράζουν τον συντελεστή διάχυσης, και τους συντελεστές των ημιεμπειρικών εξισώσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, παρόλα αυτά για τις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης η απόλυτη υγρασία του αέρα είναι πολύ υψηλότερη από την απόλυτη υγρασία που προκύπτει από την εφαρμογή του αφυγραντικού τροχού, καθιστώντας τις εξισώσεις αυτές ακατάλληλες για χρήση στην προτεινόμενη διάταξη. Οι εξισώσεις που προκύπτουν από τους Zare et al. (2011) είναι οι καταλληλότερες καθώς η ξήρανση πραγματοποιείται σε ένα εύρος τιμών απόλυτης υγρασίας του αέρα το οποίο είναι συμβατό με την λειτουργία του αφυγραντικού τροχού για τις δεδομένες θερμοκρασίες ξήρανσης. Πέρα από την έκφραση των συντελεστών των μοντέλων της κινητικής της ξήρανσης συναρτήσει της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας, υπολογίζεται και η υγρασία ισορροπίας για τις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης, καθιστώντας εφικτό τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας σε ξηρή βάση.

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης του σπόρου της ελαιοκράμβης για τις προτεινόμενες διατάξεις είναι συνεπώς οι ακόλουθες (Zare et al. 2011):

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ισορροπίας δίνεται μετά από τροποποίηση της εξίσωσης του Smith:

$$X_e = (K_1 + K_2 T) - (K_3 + K_4 T) \ln(1 - a_w) \quad (6.1)$$

όπου:

- $X_e$  : περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας
- $a_w$  : η δραστηριότητα υγρασίας
- $K_1, K_2, K_3, K_4$  : σταθερές που εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την δραστηριότητα

Για τον αδιάστατο λόγο υγρασίας χρησιμοποιήθηκε η εκθετική εξίσωση δύο όρων:

$$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (6.2)$$

όπου:

- $k_1, k_2, a, b$ : σταθερές που εξαρτώνται από τις συνθήκες ξήρανσης

Από τον ορισμό του λόγου υγρασίας σε συνδυασμό με την εξίσωση 8.2 προκύπτει η έκφραση για την περιεκτικότητα σε υγρασία ανά χρονικό βήμα:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \Rightarrow X = MR(X_o - X_e) + X_e \quad (6.3)$$

όπου:

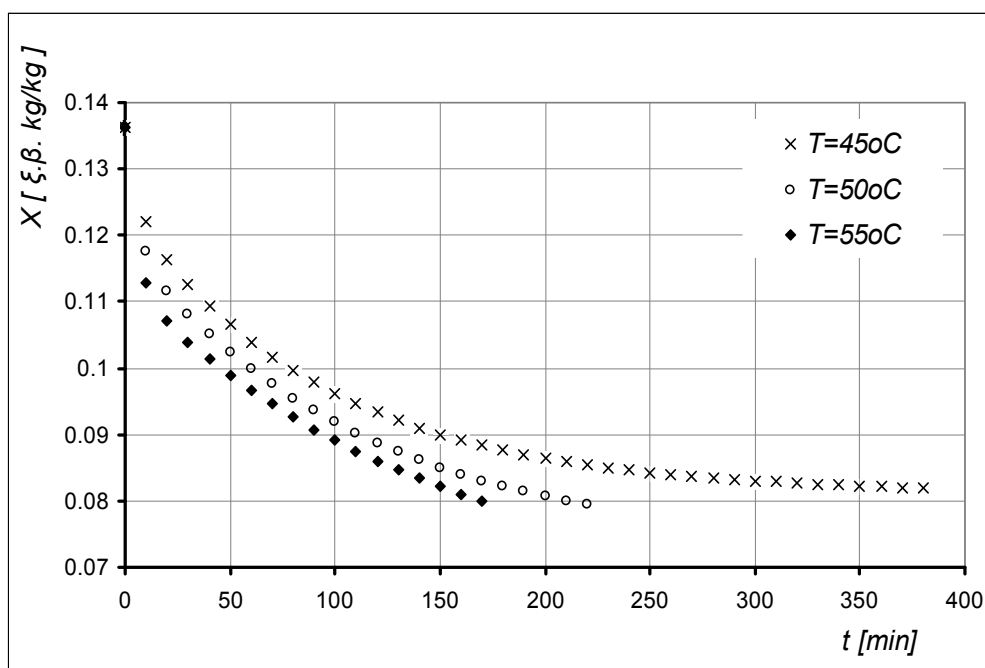
- $X_o$ : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

### 6.3 Διερεύνηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντηρίου

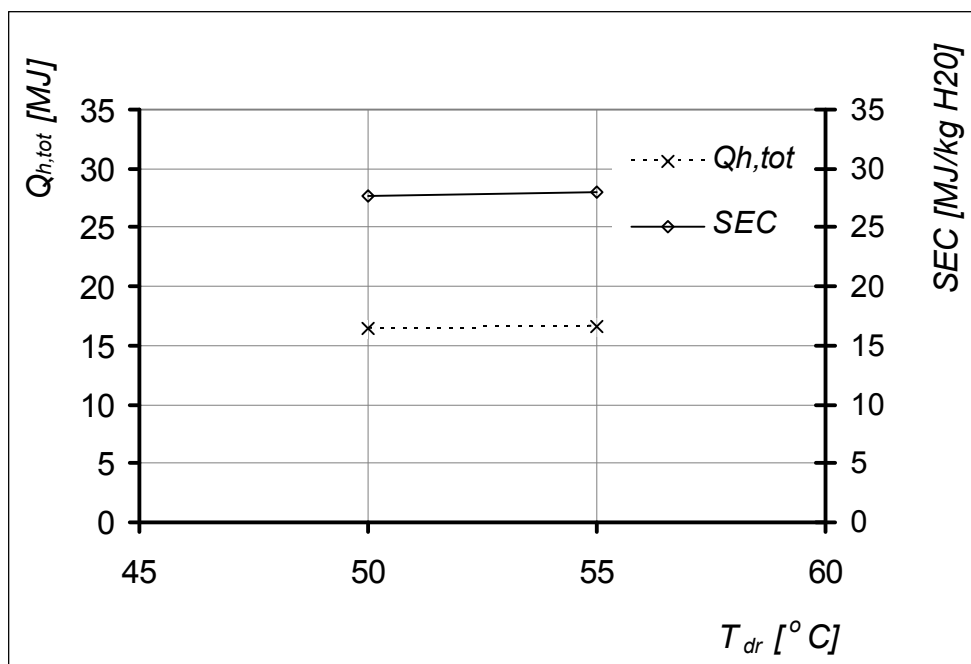
Τα αποτελέσματα που ακολουθούν εξήχθησαν για συνθήκες περιβάλλοντος 30 °C και υγρασίας 10 g/kg. Οι συνθήκες αυτές επελέγησαν καθώς μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για το μήνα Ιούνιο για την περιοχή των Αθηνών (Μπαλαράς κα., 2006). Σημειώνεται ότι ο Ιούνιος είναι από τους βασικούς μήνες συγκομιδής της ελαιοκράμβης (Διαμαντόπουλος, 2013). Η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του σπόρου της ελαιοκράμβης σε ξηρή βάση λαμβάνεται ίση με 13.6 % (ξ.β.) ενώ η τελική ίση με 8 % (ξ.β.), τελικό ποσοστό υγρασίας στο οποίο επιτρέπεται η ασφαλή αποθήκευσή της και η επιτυχής εξαγωγή του ελαίου της (Crisp et al., 1993; Zare et al., 2011; Duc et al., 2011). Η ξήρανση πραγματοποιείται σε λεπτά στρώματα πάχους 0.5 cm (Duc et al., 2011), στον προτεινόμενο θάλαμο όπου έλαβε χώρα και η ξήρανση της μέντας. Με δεδομένο ότι η φαινόμενη πυκνότητα του σπόρου της ελαιοκράμβης δίνεται 669 kg/m<sup>3</sup> (ANSI/ASAE, 1998) σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του θαλάμου ξήρανσης, προκύπτει ότι η δυναμικότητα του ξηραντηρίου ανέρχεται σε 12 kg σπόρου ελαιοκράμβης ανά κύκλο λειτουργίας.

Στο σχ. 6.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του σπόρου της ελαιοκράμβης σε σχέση με το χρόνο για διάφορες θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης. Όπως αναμένεται η αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης επιφέρει σημαντική μείωση στον συνολικό χρόνο ξήρανσης. Πιο συγκεκριμένα για απόλυτη υγρασία του αέρα

περιβάλλοντος 10 g/kg, η ξήρανση στους 45 °C δεν καθιστά εφικτή τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας στο επιθυμητό τελικό ποσοστό καθώς η υγρασία ισορροπίας, για τις δεδομένες συνθήκες του αέρα ξήρανσης, είναι μεγαλύτερη του 8 % (ξ.β.). Με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης κατά πέντε βαθμούς επιτυγχάνεται συνολικός χρόνος ξήρανσης 210 min, ενώ στους 55 °C η διάρκεια της ξήρανσης μειώνεται στα 170 min.



**Σχήμα 6.3** - Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης



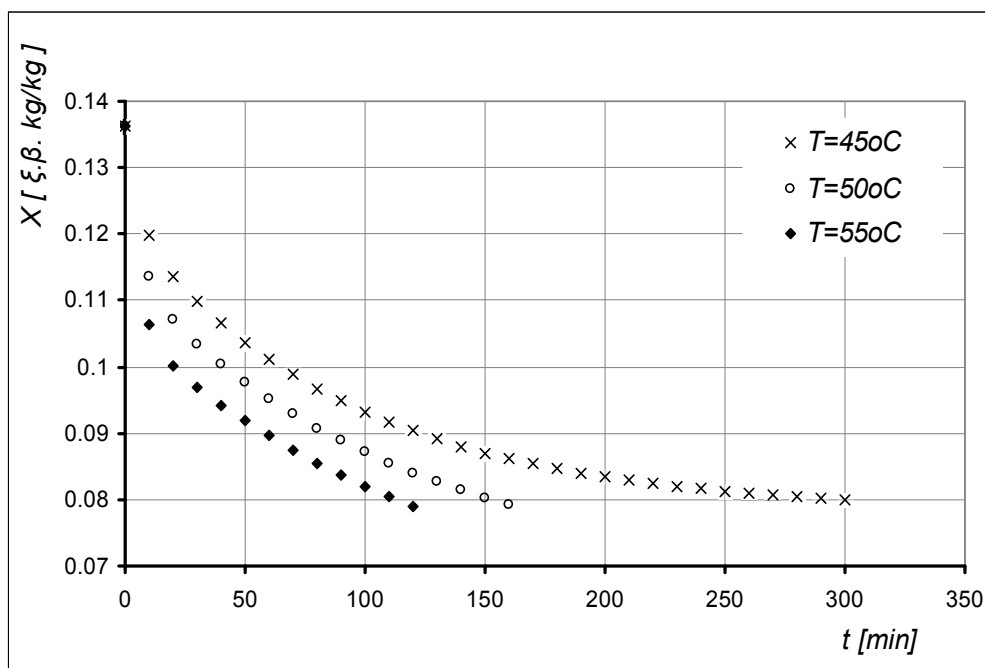
**Σχήμα 6.4** - Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης

Στο σχ. 6.4 παρουσιάζεται η απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίηση της ξήρανσης και η ειδική κατανάλωση ενέργειας, για την ξήρανση του σπόρου της ελαιοκράμβης στους 50 και 55 °C. Παρατηρούμε ότι παρόλο που η διάρκεια της ξήρανσης στους 55 °C μειώνεται κατά 20 %, η αύξηση της απαιτούμενης ισχύος από την θερμική πηγή, οφειλόμενη στην υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά που πρέπει να καλύψει, καθιστά την απαιτούμενη ενέργεια στις δύο θερμοκρασίες ξήρανσης σχεδόν ταυτόσημη.

## 6.4 Διερεύνηση λειτουργίας ξηραντηρίου με τροχό αφύγρυνσης

### 6.4.1 Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς

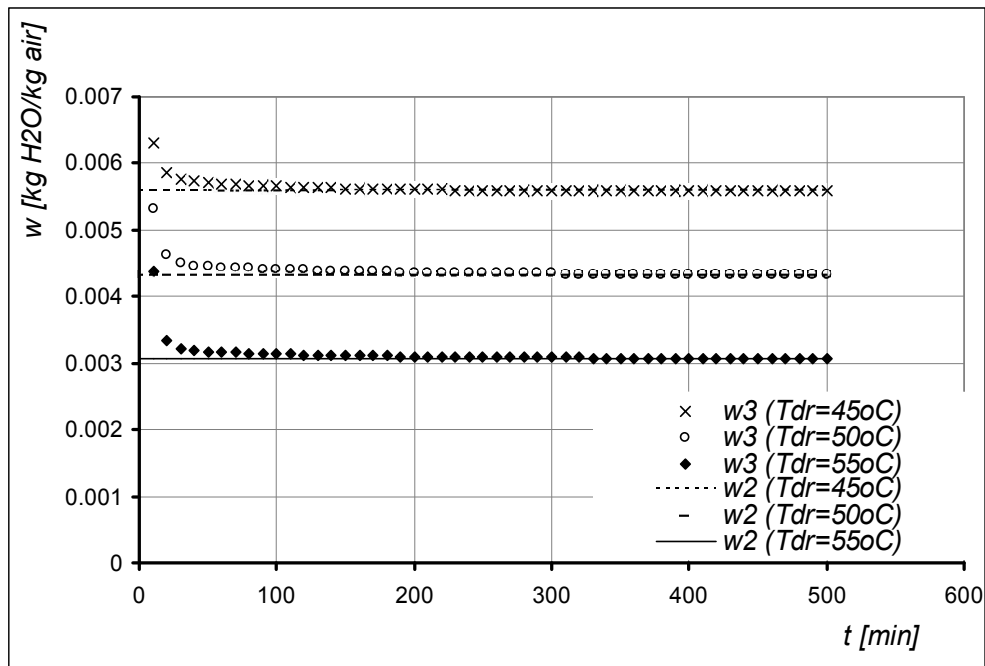
Τα αποτελέσματα που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν για τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος όπως και στην περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου, για την ίδια αρχική και τελική περιεκτικότητα σε υγρασία της ελαιοκράμβης. Οι θερμοκρασίες αναγέννησης του τροχού για την πραγματοποίηση της ξήρανσης στους 45, 50 και 55 °C είναι 60, 70 και 82 °C αντίστοιχα.



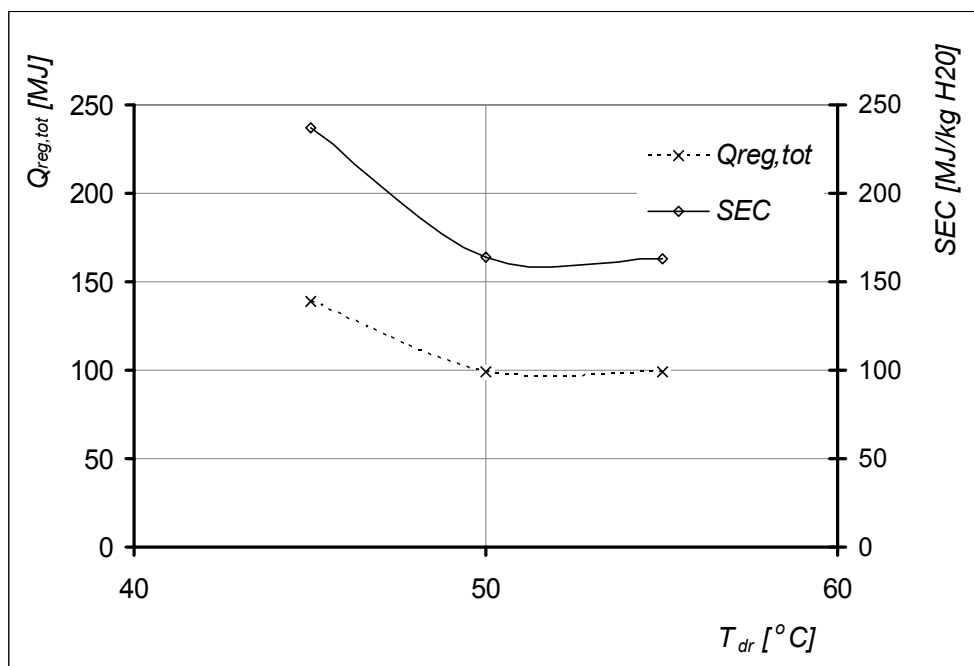
**Σχήμα 6.5** - Καμπύλες Ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα Ξήρανσης

Στο σχ. 6.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες Ξήρανσης για τις ίδιες θερμοκρασίες του αέρα Ξήρανσης με αυτές του συμβατικού Ξηραντηρίου. Όπως παρατηρούμε, στην περίπτωση της χρήσης του αφυγραντικού τροχού η Ξήρανση στους 45 °C είναι εφικτή καθώς λόγω της μείωσης της σχετικής υγρασίας του αέρα Ξήρανσης, η υγρασία ισορροπίας είναι μικρότερη από την τελική επιθυμητή τιμή, πετυχαίνοντας έτσι την Ξήρανση της ελαιοκράμβης σε 300 min. Στους 50 °C η Ξήρανση πραγματοποιείται σε 160 min ενώ στους 55 °C σε 120 min.

Η αύξηση της θερμοκρασίας Ξήρανσης συνδέεται με αύξηση της θερμοκρασίας αναγέννησης, και κατά συνέπεια μείωση της υγρασίας Ξήρανσης ( $w_2$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα. Παρατηρούμε ότι τα πρώτα λεπτά της Ξήρανσης αφαιρείται η μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας από το προϊόν, η οποία ισοδυναμεί με αύξηση της υγρασίας του αέρα Ξήρανσης κατά την έξοδό του από το Ξηραντήριο ( $w_3$ ). Μετά το πέρας της εμφάνισης του μεγίστου αυτού, η υγρασία του αέρα ( $w_3$ ) είναι σχεδόν ταυτόσημη με την υγρασία του αέρα Ξήρανσης μετά την έξοδό του από τον τροχό αφύγρυνσης ( $w_2$ ). Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της υγρασίας του ρεύματος Ξήρανσης στο τελικό αποτέλεσμα θα διερευνηθεί από την παραμετρική ανάλυση που ακολουθεί.



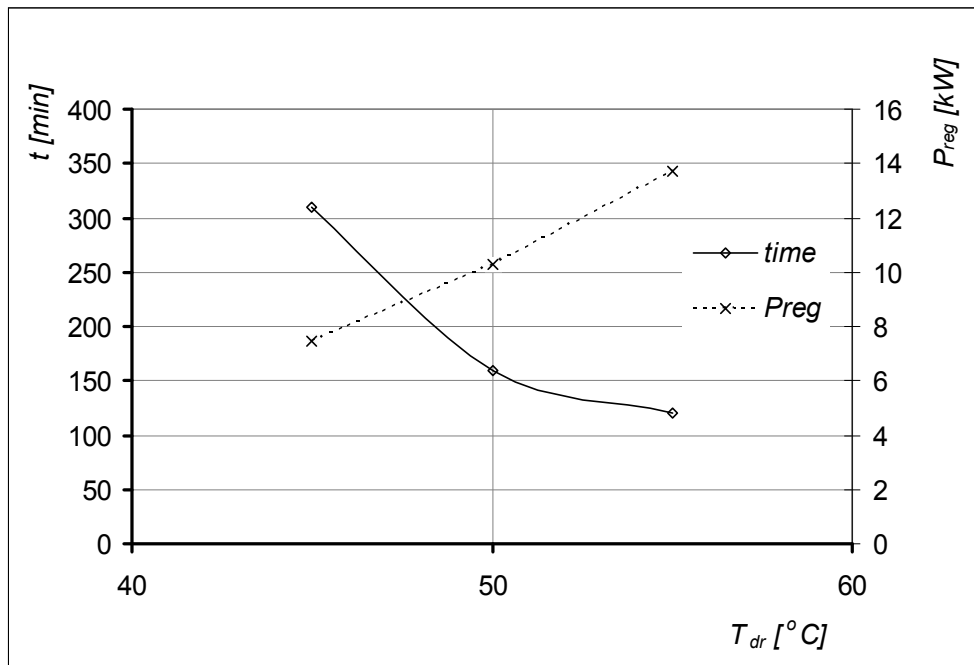
**Σχήμα 6.6** - Απόλυτη υγρασία του αέρα στην είσοδο (θέση 2) και έξοδο του Ξηραντηρίου (θέση 3) για διαφορετικές θερμοκρασίες ξήρανσης



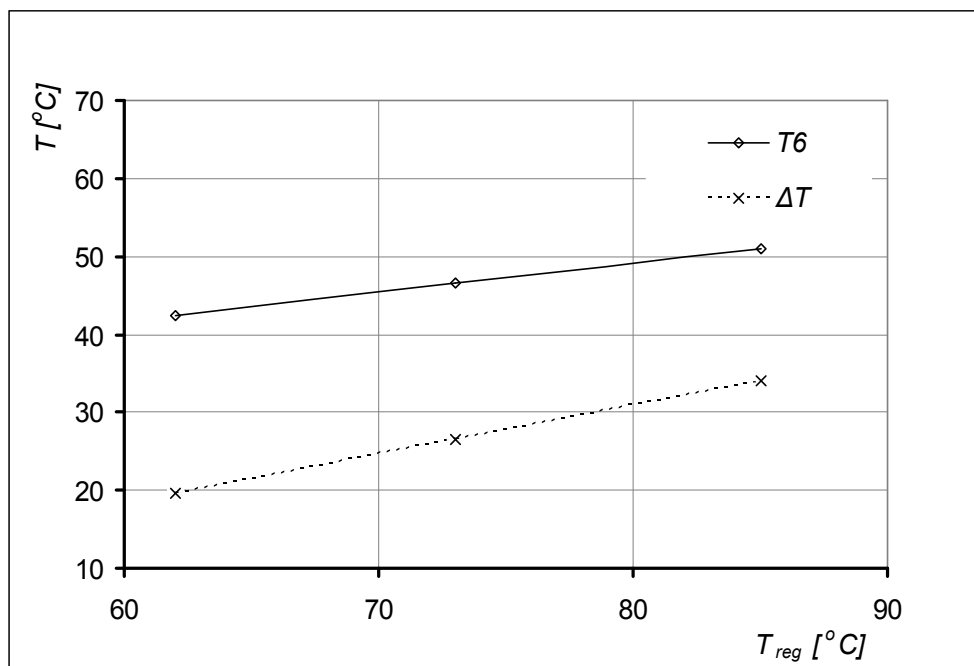
**Σχήμα 6.7** - Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης

Παρατηρούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης επιφέρει μείωση της απαιτούμενης ενέργειας (σχ. 6.7). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί (σχ. 6.8), αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης έχει ως συνέπεια τη μείωση του χρόνου ξήρανσης, παράλληλα όμως αυξάνονται οι ανάγκες

για θερμική ισχύ για την αναγέννηση του τροχού. Για το λόγο αυτό, οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι αντίστοιχες για θερμοκρασία ξήρανσης 50 και 55 °C, όπως φαίνεται και στο σχ. 6.7.



**Σχήμα 6.8** - Απαιτούμενη ισχύς για την αναγέννηση του τροχού και συνολικός χρόνος ξήρανσης σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης



**Σχήμα 6.9** - Θερμοκρασία εισόδου στον εναλλάκτη της θερμής πηγής και θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T$  σε σχέση με την θερμοκρασία αναγέννησης



Στο παραπάνω σχήμα (σχ. 6.9), απεικονίζεται η θερμοκρασία εισόδου στον εναλλάκτη της θερμικής πηγής. Η αύξηση της θερμοκρασίας αναγέννησης έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας στο ρεύμα απαγωγής, στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας. Εν τούτοις, η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T = T_{reg} - T_6$ , αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας αναγέννησης. Με άλλα λόγια, παρόλο που η αύξηση της θερμοκρασίας αναγέννησης οδηγεί σε αύξηση της θερμότητας που ανακτάται, οι συνολικές θερμικές ανάγκες είναι μεγαλύτερες.

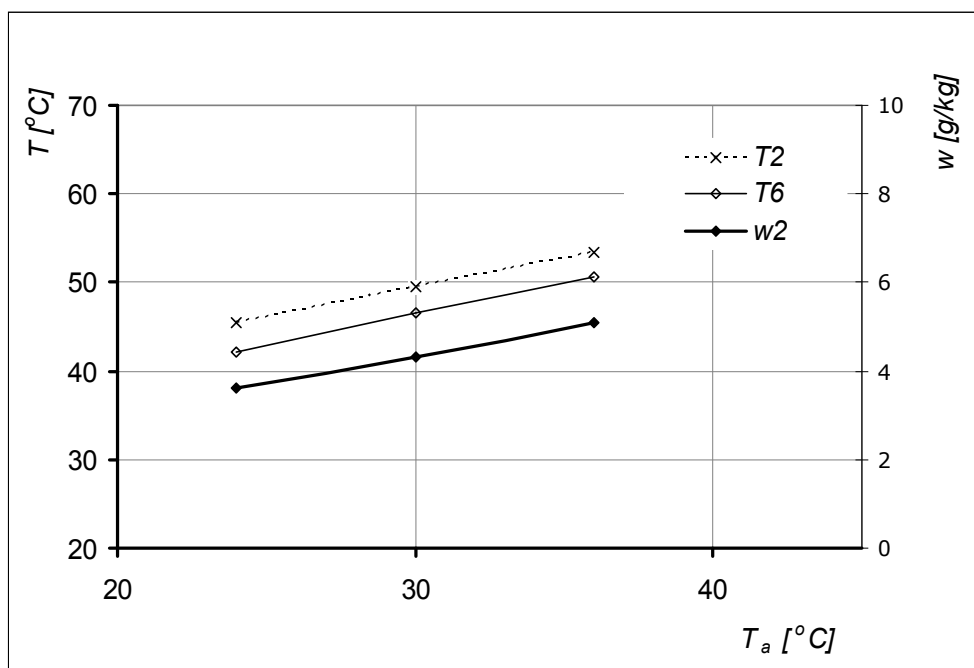
#### *6.4.2 Παραμετρική διερεύνηση της λειτουργίας του ξηραντηρίου με τη συσκευή αφύγρανσης*

##### *6.4.2.1 Εισαγωγή*

Η παραμετρική διερεύνηση εξετάζει τα αποτελέσματα που επιφέρει στην λειτουργία του ξηραντηρίου, συνεπώς και στην διεργασία της ξήρανσης, η μεταβολή των παραμέτρων της θερμοκρασίας και της υγρασίας περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία αναγέννησης παραμένει σταθερή και ίση με 70 °C ενώ οι τιμές των παραμέτρων στην περίπτωση αναφοράς είναι για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C, απόλυτης υγρασίας 10 g/kg.

##### *6.4.2.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_a$*

Η μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος οδηγεί σε διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της θερμοκρασίας δηλαδή του ρεύματος προσαγωγής στον τροχό, επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης και της υγρασίας του ρεύματος ξήρανσης, των χαρακτηριστικών δηλαδή του ρεύματος προσαγωγής, στη θέση εξόδου του τροχού. Σύμφωνα με τη λειτουργία του τροχού αφύγρανσης, η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου επιφέρει μείωση στην ικανότητά του να αφαιρεί υγρασία (Πανάρας, 2010), συνεπώς και αύξηση της υγρασίας του ρεύματος προσαγωγής στην έξοδο του τροχού.

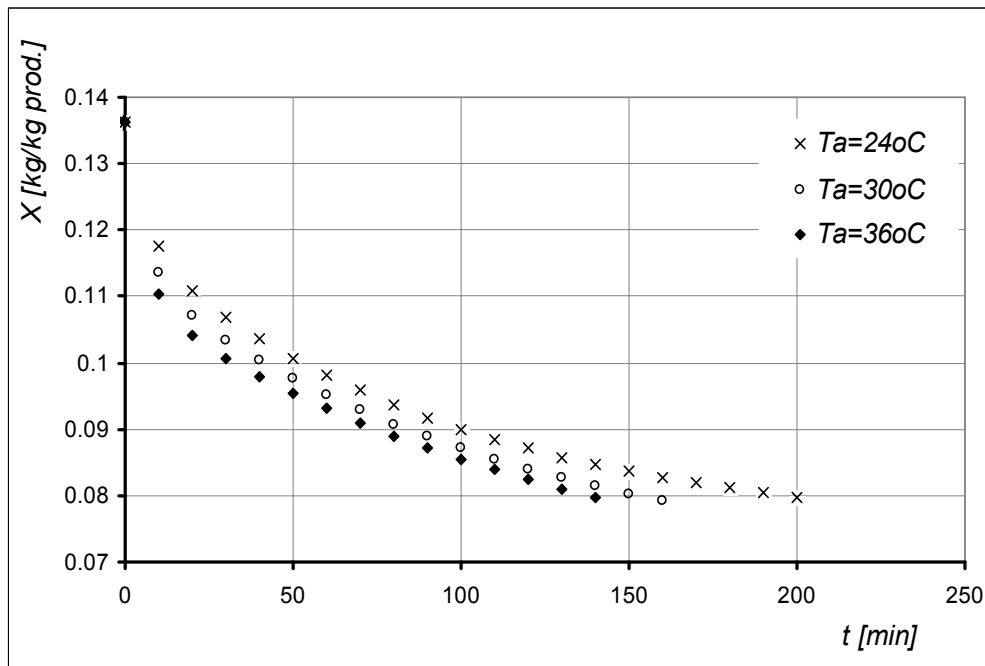


**Σχήμα 6.10** - Μεταβολή των συνθηκών ξήρανσης και της θερμοκρασίας εισόδου στη θερμική πηγή σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος

Επομένως όσο αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος τόσο η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης αλλά και η υγρασία του αυξάνονται.

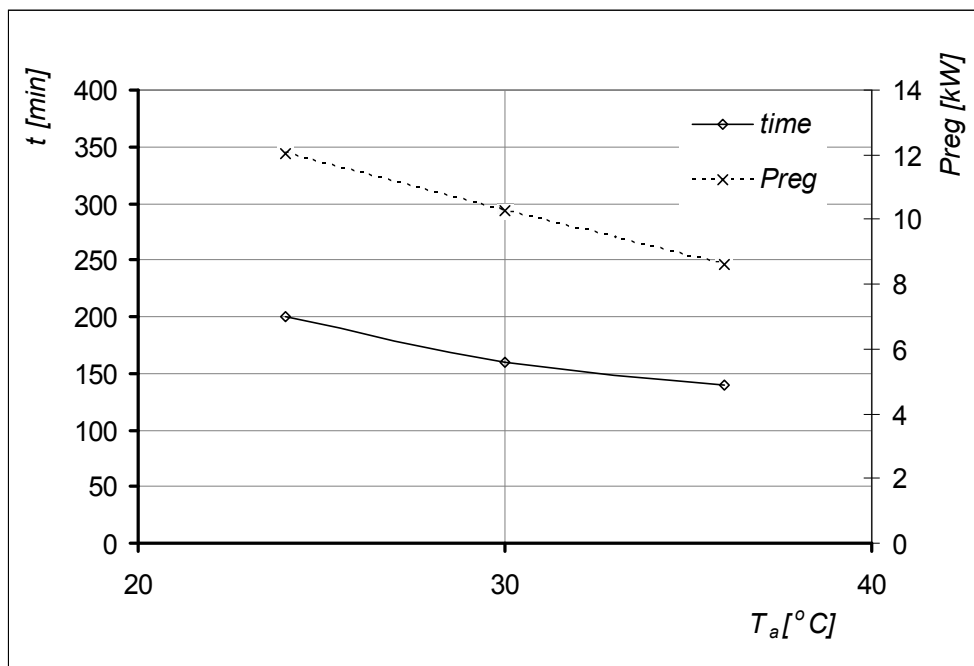
Παρόλο που η αύξηση της θερμοκρασίας του ρεύματος ξήρανσης έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ξήρανσης, η αύξηση της υγρασίας του ρεύματος ξήρανσης, επιφέρει τα αντίθετα αποτελέσματα στην διάρκεια της διεργασίας (Duc et al., 2011).

Τα αποτελέσματα της μεταβολής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και των συνεπαγόμενων μεταβολών που επιφέρει στις συνθήκες ξήρανσης, διαφαίνονται στις καμπύλες ξήρανσης του παρακάτω σχήματος (σχ. 6.11) Συμπεραίνουμε ότι η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος λειτουργεί θετικά στη μείωση του χρόνου ξήρανσης.

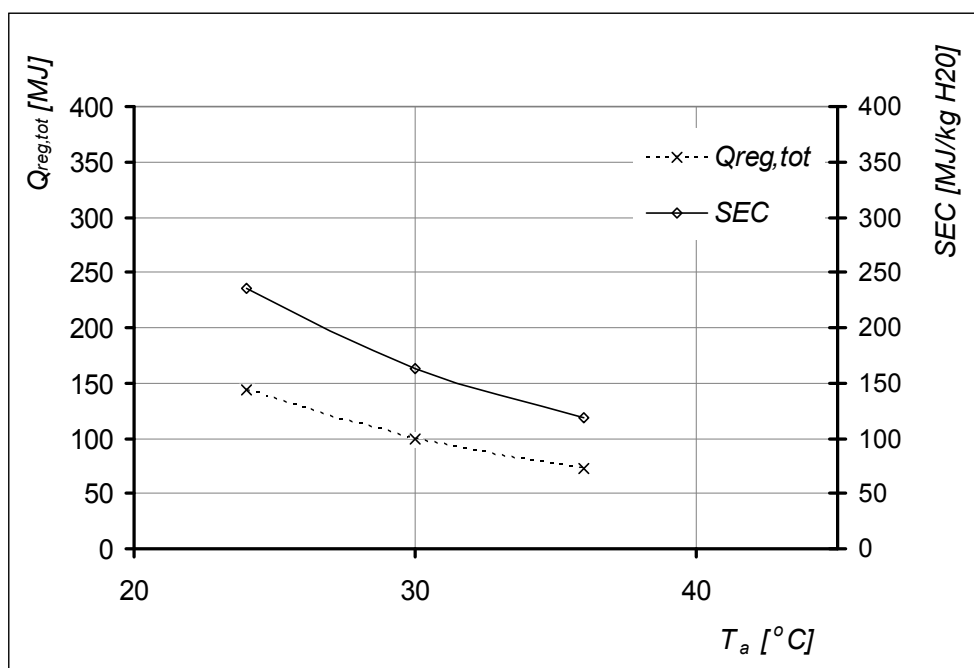


**Σχήμα 6.11** - Καμπύλες Ξήρανσης για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Η μείωση του χρόνου ξήρανσης οφειλόμενη στις συνθήκες ξήρανσης καθώς και η μείωση της ισχύος λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στην έξοδο του εναλλάκτη ανάκτησης, για την δεδομένη θερμοκρασία αναγέννησης (σχ. 6.10 & σχ. 6.12), οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για την πραγματοποίηση της ξήρανσης. Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος οδηγεί σε μείωση της συνολικής ενέργειας που δαπανάται για την αναγέννηση του τροχού άρα και της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (σχ. 6.13).



**Σχήμα 6.12** - Συνολικός χρόνος ξήρανσης και απαιτούμενη ισχύς σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος

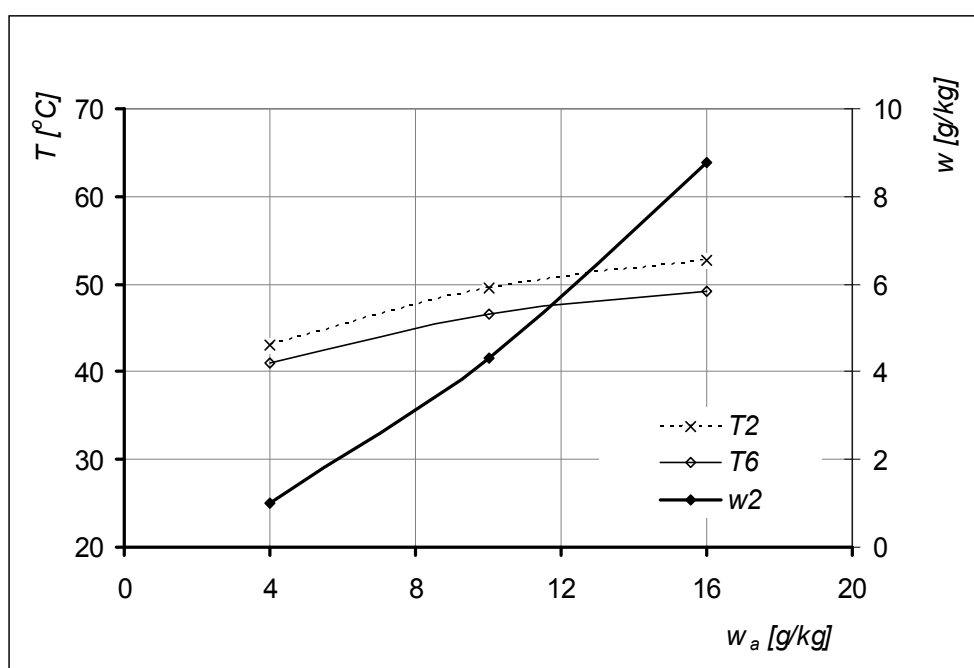


**Σχήμα 6.13** - Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος συντελεί στην μείωση του χρόνου ξήρανσης καθώς και της απαιτούμενης ενέργειας για την πραγματοποίηση της διεργασίας.

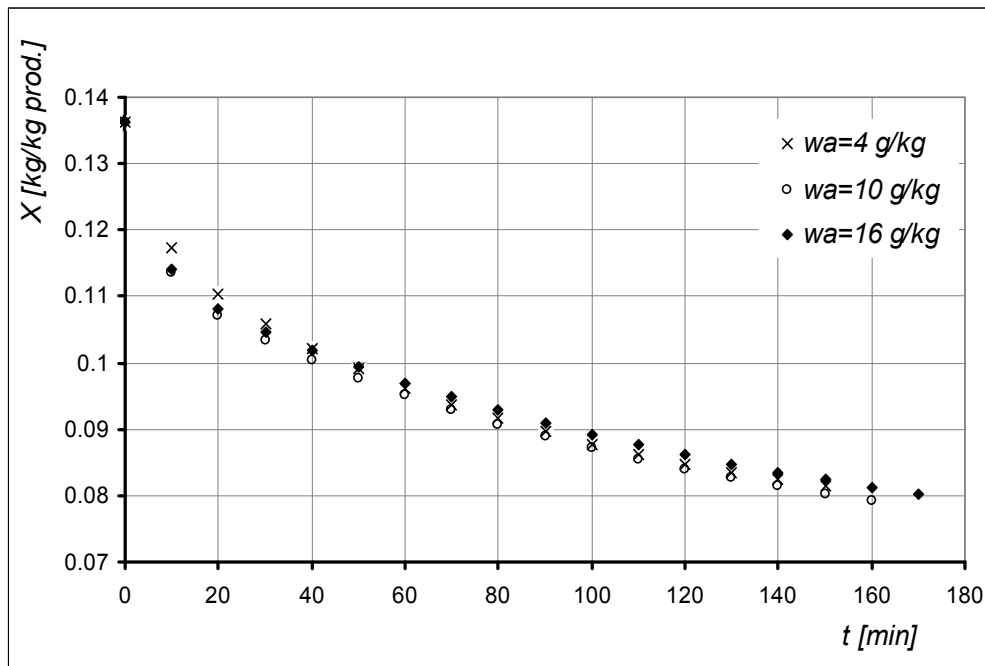
### 6.4.2.3 Μεταβολή της υγρασίας περιβάλλοντος $w_a$

Η αύξηση της υγρασίας περιβάλλοντος, της υγρασίας δηλαδή του ρεύματος προσαγωγής στον τροχό, δεν επιδρά σημαντικά στην αφυγραντική ικανότητα του τροχού (Πανάρας, 2010). Εν τούτοις, το γεγονός πως η απόλυτη υγρασία του ρεύματος προσαγωγής, στη θέση εισόδου στον τροχό αυξάνει, έχει ως αποτέλεσμα την κατακράτηση μεγαλύτερου ποσού υγρασίας από τον τροχό άρα και την αποδέσμευση υψηλότερου ποσού θερμότητας (συμπύκνωσης υδρατμών). Συνεπώς, αναμένεται αύξηση της θερμοκρασίας και υγρασίας ξήρανσης (σχ. 6.14).

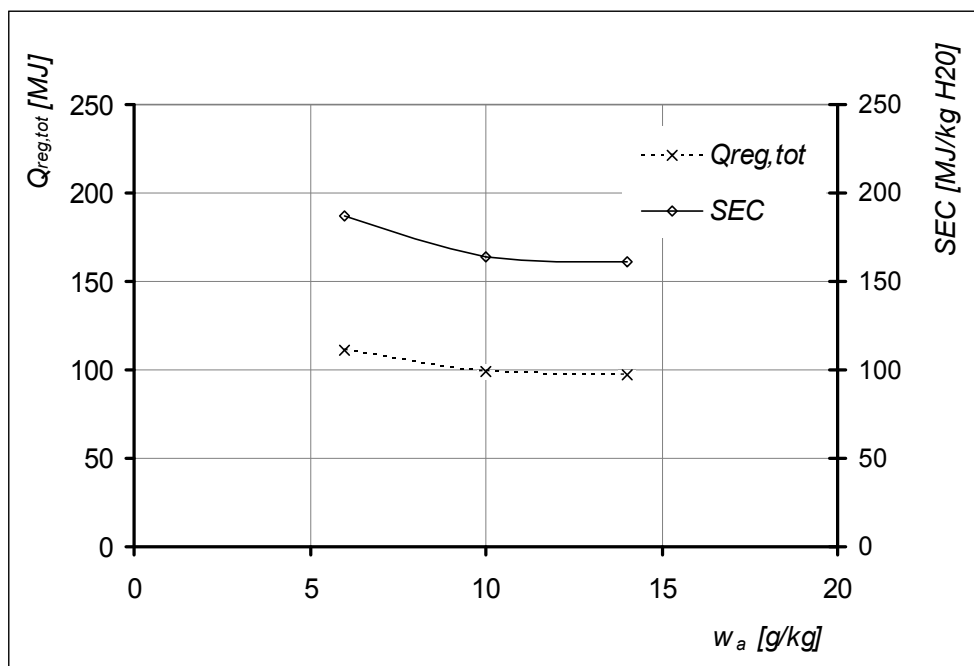


**Σχήμα 6.14** - Μεταβολή των συνθηκών ξήρανσης σε σχέση με την υγρασία περιβάλλοντος

Από τις καμπύλες ξήρανσης παρατηρούμε ότι η μεταβολή της υγρασίας περιβάλλοντος δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης (σχ. 6.15).

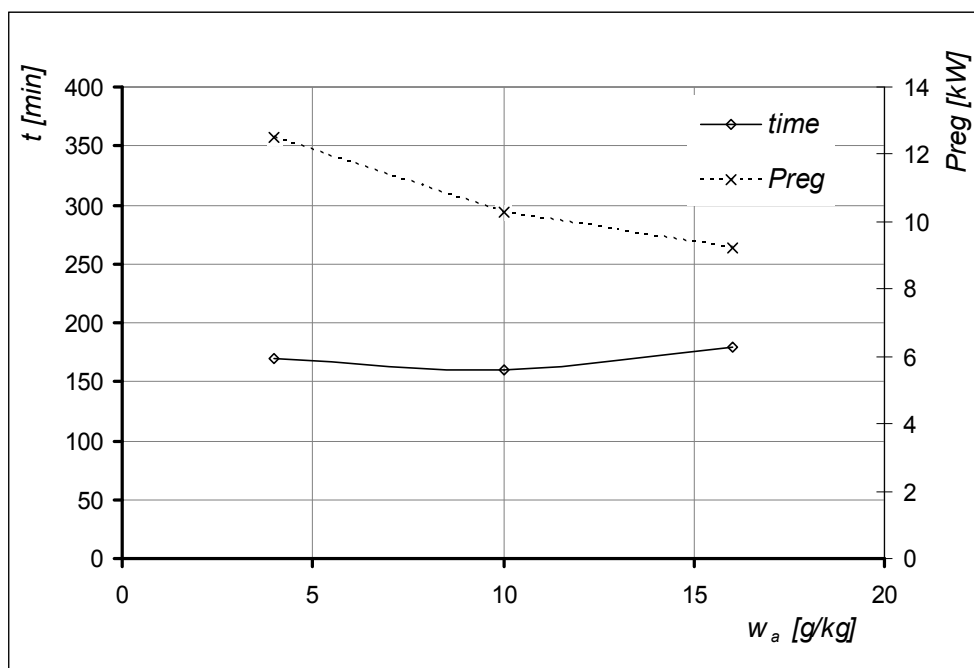


**Σχήμα 6.15** - Καμπύλες Ξήρανσης για διαφορετικές τιμές της υγρασίας περιβάλλοντος



**Σχήμα 6.16** - Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την υγρασία περιβάλλοντος

Σε επίπεδο ενέργειας (σχ. 6.16), η αύξηση της υγρασίας από ένα όριο και μετά δεν επηρεάζει, καθώς η μικρή μείωση του χρόνου συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας (σχ. 6.17).



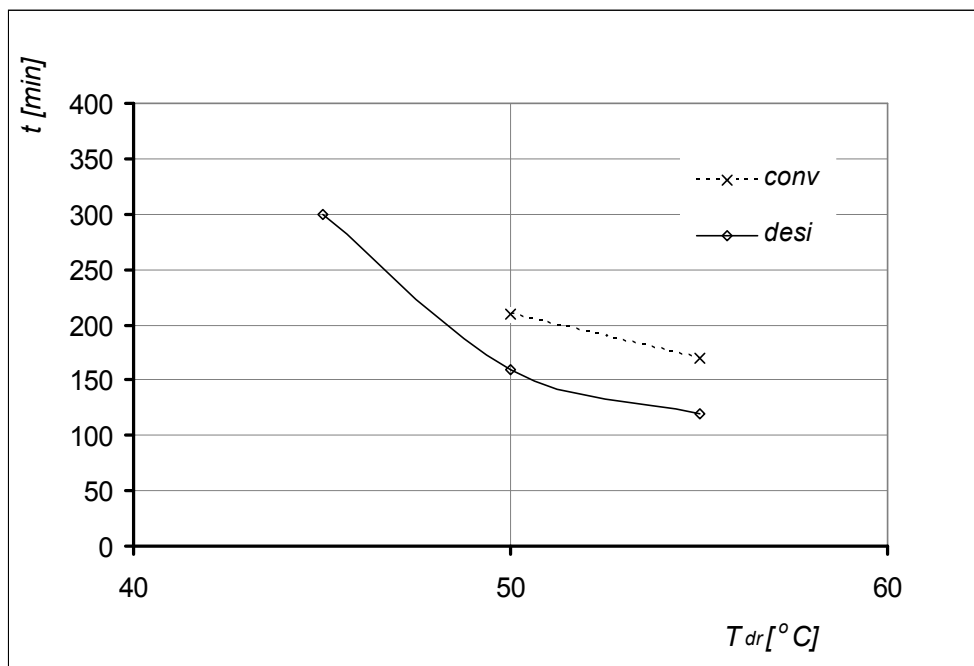
**Σχήμα 6.17** - Συνολικός χρόνος ξήρανσης και απαιτούμενη ισχύς σε σχέση με την υγρασία περιβάλλοντος

## 6.5 Σύγκριση των δύο διατάξεων

### 6.5.1 Χρόνος ξήρανσης

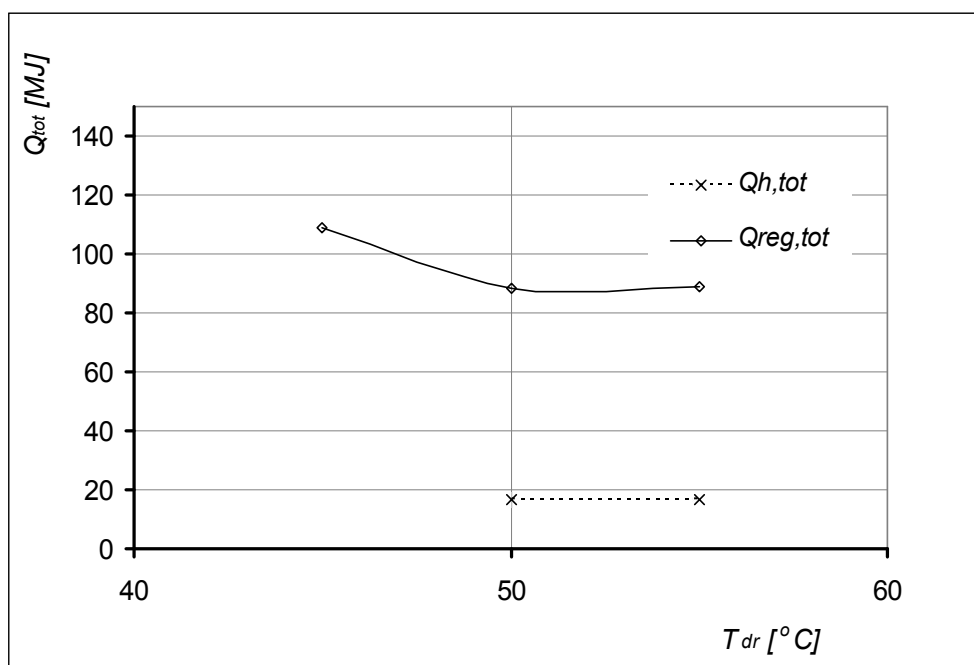
Όπως φαίνεται και στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα (σχ. 6.18), ο απαιτούμενος χρόνος ξήρανσης στην περίπτωση του ξηραντηρίου με τον αφυγραντικό τροχό είναι μικρότερος σε σχέση με την ξήρανση στο συμβατικό ξηραντήριο για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες ξήρανσης. Προφανώς αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η παρουσία του τροχού συνεισφέρει στην μείωση της υγρασίας του ρεύματος ξήρανσης.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το γεγονός πως η υγρασία του αέρα ξήρανσης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους της διεργασίας καθώς πέρα από την επίδραση που επιφέρει στην διάρκεια της ξήρανσης, καθιστά εφικτή την ξήρανση σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Ενώ στο συμβατικό ξηραντήριο για τις δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος η ξήρανση στους 45 °C δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, ο αφυγραμένος αέρας ξήρανσης στην διάταξη του ξηραντηρίου με τον τροχό αφύγρανσης καθιστά εφικτή την ξήρανση σε αυτή την θερμοκρασία.



**Σχήμα 6.18** - Συνολικός χρόνος ξήρανσης σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης στο συμβατικό (conv) και στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης (desi)

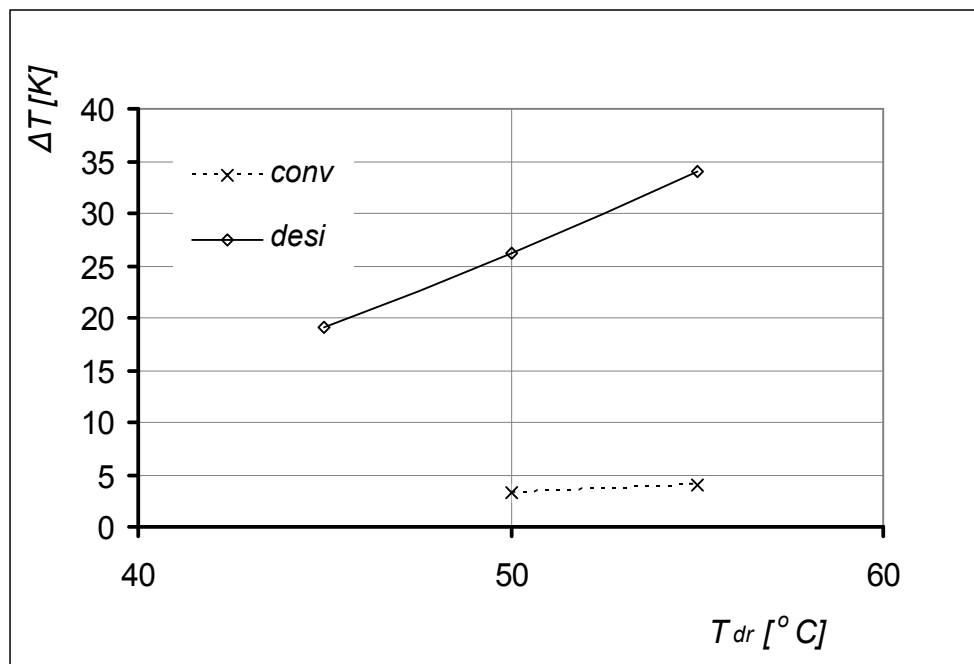
### 6.5.2 Απαιτούμενη ενέργεια



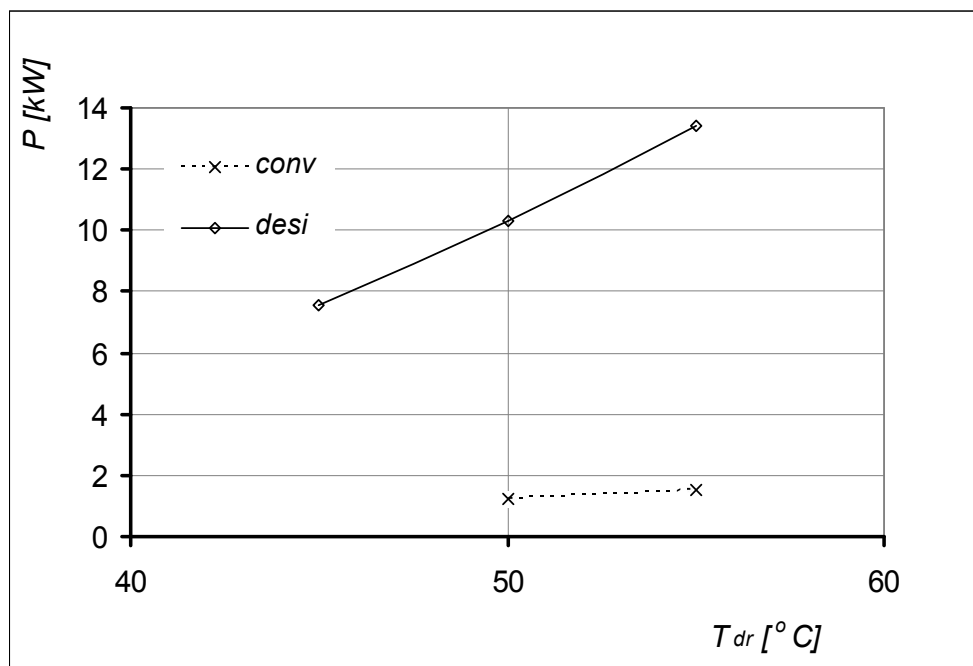
**Σχήμα 6.19** - Συνολική απαιτούμενη ενέργεια σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης στο συμβατικό ( $Q_{h,tot}$ ) και στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης ( $Q_{reg,tot}$ )



Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 6.19) οι ενεργειακές απαιτήσεις του συμβατικού ξηραντηρίου είναι σαφέστατα χαμηλότερες σε σχέση με το ξηραντήριο αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης. Όπως επισημάνθηκε και στην περίπτωση της μέντας, αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η θερμοκρασιακή διαφορά που πρέπει να καλύψει η θερμική πηγή άρα και η απαιτούμενη ισχύς, είναι σημαντικά υψηλότερη στην περίπτωση του τροχού αφύγρανσης (σχ. 6.20 & 6.21). Αν και ο χρόνος ξήρανσης μειώνεται (σχ. 6.18), εν τούτοις η ενέργεια παραμένει σημαντικά υψηλότερη για την περίπτωση του τροχού αφύγρανσης.



**Σχήμα 6.20** - Θερμοκρασιακή διαφορά εκατέρωθεν της θερμικής πηγής στο συμβατικό (conv) και στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης (desi)



**Σχήμα 6.21** - Απαιτούμενη ισχύς από την θερμική πηγή στο συμβατικό (conv) και στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης (desi)

### 6.5.3 Συμπεράσματα από την εφαρμογή των δύο διατάξεων

Το ξηραντήριο αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης εμφανίζει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι της χρήσης της συμβατικής διάταξης:

- Η μείωση του χρόνου ξήρανσης επιφέρει επιτάχυνση της παραγωγής του ξηρού προϊόντος.
- Η δυνατότητα πραγματοποίησης της ξήρανσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες έναντι του συμβατικού ξηραντηρίου καθιστά την προτεινόμενη διάταξη κατάλληλη για την ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων.

Από την άλλη, σε ενεργειακό επίπεδο η απαιτούμενη ενέργεια είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου.

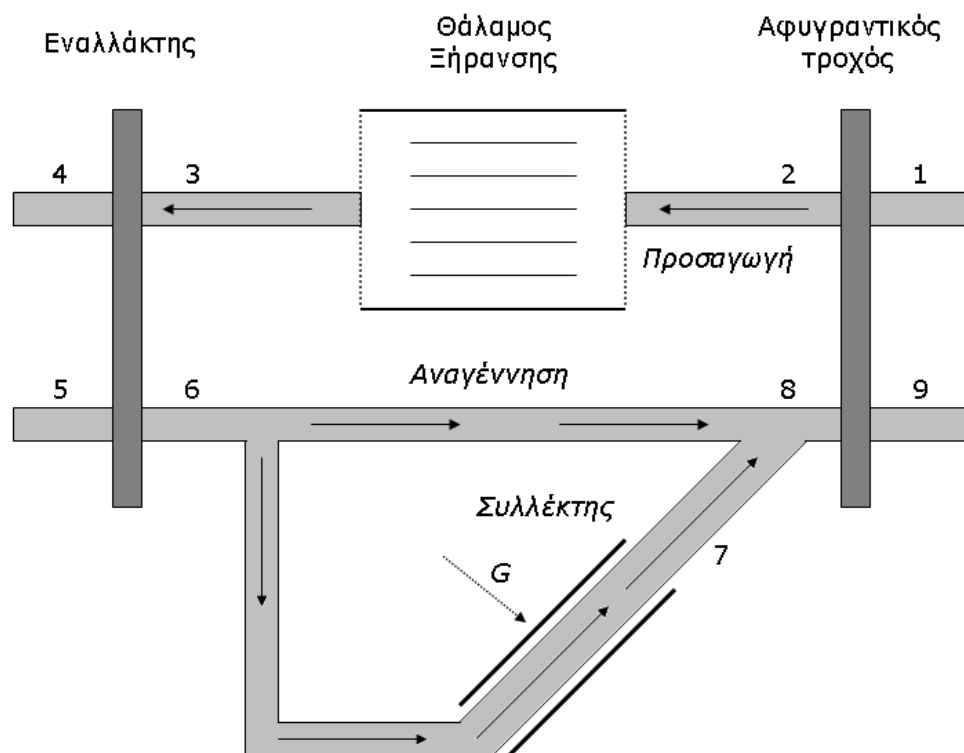
## 7 Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας στην ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με αφυγραντική διάταξη

### 7.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας στη διεργασία ξήρανσης ελαιοκράμβης. Η προτεινόμενη διάταξη περιλαμβάνει τη διάταξη με αφυγραντικό υλικό που εξετάστηκε. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια προσάγεται από συστοιχία ηλιακών συλλεκτών αέρα.

### 7.2 Διάταξη ηλιακού ξηραντηρίου

Η διάταξη του ηλιακού ξηραντηρίου απεικονίζεται στο σχ.7.1.



Σχήμα 7.1-Διάταξη ηλιακού ξηραντηρίου με τροχό αφύγρυνσης

Όσον αφορά το τμήμα της διάταξης που αναφέρεται στη θέρμανση του αέρα αναγέννησης του αφυγραντικού τροχού, ένα ποσοστό της παροχής του ρεύματος αναγέννησης, έπειτα από την θέρμανσή του από τον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας (θέση 6), οδηγείται στην συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών για την περαιτέρω αύξηση της θερμικής του ισχύος (θέση 7). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αδιαβατική ανάμειξη των δύο ρευμάτων (θέση 8) με στόχο την επακόλουθη αναγέννηση του τροχού αφύγρανσης.

Η χρήση του συλλέκτη αέρα απλοποιεί τον εξοπλισμό της εγκατάστασης καθώς δεν απαιτείται εναλλάκτης για τη θέρμανση του αέρα του ρεύματος αναγέννησης από τη θερμική πηγή. Με δεδομένο ότι στη διάταξη δεν ενσωματώνεται σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, η χρήση του συλλέκτη αέρα θεωρήθηκε προτιμότερη καθώς μειώνει το κόστος της εγκατάστασης, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διερεύνηση λειτουργίας της διάταξης με ηλιακή ενέργεια.

Ο ηλιακός συλλέκτης που επιλέχθηκε έχει μελετηθεί τόσο αυτόνομα όσο και σε σύνδεση με διάταξη ξήρανσης στο ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ (Lamnatou et al., 2012). Αποτελείται από 20 σωλήνες κενού, με εξωτερική διάμετρο για κάθε σωλήνα 5.8 cm, και μήκος 2 m (εικ. 7.1).



**Εικόνα 7.1** – Συλλέκτης αέρα σωλήνων κενού

Ο συλλέκτης έχει επιφάνεια παραθύρου  $A_c=1.7 \text{ m}^2$ , η οποία αναφέρεται στην ορθογώνια προβολή της επιφάνειας των σωλήνων κενού, ορισμός που συμφωνεί με το αντίστοιχο πρότυπο δοκιμών EN12975-2 (CEN, 2006).

### 7.3 Μοντέλο ηλιακού ξηραντηρίου

Το μοντέλο του ηλιακού ξηραντηρίου αναπτύχθηκε στη βάση του μοντέλου του ξηραντηρίου με αφυγραντικά μέσα, με την κατάλληλη εισαγωγή των σχέσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του συλλέκτη αέρα.

Για τη λειτουργία του συλλέκτη αέρα, προτείνεται η σχέση (CEN, 2006b; Duffie and Beckmann, 2006):

$$\eta_{sol} = \eta_o - U \frac{T_{sf,in} - T_a}{G} \quad (7.1)$$

όπου :

- $\eta_o$  : η οπτική απόδοση, και εκφράζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση του συλλέκτη για τις συγκεκριμένες συνθήκες
- $U$  : θερμικές απώλειες ανά μονάδα επιφάνειας του συλλέκτη
- $T_{sf,in}$  : η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συλλέκτη
- $T_a$  : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- $G$  : η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη

Οι παραπάνω όροι συνθέτουν το απλούστερο μοντέλο συλλέκτη, το οποίο ισχύει για κάθετη πρόσπτωση. Στην περίπτωση αλλαγής γωνίας πρόσπτωσης, προστίθεται άλλη μία παράμετρος, αυτή του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης (Duffie and Beckmann, 2006).

Από την εργασία των Lamnatou et al. (2012), προκύπτει για παροχή 78 m<sup>3</sup>/h,  $\eta_o=0.61$ ,  $U=2.57$  W/m<sup>2</sup>/K.

Παράλληλα, το μοντέλο συνυπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή, και για τα δεδομένα της συγκεκριμένης τοποθεσίας, η οποία στην περίπτωση που μελετήθηκε στην εργασία είναι η Αθήνα, την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη, καθώς και τη γωνία πρόσπτωσης. Επίσης συνυπολογίζεται η επίδραση στη λειτουργία της διάταξης της συνδεσμολογίας των συλλεκτών (Duffie and Beckmann, 2006).

Σύμφωνα με τη διάταξη που περιγράφεται στο σχ. 7.1, η διατήρηση ίσης παροχής αέρα στα ρεύματα προσαγωγής και απαγωγής για τον τροχό αφύγρανσης και τον εναλλάκτη, απαιτεί την απόρριψη ποσού αέρα στο ρεύμα απαγωγής, στην έξοδο του εναλλάκτη ανάκτησης. Αντίστοιχα, ο

θερμαινόμενος αέρας από το συλλέκτη αναμιγνύεται με τον υπόλοιπο αέρα του ρεύματος απαγωγής ώστε να διατηρείται στον τροχό η επιθυμητή παροχή 1200 m<sup>3</sup>/h. Η περίπτωση λειτουργίας της διάταξης με όχι ίσες τιμές για τα ρεύματα παροχής και προσαγωγής δεν μελετήθηκε, καθώς οι πειραματικά προσδιοριζόμενοι (Panaras et al., 2010a; Panaras et al., 2010b) ή παρεχόμενοι από τους κατασκευαστές (ProFlute, Klingenburg) συντελεστές απόδοσης των συσκευών δεν είναι διαθέσιμοι.

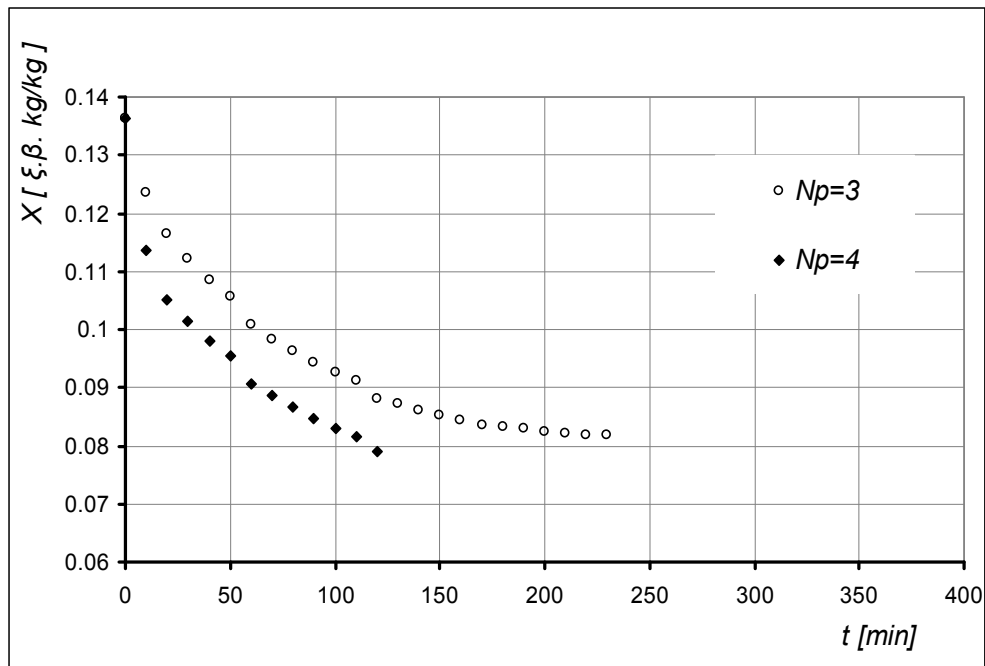
Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα από το τυπικό Μετεωρολογικό έτος Αθηνών, μήνα Ιουνίου (Μπαλαράς κ.α., 2006). Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν οι ωριαίες τιμές που αντιστοιχούν στο μέσο όρο των τιμών όλων των ημερών του μήνα.

#### **7.4 Αποτελέσματα**

Με δεδομένο ότι η αύξηση της παροχής οδηγεί σε υψηλή πτώση πίεσης διαμέσου του συλλέκτη, συνεπώς αυξάνει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης, προτιμήθηκε η παροχή λειτουργίας του συλλέκτη αέρα να είναι 100 m<sup>3</sup>/h, παροχή στο επίπεδο των τιμών της πειραματικής διερεύνησης (Lamnatou et al, 2012). Σημειώνεται ότι στην εν λόγω εργασία εκτός από την παροχή των 78 m<sup>3</sup>/h, για την οποία υπολογίστηκε αποδοτικότητα του συλλέκτη, η λειτουργία του συλλέκτη μελετήθηκε και για παροχές 65, 85 m<sup>3</sup>/h.

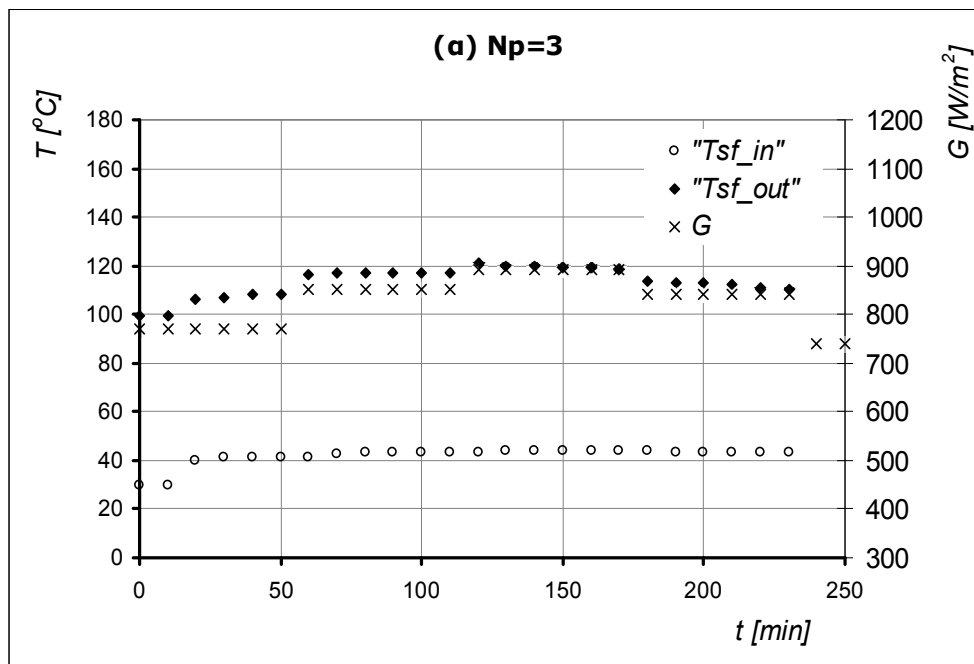
Επίσης θεωρείται ότι για την παροχή αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς σημαντικό σφάλμα οι διαθέσιμοι συντελεστές απόδοσης για το συλλέκτη αέρα, οι οποίοι αναφέρονται σε παροχή 78 m<sup>3</sup>/h (Lamnatou et al., 2012).

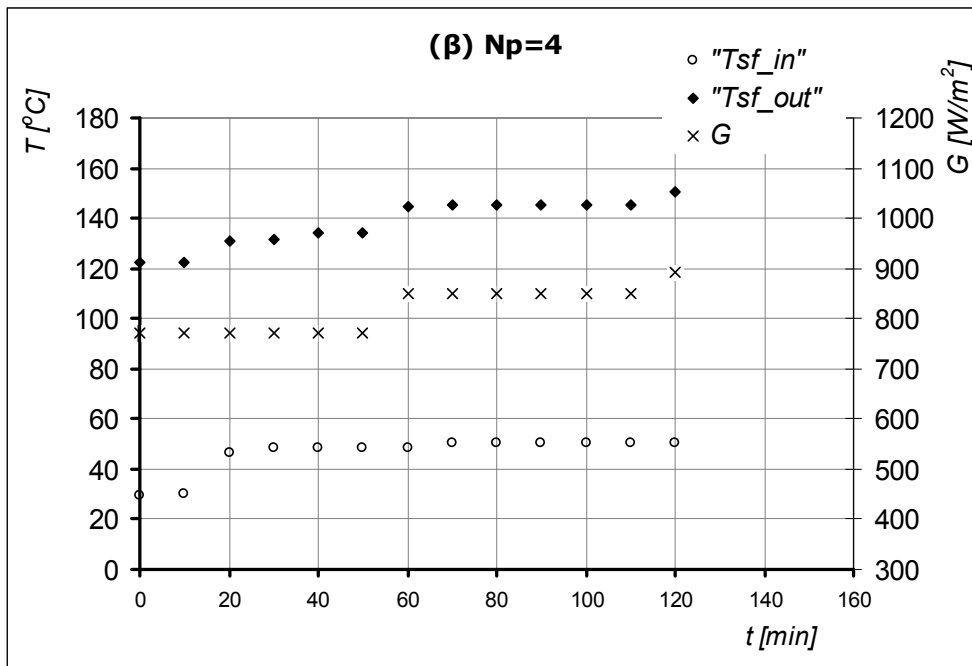
Εξετάστηκε η ξήρανση κατά τη διάρκεια των μεσημεριανών ωρών, ώστε να μεγιστοποιηθεί η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια.



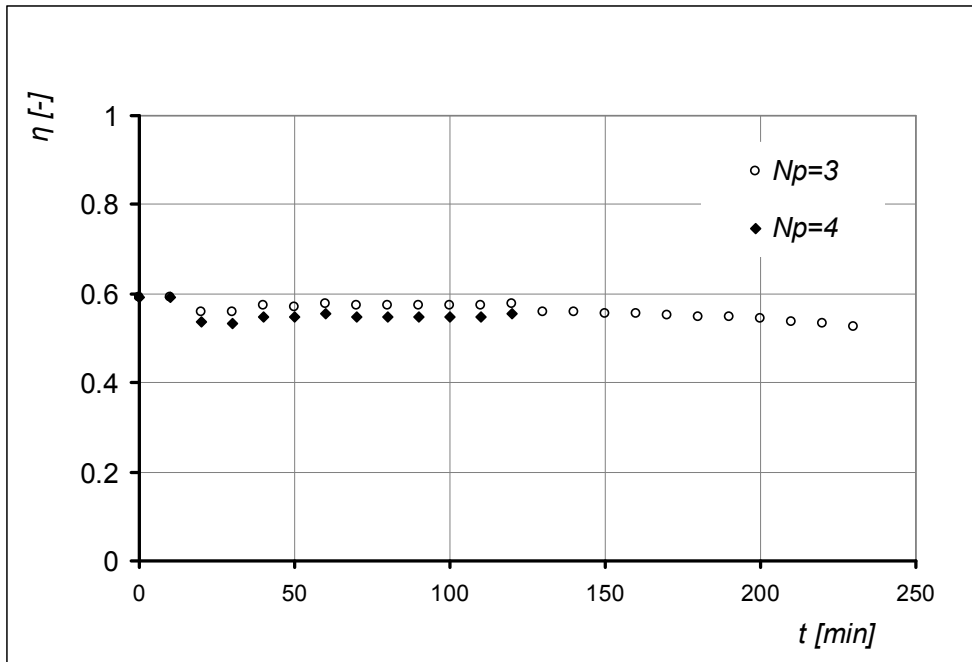
**Σχήμα 7.1** – Καμπύλες ξήρανσης για διαφορετικές συστοιχίες συλλεκτών αέρα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η χρήση 3 συλλεκτών σε παράλληλη συνδεσμολογία επιτυγχάνει οριακά την ξήρανση του προϊόντος. Η χρήση 4 συλλεκτών επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις ως προς το χρόνο ξήρανσης, αυξάνει όμως και το κόστος της εγκατάστασης.





**Σχήμα 7.2** – Λειτουργία ηλιακού πεδίου συλλεκτών κατά την ξήρανση ελαιοκράμβης (θερμοκρασία εισόδου, εξόδου και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο): α) πεδίο 3 συλλεκτών, β) πεδίο 4 συλλεκτών σε παράλληλη συνδεσμολογία



**Σχήμα 7.3** – Αποδοτικότητα ηλιακού πεδίου συλλεκτών κατά την ξήρανση ελαιοκράμβης



Σχετικά με τη λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών, όπως προκύπτει και από το σχ. 7.2, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το πεδίο ακολουθεί την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για μεγαλύτερο αριθμό συλλεκτών, η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλιακού πεδίου είναι υψηλότερη, όπως και αναμένεται.

Στο σχ. 7.3 παρουσιάζεται η αποδοτικότητα του πεδίου κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, όπως αυτή εκφράζεται με το συντελεστή απόδοσης. Ο συντελεστής απόδοσης του ηλιακού πεδίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{sf} = \frac{1000P_{sf}}{A_{sf}G} \quad (7.2)$$

όπου:

- $P_{sf}$  : η θερμική ισχύς του ηλιακού πεδίου
- $A_{sf}$  : η επιφάνεια του ηλιακού πεδίου
- $G$  : η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των συλλεκτών του ηλιακού πεδίου

Η θερμική ισχύς του ηλιακού πεδίου δίνεται από τη σχέση:

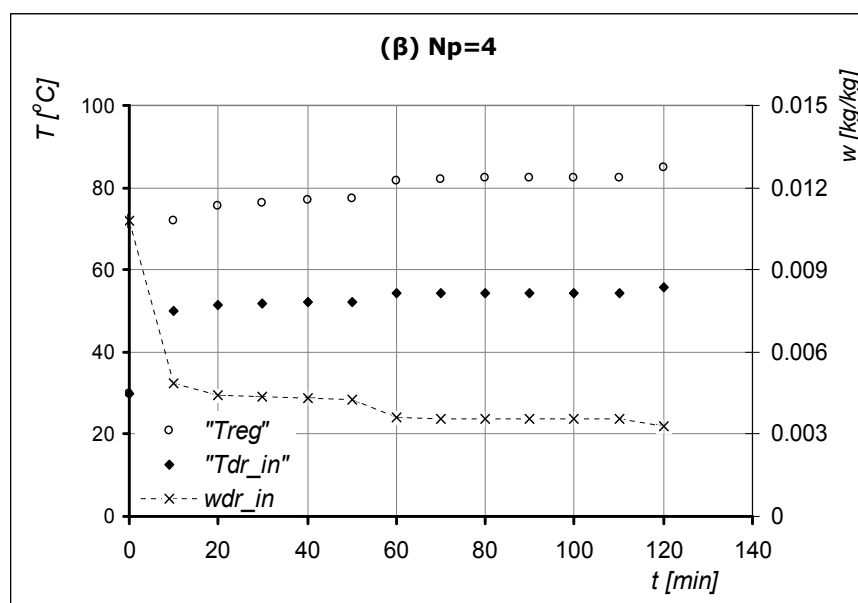
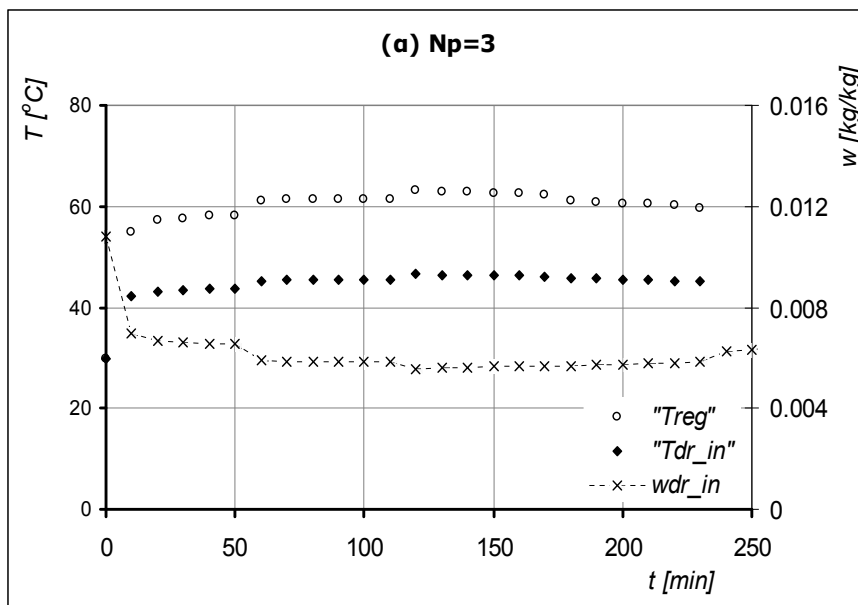
$$P_{sf} = \dot{m}_{sf} c_{p,sf} (T_{sf,out} - T_{sf,in}) \quad (7.3)$$

όπου:

- $\dot{m}_{sf}$  : η παροχή του θερμικού φορέα του ηλιακού πεδίου ανά χρονικό βήμα
- $c_{p,sf}$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα του θερμικού φορέα του ηλιακού πεδίου
- $T_{sf,out}$  : η θερμοκρασία εξόδου του θερμικού φορέα από το ηλιακό πεδίο
- $T_{sf,in}$  : η θερμοκρασία εισόδου του θερμικού φορέα στο ηλιακό πεδίο

Σύμφωνα με το σχ. 7.4, ο συντελεστής απόδοσης του πεδίου παρουσιάζει μια τιμή της τάξης του 0.5 – 0.6, που κρίνεται ως αρκετά ικανοποιητική. Στην περίπτωση των 4 συλλεκτών, η απόδοση είναι ελαφρά χαμηλότερη, καθώς το πεδίο λειτουργεί σε υψηλότερο θερμοκρασιακό επίπεδο.

Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο συλλέκτη είναι υψηλή. Συνεπώς δεν υπάρχει λόγος για σύνδεση των συλλεκτών σε σειρά, συνδεσμολογία η οποία χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών σε σχέση με την παράλληλη συνδεσμολογία. Για το λόγο αυτό, η διερεύνηση περιορίστηκε στην παράλληλη συνδεσμολογία.



**Σχήμα 7.4** – Επιτευχθείσες συνθήκες στην είσοδο του ξηραντηρίου και θερμοκρασία αναγέννησης αφυγραντικού τροχού κατά την ξήρανση ελαιοκράμβης με αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας: α) πεδίο 3 συλλεκτών, β) πεδίο 4 συλλεκτών σε παράλληλη συνδεσμολογία

Όσον αφορά στις συνθήκες ξήρανσης (σχ. 7.4), στην περίπτωση των περισσότερων συλλεκτών είναι ευνοϊκότερες, ήτοι υψηλότερη θερμοκρασία και χαμηλότερη υγρασία ξήρανσης, κάτι που αποτυπώνεται και στο χρόνο ξήρανσης. Υψηλότερη είναι και η θερμοκρασία αναγέννησης για μεγαλύτερη επιφάνεια συλλεκτών.

## **7.5 Συμπέρασμα**

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι προφανές ότι η θερμική ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για τη λειτουργία του ξηραντηρίου με αφυγραντική διάταξη. Οι επιτευχθείσες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα στην έξοδο του αφυγραντικού τροχού (είσοδος του ξηραντηρίου) διασφαλίζουν την αποτελεσματική ξήρανση του προϊόντος. Σε κάθε περίπτωση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ενδεικτικά για τις δυνατότητες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε αντίστοιχες εγκαταστάσεις, και αναφέρονται στις συγκεκριμένες επιλογές ως προς τις συνθήκες λειτουργίας και τα υποσυστήματα της διάταξης.

## 8 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση της ξήρανσης θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων και δη των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών με τη χρήση αφυγραντικών μέσων.

Η εργασία αναπτύχθηκε γύρω από δύο διακριτούς άξονες:

- Την βιβλιογραφική διερεύνηση της ξήρανσης των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων, με στόχο την απόκτηση γνώσης σε σχέση με τις συνθήκες και τις συνηθέστερες μεθόδους ξήρανσης αυτών. Την διερεύνηση της χρήσης αφυγραντικών μέσων στην εφαρμογή της ξήρανσης καθώς και των αποτελεσμάτων που επιφέρουν.
- Την θεωρητική διερεύνηση μέσω του σχεδιασμού και της μοντελοποίησης ενός συμβατικού ξηραντηρίου και ενός ξηραντηρίου με συσκευή αφύγρανσης για την ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με στόχο την σύγκριση των δύο διατάξεων ως προς την απόδοσή τους, τις συνθήκες λειτουργίας τους καθώς και των αποτελεσμάτων που επιφέρουν στο προς ξήρανση προϊόν.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία σύνοψη των συμπερασμάτων έτσι όπως προκύπτουν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στη βιβλιογραφία η ξήρανση των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Η έρευνα περιορίζεται στην επίδραση των συνθηκών ξήρανσης, ιδιαιτέρως της θερμοκρασίας, στην ποιότητα του τελικού προϊόντος καθώς και στη διάρκεια της ξήρανσης αυτού. Οι ερευνητές επικεντρώνονται στην ξήρανση σε συμβατικού τύπου ξηραντήρια συναγωγής όπου δεν αναλύεται η επίδραση της υγρασίας ως παράμετρος στην ξήρανση. Η χρήση αφυγραμένου αέρα ξήρανσης συναντάται σε συνήθη γεωργικά προϊόντα όπου τονίζεται η θετική επίδραση της μείωσης της υγρασίας του αέρα ξήρανσης στην διάρκεια της διεργασίας και στην τελική ποιότητα του αποξηραμένου προϊόντος. Επομένως παρατηρούμε ότι στη βιβλιογραφία εμφανίζεται έλλειψη στην εφαρμογή των συσκευών αφύγρανσης για την ξήρανση των θερμοευαίσθητων αυτών προϊόντων.

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην ξήρανση των αρωματικών φυτών και την σύγκριση των δύο διατάξεων που προτάθηκαν, επιλέχθηκε η περίπτωση της μέντας λόγω της μεγάλης εφαρμογής που τυγχάνει από την βιομηχανία τροφίμων και καλλυντικών και της ύπαρξης πληθώρας δημοσιεύσεων σε σχέση με άλλα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά που ευδοκιμούν στην Ελλάδα. Εν τούτοις τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την μοντελοποίηση της ξήρανσής της στις δύο διατάξεις δεν είναι αντιπροσωπευτικά λόγω του γεγονότος ότι τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα ξήρανσης δεν περιλαμβάνουν την επίδραση της υγρασίας του αέρα ξήρανσης. Ο χρόνος ξήρανσης ο οποίος εξαρτάται από τις συνθήκες ξήρανσης και επιδρά στην συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι σχεδόν ίσος στις δύο διατάξεις.

Η απουσία μοντέλων που να περιλαμβάνουν την επίδραση της υγρασίας του αέρα ξήρανσης στην περίπτωση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών οδήγησε την αναζήτηση άλλων θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με στόχο την επιτυχή θεωρητική διερεύνηση των δύο διατάξεων και των επιδράσεων των συνθηκών ξήρανσης στην διεργασία. Στη βιβλιογραφία η περίπτωση της ξήρανσης του σπόρου της ελαιοκράμβης έχει μελετηθεί εκτενώς λόγω της επίδρασης των συνθηκών ξήρανσης στην τελική ποσότητα και ποιότητα του εξαγόμενου ελαίου. Η ύπαρξη μοντέλων της κινητικής της ξήρανσης του σπόρου για χαμηλές τιμές της απόλυτης υγρασίας του αέρα ξήρανσης καθιστά την ελαιοκράμβη κατάλληλη για την θεωρητική διερεύνηση των δύο διατάξεων.

Τα αποτελέσματα της θεωρητικής διερεύνησης επαληθεύουν την θετική επίδραση της χαμηλής υγρασίας του αέρα ξήρανσης στην μείωση της συνολικής διάρκειας της διεργασίας. Η δυνατότητα ξήρανσης του σπόρου σε χαμηλότερη θερμοκρασία, αποτέλεσμα της αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης, δεδομένης της θερμοευαίσθητης φύσης του καθιστά την εφαρμογή των αφυγραντικών μέσων κατάλληλη σε εφαρμογές ξήρανσης των δεδομένων γεωργικών προϊόντων. Εν τούτοις σε ενεργειακό επίπεδο, η παρουσία του τροχού αφύγρανσης αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις σε θερμική ενέργεια. Στο πλαίσιο αυτό, είναι σημαντικό να σταθμιστεί ποσοτικά η βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, μέσω της ξήρανσης με αφυγραντικά μέσα, σε σχέση με την αύξηση του ενεργειακού κόστους.

Η παραμετρική ανάλυση κατέδειξε την επιρροή των συνθηκών περιβάλλοντος στην λειτουργία του ξηραντηρίου. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει σημαντική επίδραση στην καταναλισκόμενη ενέργεια και στον χρόνο ξήρανσης. Αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην λειτουργία της διάταξης.

Αντιθέτως η υγρασία του αέρα περιβάλλοντος δεν επιδρά στην διάρκεια της ξήρανσης και από ένα όριο υγρασίας και πάνω η καταναλισκόμενη ενέργεια παραμένει σταθερή.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την επιτυχή ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων μέσω της αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης είναι δυνητικά πραγματοποιήσιμη. Η αντικατάσταση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης από συστοιχία ηλιακών συλλεκτών αέρα καθιστά εφικτή την ξήρανση του σπόρου της ελαιοκράμβης.

Η ξήρανση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών και γενικότερα των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με αφυγραντικά μέσα αποτελεί ένα τεχνολογικό αντικείμενο το οποίο δεν έχει ερευνηθεί εκτενώς. Η βελτίωση της ποιότητας του τελικού αποξηραμένου προϊόντος λόγω της ξήρανσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η αύξηση της παραγωγικότητας, λόγω της μείωσης του χρόνου ξήρανσης ανά κύκλου λειτουργίας, η δυνατότητα χρήσης των διατάξεων από μικρούς και μεσαίους παραγωγούς, η δυνατότητα αντικατάστασης της θερμικής πηγής από ηλιακούς συλλέκτες για την μείωση τους λειτουργικού κόστους, αποτελούν τους λόγους για την πραγματοποίηση περαιτέρω έρευνας, σε μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογική εφαρμογή.

Με δεδομένο ότι πρόκειται για ένα πεδίο που δεν έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε κατέδειξε τα ακόλουθα σημεία προς περαιτέρω διερεύνηση:

- Υπάρχει ανάγκη για επέκταση των υφιστάμενων μοντέλων ξήρανσης με διάχυση υγρασίας σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας. Ειδικότερα, προτείνεται η μελέτη φυτών τα οποία εμφανίζουν ενδιαφέρον για την Ελληνική αγορά.
- Διερεύνηση εφαρμογής αφυγραντικών υλικών με κατάλληλα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις συνθήκες που συναντώνται στην ξήρανση των υλικών.
- Ανάπτυξη ξηραντηρίου με αφυγραντικά υλικά και πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας αυτού με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα του τελικού προϊόντος, τις ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και την απόκτηση εμπειρίας σε ζητήματα σχεδιασμού - διαστασιολόγησης.
- Την υιοθέτηση ή και ανάπτυξη κριτηρίων και μεθόδων που να επιτρέπουν την ποσοτική αποτίμηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ξήρανσης με αφυγραντικά

μέσα. Με τον τρόπο αυτό, θα είναι δυνατή η αξιολόγηση της χρήσης των αφυγραντικών μέσων, σε σχέση με την περίπτωση των συμβατικών ξηραντηρίων, όχι μόνο σε επίπεδο συνθηκών της διεργασίας (θερμοκρασία, υγρασία ρεύματος ξήρανσης, χρόνος ξήρανσης) ή ενεργειακό επίπεδο, αλλά και ποιότητας του τελικού προϊόντος.

- Τη διερεύνηση αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε αντίστοιχες διατάξεις, στη βάση τόσο πειραματικής όσο και θεωρητικής ανάλυσης.

## Βιβλιογραφία

Aghbashlo M., Kianmehr M.-H., Samini-Adhijahani H., 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management* 49, 2865-2871

Akpinar K.-E., 2006. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering* 77, 864–870

Akpinar K.-E., 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Conversion and Management* 51, 2407–2418

Akpinar Kavak E., Bicer Y., Cetinkaya F., 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering* 75(3), 308–315

American National Standards Institute, 1998. Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage. ANSI/ASAE D241.4

Andrade P.-D.-R., Lemus M.-R., Perez C.-E.-C., 2011. Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations. *VITAE, REVISTA DE LA FACULTAD DE QUIMICA FARMACEUTICA* 18(3), 325-334

Argyropoulos D., Müllera J., 2011. Effect of Convective Drying on Quality of Lemon Balm (*Melissa Officinalis* L.). *Procedia Food Science* 1, 1932–1939

ASHRAE, 1996. *Psychrometrics: Theory and Practice*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.

Atuonwu J.-C., Jin X., Van Straten G., Van Deventer Antonius H.-C., Van Boxtel J.-B., 2011. Reducing energy consumption in food drying: Opportunities in desiccant adsorption and other dehumidification strategies. *Procedia Food Science* 1, 1799–1805

Αγροτικός Συνεταιρισμός Ταξιάρχη, 2008. Μελέτη για την αναγνώριση των Ξηρών Σύκων Ταξιάρχη ως Π.Ο.Π.

Αναστόπουλος Κ., 2012. Καλλιέργεια, παραγωγή και εμπορία Αρωματικών & Φαρμακευτικών Φυτών. Δυνατότητα οικονομικών ενισχύσεων.. Διαθέσιμο σε: [www.patt.gov.gr](http://www.patt.gov.gr) (Ανακτήθηκε 15 Μαρτίου, 2013)

Banks P.J., 1972. Coupled equilibrium heat and single adsorbate transfer in fluid dliw trough porous medium – I. Characteristics potentials and specific capacity ratios. *Chemical Engineering Science* 27, 1143-1155



- Belessiotis V., Delyannis E., 2011. Solar Drying. *Solar Energy* 85, 1665-1691
- Belghit A., Kouhila M., Boutaleb B.-C., 2000. Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants. *Energy Conversion and Management* 41(12), 1303–1321
- Brooker D.-B., Bakker-Arkema F.-W., Hall C.-W., 1974. *Drying Cereal Grains*. The AVI Publishing Company Inc., Westport, Connecticut, USA
- Βικιπαίδεια ([el.wikipedia.org](http://el.wikipedia.org) )
- Calixto J.-B., 2000. Efficacy, safety, quality control, market and regulatory guidelines for herbal medicines (phytotherapeutic agents). *Braz. J. Med. Biol. Res.* 33, 179-189
- CEN, 2006. EN12975-2, Thermal Solar Systems and Components – Solar Collectors – Part 2: Test Methods. Brussels
- Cranck, J., 1975. *The mathematics of diffusion* (2<sup>nd</sup> ed.). Oxford: Clarendon Press
- Crisp J., Woods J.-L., 1994. The drying properties of rapeseed. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57, 89-97
- Γαρδέλη Χ., 2009. Μελέτη της Χημικής Σύστασης Αιθέριων Ελαίων ορισμένων Αρωματικών Φυτών της Ελληνικής Χλωρίδας. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα
- Daguenet M., 1985. *Les sechoirs solaires: theorie et pratique*. Paris: UNESCO
- De Antonellis S., Joppolo C.-M., Molinaroli L., Pasini A., 2012. Simulation and energy efficiency analysis of desiccant wheel systems for drying processes. *Energy* 37, 336-345
- Doymaz I., 2006. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering* 74, 370-375
- Duc L.-A., Han W.-J., Keum D.-H., 2011. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Stored Products Research* 47, 32-38
- Duffie J.A., Beckmann W.A., 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes* (3<sup>rd</sup> edition). Wiley-Interscience, New York
- Dutta K.-B., 2007. *Principles Of Mass Transfer And Separation Process*. Prentice Hall of India. New Delhi
- Διαμαντόπουλος Χ., 2013. Με θετικό πρόσημο έκλεισε η χρονιά για την ελαιοκράμβη. Θετικές οι προοπτικές και για τις αποδόσεις στον ηλίανθο. Διαθέσιμο σε: [www.agrotypos.gr](http://www.agrotypos.gr) (Αναρτήθηκε 2 Ιουλίου, 2013)

Δόρδας Χ., 2009. Συμπληρωματικές σημειώσεις για το μάθημα των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, τομέας φυτών μεγάλης καλλιέργειας και οικολογίας εργαστήριο γεωργίας.

Δούκα Β., Λυδάκης Δ., 2011. Παραγωγή και επεξεργασία ξηρών σύκων στην Εύβοια. Διπλωματική εργασία. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Σχολή Γεωπονίας, τμήμα φυτικής παραγωγής.

European Pharmacopoeia, 2005. Ph.Eur. 5.00. Deutscher Apotheker Verlag, Stuttgart, 4392

Enteria N., Mizutani K., 2013. The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2095–2122

Figiel A., Szumny A., Gutiérrez-Ortíz A., Carbonell-Barrachina A.-A., 2010. Composition of oregano essential oil (*Origanum vulgare*) as affected by drying method. *Journal of Food Engineering* 98(2), 240–247

Finn S., Karen M.-P., 1995. SEED MOISTURE AND DRYING PRINCIPLES. LECTURE NOTE C-5. Danida Forest Seed Centre

Gandhidasan P., 2004. A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant. *Solar Energy* 76, 409–416

Gilbert H., Baxerres J.-L., Kim H., 1980. Blanching time in fluidized beds. *Food process engineering* 1, 75–85

Giner A., Calvelo A., 1987. Modelling of wheat drying in fluidized beds. *Journal of Food Science* 52(5), 1358–1363

Gurtas Seyhan F., Evranuz Ö., 2000. LOW TEMPERATURE MUSHROOM (*A. bisporus*) DRYING WITH DESICCANT DEHUMIDIFIERS. *Drying Technology: An International Journal*, 18 (1-2), 433-445

Harbourne N., Marete E., Jacquier J.-C., O'Riordan D., 2009. Effect of drying methods on the phenolic constituents of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) and willow (*Salix alba*). *LWT-Food Science and Technology* 42 (9), 1468–1473

Henning, H.-M., 2007. Solar assisted air conditioning of buildings - An overview. *Applied Thermal Engineering* 27, 1734-1749

Jakubowska K.-M., Szpryngiel M., 2008. Influence on drying condition on quality properties of rapeseed. *International Agrophysics* 22, 327-331

Jurinak J.J., 1982. Open cycle solid desiccant cooling-component models and system simulations. Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, Madison

- Kane E., Ahmet S., Kouhila M., 2009. Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint leaves (*M. pulegium*). *Revue des Energies Renouvelables* 12(3), 449 – 470
- Kaya A., Aydin O., 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management* 50, 118–124
- Kays W.-M., London A.-L., 1984. *Compact Heat Exchangers* (3rd ed.). McGraw Hill, London.
- Klingenburg GmbH ([www.klingenburg.de](http://www.klingenburg.de))
- Krokida M.-K., Karathanos V.-T., Maroulis Z.-B., Marinou-Kouris D., 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59(4), 391–403
- La D., Dai Y.J., Li Y., Wang R.Z., Ge T.S., 2010. Technical development of rotary desiccant dehumidification and air-conditioning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 130-147
- Lamnatou C., Papanicolaou E., Belessiotis V., Kyriakis N., 2012. Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector. *Applied Energy* 94, 232-243
- Lewis, W. -K., 1921. The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial Engineering* 13, 427–443
- Lopez A., Iguaz A., Esnoz A., Virseda P., 2000. Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology* 18(4&5), 995-1006
- Maclaine-Cross I.L., 1974. A theory of combined heat and mass transfer in regenerators. Ph.D. Thesis, Monash University, Melbourne
- Maclaine-Cross I.L., Banks P.J., 1972. Coupled heat and mass transfer in regenerators-prediction using an analogy heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15, 1225-1242
- Madhiyanon T., Adirekrut S., Sathitruangsak P., Soponronnarit S., 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 46(4), 282-290
- McCormack J.-H., 2004. *Seed Processing and Storage: Principles and Practices of seed harvesting, processing, and storage: an organic seed production manual for seed growers in the Mid-Atlantic and Southern U.S.* Creative Commons, Version 1.3

Misha S., Mat S., Ruslan M.-H., Sopian K., 2012. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4686–4707

Mujumdar A-S., 2007. Principles, classification and selection of dryers. *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press

Μπαλάρας Κ.Α., Κοντογιαννίδης Σ., Λυκούδης Σ., 2006. Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος Αθηνών. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Μπελεσιώτης Β., Δεληγιάννη Ε., 2009. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ – Αρχές διεργασιών ξήρανσης. Έκδοση ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ". Αθήνα

Nagaya K., Li Y., Jin Z., Fukumuro M., Ando Y., Akaishi A., 2006. Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control. *Journal of Food Engineering* 75, 71–77

Oztekin S., Martinov M., 2007. Medicinal and aromatic crops: Harvesting, drying and processing. Haworth food agricultural products press, New York, 320

Panaras G., Mathioulakis E., Belessiotis V., Kyriakis N., 2010a. Theoretical and experimental investigation of a desiccant air-conditioning system. *Renewable Energy* 35, 1368-1375

Panaras G., Mathioulakis E., Belessiotis V., Kyriakis N., 2010b. Experimental validation of a simplified approach for a desiccant wheel model. *Energy and Buildings*, 42(10), 1719-1725

Panaras G., Mathioulakis E., Belessiotis V., 2011. Solid desiccant air-conditioning systems – Design Parameters. *Energy* 36(5), 2399-2406

Park J.-K., Vohnikova Z., Pedro Reis Brond F., 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering* 51, 193-199

Proflute AB ([www.proflute.se](http://www.proflute.se))

Πανάρας Γ., 2010. Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση συστήματος ηλιακού κλιματισμού με στέρεα αφυγραντικά μέσα. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Παπαναγιώτου Ε., Παπανικολάου Κ., Ζαμανίδης Σ., 2001. Η καλλιέργεια των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών στην Ελλάδα. Γεωργία και Κτηνοτροφία 1, 36-42

Πολυσιού Μ., 2008. Αρωματικά και Φαρμακευτικά Φυτά. Προσδοκίες για αγρότες και μεταποιητές του Ν. Καρδίτσας. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καρδίτσας

Roberts E.-H., 1972. Viability of Seeds. Chapman & Hall, London.

- Rocha R.-P., Melo E.-C., Radünz L.-L., 2011. Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *Journal of Medicinal Plants Research* 5(33), 7076–7084
- San J.-Y., Jiang G.-D., 1994. Modelling and testing of a silica gel packed-bed system. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37(8), 1173-1179
- Sawhney R.-L., Pangavhane D.-R., Sarsavadia P.-N., 2009. Drying Studies of Single Layer Thompson Seedless Grapes. *International Solar Food Processing Conference 2009*
- Shanmugama V., Natarajan E., 2006. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable Energy* 31, 1239–1251
- Sharapin N., 2000. *Fundamentos de tecnologia de Produtos Fitoterápicos*. Santafé de Bogotá, 145-157
- Sharma G.-P., Suresh P., 2006. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy* 31, 1921-1926
- Silva F., Casali V.-W.-D., 2000. *And aromatic plants medicinais: Postoperative essenciais colheita and oils*. Viçosa: Art and Livros, 135
- Σκρουμπής Β., 1998. *Αρωματικά, φαρμακευτικά και μελισσοτροφικά φυτά της Ελλάδας*. Εκδόσεις Αγρότυπος, Αθήνα
- Σταματόπουλος Β., 2006. *ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΜΜΕΣΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΞΗΡΑΝΣΗ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΗΣ ΣΤΑΦΙΔΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΙΓΙΟΥ*. Μεταπτυχιακή Εργασία. Πάτρα
- Σταυρακάκης Μ., 1986. *Σταφιδοποιία*. Έκδοση Γεωπονικού Πανεπιστημίου
- Tarhan S., Telci I., Tuncay T.-M., Polatci H., 2010. Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer. *Industrial Crops and Products* 32, 420-427
- Thoruwa T.-F.-N., Smith J.-E., Grant A.-D., Johnstone C.-M., 1996. Developments in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccants materials. *Renewable Energy* 9(1-4), 686-689
- Zare D., Ranjbaran M., Niakousari M., Javidi M., 2011-2012. Thin Layer Drying and Equilibrium Moisture Content Equations for Canola (*Brassica napus* L.). *Iran Agricultural Research* 30(1-2), 31(1)
- Zhang M., Li C.-L., Ding X.-L., 2003. Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low-vacuum dehydration. *Drying Technology* 21(3), 569–579

Zhang M., Li C.-L., Ding X.-L., 2005. Effects of heating conditions on the thermal denaturation of white mushroom suitable for dehydration. *Drying Technology*, 23(5), 1119–1125