



Διπλωματική εργασία

Τίτλος:
Ενεργειακή αναβάθμιση σε εργοστάσιο ξήρανσης τροφίμων

ημερομηνία:

21/6/2024

Όνομα φοιτητή:

Στυλιανός Πολυγυρινός

Όνομα επιβλέπων καθηγητή:

Γεώργιος Πανάρας

Περίληψη

Στις σύγχρονες κοινωνίες η ζήτηση για αποξηραμένα αγροτικά προϊόντα υψηλής ποιότητας σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής των υδρογονανθράκων καθιστούν την εύρεση μέτρων για την μείωση κόστους ιδιαίτερα σημαντική, ιδίως στα θερμοευαίσθητα προϊόντα, τα οποία απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαδικασία ξήρανσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ξήρανση αγροτικών προϊόντων στην επιχείριση 4G, με έδρα το “Μαυροδένδρι” Κοζάνης. Στόχος είναι αφενός η εξοικονόμηση ενέργειας, αφετέρου η διασφάλιση υψηλής ποιότητας στο τελικό προϊόν. Καθώς και η εύρεση των παραμέτρων που μας δίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό επιτυγχάνεται, τόσο με την επιλογή οικονομικότερης θερμικής πηγής, όσο και με την χρήση ηλιακής ενέργειας. Ως διεργασία αναφοράς χρησιμοποιείται η ξήρανση μήλων.

Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο, καθώς και τα κύρια μεγέθη και οι εξισώσεις που θα χρειαστούμε για την μοντελοποίηση γεωργικών προϊόντων. Έπειτα ακολουθεί βιβλιογραφική διερεύνηση που αφορά στην ξήρανση γεωργικών προϊόντων, με έμφαση στον προσδιορισμό των ιδανικών συνθηκών ξήρανσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνηθέστερες μέθοδοι ξήρανσης, οι διάφοροι τύποι ξηραντηρίων και οι εφαρμογές που ο κάθε τύπος παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ακολουθεί ειδική αναφορά στα ηλιακά ξηραντήρια, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τύπου και βιβλιογραφική τους διερεύνηση.

Το έκτο κεφάλαιο πραγματεύεται με τη μελέτη συμβατικών ξηραντηρίων συναγωγής μέσω της βιβλιογραφίας, όπως και με τη μελέτη των υποσυστημάτων ενός ξηραντηρίου θερμού αέρα. Ακόμη ασχολείται με τον ορισμό παραδοχών και συνθηκών περιβάλλοντος για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης μήλων, αλλά και με την εύρεση ιδανικών συνθηκών ξήρανσης για την καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και διασφάλιση της βέλτιστης δυνατής ποιότητας για τους μήνες Ιούλιο και Ιανουάριο.

Στην συνέχεια μελετάμε την αγορά ενέργειας και τις αυξομειώσεις τιμών τα τελευταία χρόνια με σκοπό να βρούμε πια θερμική πηγή είναι οικονομικότερη. Οι πηγές που μελετούνται είναι ο ηλεκτρικός θερμαντήρας ο καυστήρας φυσικού αερίου και η αντλία θερμότητας.

Το όγδοο κεφάλαιο αφορά στη μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Γίνεται υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας για τους μήνες Ιούλιο και Ιανουάριο. Καταληκτικά, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παραπάνω μελέτης αλλά και αντικείμενα που χρήζουν περαιτέρω έρευνα.

Abstract

In modern societies the demand for high quality dehydrated agricultural products in combination with rising energy prices especially in regard with fossil fuels have made energy saving methods necessary, especially in the drying of heat sensitive products which require specialized conditions during the drying process.

The study presented is concerned with the drying of agricultural products in the business 4G located in “Μαυροδένδρι” close to the city of “Κοζάνη”. The goal is the conservation of energy, but also the guarantee of producing a high quality product and the discovery of the parameters that produce the best outcome. As an example process the drying of apples has been selected.

In further detail the first chapter presents the theoretical framework needed the main values that concern us and the equations needed for the calculation and simulation of the drying process. A study of the current bibliography follows centered on the discovery of the best drying conditions for various agricultural products.

After that the most common methods of drying are presented in combination the most popular types of dryers and the cases they see most use in. Following that we go in further detail exploring solar dryers their advantages and disadvantages and their presence in the bibliography.

In the sixth chapter we study the conventional hot air dryer and its sub parts and defining of the required assumptions and environmental conditions for the simulation of the drying process of apples. It continues with presenting the result that various drying conditions produce regarding the months of July and January.

Then we take a look at the energy market and the price of energy the last years in order to find the most economical heat source available. The energy sources considered were the electric heater the natural gas burner and the high temperature heat pump

In the last chapter we explore the installation of solar panels for energy production and we calculate the energy produced for the months of July and January. In the conclusion we present our findings combined with the areas that need further research.

Table of Contents

Σύμβολα.....	6
1 Μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης.....	9
1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Η Διεργασία της ξήρανσης.....	9
1.3 Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης.....	10
1.3.1 Δραστικότητα υγρασίας.....	10
1.3.2 Μαθηματικές εκφράσεις των ισόθερμων καμπυλών ρόφησης.....	12
1.4 Φάσεις της Ξήρανσης.....	13
1.5 Μοντελοποίηση της ξήρανσης.....	14
1.6 Εξισώσεις ξήρανσης λεπτής λωρίδας.....	15
1.6.1 Εισαγωγή.....	15
1.6.2 Θεωρητικά μοντέλα.....	16
1.6.3 ημι-θεωρητικά μοντέλα.....	19
2 Ξήρανση γεωργικών προϊόντων.....	22
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Ξήρανση συνήθων γεωργικών προϊόντων.....	22
2.2.1 Ξήρανση σταφίδας.....	22
2.2.1.1 Δημοφιλείς μέθοδοι.....	22
2.2.1.2 Συνθήκες ξήρανσης.....	25
2.2.2 Ξήρανση σύκων.....	25
2.2.3 Μοντελοποίηση ξήρανσης μήλων σε ξηραντήριο συναγωγής.....	25
2.2.3.1 Εισαγωγή.....	25
2.2.3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά μήλων.....	25
2.2.3.3 βιβλιογραφική διερεύνηση.....	26
2.3 Αρωματικά και Φαρμακευτικά Φυτά.....	27
2.3.1 Εισαγωγή.....	27
2.3.2 Ξήρανση Αρωματικών και Φαρμακευτικών Φυτών.....	28
2.3.2.1 Σκοπός της ξήρανσης.....	28
2.3.2.2 Προϋποθέσεις κατά την ξήρανση.....	28
2.3.2.3 Μέγιστη τελική περιεκτικότητα σε υγρασία.....	30
2.3.3 Ξήρανση σε μικρές και μεσαίες παραγωγικές μονάδες.....	31
2.3.3.1 Ηλιακή ξήρανση.....	31
2.3.3.2 Ξήρανση σε σκιερό μέρος.....	31
2.3.3.3 Ξήρανση σε βιομηχανική κλίμακα.....	32
2.3.4 Βιβλιογραφική διερεύνηση στην ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών.....	32
2.4 Σπόροι.....	34
2.4.1 Ξήρανση σπόρων.....	34
2.4.2 Συνθήκες ξήρανσης.....	34
3 Τύποι ξηραντηρίων.....	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Ξηραντήρια συναγωγής.....	36
3.2.1 Εισαγωγή.....	36
3.2.2 Περιστροφικά ξηραντήρια.....	36
3.2.3 Ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης.....	37

3.2.4 Ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους.....	38
3.2.5 Ξηραντήρια τούνελ.....	39
3.3 Ηλιακά Ξηραντήρια.....	40
3.4 Λυοφιλίωση (Κρυοαφυδάτωση).....	40
3.5 Ξηραντήρια μικροκυμάτων.....	41
4 Ηλιακά Ξηραντήρια.....	43
4.1 Εισαγωγή.....	43
4.2 Ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα.....	43
4.3 Τύποι ηλιακών Ξηραντηρίων.....	44
4.3.1 Ανοιχτή ηλιακή Ξήρανση.....	44
4.3.2 Άμεση ηλιακή Ξήρανση.....	44
4.3.3 Έμμεση ηλιακή Ξήρανση.....	45
4.3.4 Ξηραντήρια ανάμικτης λειτουργίας.....	45
4.3.5 Ηλιακά Ξηραντήρια φυσικής συναγωγής.....	46
4.3.6 Ηλιακά Ξηραντήρια εξαναγκασμένης συναγωγής.....	46
4.4 Ηλιακά Ξηραντήρια στην βιβλιογραφία.....	47
5 Σχεδιασμός και μοντελοποίηση Ξηραντηρίου μήλων.....	50
5.1 Σχεδιασμός του θαλάμου Ξήρανσης.....	50
5.1.1 Εισαγωγή.....	50
5.1.2 Σχεδιασμός θαλάμου Ξήρανσης.....	50
5.2 Επιλογή μοντέλου.....	51
6 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού Ξηραντηρίου.....	56
6.1 Υποσυστήματα Ξηραντηρίου.....	56
6.1.1 Εναλλάκτης.....	56
6.1.2 Θερμική πηγή.....	57
6.1.3 Θάλαμος Ξήρανσης.....	57
6.2 Αποτελέσματα για μήνα Ιούλιο.....	59
6.3 Αποτελέσματα για μήνα Ιανουάριο.....	64
6.3.1 Εισαγωγή.....	64
6.3.2 Αποτελέσματα.....	64
6.4 Διεργασία χωρίς Εναλλάκτη.....	65
6.5 Συμπεράσματα.....	65
7 Θερμικές πηγές.....	67
7.1 Εισαγωγή.....	67
7.2 Τύποι θερμικών πηγών.....	67
7.3 Τιμές ενέργειας τα τελευταία χρόνια.....	68
7.3.1 Εισαγωγή.....	68
7.3.2 Τιμές Ηλεκτρικού ρεύματος.....	68
7.3.3 Τιμές Φυσικού αερίου.....	71
7.3.3.1 Τιμές φυσικού αερίου στην Ευρώπη.....	71
7.3.3.2 Τιμές φυσικού αερίου στην Ελλάδα.....	73
7.4 Επιλογή τιμών για χρήση στα παραδείγματα.....	74
7.5 Καυστήρας φυσικού αερίου.....	75
7.5.1 Εισαγωγή.....	75
7.5.2 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση καυστήρα φυσικού αερίου.....	76
7.6 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα.....	76
7.6.1 Εισαγωγή.....	76

7.6.2 Υπολογισμός κόστους με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα.....	77
7.7 Θέρμανση με αντλία θερμότητας.....	77
7.7.1 Εισαγωγή.....	77
7.7.2 Επιλογή αντλίας θερμότητας.....	78
7.7.3 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση Αντλίας θερμότητας για τον μήνα Ιούλιο.....	82
7.7.4 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση Αντλίας θερμότητας για τον μήνα Ιανουάριο.....	82
7.8 Συμπεράσματα.....	83
8 Εγκατάσταση Φ/Β για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.....	85
8.1 Εισαγωγή.....	85
8.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.....	85
8.3 Υπολογισμός επιφάνειας Φ/Β για ηλεκτρικό θερμαντήρα.....	89
8.3 Υπολογισμός επιφάνειας Φ/Β για αντλία θερμότητας.....	90
8.4 Συμπεράσματα.....	91
9 Συμπεράσματα και προτάσεις.....	94
Βιβλιογραφία.....	97

Σύμβολα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα κύρια σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διάρκεια της εργασίας.

A Επιφάνεια	[m ²]
α_w δραστηριότητα υγρασίας	[-]
c_p ειδική θερμοχωρητικότητα	[J/(kgK)]
Def συντελεστής διάχυσης	[m ² /s]
F₁,F₂ μεταβλητές συνδυασμένου δυναμικού	[-]
G ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	[W/ m ²]
h_g ειδική ενθαλπία εξατμίσεως νερού	[J/kg]
m μάζα ρευστού ανά χρονικό βήμα	[kg]
MR αδιάστατος λόγος υγρασίας	[-]
Np αριθμός συλλεκτών σε παράλληλη συνδεσμολογία	[-]

η_{hx} βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας	[-]
η_o συντελεστής οπτικής απόδοσης ηλιακού συλλέκτη	[-]
η_{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 ² 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.)	[-]
Δτ θερμοκρασιακή διαφορά	[K]
Δτ χρονικό βήμα	[sec]
Δείκτες	
α Περιβάλλον	
air Αέρας	
dr υποδηλώνει τις συνθήκες του ρεύματος ξήρανσης (θερμοκρασία ή υγρασία ξήρανσης)	
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 από συσκευή του συστήματος

reg Αναγέννηση

sf ηλιακό πεδίο

tot υποδηλώνει σύνολο ή συνολική ποσότητα (μάζας ή ενέργειας)

w Νερό ή υγρασία

1 Μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης

1.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι παραδοχές και οι προσεγγίσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία για την κατανόηση και μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης.

1.2 Η Διεργασία της ξήρανσης

Η ξήρανση είναι μια περίπλοκη διεργασία που περιλαμβάνει ταυτόχρονα μεταφορά μάζας και θερμότητας και παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την διάταξη και το προϊόν. Για αυτόν τον λόγο οι πειραματικές μέθοδοι υπολογισμού είναι πολύ χρήσιμες. Είναι πρακτικές και ταυτόχρονα δίνουν ακριβή αποτελέσματα.

Η ξήρανση ορίζεται παραδοσιακά ως μια διεργασία που μετατρέπει ένα υγρό ή στερεό υλικό σε ένα στερεό με χαμηλότερη περιεκτικότητα υγρασίας. Είναι μια από τις παλαιότερες φυσικές διεργασίες με χρήση στην μεταποίηση προϊόντων και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στις αγροτικές, χημικές και φαρμακευτικές βιομηχανίες όπως στην επεξεργασία φαγητού, κεραμικών, χαρτιού και πολυμερών.

Η ξήρανση είναι επίσης ενεργειακά απαιτητική, με το 10-15% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της βιομηχανίας των ανεπτυγμένων χωρών να αναλογεί σε αυτήν.

Πιο συγκεκριμένα στην βιομηχανία φαγητού η ξήρανση μπορεί να γίνεται στο αρχικό στάδιο (λαχανικά, φρούτα, μπαχαρικά, γάλα) η σε επόμενο στάδιο (στιγμιαίος καφές, σούπες, συμπυκνώματα πρωτεΐνης) με κύριο σκοπό την επιμήκυνση χρόνου ζωής, την επίτευξη επιθυμητής μορφής (σκόνη, φλοίδες, κόκκους), επιθυμητό χρώμα η γεύση, μείωση όγκου ή μάζας και την παραγωγή προϊόντων που θα ήταν αλλιώς αδύνατη (Mujumdar 1997).

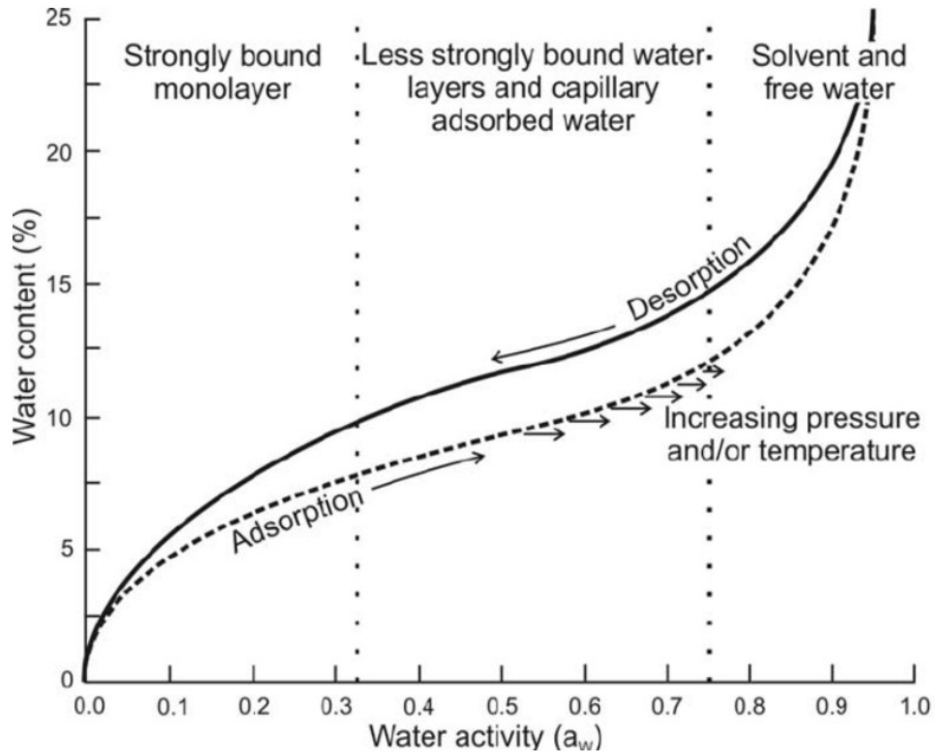
1.3 Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης

1.3.1 Δραστικότητα υγρασίας

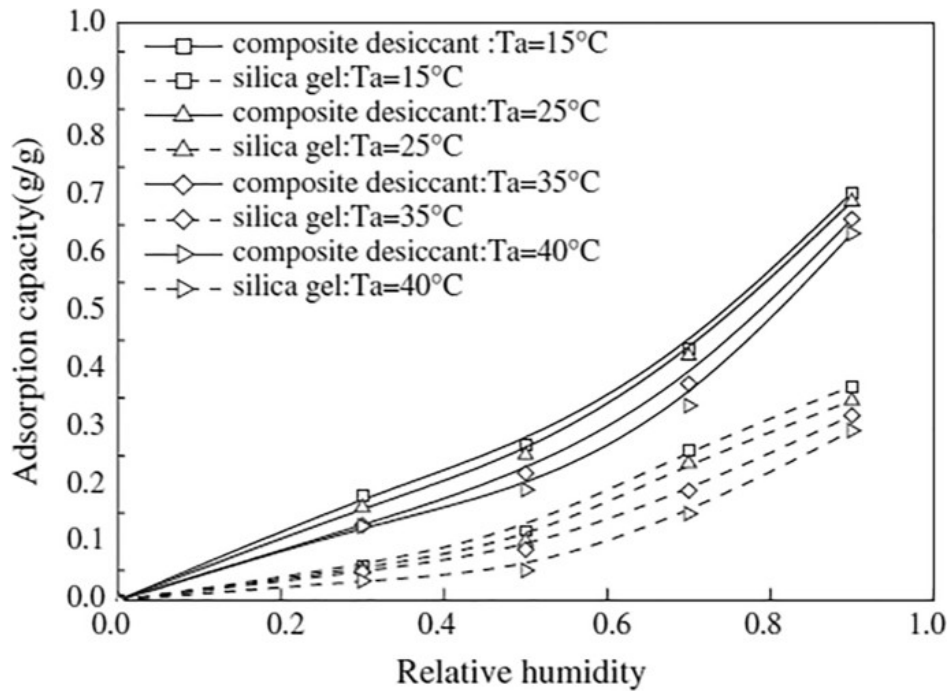
Οι ισόθερμες καμπύλες ρόφησης περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ένα προϊόν προσλαμβάνει ή αποβάλλει υγρασία στο περιβάλλον ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Οι ισόθερμες καμπύλες προσδιορίζονται όταν η υγρασία του προϊόντος βρίσκεται σε ισορροπία με τους υδρατμούς του αέρα που έρχεται σε επαφή. Όταν ένα προϊόν βρίσκεται σε σταθερό περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα η περιεχόμενη υγρασία του σταθεροποιείται σε ένα σημείο που ονομάζεται σημείο ισορροπίας της υγρασίας. Για διαφορετικές τιμές της σχετικής υγρασίας του αέρα το σημείο ισορροπίας μετακινείται. Για να σχηματίσουμε τις καμπύλες ρόφησης σχετίζουμε τα σημεία ισορροπίας της υγρασίας X του προϊόντος με την σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης Φ σε μία σταθερή θερμοκρασία. Στα τρόφιμα όμως είναι χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί η δραστική υγρασία του τροφίμου a_w αντί της σχετικής υγρασίας και να σχετιστεί με την υγρασία ισορροπίας. Η δραστική υγρασία του τροφίμου ορίζεται ως το κλάσμα της μερικής τάσης ατμών του νερού του τροφίμου p προς την μερική τάση ατμών απιονισμένου νερού p_0 στην ίδια θερμοκρασία και ισούται με την σχετική υγρασία του αέρα διά 100. Η δραστικότητα είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά καθώς είναι κρίσιμος παράγοντας για στην συντήρηση προϊόντων και εξαρτάται από τις χημικές και μικροβιακές ιδιότητες του προϊόντος.

Από τις ισόθερμες καμπύλες ενός προϊόντος μπορούμε να βρούμε το σημείο ισορροπίας και κατά την διάρκεια της ξήρανσης αλλά και της ύγρανσης. Γνωρίζοντας την ισόθερμη καμπύλη ενός προϊόντος για την θερμοκρασία που θα αποθηκευθεί, μπορούμε να υπολογίσουμε την περιεχόμενη υγρασία που θα έχει ως αποτέλεσμα την ασφαλή αποθήκευση του. Οι ισόθερμες καμπύλες λοιπόν είναι εξαιρετικά χρήσιμες, καθώς μας ενημερώνουν για τις συνθήκες που πρέπει να αποθηκευτεί το προϊόν καθώς και το σημείο στο οποίο η ξήρανση πρέπει να σταματήσει ώστε και να εξοικονομηθεί ενέργεια αλλά και να έρθει στην επιθυμητή υγρασία για αποθήκευση.

Είναι συνηθισμένο η καμπύλη προσρόφησης να υστερεί σε σχέση με αυτήν της απορρόφησης. Όταν η υγρασία ισορροπίας στο σημείο αποθήκευσης είναι μεγαλύτερη από την σχετική υγρασία του προϊόντος τότε το προϊόν θα αρχίσει να απορροφά νερό από τον αέρα. Αντίθετα αν η υγρασία ισορροπίας είναι μικρότερη από την περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος τότε η περιεχόμενη υγρασία του θα μειωθεί. Έτσι η υγρασία ισορροπίας του θαλάμου αποθήκευσης πρέπει να διατηρείται σε τέτοια επίπεδα ώστε να αποφεύγεται η ενυδάτωση του κατά την περίοδο αποθήκευσης του, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει στην ακαταλληλότητα αυτού προς κατανάλωση.



Σχήμα 1.1 : Ισόθερμη ρόφησης-εκρόφησης τυπικού τροφίμου (Aieaksinen,Sari 2023)



Σχήμα 1.2: καμπύλες ρόφησης διαφορετικών αφυγραντικών υλικών για διάφορες θερμοκρασίες (Abdelgaid et al., 2023)

Οι ισόθερμες καμπύλες χρησιμοποιούνται και για άλλα υλικά που βρίσκουν χρήση στην διεργασία της ξήρανσης όπως τα αφυγραντικά υλικά (σχήμα 1.2) Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την συμπεριφορά των αφυγραντικών υλικών για διαφορετικές θερμοκρασίες και σχετικές υγρασίες ώστε να μπορεί να γίνει σωστή επιλογή αφυγραντικού υλικού για την εφαρμογή που προορίζεται.

1.3.2 Μαθηματικές εκφράσεις των ισόθερων καμπυλών ρόφησης

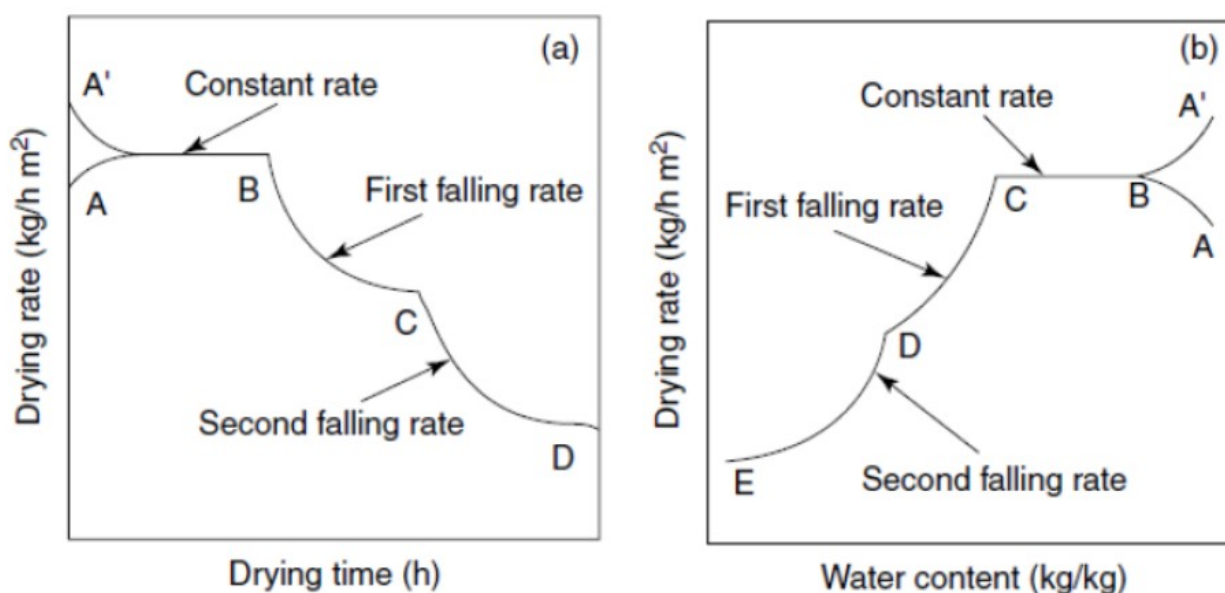
Μπορούμε χρησιμοποιώντας εμπειρικές ή θεωρητικές μεθόδους να περιγράψουμε μαθηματικά τα φαινόμενα ρόφησης (πιν. 1.1). Η BET είναι μια θεωρητική μέθοδος που βασίζεται στην υπόθεση ότι στην υγροσκοπική επιφάνεια των πόρων με την αύξηση της πίεσης σχηματίζονται στοιβάδες από προσροφούμενα μόρια νερού με αυξανόμενο πάχος. Η θεωρία προκύπτει από από εξέλιξη της θεωρίας Langmuir. Μια ακόμα μέθοδος με θεωρητική βάση είναι η εξίσωση GAB η οποία έχει ευρεία χρήση στην ξήρανση τροφίμων. Ενδεικτικές εμπειρικές εξισώσεις είναι αυτές του Oswin, Peleg, Smith και έχουν εφαρμογή κυρίως σε τρόφιμα. Οι θεωρητικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα μεγάλο εύρος προϊόντων με ικανοποιητική ακρίβεια. Ενώ οι εμπειρικές μέθοδοι έχουν περιορισμένη εφαρμογή αλλά σε μερικές περιπτώσεις μπορούν να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τις θεωρητικές μεθόδους (Andrade et al., 2010).

Model	Equations
GAB	$MC_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$
BET	$MC_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w)} \cdot \left[\frac{1 - (n + 1) \cdot (a_w)^n + n \cdot (a_w)^{n+1}}{1 - (1 - C) \cdot a_w - C \cdot (a_w)^{n+1}} \right]$
Halsey	$MC_{eq} = \left(\frac{-a}{\ln(a_w)} \right)^{1/b}$
Oswin	$MC_{eq} = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b$
Henderson	$MC_{eq} = \left(\frac{-\ln(1 - a_w)}{b} \right)^{1/a}$

Πίνακας 1.1 : Συνήθη μοντέλα και οι μαθηματικές τους εκφράσεις για την μοντελοποίηση των ισόθερων καμπυλών απορρόφησης-εκρόφησης υγροσκοπικών υλικών (Nunes et al., 2020)

1.4 Φάσεις της Ξήρανσης

Η συμπεριφορά του προϊόντος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κατά την διάρκεια της ξήρανσης είναι απαιτητική για την κατανόηση της φυσικής διεργασίας της ξήρανσης και των φαινομένων που διέπουν την απομάκρυνση υγρασίας από ένα φρέσκο προϊόν. Ο ρυθμός ξήρανσης, δηλαδή η απομάκρυνση υγρασίας σε σχέση με τον χρόνο δεν παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της ξήρανσης αλλά παρουσιάζει σχετικά ευδιάκριτα στάδια. Μελετώντας αυτά τα στάδια μπορούμε να κατανοήσουμε την επίδραση των συνθηκών ξήρανσης αλλά και τους μηχανισμούς που διέπουν την εξέλιξη της διεργασίας. Οι Mujumdar et., al 2000 χωρίζουν την διεργασία σε 3 κύρια στάδια και το προστάδιο κατά το οποίο το προϊόν δεν έχει φτάσει ακόμα την θερμοκρασία ισορροπίας μέσα στον θάλαμο. Στο πρώτο στάδιο παρατηρείται σταθερός ρυθμός ξήρανσης. Στο στάδιο αυτό η επιφάνεια του υλικού είναι κορεσμένη σε υγρασία και η υγρασία που εξατμίζεται είναι κυρίως από αυτήν. Το δεύτερο στάδιο είναι αυτό του φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης. Η επιφάνεια του υλικού παραμένει ακόρεστη σε υγρασία καθώς ο ρυθμός που το νερό ρέει από το εσωτερικό του δεν είναι αρκετός για τον κορεσμό της με αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ξήρανσης σταδιακά. Στο τρίτο στάδιο ο ρυθμός μειώνεται ακόμα περισσότερο καθώς η υγρασία που απομένει είναι πολύ ισχυρά δεσμευμένη στο εσωτερικό του υλικού και η αφαίρεσή της είναι πολύ δύσκολη.



Σχήμα 1.3 : (α) ο ρυθμός ξήρανσης σε σχέση με τον χρόνο (β) ο ρυθμός ξήρανσης σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία (moisture control)

Είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της διάρκειας της ξήρανσης να γνωρίζουμε τον ρυθμό ξήρανσης και την μεταβολή του κατά την διάρκεια της διεργασίας. Ο ρυθμός ξήρανσης εξηγεί την συμπεριφορά του υλικού κατά την διάρκεια της ξήρανσης μας

δίνει την περιεχόμενη υγρασία σε κάθε χρονική στιγμή καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο για την ολοκλήρωση της διεργασίας. Για βιολογικά προϊόντα όπως τα αγροτικά που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία δεν παρατηρείται σταθερή περίοδος ξήρανσης (Bakshi and Singh, 1980).

1.5 Μοντελοποίηση της ξήρανσης

Ο κύριος μηχανισμός ξήρανσης είναι διάχυση υγρού μέσω της επιφάνειας και των πόρων του, η διάχυση λόγω διαφοράς υγρασίας και η τριχοειδής δράση.

Η ξήρανση μοντελοποιείται με 2 κύρια μοντέλα:

(I) Distributed models

Λαμβάνουν υπόψη την μεταφορά θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό του υλικού και υπολογίζουν την διανομή θερμοκρασίας και υγρασίας του προϊόντος. Βασίζονται στις εξισώσεις του Luikov που παράγονται από τον δεύτερο νόμο του Fick (Luikov, 1975).

$$\partial M/\partial t = \nabla^2 K_{11} + \nabla^2 K_{12} T + \nabla^2 K_{13} P$$

$$\partial T/\partial t = \nabla^2 K_{21} + \nabla^2 K_{22} T + \nabla^2 K_{23} P$$

$$\partial P/\partial t = \nabla^2 K_{31} + \nabla^2 K_{32} T + \nabla^2 K_{33} P$$

(1)

Για τις περισσότερες διεργασίες η επιρροή της πίεσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σχέση με αυτήν της θερμοκρασίας και της υγρασίας και οι εξισώσεις μετατρέπονται (Brooker et al., 1974):

$$\partial M/\partial t = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} T$$

$$\partial T/\partial t = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} T$$

(2)

Παρόλα αυτά αυτές οι εξισώσεις δεν μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους λόγω των δύσκολων και περίπλοκων πραγματικών μηχανισμών ξήρανσης. Μπορούν όμως να λυθούν με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Ozilgen and Ozdemir, 2001).

(ii) Lumped parameter models

Αυτά τα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη την κατανομή θερμοκρασίας στο προϊόν καθώς θεωρούν ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας.

$$\partial M/\partial t = K_{11} \nabla^2 M$$

$$\partial T/\partial t = K_{22} \nabla^2 T$$

(3) (4)

η σταθερά K_{11} είναι γνωστή ως δραστική υγρασία διάχυσης (D_{eff}) και η K_{22} ως θερμική διάχυση (α). Για σταθερές τιμές D_{eff} και α οι εξισώσεις μετατρέπονται ως:

$$\partial M/\partial t = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial M}{\partial x} \right]$$

$$\partial T/\partial t = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right]$$

(5) (6)

όπου $\alpha_1=0$ για παραλληλόγραμμα $\alpha_1=1$ για κυλίνδρους και $\alpha_1=2$ για σφαίρες (Ekechukwu, 1999).

Η παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής υγρασίας δεν συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις κάτω από πραγματικές συνθήκες. Αυτό το σφάλμα μπορεί να μειωθεί με την μείωση του πάχους του προϊόντος σε αποδεκτά επίπεδα (Henderson and Pabis, 1961) με αυτήν την αναγκαιότητα η ξήρανση λεπτής λωρίδας γίνεται πολύ σημαντική και παράγονται οι εξισώσεις της.

1.6 Εξισώσεις ξήρανσης λεπτής λωρίδας

1.6.1 Εισαγωγή

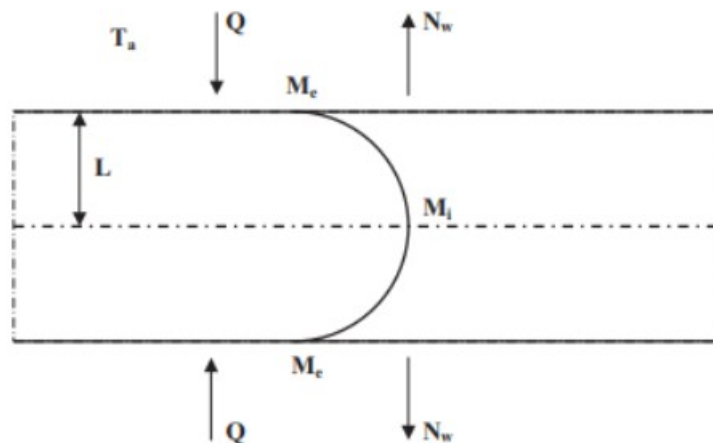
Οι εξισώσεις ξήρανσης λεπτής λωρίδας είναι σημαντικά μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της διεργασίας. Είναι πρακτικές με καλή ακρίβεια αλλά χρειάζεται να είναι γνωστές οι καμπύλες ξήρανσης.

Η ξήρανση λεπτής λωρίδας ορίζεται ως η ξήρανση μιας στρώσης δειγμάτων σωματιδίων ή λεπτών φετών. Λόγο του λεπτού πάχους η διανομή της θερμοκρασίας μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη. Αυτές οι εξισώσεις έχουν μεγάλο εύρος χρήσης λόγω της ευκολίας τους και της δυνατότητας να δώσουν αποτέλεσμα με λιγότερα δεδομένα σε σχέση με τα περίπλοκα μαθηματικά μοντέλα (Distributed models).

Οι εξισώσεις μπορεί να είναι θεωρητικές, ημι-θεωρητικές ή εμπειρικές. Οι θεωρητικές προέρχονται από τον δεύτερο νόμο του Fick, μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλές περιπτώσεις αλλά περιέχουν πολλές υποθέσεις που οδηγούν σε σφάλματα. Οι ημι-θεωρητικές προέρχονται και αυτές από τον δεύτερο νόμο του Fick και τις απλοποιημένες μορφές του ή από τον νόμο ψύξης του Newton. Είναι πιο απλές και χρειάζονται λιγότερες υποθέσεις λόγω της ενσωμάτωσης εμπειρικών δεδομένων αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις περιπτώσεις (Fortes and Okos, 1981, Parry, 1985). Τα εμπειρικά μοντέλα έχουν ομοιότητες με τα ημι-θεωρητικά αλλά εξαρτώνται σημαντικά από τις πειραματικές συνθήκες και δεν δίνουν πολλές πληροφορίες για την συμπεριφορά των προϊόντων (Ashworth et al., 1972).

1.6.2 Θεωρητικά μοντέλα

Από την εξίσωση (5)



Σχήμα 1.4: απεικόνιση ξήρανσης λεπτής λωρίδας εάν η ξήρανση λαμβάνει χώρα και στις δύο πλευρές (Erbay et al., 2010)

Με τις παρακάτω συνοριακές συνθήκες και υποθέσεις η (5) μπορεί να λυθεί αναλυτικά

$$t=0, -L \leq x \leq L, M = M_i \quad (7)$$

$$t > 0, x=0, dM/dx=0 \quad (8)$$

$$t > 0, x=L, M = M_e \quad (9)$$

$$t > 0, -L \leq x \leq L, T = T_a \quad (10)$$

υποθέσεις

- (I) το σώμα είναι ομοιογενές και ιστροπικό
- (II) τα μαθηματικά χαρακτηριστικά είναι σταθερά και μείωση όγκου αμελητέα
- (III) αλλαγές πίεσης αμελητέα
- (IV) η εξάτμιση συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια
- (V) αρχική υγρασία ομοιόμορφη (7) και στην πορεία συμμετρική (8)
- (VI) η διάχυση στην επιφάνεια έχει τελειώσει και η υγρασία ισορροπίας φτάνει στην επιφάνεια (9)
- (VII) η διανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη και ίση με θερμοκρασία ξήρανσης όπως στο Lumped system (10)
- (VIII) η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή μέσα στο σώμα και εξωτερικά με συναγωγή με τον αέρα
- (IX) η δραστική υγρασία διάχυσης είναι σταθερή σε σχέση με την υγρασία του προϊόντος κατά την διάρκεια της ξήρανσης

Η λύση της (5) (Crank,1975) για άπειρο επίπεδο (11) άπειρο κύλινδρο (12)

$$MR = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} 1/(2i-1)^2 \exp\left[\frac{-(2i-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{A_2}\right] \quad (11)$$

$$MR = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} 1/J_0^2 \exp\left[\frac{(-J_0^2 D_{eff} t)}{A_2}\right] \quad (12)$$

Table 1 Values of geometric constants according to the product geometry.

Product Geometry	A_1	A_2^*
Infinite slab	$8/\pi^2$	$4L^2$
Sphere	$6/\pi^2$	$4r^2$
3-dimensional finite slab	$(8/\pi^2)^3$	$1/(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2)$

* L is the half thickness of the slice if drying occurs from both sides, or L is the thickness of the slice if drying occurs from only one side.

Πίνακας 1.2 : τιμές γεωμετρικών σταθερών για άπειρη πλάκα, σφαίρα και άπειρη πλάκα τριών διαστάσεων (Erbay et al., 2010)

D_{eff} = δραστική υγρασία διάχυσης (m^2/s), t = χρόνος (s), MR = υγρασία ισορροπίας, J_0 = ρίζες της εξίσωσης Bessel. A_1, A_2 γεωμετρικές σταθερές από τον πίνακα 2.

Εάν η σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης είναι σταθερή τότε η υγρασία ισορροπίας είναι σταθερή και το **MR** υπολογίζεται ως:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (13)$$

εάν αλλάζει τότε αλλάζει και η υγρασία ισορροπίας και υπολογίζεται ως (Diamante and Munro, 1993):

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (14)$$

M_i = αρχική υγρασία, M_t = η μέση υγρασία στον χρόνο t , M_e = η υγρασία ισορροπίας αν αποδεχτούμε ότι τα φαγητά ξηραίνονται χωρίς σταθερή περίοδο τότε το $M_i = M_{cr}$ που ορίζεται ως η περιεχόμενη υγρασία του προϊόντος μετά το τέλος της σταθερής περιόδου ξήρανσης τότε η (13) μετατρέπεται σε:

$$\varphi = \frac{M_t - M_e}{M_{cr} - M_e} \quad (15)$$

όπου φ = χαρακτηριστική υγρασία

1.6.3 ημι-θεωρητικά μοντέλα

Τα ημι-θεωρητικά μοντέλα προέρχονται ή από τον νόμο του Newton για την ψύξη ή από τον δεύτερο νόμο του Fick.

Newton

a. Lewis model

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (16)$$

K σταθερά ξήρανσης (s⁻¹) υπολογίζεται πειραματικά και εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού (Marinos-Kouris and Maroulis, 1995). Εάν το K είναι ανεξάρτητο από το M τότε:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(-kt)$$

(17)

b. Page Model

Το μοντέλο μετατρέπει αυτό του Lewis προσθέτοντας την εμπειρική αδιάστατη σταθερά **n**

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(-kt^n)$$

(18)

το **n** μπορεί να πάρει διαφορετικές τιμές για διαφορετικά προϊόντα όπως (καλαμπόκι, σόγια, γλυκοπατάτα).

Fick

a. Henderson and Pabis Model

Φτιάχτηκε κυρίως για την μοντελοποίηση ξήρανσης καλαμποκιού

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_1 \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{A_2} t\right)$$

(19)

Αν **D_{eff}** σταθερή τότε

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = a \exp(-kt)$$

(20)

όπου **a** σταθερά μοντέλου υπολογίζεται πειραματικά

b. Logarithmic (Asymptotic) Model

Είναι μετατροπή πάνω στο μοντέλο Henderson and Pabis κυρίως για μοντέλα ξήρανσης δάφνης

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = a \exp(-kt) + c$$

(20)

όπου c εμπειρική σταθερά

c. Midlili Model

Ο Midlili το 2002 έκανε μια μετατροπή πάνω στο μοντέλο Henderson and Pabis προθέτοντας μια εμπειρική σταθερά $b(s^{-1})$ τον χρόνο t . Εφαρμόζεται στην ξήρανση γύρης, μανιταριών και φιστικιών

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = a \exp(-kt) + b * t$$

(21)

d. Modified Midlili Model

Ο Ghazanfari το 2006 υπέθεσε την σταθερά $\alpha=1$ και έκανε την εφαρμογή στην παραγωγή μερικών υφασμάτων

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(-kt) + b * t$$

(22)

e. Midilli-Kucuk

Ο Kucuk έκανε μετατροπή πάνω στο μοντέλο του Midilli το 2002

$$MR = a \exp(-kt^n + bt)$$

(23)

f. Demir

Ο Demir το 2007 έκανε έναν συνδυασμό των προηγούμενων μοντέλων με εφαρμογή στην ξήρανση πράσινων ελιών

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = a \exp[(-kt)^n] + b$$

(24)

g. Μοντέλο δύο όρων

Ο Henderson το 1974 έλαβε υπό όψη τους δύο πρώτους της λύσης του δεύτερου νόμου του Fick με εφαρμογή στην ξήρανση σιτηρών

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$$

(25)

όπου **a, b** σταθερές σχήματος (αδιάστατες) και **k₁, k₂** (s⁻¹) εμπειρικές σταθερές

h. Ακολούθησαν και άλλες μετατροπές η κάθε μια με την δικιά της ειδικότητα και σκοπό.

2 Ξήρανση γεωργικών προϊόντων

2.1 Εισαγωγή

Στην Ελλάδα ξήρανση συνήθως γίνεται σε φρούτα με πιο σύνηθες να είναι οι σταφίδες και τα σύκα. Είναι χρήσιμο λοιπόν να δούμε στοιχεία για τις μεθόδους ξήρανσής τους και τον τρόπο που συμπεριφέρονται κατά την διάρκειά της.

2.2 Ξήρανση συνήθων γεωργικών προϊόντων

2.2.1 Ξήρανση σταφίδας

2.2.1.1 Δημοφιλείς μέθοδοι

Οι συνηθέστερες μέθοδοι ξήρανσης της σταφίδας είναι :

- ξήρανση με το φαινόμενο του θερμοκηπίου



Εικόνα 2.1 : Ξήρανση σταφίδας με ηλιακή ενέργεια με χρήση φαινομένου του θερμοκηπίου (olivenet)

- ξήρανση με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 2.2 : ξήρανση σταφίδας με άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία (ertnews)

- ξήρανση σε σκιερό μέρος



Εικόνα 2.3 : ξήρανση σταφίδας υπό σκιά (olivemagazine)

- ξήρανση με ρεύμα θερμού αέρα και εξαναγκασμένη συναγωγή σε βιομηχανική κλίμακα

Η ξήρανση της σταφίδας γίνεται συνήθως αμέσως μετά την περίοδο του τρύγου. Οι σταφίδες απλώνονται σε σταφιδόπανα και σε μερικές περιπτώσεις καλύπτονται από επιπλέον πλαστικά σταφιδόπανα που δημιουργούν φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτή η μέθοδος δεν φαίνεται να έχει σημαντικά οφέλη στην ξήρανση εκτός από την προστασία της από ξαφνική βροχή. Αυτό συμπεραίνεται εμπειρικά από το γεγονός ότι οι παραγωγοί όταν ο καιρός επιτρέπει προτιμούν την άμεση ηλιακή ξήρανση (Σταματόπουλος,2006).

Ανάλογα με την ποικιλία της σταφίδας, η κάθε μία με τα δικά της χαρακτηριστικά, πρέπει να επιλεγεί και η κατάλληλη μέθοδος ξήρανσης για να εξασφαλίσουμε την καλύτερη δυνατή ποιότητα. Από τα αποτελέσματα μελετών (Σταυράκης,1986) βλέπουμε ότι σταφίδες που ξηράνθηκαν με άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία είναι ποιοτικά χειρότερες από αυτές που αποξηράνθηκαν με άλλες μεθόδους. Είναι σημαντικό λοιπόν να γίνει η ξήρανση σε όσο δυνατών καλύτερες συνθήκες τόσο σε μικρή όσο και σε βιομηχανική κλίμακα καθώς οι σταφίδες αποτελούν ένα σημαντικό εγχώριο και εξαγόμενο προϊόν.

2.2.1.2 Συνθήκες ξήρανσης

Για την ασφαλή συντήρηση των σταφίδων το περιεχόμενο υγρασίας τους πρέπει να φτάσει στο 17 με 18 % σε ξηρή βάση. Η ξήρανση με άμεση ηλιακή ακτινοβολία γίνεται στους 45 °C με την σημείωση ότι χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν επαρκούν καθώς η υγρασία ισορροπίας είναι υψηλότερη από την επιθυμητή με αποτέλεσμα η ξήρανση να μην ολοκληρώνεται. Σε βιομηχανική κλίμακα η ξήρανση γίνεται με μέγιστο όριο θερμοκρασίας 77 °C με ξηραντήρια συναγωγής θερμού αέρα (Sawhney et al., 2009).

2.2.2 Ξήρανση σύκων

Η ξήρανση των σύκων γίνεται και αυτή παρόμοια με αυτήν των σταφίδων, δηλαδή με ηλιακή ακτινοβολία. Απλώνονται στις λεγόμενες λιάστρες αφού έχουν υποστεί λεύκανση. Η ξήρανση κρατάει πολλές μέρες ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (9 με 12) μέχρι η περιεχόμενη υγρασία να είναι πολύ χαμηλή. Τα βράδια τα σύκα πρέπει να μαζεύονται λόγω εντόμων τα οποία μπορούν να προξενήσουν μεγάλες ζημιές ή εάν οι καιρικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές .

2.2.3 Μοντελοποίηση ξήρανσης μήλων σε ξηραντήριο συναγωγής

2.2.3.1 Εισαγωγή

Η ξήρανση των μήλων προσεγγίζεται με την μέθοδο την λεπτής λωρίδας (thin layer drying). Δεν εμφανίζεται σταθερός ρυθμός ξήρανσης κατά την διεργασία αλλά ο ρυθμός μειώνεται με τον χρόνο, με την διάχυση να είναι ο κύριος μηχανισμός ξήρανσης (Akpinar 2006).

Τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρό για τον προσδιορισμό των καμπυλών ξήρανσης είναι τα μοντέλα Newton, Page, modified page, Henderson and Pabis, Logarithmic, two term, two term exponential, Wang and Singh, Diffusion approach, Modified Henderson Pabis, Verma και Midili and Kucuk.

2.2.3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά μήλων

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι το χρώμα, η υφή και η συνολική φαινόλη.

Ως φαινόλες ονομάζουμε μια ποικιλία από χημικές ουσίες που είναι παρούσες σε πολλά φρούτα όπως (+)-catechin και (-)-epicatechin (flavan-3-ols or flavanols), phloridzin (dihydrochalcone glycosides), quercetin (flavonols), cyaniding (anthocyanidins), cyanidin-3-O-galactoside (anthocyanins), chlorogenicacid (phenolic acids), και hydroxycinnamates (p-coumaric acid). Αυτές οι ουσίες παρουσιάζονται σε ποσότητες 75.7-93 mg/g και μπορούν να μετρηθούν με ηλεκτρομετρία(CG-MS).Αυτές οι ουσίες

έχουν δείξει σημαντικά οφέλη στην υγεία όπως: αντικαρκινική δράση, καταπολέμηση του Alzheimer, βελτιώνουν την υγεία του πεπτικού συστήματος και μειώνουν τα επίπεδα της χοληστερίνης (Francini et al., 2013).

Τα χαρακτηριστικά της υφής μπορούν να μετρηθούν από εξειδικευμένα όργανα (texture analyzers) και οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν είναι η σκληρότητα ή ελαστικότητα και συνεκτικότητα (Cruz et al.,2015).

Το χρώμα μπορεί να μετρηθεί με μετρητή χρώματος ο οποίος μας δίνει τις συντεταγμένες του χρώματος στον χάρτη των χρωμάτων. Συγκρίνοντας το τελικό χρώμα με το χρώμα του φρέσκου μήλου μπορούμε να βρούμε το βαθμό κατά τον οποίον αυτό έχει αλλοιωθεί (Cruz et al.,2015).

2.2.3.3 βιβλιογραφική διερεύνηση

Το 2015 οι Cruz et al μελετούν την διεργασία ξήρανσης σε δύο ποικιλίες μήλων golden delicious και Granny smith. Οι θερμοκρασίες ξήρανσης που επιλέχθηκαν ήταν 30,40,50,60 °C και τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν αρκετά κοντά στις προβλέψεις των μοντέλων Page, logarithmic, Henderson Pabis, Vega-Lemus με τις τιμές του R να είναι πάνω από 0.9 σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από το μοντέλο Vega-Lemus το οποίο κρίνεται ακατάλληλο για την ξήρανση μήλων. Το μοντέλο του Page έδωσε τις μεγαλύτερες τιμές R αλλά και τα άλλα δυο μοντέλα κρίθηκαν ικανοποιητικά. Η οξύτητα και τα σάκχαρα επηρεάστηκαν από την διεργασία και στις δύο ποικιλίες ενώ η θερμοκρασίες ήταν αρκετά χαμηλές ώστε να μην έχουν επιρροή. Όσο αφορά στο χρώμα και οι δυο ποικιλίες παρουσίασαν πιο σκούρα χρώματα με πιο έντονο κίτρινο σε όλες τις θερμοκρασίες. Η υφή ήταν παρόμοια στις δύο ποικιλίες στην αρχική κατάσταση αλλά και μετά την ξήρανση παρουσιάστηκαν τα ίδια αποτελέσματα με μείωση της σκληρότητας και την μαστιχωτή υφή.

Οι Demarchi et al 2013 ξηραίνουν φλοίδες από μήλα (apple leathers) σε θερμοκρασίες 50, 60, 70 °C και η πορεία της διαδικασίας μπορεί να προβλεφθεί επιτυχώς με την μέθοδο διάχυσης ενός όρου. Η περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτικά (AC) μειώνεται σημαντικά μετά την ξήρανση και μειώνεται ακόμα περισσότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης. Η προσθήκη μεταδιθειώδους καλίου στο προϊόν το προστατεύει από την απώλεια αντιοξειδωτικών ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Καταλήγουν ότι η μέθοδος ξήρανσης με θερμό αέρα που είναι και η πιο δημοφιλής οδηγεί σε μεγάλες απώλειες αντιοξειδωτικών και θα πρέπει να γίνουν έρευνες για να βρεθούν εναλλακτικές μέθοδοι ή τρόποι να μειωθεί η θερμοκρασία ξήρανσης. Η εύρεση καλύτερων πρόσθετων ουσιών για την προστασία των προϊόντων αναφέρετε και αυτή ως άλλη εναλλακτική.

Οι Nadian et al 2015 χρησιμοποίησαν ένα οπτικό σύστημα συνδεδεμένο με υπολογιστή με σκοπό να ελέγχουν σε πραγματικό χρόνο το χρώμα των μήλων. Είχαν σκοπό να αναπτύξουν μια σχέση ανάμεσα στο χρώμα και την περιεχόμενη υγρασία αλλά κατέληξαν ότι χρειάζεται περισσότερη έρευνα. Συμπεραίνουν ότι η θερμοκρασία ξήρανσης είναι πολύ σημαντική στην διατήρηση του χρώματος. Χρησιμοποίησαν έναν αυτοδίδακτο αλγόριθμο για να μοντελοποιήσουν την διεργασία με επιτυχία επιτυγχάνοντας $R^2=0.9869$

Το 2020 οι Tere et al συγκρίνουν την ξήρανση με θερμό αέρα και την υβριδική ξήρανση με θερμό αέρα σε συνδυασμό με μικροκύματα. Στα αποτελέσματα καταλήγουν ότι:

α. Η χρήση μικροκυμάτων αυξάνει τον ρυθμό ξήρανσης και μειώνει τον χρόνο ξήρανσης σημαντικά σε σχέση με την συμβατική ξήρανση με θερμό αέρα.

β. Ο ρυθμός ξήρανσης και ο χρόνος ξήρανσης επηρεάζονται από την θερμοκρασία του θερμού αέρα αλλά και από την ένταση της ακτινοβολίας. Όταν αυτές ανεβαίνουν ο ρυθμός ξήρανσης αυξάνεται και ο χρόνος ξήρανσης μειώνεται. Η αύξηση της έντασης των μικροκυμάτων έχει μεγαλύτερη επιρροή στις χαμηλές εντάσεις και όσο η ένταση μεγαλώνει τόσο η επιρροή στον χρόνο ξήρανσης μικραίνει.

γ. Το μοντέλο του Page ήταν το πιο αποτελεσματικό στην μοντελοποίηση και πρόβλεψη της διεργασίας με χρήση του υβριδικού συστήματος. Ενώ το παραβολικό μοντέλο ήταν το πιο κατάλληλο για την μοντελοποίηση της συμβατικής ξήρανσης.

δ. Το μοντέλο που καλύτερα περιγράφει και τις δύο μεθόδους ήταν το μοντέλο του Peleg.

Οι Aghilinategh et al., 2015 μελετούν την ξήρανση μήλων με δύο μεθόδους, θερμό αέρα και μικροκύματα και μελετούν την τελικό χρώμα του προϊόντος συγκρίνοντάς το με αρχικό και την συγκέντρωση της συνολικής φαινόλης. Εξετάζουν θερμοκρασίες αέρα από 40-80 °C με ταχύτητα αέρα από 0.5 – 2 m/s και για τα μικροκύματα ένταση 200-600 W. Για την ξήρανση με θερμό αέρα αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την συνολική συγκέντρωση φαινόλης και αυξάνει της διαφορά χρώματος από το φρέσκο μήλο. Αύξηση της ταχύτητας του αέρα βελτιώνει την ποιότητα του προϊόντος και στους δύο παράγοντες που εξετάζονται. Για την ξήρανση με μικροκύματα, μεγαλύτερη ισχύς αυξάνει τα επίπεδα συνολικής φαινόλης και μειώνει την διαφορά χρώματος. Συνολικά η ξήρανση με μικροκύματα παράγει προϊόν υψηλότερης ποιότητας από ότι η ξήρανση με θερμό αέρα.

2.3 Αρωματικά και Φαρμακευτικά Φυτά

2.3.1 Εισαγωγή

Στην Ελλάδα συναντάμε μεγάλη ποικιλία από αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά. Πάνω από 150 είδη είναι ενδημικά αλλά πολλά από αυτά δεν αξιοποιούνται. Η καλλιέργειά τους παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις αλλά και μεγάλα οικονομικά οφέλη καθώς η τιμή τους ανά κιλό είναι ιδιαίτερα υψηλή. Τα κυριότερα φυτά που συναντάμε στην Ελλάδα είναι η ρίγανη, το θυμάρι, το θρουμπί, το φασκόμηλο, ο γλυκάνισος, ο μάραθος, το χαμομήλι, τη μέντα, τον δυόσμο το φλισκούνι, τη λεβάντα, το μελισσόχορτο και τέλος τα πολύ γνωστά και τοπικά προϊόντα όπως ο κρόκος Κοζάνης, η μαστίχα Χίου, το δίκταμο Κρήτης και το τσάι του βουνού Μαγνησίας (Πολύσιος, www.yraithros.gr).

2.3.2 Ξήρανση Αρωματικών και Φαρμακευτικών Φυτών

2.3.2.1 Σκοπός της ξήρανσης

Μερικά από τα Αρωματικά και Φαρμακευτικά φυτά δεν χρειάζονται ξήρανση κατά την μεταποίηση τους στο τελικό προϊόν όπως η παραγωγή αιθέριων ελαίων από μέντα, μελισσόχορτο ή βασιλικό που γίνεται με εκχύλιση ή απόσταξη . Παρόλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις η ξήρανση είναι απαραίτητη για την συντήρηση τους μέχρι την στιγμή της απόσταξης ή εκχύλισης. Η ξήρανση έχει ακόμα το πλεονέκτημα ότι μειώνει τον όγκο και το βάρος του προϊόντος καθιστώντας το πιο οικονομικό και εύχρηστο κατά την μετακίνηση και αποθήκευσή του.

Η ξήρανση έχει σκοπό την μείωση της περιεχόμενης υγρασίας του προϊόντος ώστε να εμποδιστεί η ενζυμική και μικροβιακή δραστηριότητα με αποτέλεσμα την παράταση της διάρκειας ζωής του. Η έκθεση ενός φυτού σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί όμως να έχει αποτέλεσμα την απώλεια αιθέριων ελαίων, πτητικών ουσιών αλλά και άλλων θερμοευαίσθητων ουσιών που μπορεί να περιέχονται στο φυτό. Τα περισσότερα φαρμακευτικά φυτά ξηραίνονται σε θερμοκρασίες ανάμεσα στους 30 με 60 °C. Οι ιδανικές συνθήκες ξήρανσης είναι διαφορετικές για κάθε φυτό και πρέπει να προσδιορίζονται πειραματικά καθώς πολύ αργός ρυθμός ξήρανσης μπορεί να βλάψει το προϊόν λόγω παρουσίας ενζύμων, μυκητών και βακτηρίων κατά την διάρκεια της ξήρανσης. Από την άλλη μεριά πολύ γρήγορη αφυδάτωση του προϊόντος προκαλεί αλλοίωση της επιφάνειάς του και μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη κατανομή υγρασίας (Sharapin, 2000). Για τους λόγους αυτούς είναι απαραίτητη η χρήση ξηραντηρίων που μας επιτρέπουν να ελέγχουμε της συνθήκες ξήρανσης και να διασφαλίσουμε ότι οι συνθήκες ξήρανσης είναι τέτοιες ώστε να μην βλάψουν το τελικό προϊόν και τις ποσότητες ενεργών συστατικών που μας ενδιαφέρουν.

2.3.2.2 Προϋποθέσεις κατά την ξήρανση

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

α. Για να διασφαλίσουμε την ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά του προϊόντος πρέπει η τελική περιεχόμενη υγρασία του να ταυτίζεται με την υγρασία ισορροπίας για την θερμοκρασία και σχετική υγρασία που επικρατούν στον χώρο αποθήκευσης, καθώς σε άλλη περίπτωση μπορεί το προϊόν να ενυδατωθεί και να γίνει ευάλωτο σε μικροοργανισμούς.

β. Πρέπει οι συνθήκες ξήρανσης να είναι τέτοιες ώστε να προστατευθούν τα ενεργά συστατικά, το χρώμα, η γεύση και το άρωμα του προϊόντος

γ. Η συγκέντρωση μικροβίων θα πρέπει να είναι κάτω των προδιαγεγραμμένων ορίων (Oztekin and Martinov,2007).

2.3.2.3 Μέγιστη τελική περιεκτικότητα σε υγρασία

Κάθε αρωματικό ή φαρμακευτικό φυτό έχει το δικό του όριο περιεχόμενης υγρασίας . Ορισμένα παραδείγματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Διαμαντόπουλος,2013).

ΕΙΔΟΣ	ΜΕΡΗ	W % υ.β.
<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. (European Pharmacopoeia,2005)

Από τον πίνακα 2.1 παρατηρούμε ότι για τα προϊόντα αυτά η τελική περιεχόμενη υγρασία θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 8 και 12% (υ.β.) για να διασφαλίσουμε την ασφαλή αποθήκευσή τους.

2.3.3 Ξήρανση σε μικρές και μεσαίες παραγωγικές μονάδες

2.3.3.1 Ηλιακή ξήρανση

Η ηλιακή ξήρανση επιτυγχάνεται συνήθως με άμεση έκθεση του προϊόντος στην ηλιακή ακτινοβολία. Χρησιμοποιείται συνήθως για μικρές και μεσαίες παρτίδες. Αυτή η απλή και παραδοσιακή μέθοδος έχει αρκετά μειονεκτήματα ιδιαίτερα όταν εφαρμόζεται για την ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών, καθώς τα πρότυπα ποιότητας είναι αρκετά υψηλά και η αδυναμία της να έχει ελεγχόμενες συνθήκες ξήρανσης καθιστούν την επίτευξή τους δύσκολη. Εκτεταμένη έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί απώλειες σε αιθέρια έλαια αλλά και αλλοίωση του χρώματος στα υπό ξήρανση προϊόντα (Rocha et al., 2011). Ως αποτέλεσμα, παρά του μηδενικού κόστους ενέργειας της διεργασίας και της απλότητας της η ηλιακή ξήρανση κρίνεται ακατάλληλη καθώς μπορεί να καταστρέψει τις χημικές ουσίες, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν ή στην χειρότερη περίπτωση να καταστήσει ολόκληρη την παρτίδα ακατάλληλη προς κατανάλωση. Για αυτό τον λόγο χρειαζόμαστε μια μέθοδο ξήρανσης με όσο δυνατόν καλύτερα ελεγχόμενες συνθήκες ξήρανσης.

2.3.3.2 Ξήρανση σε σκιερό μέρος

Είναι ιδιαίτερα δημοφιλής μέθοδος για παρτίδες μικρής κλίμακας αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών. Ενώ η σκίαση προστατεύει το προϊόν από τα αρνητικά αποτελέσματα της άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία έχει το μειονέκτημα ότι μπορούν να δημιουργηθούν ευνοϊκές συνθήκες για ανάπτυξη μούχλας και δραστηριότητα εντόμων λόγω της υψηλής υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα εάν ο χώρος ξήρανσης τροφοδοτείται επαρκώς με φρέσκο αέρα.



Εικόνα 2.4 : Ξήρανση αρωματικών φυτών υπό σκιά (herbsgreece)

2.3.3.3 Ξήρανση σε βιομηχανική κλίμακα

Για μεγάλες παραγωγές και την διασφάλιση των προτύπων ποιότητας οι μέθοδοι ξήρανσης που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως λυοφιλιωτές και ξηραντήρες μικροκυμάτων. Αυτές οι μέθοδοι έχουν μεγάλο κόστος και είναι σχετικά περίπλοκες, για αυτό τον λόγο εξετάζεται η εφαρμογή άλλων μεθόδων όπως παραλλαγές ξηραντηρίων συναγωγής, υβριδικά ξηραντήρια με μικροκύματα ή ηλιακά ξηραντήρια και περιστροφικά ξηραντήρια.

2.3.4 Βιβλιογραφική διερεύνηση στην ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών.

Η βιβλιογραφία αναφέρετε κυρίως σε πειραματικές διατάξεις πολύ μικρής δυναμικότητας που σκοπό έχουν την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών για την ξήρανση του κάθε προϊόντος και δεν βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στην βιομηχανία. Στόχος είναι η εύρεση διεργασιών και μεθόδων που οδηγούν σε όσο δυνατόν καλύτερη τελική ποιότητα προϊόντος σε συνδυασμό με υψηλή ενεργειακή απόδοση και απλότητα εφαρμογής. Αυτές οι απαιτήσεις είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν λόγω της μεγάλης ευαισθησίας των φαρμακευτικών και αρωματικών φυτών.

Οι Kaya et al., 2009 ερευνούν την κινητική της ξήρανσης για φύλλα μέντας και τσουκνίδας σε ξηραντήριο συναγωγής. Αύξηση της θερμοκρασίας η της ταχύτητας του αέρα ξήρανσης μειώνει τον χρόνο ξήρανσης, ενώ μείωση της υγρασίας του ρεύματος ξήρανσης επίσης μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της ξήρανσης. Στους 35 °C και για σχετική υγρασία ρεύματος 40% αύξηση της ταχύτητας του αέρα από 0.2 σε 0.6 m/s οδηγεί σε μείωση του χρόνου ξήρανσης κατά 6.9% για φύλλα τσουκνίδας και 6.67% για φύλλα μέντας. Για ταχύτητα αέρα 0.2 m/s και σχετική υγρασία 40% στο ρεύμα ξήρανσης αύξηση της θερμοκρασίας από τους 35 στους 55 °C μειώνει τον χρόνο ξήρανσης κατά 25% για φύλλα τσουκνίδας και 26.67% για φύλλα μέντας. Η μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα ξήρανσης είχε ακόμα πιο δραστικά αποτελέσματα καθώς στους 35 °C και για ταχύτητα αέρα 0.2 m/s η μείωση της σχετικής υγρασίας από το 70 στο 40% είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου ξήρανσης κατά 41.6% για τα φύλλα τσουκνίδας και 37.5% για τα φύλλα μέντας.

Οι Qu et al., 2019 μελετούν την ξήρανση μαύρου τσαγιού σε διάφορες διατάξεις και την τελική περιεκτικότητά του σε πτητικές ουσίες. Συγκρίνουν τα αποτελέσματα με την ξήρανση σε συμβατικό ξηραντήριο θερμού αέρα. Οι διατάξεις που μελετήθηκαν ήταν ξήρανση με υπέρυθη ακτινοβολία, λάμπα αλογόνου, μικροκύματα και συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων. Τα καλύτερα αποτελέσματα έδωσε η ξήρανση με μικροκύματα και η ξήρανση με μικροκύματα σε συνδυασμό με λάμπα αλογόνου. Καταλήγουν ότι χρήση μοντέρνων μεθόδων μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική στην

αύξηση της ποιότητας και στην απόδοση της διεργασίας του μαύρου τσαγιού αλλά με σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος της παραγωγής.

Το 2014 οι Argyropoulos et al., μελετούν την απώλεια αιθέριων ελαίων κατά την ξήρανση μελισσόχορτου (*Melissa officinalis* L.) σε συμβατικό ξηραντήριο συναγωγής για διάφορες θερμοκρασίες ξήρανσης. Στους 30 °C παρατήρησαν μείωση στα αιθέρια έλαια κατά 16% η οποία αυξήθηκε στο 23% στους 45 °C και ακόμα περισσότερο στους 60 °C με μείωση της τάξεως του 65%. Για θερμοκρασίες πάνω από 75 °C η μείωση είναι πολύ μεγάλη καθώς χάνετε το 73% των αιθέριων ελαίων. Καταλήγουν ότι για την μείωση αυτή ευθύνεται η καταστροφή θερμοευαίσθητων πτητικών ουσιών που παράγουν το αιθέριο έλαιο αλλά και η συρρίκνωση και καταστροφή κυττάρων κατά την ξήρανση. Προτείνουν την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς των πτητικών ουσιών που παράγουν αιθέρια έλαια κατά την ξήρανση για την εύρεση της ιδανικής θερμοκρασίας ξήρανσης.

Οι Rao et al., 2021 μελετούν ένα μεγάλο εύρος φαρμακευτικών βοτάνων και την συμπεριφορά τους κατά την ξήρανση με την βοήθεια ηλιακής ενέργειας. Καθώς τα φαρμακευτικά βότανα είναι πολύ ευαίσθητα και ο έλεγχος των συνθηκών ξήρανσης είναι πολύ σημαντικός υπάρχει έλλειψη βιβλιογραφίας πάνω την ξήρανση βοτάνων με χρήση ηλιακής έρευνας. Καταλήγουν στα εξής αποτελέσματα:

α. Η καταστροφή φαρμακευτικών βοτάνων συμβαίνει λόγω επιλογής μεθόδου που δεν πληρεί τις προϋποθέσεις για την ασφαλή ξήρανση του προϊόντος. Η ηλιακή ξήρανση είναι ελκυστική καθώς έχει την δυνατότητα να παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας με πολύ χαμηλό κόστος αν η διεργασία πραγματοποιηθεί ορθά.

β. Ηλιακά ξηραντήρια μπορούν παράγουν προϊόντα υψηλότερης ποιότητας σε σχέση με την ξήρανση με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.

γ. Από όλα τα ηλιακά ξηραντήρια αυτά που δείχνουν την μεγαλύτερη ικανότητα για έλεγχο των συνθηκών ξήρανσης ήταν τα ξηραντήρια έμμεσης έκθεσης στον ήλιο και εξαναγκασμένης συναγωγής.

δ. Χρήση τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της διεργασίας και αλλαγή των παραμέτρων λειτουργίας για την ικανοποίηση των προϋποθέσεων ξήρανσης κάθε προϊόντος.

ε. Καινούργια μαθηματικά μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν για να λάβουμε προβλέψεις μεγαλύτερης ακριβείας και αξιοπιστίας.

στ. Λόγο του χαμηλού κόστους περαιτέρω έρευνα πρέπει να γίνει για την αύξηση της απόδοσης των ηλιακών ξηραντηρίων.

η. Υπολογιστικά προγράμματα μπορούν να προσομοιώσουν την λειτουργία του ηλιακού ξηραντηρίου και να μειώσουν το αρχικό κόστος επένδυσης και να αναλύσουν την απόδοση διαφόρων διατάξεων.

θ. Η ενσωμάτωση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, καλύτερων μονωτικών υλικών και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην λειτουργία των ηλιακών ξηραντηρίων κατά την διάρκεια όλης της περιόδου ηλιοφάνειας αλλά και σε μεγαλύτερο εύρος εποχών.

ι. Οικονομικοί παράγοντες όπως το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στον σχεδιασμό του ξηραντηρίου.

2.4 Σπόροι

2.4.1 Ξήρανση σπόρων

Οι σπόροι είναι μια άλλη κατηγορία προϊόντος που κατατάσσονται στα θερμοευαίσθητα. Οι σπόροι πρέπει να ξηραίνονται σχετικά γρήγορα μετά τον καθαρισμό τους. Αργός ρυθμός ξήρανσης οδηγεί σε κίνδυνο σχηματισμού μούχλας ή στην πρόωρη ανάπτυξη βλαστού. Η ξήρανση τους με άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία είναι επικίνδυνη καθώς η θερμοκρασία ξήρανσης δεν πρέπει να ξεπεράσει τους 35 °C. Σπόροι μαύρου χρώματος είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε αυτήν την μέθοδο ξήρανσης. Ένα ελεγχόμενο περιβάλλον συνιστάτε όπως και στην περίπτωση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών (McCormack,2004).

2.4.2 Συνθήκες ξήρανσης

Κάθε προϊόν παρουσιάζει και τις δικές του ιδιαιτερότητες ως προς τις συνθήκες που πρέπει να επικρατούν κατά την ξήρανση ώστε αυτή να είναι ασφαλής και να παράγει προϊόν υψηλής ποιότητας. Η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι. Αύξηση τις ταχύτητας του αέρα μειώνει δραστικά τον χρόνο ξήρανσης αλλά υπάρχει ένα ανώτατο όριο σε αυτήν καθώς από μια ταχύτητα και πάνω το προϊόν μπορεί να παρασυρθεί από τον αέρα να πέσει στο πάτωμα τού ξηραντηρίου και η ξήρανση να μην ολοκληρωθεί. Αντίστοιχα αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει και αυτή τον χρόνο ξήρανσης. Κάθε είδος σπόρου έχει διαφορετική αντοχή στην θερμοκρασία αλλά για τους περισσότερους η θερμοκρασία τους κατά την ξήρανση δεν πρέπει να ξεπεράσει τους 32.9 °C (Barrozo et al., 2014).

Οι Copeland et al., 2001 μελετούν την ξήρανση σπόρων για να αναπτύξουν μεθόδους για πιο αποδοτική και ασφαλή για το προϊόν ξήρανση. Σημειώνουν σαν ασφαλείς συνθήκες αποθήκευσης θερμοκρασίες ανάμεσα στους 10-13 °C και σχετική υγρασία 12-13 % για την αποφυγή ανάπτυξης μούχλας. Για τις συνθήκες ξήρανσης αναφέρουν ότι η ιδανική θερμοκρασία εξαρτάται από είδος του σπόρου και περιεχόμενη υγρασία του εκείνη την στιγμή. Για παράδειγμα οι σπόροι καλαμποκιού περιεχόμενης υγρασίας 24% έχουν μέγιστη ασφαλή θερμοκρασία 61 °C ενώ για υγρασία 18% η μέγιστη θερμοκρασία πέφτει στους 57 °C. Στην συνέχεια παρουσιάζουν διαφορετικούς τύπους ξηραντηρίων και της συνθήκες που θα πρέπει να επικρατούν σε καθένα από αυτά για την ασφαλή ξήρανση.

3 Τύποι ξηραντηρίων

3.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν πάρα πολλές μέθοδοι ξήρανσης η κάθε μία με ιδιαίτερο σκοπό και εξειδίκευση. Υπάρχουν πάνω από 200 είδη ξηραντηρίων (Mujumdar 1997). Για το καθένα οι συνθήκες όπως η ταχύτητα του αέρα, η θερμοκρασία, η πίεση, ο χρόνος ξήρανσης, η σχετική υγρασία αλλάζουν σε σχέση με την παροχή νωπού προϊόντος, υλικού, σκοπού και μεθόδου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις συνηθέστερες διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων.

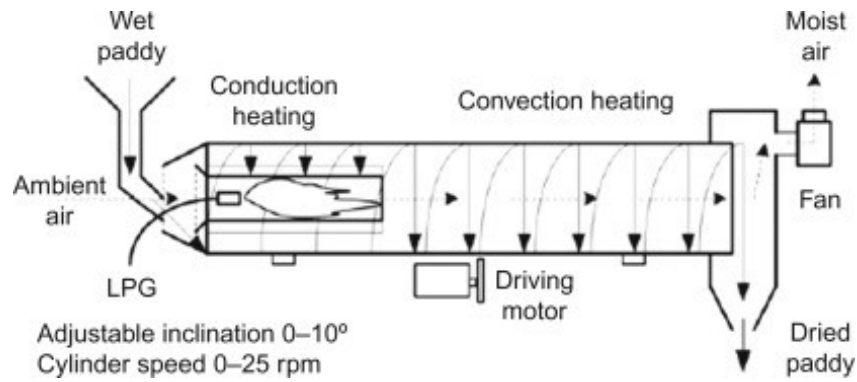
3.2 Ξηραντήρια συναγωγής

3.2.1 Εισαγωγή

Τα ξηραντήρια συναγωγής είναι η πιο δημοφιλής οικογένεια ξηραντηρίων που συναντάμε στην βιομηχανία. Η αισθητή θερμότητα ενός αερίου μεταφέρεται στην επιφάνεια του προϊόντος αφαιρεί υγρασία από αυτό και την μεταφέρει στην έξοδο του θαλάμου ξήρανσης. Τέσσερις κύριες μορφές ξηραντηρίων συναγωγής μπορούν να αναγνωριστούν, ξηραντήρια με δίσκους, περιστροφικά ξηραντήρια, ξηραντήρια τούνελ και ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης. Τα ξηραντήρια αυτά έχουν εφαρμογή σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας από την ξήρανση τροφίμων μέχρι την ξήρανση ανόργανων προϊόντων (Kiranoudis, 1996).

3.2.2 Περιστροφικά ξηραντήρια

Τα περιστροφικά ξηραντήρια συναντώνται κυρίως στην μεταλλουργία και την χημική βιομηχανία καθώς η συνεχής ανάμιξη μπορεί είναι πολύ βίαιη για τα περισσότερα γεωργικά προϊόντα αλλά βλέπουμε εφαρμογές τους σε ξήρανση γεωργικών προϊόντων όπου το προϊόν το επιτρέπει. Το ξηραντήριο αποτελείται από ένα τύμπανο έναν περιστρεφόμενο σωλήνα δηλαδή από το εσωτερικό του διέρχεται θερμός αέρας και τοποθετείται το νοπό προϊόν. Στην εσωτερική επιφάνεια υπάρχουν επίσης πτερύγια διαφόρων μεγεθών και γεωμετρίας με στόχο να μεγιστοποιήσουν την επιφάνεια επαφής του στερεού με τον αέρα καθώς και την ανάμιξη και κυκλοφορία του.



Εικόνα 3.1: Σχέδιο Περιστροφικού ξηραντηρίου Likitrattanaporn et al. (2003)



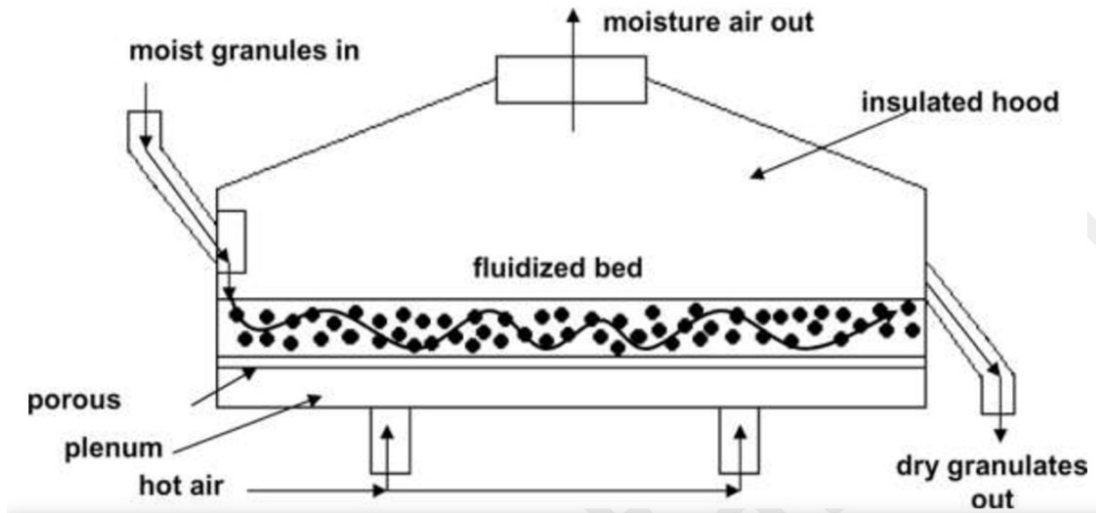
Εικόνα 3.2: Εσωτερική όψη τυμπάνου με μεταλλικά πτερύγια (cementplantsupplier)

3.2.3 Ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης

Είναι μέθοδος που συναντάται αρκετά συχνά στην βιομηχανία. Το προϊόν απλώνεται στο πάτωμα του θαλάμου ξήρανσης και ο θερμός αέρας εξέρχεται και αυτός από το πάτωμα διαμέσου του στερεού με αποτέλεσμα την αιώρησή του. Με την μέθοδο αυτή μπορούμε να μειώσουμε τους χρόνους ξήρανσης με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων. Χαρακτηρίζονται κατάλληλα για ξήρανση θερμοευαίσθητων προϊόντων καθώς εμποδίζει πιθανή υπερθέρμανσή τους (Giner et al., 1987). Το βασικό μειονέκτημα που εμποδίζει την ευρύτερη χρήση τους είναι ότι το προϊόν θα πρέπει να έχει σχήμα που επιτρέπει την αιώρησή του. Το προϊόν θα πρέπει να έχει ένα άνω όριο

στην κοκκομετρία του ώστε να επιτευχθεί η αιώρησή του. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται κυρίως σε φαρμακευτικά προϊόντα αλλά και σε γεωργικά προϊόντα όπως το σιτάρι, σόγια και άλλα με παρόμοια γεωμετρία και μέγεθος. Για γεωργικά προϊόντα με συμφέρουσα γεωμετρία αλλά μεγαλύτερο μέγεθος όπως αρακάς, ρεβίθια κτλ διαμορφώνονται ειδικά διαμορφωμένες κλίνες.

Συνήθως οι θερμοκρασίες ξήρανσης κυμαίνονται από 60 ως 90 °C με χρόνους ξήρανσης από 0.5 έως 100 λεπτά (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη,2009)



Εικόνα 3.3: Τυπική διάταξη ξηραντηρίου ρευστοποιημένης κλίνης

3.2.4 Ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους

Τα ξηραντήρια με δίσκους αποτελούνται από στοίβες δίσκων τοποθετημένες μέσα σε έναν καλά μονωμένο θάλαμο στον οποίο οδηγείτε θερμός αέρας για την ξήρανση με την βοήθεια ανεμιστήρων, φυσητήρων ή φυσικής ροής. Ο αέρας μπορεί να ανακυκλοφορεί και οι δίσκοι μπορεί να κινούνται ή όχι.

Επιλέγονται συχνά λόγω της απλής κατασκευής και του χαμηλού κόστους τους. Η μη ομοιόμορφη ξήρανση είναι συχνό πρόβλημα καθώς προϊόντα σε διαφορετικές θέσεις παρουσιάζουν διαφορά στην τελική υγρασία. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με καλή ροή του αέρα και επιλογή κατάλληλης γεωμετρίας του θαλάμου με εγκατάσταση πτερυγίων ή με την εναλλαγή της θέσης των δίσκων κάτι που όμως απαιτεί την διακοπή της διεργασίας. Μετρητές υγρασίας και θερμοκρασίας μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες θέσεις του θαλάμου για την εύρεση των ακριβών συνθηκών ξήρανσης σε κάθε σημείο του ξηραντηρίου.

Τα ξηραντήρια με κινούμενους δίσκους αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ανομοιόμορφης ξήρανσης με την διαρκή κίνηση των δίσκων μέσα στο ξηραντήριο. Δύο δημοφιλείς τύποι είναι τα ξηραντήρια με κάθετη κίνηση δίσκων και τα περιστροφικά ξηραντήρια με δίσκους. Η βελτίωση της ομοιομορφίας έρχεται με κόστος το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας καθώς το σύστημα κίνησης των δίσκων περιπλέκει την κατασκευή του και απαιτεί δαπάνη ενέργειας κατά την διεργασία για την κίνηση των δίσκων.

Μπορούν να σχεδιαστούν με πολλές διαφορετικές διαρρυθμίσεις ανάλογα με τις ανάγκες του προϊόντος. Για παράδειγμα μπορούν να έχουν πολλαπλές ζώνες θέρμανσης ή την δυνατότητα ρύθμισης της παροχής του αέρα για την διασφάλιση ομοιόμορφης ξήρανσης.

Συνολικά αποτελούν μία αξιόπιστη και αποδοτική μέθοδο ξήρανσης σε βιομηχανική κλίμακα. Η απλή κατασκευή και λειτουργία καθώς η δυνατότητα επιλογής ρυθμίσεων κατάλληλων για κάθε προϊόν είναι σημαντικά πλεονεκτήματα (Misha et al., 2013).

3.2.5 Ξηραντήρια τούνελ

Αυτός ο τύπος ξηραντηρίου χρησιμοποιείται στην ξήρανση τροφίμων όπως φρούτα, λαχανικά, κρέας και σπόροι αλλά και στην παραγωγή φαρμάκων, κεραμικών και υφασμάτων.

Τα ξηραντήρια τούνελ αποτελούνται από έναν θάλαμο , έναν ιμάντα κίνησης που διέρχεται κατά μήκος του και μία εισαγωγή θερμού αέρα με αναδευτήρα για την εξασφάλιση καλής και ομοιόμορφης ροής του αέρα. Τα προϊόντα τοποθετούνται είτε απευθείας πάνω στον ιμάντα κίνησης είτε μέσα σε τελάρα η δίσκους που τοποθετούνται πάνω στον ιμάντα. Ο ιμάντας κινεί τα προϊόντα από την μία άκρη του ξηραντηρίου στην άλλη ενώ θερμός αέρα ρέει συνήθως αντίθετα στην κατεύθυνση κίνησης του ιμάντα. Ο αέρας απάγει υγρασία από το προϊόν και αφού υγρανθεί οδηγείτε στην έξοδο του θαλάμου.

Τα ξηραντήρια μπορούν πάρουν πολλές μορφές όπως ξηραντήρια με πολλαπλούς ιμάντες η πολλαπλές εισόδους θερμού αέρα για την διασφάλιση ομοιόμορφης και ασφαλούς για το προϊόν ξήρανσης. Ταυτόχρονα μπορούμε να ρυθμίσουμε την θερμοκρασία και την παροχή του αέρα αλλά και την ταχύτητα του ιμάντα κίνησης για να ικανοποιηθούν οι ιδανικές συνθήκες ξήρανσης του κάθε προϊόντος.

Τα ξηραντήρια τούνελ είναι αξιόπιστα και αποτελεσματικά στην ξήρανση σε βιομηχανική κλίμακα.



Εικόνα 3.4 :φωτογραφία ξηραντηρίου τούνελ

3.3 Ηλιακά ξηραντήρια

Τα ηλιακά ξηραντήρια εμφανίζονται σε πολλές μορφές και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς στην Ελλάδα το ηλιακό δυναμικό είναι υψηλό. Για αυτόν τον λόγο θα παρουσιαστούν σε παρακάτω κεφάλαιο.

3.4 Λυοφιλίωση (Κρυοαφυδάτωση)

Η λυοφιλίωση είναι μέθοδος κατά την οποία το νερό αφαιρείται από το προϊόν μέσω της εξάχνωσής του. Για να δημιουργήσουμε συνθήκες εξάχνωσης θα πρέπει η τάση ατμών του νερού και η θερμοκρασία να διατηρούνται κάτω από το τριπλό σημείο, για αυτό και χρησιμοποιείται αντλία κενού.

Η διαδικασία γίνεται σε τρία στάδια: 1) κατάψυξη του προϊόντος που προορίζεται για ξήρανση, 2) πρωτογενής ξήρανση και 3) δευτερογενής ξήρανση. Στο πρώτο στάδιο της πρωτογενούς ξήρανσης μειώνεται η πίεση στον θάλαμο ξήρανσης και ο πάγος που έχει δημιουργηθεί κατά το στάδιο της κατάψυξης του εξαχνώνεται. Μέχρι το τέλος της πρωτογενούς ξήρανσης όλο το ελεύθερο νερό έχει απομακρυνθεί. Στο στάδιο

δευτερογενούς ξήρανσης ρυθμίζεται η αντλία κενού στο μέγιστο ώστε να απομακρυνθεί το δεσμευμένο νερό.

Μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ μεγάλο κόστος εξοπλισμού και ενέργειας κατά της διεργασία της ξήρανσης καθώς η χρήση αντλίας κενού και η ψύξη του φρέσκου προϊόντος αντιπροσωπεύουν ένα επιπλέον κόστος. Το μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι ότι η γεύση το άρωμα και οι πτητικές ουσίες του προϊόντος διατηρούνται σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με άλλες μεθόδους. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν σαν αποτέλεσμα η λυοφιλίωση να συναντάται κυρίως σε βιομηχανίες φαρμάκων και σε πολύ απαιτητικές βιομηχανίες τροφίμων (Γαρδέλη,2012).



Εικόνα 3.5 : Λυοφιλιωτές για ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών προϊόντων.

3.5 Ξηραντήρια μικροκυμάτων

Είναι ξηραντήρια που χρησιμοποιούν μικροκύματα για την ξήρανση του φρέσκου προϊόντος. Η ξήρανση με μικροκύματα μπορεί να προσφέρει πολύ μικρούς χρόνους ξήρανσης είναι αρκετά οικονομική καθώς θερμαίνει το προϊόν απευθείας και δεν σπαταλάει ενέργεια στην θέρμανση του θαλάμου. Επιτρέπει τον έλεγχο της ισχύς των μικροκυμάτων σε ζωντανό χρόνο. Αλλά παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα όπως ανομοιόμορφη ξήρανση. Μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση μερικών προϊόντων όπως σπόροι και φρούτα με αποτέλεσμα την πτώση τις ποιότητας του τελικού προϊόντος. Υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης η παραγωγή σπιθών κάτι που μπορεί να

προκαλέσει ζημιά στον εξοπλισμό. Αλλά το κυριότερο μειονέκτημα είναι το μεγάλο κόστος εγκατάστασης σε σχέση με άλλα ξηραντήρια και ανάγκη για εξειδικευμένης γνώσεις για την λειτουργία και την συντήρησή του. Σαν αποτέλεσμα δεν συνηθίζεται η χρήση της σαν μόνη μέθοδος ξήρανσης αλλά σε υβριδικές διατάξεις με άλλες μεθόδους (Zhang, 2003). Τυπικά συναντάμε υβριδικά συστήματα σε συνδυασμό με λυοφιλίωση ή θερμό αέρα και στόχο την μείωση του χρόνου ξήρανσης, την καλύτερη ενεργειακή κατανάλωση και την καλύτερη ποιότητα του τελικού αποξηραμένου προϊόντος.

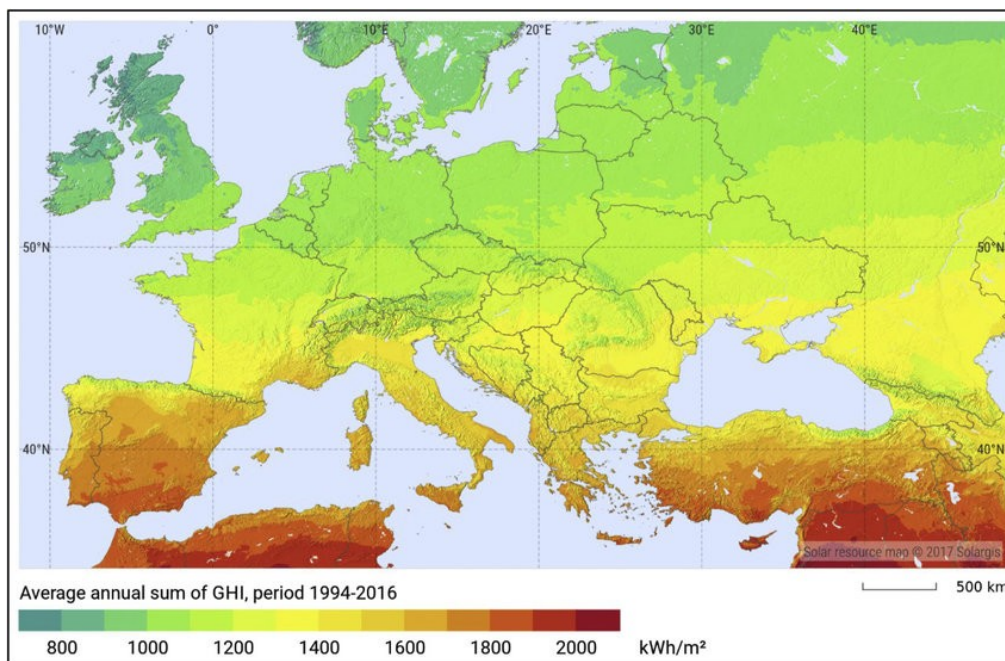
4 Ηλιακά ξηραντήρια

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε την λειτουργία, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης ηλιακών ξηραντηρίων για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων.

4.2 Ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα ,λόγω της γεωγραφικής της θέσης, διαθέτει μεγάλο δυναμικό ηλιακής ενέργειας. Σύμφωνα με τα δεδομένα της ευρωπαϊκής ένωσης φωτοβολταϊκής βιομηχανίας (European photovoltaic Industry Association) η Ελλάδα λαμβάνει κατά μέσο όρο 1800 με 2200 kWh ηλιακής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο τον χρόνο, μέγεθος που είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τις άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Ιδιαίτερα στα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αγγίζει τις 2400 kWh ανά τετραγωνικό μέτρο τον χρόνο. Αυτό καθιστά την Ελλάδα προνομιακό κράτος για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων αλλά και μικρότερων μονάδων ηλιακών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών (Φ/Β) μονάδων. Τα τελευταία χρόνια με την εφαρμογή πολιτικών όπως η δυνατότητα σε ιδιώτες και επιχειρήσεις να πουλάνε το παραπανίσιο ρεύμα που παράγουν πίσω στο δίκτυο και φορολογικά κίνητρα για την εγκατάσταση μονάδων εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας έχουν κάνει την αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας πιο οικονομικά ελκυστική.



Εικόνα 4.1 : Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη (Gholami et al., 2020)

4.3 Τύποι ηλιακών ξηραντηρίων

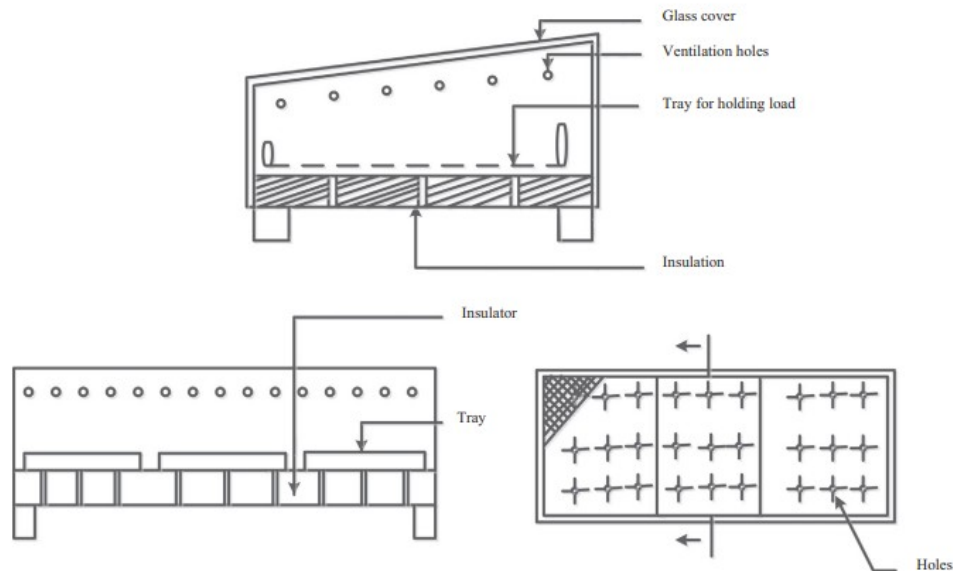
4.3.1 Ανοιχτή ηλιακή ξήρανση

Είναι η πιο διαδεδομένη διαδικασία ξήρανσης κυρίως σε χώρες του τροπικού κύκλου. Περιλαμβάνει το άπλωμα του προϊόντος σε δίσκους ή μουσαμάδες και έκθεσή του στον ήλιο και τον αέρα. Από αυτήν την μέθοδο προκύπτουν πολλά μειονεκτήματα όπως μεγάλο εργατικό κόστος, μεγάλος χρόνος ξήρανσης, οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα την διάρκεια και την ποιότητα της ξήρανσης, χρειάζεται το προϊόν να μαζεύεται την νύχτα και σε περίπτωση βροχής για την προστασία του και το προϊόν αφήνεται ευάλωτο σε έντομα. Αυτά τα μειονεκτήματα κάνουν την επιλογή άλλης μεθόδου επιθυμητή όπου είναι δυνατόν.

4.3.2 Άμεση ηλιακή ξήρανση

Το προϊόν μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο έδαφος μέσα σε δίσκους και να καλυφθεί από πλαστικά καλύμματα είτε να τοποθετηθεί σε κουτί με ράφια και γυάλινο κάλυμμα. Χρειάζεται αερισμός του προϊόντος για την αφαίρεση της υγρασίας που συγκεντρώνεται. Η μέθοδος αυτή προσφέρει έναν βαθμό προστασίας από τα καιρικά φαινόμενα και την σκόνη και μικρότερους χρόνους ξήρανσης σε σχέση με την ανοιχτή ηλιακή ξήρανση. Είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για μεγάλες σοδιές αλλά η απλότητά της και το

χαμηλό κόστος της την καθιστούν αρκετά δημοφιλή για ξήρανση μικρών ποσοτήτων προϊόντων (Mustajen et al., 2014).



Εικόνα 4.2 : Σχέδιο ξηραντηρίου άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία (Mustajen et al., 2014)

4.3.3 Έμμεση ηλιακή ξήρανση

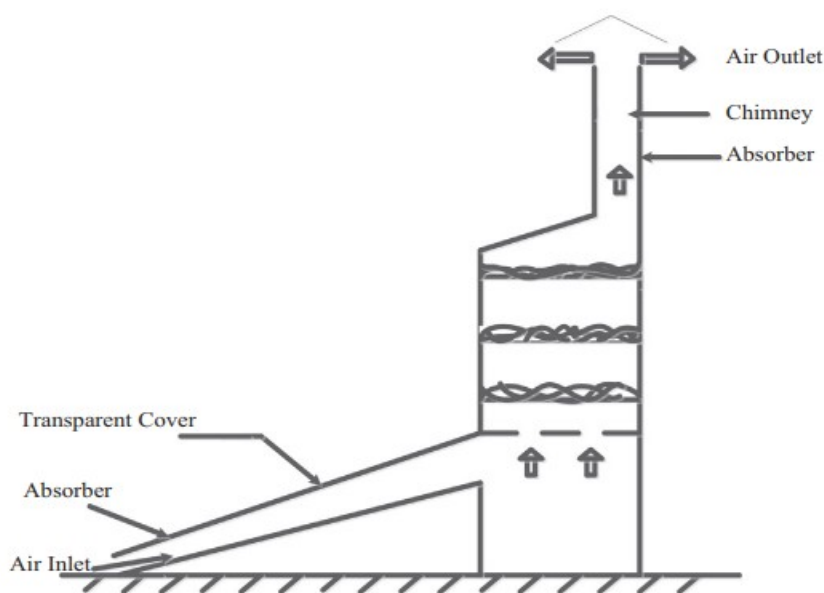
Στην ξήρανση με έμμεση ηλιακή ακτινοβολία η ενέργεια του ήλιου θερμαίνει αέρα σε ηλιακό συλλέκτη. Ο θερμός αέρας οδηγείται μετά στον θάλαμο ξήρανσης όπου περνάει ανάμεσα από το προϊόν το οποίο είναι τοποθετημένο σε ράφια με δίσκους και έπειτα ο υγρός αέρας αποβάλλεται από τον θάλαμο. Αυτή η μέθοδος μπορεί να παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος και μικρότερο χρόνο ξήρανσης σε σχέση με της προηγούμενες μεθόδους. Η εξάρτηση από της καιρικές συνθήκες και την γεωγραφική θέση καθώς και η περιορισμένη δυναμική παραμένουν σημαντικά μειονεκτήματα.

4.3.4 Ξηραντήρια ανάμικτης λειτουργίας

Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο ξηραντήριο από ένα γυάλινο κάλυμμα. Ο θάλαμος είναι βαμμένος μαύρος για με μεγιστοποιηθεί η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας. Τα ξηραντήρια ανάμικτης λειτουργίας χαρακτηρίζονται ως παθητικά γιατί δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη.

4.3.5 Ηλιακά ξηραντήρια φυσικής συναγωγής

Τα ηλιακά ξηραντήρια φυσικής συναγωγής ή παθητικά ξηραντήρια στηρίζονται στην φυσική ροή του αέρα για την κυκλοφορία του μέσα στο ξηραντήριο. Ο αέρας περιβάλλοντος εισέρχεται από το χαμηλότερο σημείο του ξηραντηρίου έπειτα θερμαίνεται από έναν ηλιακό συλλέκτη και λόγω διαφοράς πυκνότητας έχει την τάση να ανεβαίνει. Περνάει από τον θάλαμο ξήρανσης όπου απάγει υγρασία από το προϊόν και εξέρχεται από την κορυφή του ξηραντηρίου με την βοήθεια καμινάδας. Ο ρυθμός ξήρανσης είναι περιορισμένος σε σχέση με ξηραντήρια εξαναγκασμένης συναγωγής αλλά το κόστος αγοράς και συντήρησής τους είναι χαμηλότερο, η κατασκευή τους είναι ευκολότερη και για αυτόν τον λόγο είναι αρκετά δημοφιλή (Mustajen et al., 2014).

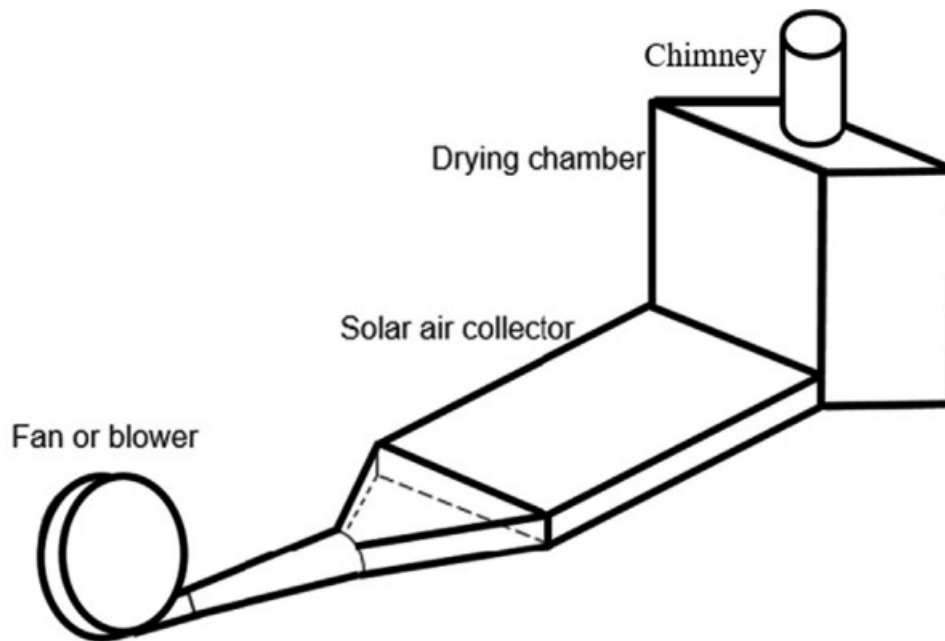


Εικόνα 4.3 : σχέδιο ηλιακού ξηραντηρίου φυσικής συναγωγής (Mustajen et al., 2014).

4.3.6 Ηλιακά ξηραντήρια εξαναγκασμένης συναγωγής

Τα ηλιακά ξηραντήρια εξαναγκασμένης συναγωγής ή ενεργητικά ξηραντήρια χρησιμοποιούν αναδευτήρες για να πετύχουν εξαναγκασμένη συναγωγή. Έτσι αυξάνεται ο ρυθμός ξήρανσης και η ποιότητα του προϊόντος. Η ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση των αναδευτήρων κάνει την χρήση τους πιο δύσκολη καθώς χρειάζεται σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας είναι μεγαλύτερο. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί παραχθεί από Φ/Β πάνελ καθιστώντας το ξηραντήριο ανεξάρτητο από το δίκτυο ενέργειας αλλά αυξάνοντας το αρχικό κόστος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα ή υβριδικά σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους όπως ξηραντήρια με θέρμανση αέρα μέσω συμβατικών

μεθόδων ή μικροκυμάτων με κύριο στόχο την μείωση κόστους κάτι που μπορεί να είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο κυρίως σε μέρη με ισχυρή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (Lingayat et al., 2019).



Εικόνα 4.4 : Σχέδιο ηλιακού ξηραντηρίου εξαναγκασμένης συναγωγής (Lingayat et al., 2019)

4.4 Ηλιακά ξηραντήρια στην βιβλιογραφία

Οι Chemkhi et al., 2004 μελετούν την θερμοκρασία εξόδου από έναν ηλιακό συλλέκτη αέρα με φυσική και εξαναγκασμένη ροή. Ο συλλέκτης έχει εμβαδό παραθύρου 8.6 τετραγωνικά μέτρα και δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας του από 20 μέχρι 70 °C. Οι θερμοκρασίες στην έξοδο του συλλέκτη ήταν αρκετά ικανοποιητικές με την θερμοκρασία φυσικής ροής να πλησιάζει τους 80 °C ενώ με εξαναγκασμένη τους 60 °C. Παρατηρούν ότι η απόδοση του συλλέκτη είναι χαμηλή για την περίπτωση φυσικής συναγωγής με τιμές ανάμεσα στο 10 και 15% της εισερχόμενης ενέργειας ενώ αυξάνοντας την παροχή η απόδοση μπορεί να φτάσει το 50 με 60%. Καταλήγουν ότι αυτή η έρευνα είναι χρήσιμη για επόμενες έρευνες που θα μελετήσουν ολόκληρη διάταξη ξηραντηρίου.

Το 2003 οι Bala et al., κατασκευάζουν ένα πειραματικό ηλιακό ξηραντήριο τυπου τούνελ. Το οποίο χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες αέρα και Φ/Β για την παροχή ρεύματος σε αναδευτήρες για την ξήρανση ανανά. Εκτελούν τρία πειράματα στα οποία η θερμοκρασία ξήρανσης κυμαινόταν από 34 μέχρι 64 °C. Η ελεγχόμενη παροχή ενέργειας στους αναδευτήρες επιτρέπει τον έλεγχο της παροχής αέρα στον ηλιακό

συλλέκτη και έτσι την ρύθμιση θερμοκρασίας στο τούνελ. Η δυναμικότητα του ξηραντηρίου είναι 150 κιλά φρέσκου ανανά και μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα από το ηλεκτρικό δίκτυο. Είναι απλό στην κατασκευή και μπορεί να κατασκευαστεί από τοπικά υλικά και τεχνίτες. Το προϊόν παραμένει προστατευμένο από έντομα και βροχή κατά την διάρκεια της ξήρανσης.

Καταλήγουν ότι περισσότερη έρευνα πρέπει να γίνει για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του ξηραντηρίου.

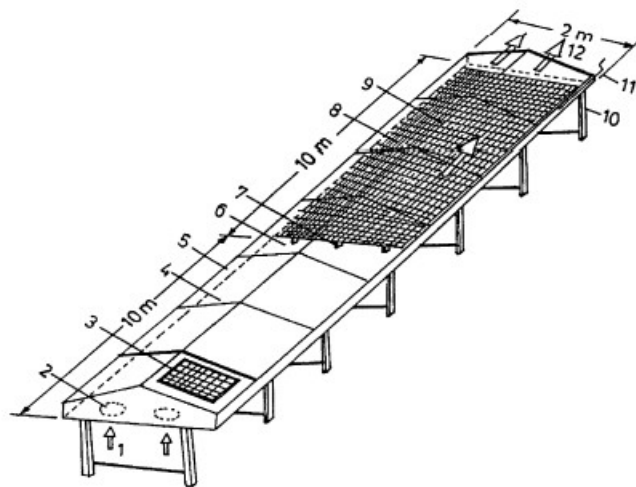


Fig. 1. Solar tunnel drier: (1) air inlet; (2) fan; (3) solar module; (4) solar collector; (5) side metal frame; (6) outlet of the collector; (7) wooden support; (8) plastic net; (9) roof structure for supporting the plastic cover; (10) base structure for supporting the tunnel drier; (11) rolling bar; (12) outlet of the drying tunnel.

Εικόνα 4.5 : Σχέδιο ξηραντηρίου που σχεδίασαν οι Bala et al.,

Οι Lingayat et al., 2019 μελετούν διάφορες διατάξεις ηλιακών ξηραντηρίων έμμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία και την ξήρανση διαφόρων προϊόντων σε αυτά. Ο χρόνος ξήρανσης διαφέρει τόσο από προϊόν σε προϊόν αλλά από διάταξη σε διάταξη. Η θερμοκρασία και η ταχύτητα αέρα επηρεάζουν την ποιότητα του προϊόντος. Διακρίνουν τις δύο κύριες κατηγορίες ηλιακών ξηραντηρίων τα παθητικά και τα ενεργητικά. Τα παθητικά ξηραντήρια έχουν το πλεονέκτημα να λειτουργούν ανεξάρτητα από το δίκτυο ενώ προσφέρουν περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας. Τα ενεργητικά ξηραντήρια προσφέρουν γρηγορότερο χρόνο ξήρανσης μεγαλύτερη ικανότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας την ικανότητα ανακυκλωφόριας του αέρα κάτι που αυξάνει την απόδοση του ξηραντηρίου. Η χρήση μονάδων αποθήκευσης θερμότητας ή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας όπως τα αφυγραντικά υλικά μπορούν να εξασφαλίσουν την λειτουργία του ξηραντηρίου κατά την διάρκεια της νύχτας και την μείωση του χρόνου ξήρανσης. Φ/Β πάνελ μπορούν να τροφοδοτήσουν τους αναδευτήρες μειώνοντας την

κατανάλωση ρεύματος από το δίκτυο. Καταλήγουν ότι ο πράσινος και ελεύθερος χαρακτήρας της ηλιακής ενέργειας συμβάλουν τόσο στην γρήγορη απόσβεση της αρχικής επένδυσης όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος.

Οι Djebli et al., 2020 μελετούν την ξήρανση πατάτας σε δύο διαφορετικά ηλιακά ξηραντήρια ένα έμμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία και ένα ανάμεικτου τύπου. Ο ρυθμός ξήρανσης στο ξηραντήριο έμμεσου τύπου ήταν γρηγορότερος καθώς μπορούν να αναπτυχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα. Η ξήρανση κράτησε τρεις ώρες και σαράντα λεπτά στο ξηραντήριο έμμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία με θερμοκρασίες ανάμεσα στους 45 με 55 °C. Στο ξηραντήριο ανάμεικτης λειτουργίας η ξήρανση κράτησε τέσσερις ώρες και σαράντα λεπτά με θερμοκρασίες ανάμεσα στους 45 με 57 °C. Το χρώμα του προϊόντος διατηρήθηκε σε μεγάλο βαθμό στο ξηραντήριο έμμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία ενώ στο ξηραντήριο ανάμεικτης λειτουργίας το 35 % από της ροδέλες πήραν γκρι χρώμα. Έπειτα ανέπτυξαν ένα καινούργιο μοντέλο για την πρόβλεψη της πορείας τις διεργασίας το οποίο επιβεβαιώθηκε από τα πειράματα. Σημειώνουν ότι καθώς τα πειράματα έλαβαν χώρα σε περιοχή με υψηλά ποσοστά υγρασίας στον αέρα και αναμένεται τα ξηραντήρια να έχουν καλύτερη απόδοση σε ξηρότερες περιοχές.

5 Σχεδιασμός και μοντελοποίηση ξηραντηρίου μήλων

5.1 Σχεδιασμός του θαλάμου ξήρανσης

5.1.1 Εισαγωγή

Ένα βασικό χαρακτηριστικό ενός θαλάμου ξήρανσης είναι η δυναμική του δηλαδή η χωρητικότητα του σε φρέσκο προϊόν. Είναι επόμενο ότι η τελική ποσότητα του προϊόντος από έναν κύκλο εξαρτάται από το μέγεθος του θαλάμου. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του προϊόντος καθορίζουν τις συνθήκες του αέρα ξήρανσης όπως η ταχύτητα του ρεύματος αέρα και η θερμοκρασία του και συνεπώς καθορίζουν και τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης.

Η βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό βιομηχανικών ξηραντηρίων είναι αρκετά φτωχή καθώς επικεντρώνεται στην μελέτη πειραματικών διατάξεων για την εύρεση των ιδιοτήτων διαφόρων προϊόντων και των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης. Ο σχεδιασμός ενός ξηραντηρίου δεν ακολουθεί γενικούς κανόνες, έχει όμως ως κύριες παραμέτρους την δυναμικότητα την ισχύ των ανεμιστήρων και τον επιθυμητό χρόνο ξήρανσης.

Είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίσουμε ομοιόμορφη ροή του αέρα στον θάλαμο καθώς και καλό εξαερισμό ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί ο αέρας που έχει απάγει υγρασία από το προϊόν και είναι πλέον πολύ υγρός για να το ξηράνει. Με αυτόν τον σκοπό στον θάλαμο μπορεί να εγκατασταθούν πτερύγια για την καθοδήγηση του αέρα.

5.1.2 Σχεδιασμός θαλάμου ξήρανσης

Οι θάλαμοι ξήρανσης συναγωγής διακρίνονται σε ξηραντήρια παράλληλης και εγκάρσιας ροής ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής του αέρα σε σχέση με τα τελάρα που περιέχουν το προϊόν.

Τα περισσότερα ξηραντήρια που βλέπουν χρήση στην βιομηχανία είναι ξηραντήρια παράλληλης ροής καθώς τα ξηραντήρια κάθετης ροής παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες στην σχεδίαση και την λειτουργία τους όπως:

- Η μεγάλη πτώση πίεσης.
- Προβλήματα με διασκορπισμό του προϊόντος κατά την λειτουργία του ξηραντηρίου λόγω της ταχύτητας του αέρα
- Τραυματισμό των ευαίσθητων προϊόντων
- Μείωση της δυναμικότητας λόγω κορεσμού του αέρα όσο μεγαλώνει το ύψος

Όσο αφορά τα ξηραντήρια παράλληλης ροής εμφανίζονται προβλήματα ανομοιόμορφης ροής αλλά αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν σχετικά εύκολα με την χρήση διάτρητων τελάρων και υψηλές ταχύτητες ροής. Ο θάλαμος που μας αφορά είναι παράλληλης ροής και καθώς αυτός ο τύπος κρίνεται προτιμότερος όλοι οι υπολογισμοί θα αφορούν στον θάλαμο παράλληλης ροής.

5.2 Επιλογή μοντέλου

Από το μοντέλο που θα επιλέξουμε θέλουμε να έχουμε αποτέλεσμα τον χρόνο ξήρανσης που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής τελικής υγρασίας (X) για διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες ροής αέρα.

Για να υπολογίσουμε την τελική υγρασία χρειαζόμαστε ως δεδομένα τον λόγο υγρασίας (MR) αλλά και την υγρασία ισορροπίας (X_e) για της διάφορες τιμές της υγρασίας και θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσης.

Στην βιβλιογραφία δεν συναντάμε μελέτη στην επίδραση της κατεύθυνσης της ροής του αέρα στην ξήρανση. Η ξήρανση με ροή κάθετη στην επιφάνεια του προϊόντος έχει αποτέλεσμα διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με την ξήρανση σε ξηραντήριο παράλληλης ροής. Η εγκάρσια ροή παρουσιάζει μικρότερο χρόνο ξήρανσης σε σχέση με την οριζόντια ροή για την ίδια θερμοκρασία ξήρανσης λόγω την μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής. Στην οριζόντια ροή η ξήρανση δεν είναι ομοιόμορφη καθώς η πλευρά που βρίσκεται σε επαφή με το τελάρο δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Η χρήση διάτρητων τελάρων συνιστάται καθώς οδηγεί σε αύξηση την επιφάνειας επαφής και αντιμετωπίζει τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην περίπτωση εγκάρσιας ξήρανσης είναι απαραίτητο να μειώσουμε την ταχύτητα του ρεύματος αέρα ώστε να εξασφαλίσουμε ότι το προϊόν δεν θα αρχίσει να αιωρείται κάτι που μπορεί να πληγώσει το προϊόν ή να οδηγήσει ακόμα και στην πτώση του από από τα τελάρια.

Ο Ankarar το 2006 έκανε μια σειρά πειραμάτων όπου έγινε σύγκριση ανάμεσα σε 13 διαφορετικά δημοφιλή μοντέλα με σκοπό να βρει ποιο μοντέλο περιγράφει καλύτερα την ξήρανση διαφόρων λαχανικών (πατάτες, μήλα, κολοκύθες). Εκτέλεσε πειράματα σε διαφορετικές θερμοκρασίες και ταχύτητες αέρα και σύγκρινε τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που προέβλεπε η κάθε μέθοδος. Επανέλαβε την διαδικασία για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Χρησιμοποίησε το πρόγραμμα statistica για να υπολογίσει την μεταβλητή σχετικότητας R αλλά υπολόγισε και την μεταβλητή χ^2 ορισμένη ως.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},1} - MR_{\text{pre},i})^2}{N-n}$$

(1)

Όπου:

$MR_{\text{exp},i}$: η πειραματικά παρατηρηθείσα τιμή της υγρασίας

$MR_{\text{pre},i}$: η προβλεπόμενη από το μοντέλο υγρασία

N : ο αριθμός παρατηρήσεων n = ο αριθμός σταθερών

Η αρχική υγρασία των λαχανικών ήταν για πατάτες 83%(wb), μήλα 87%(wb), κολοκύθες 93% (wb) έγινε ξήρανση μέχρι την υγρασία 10%(wb), 13%(wb), 6(wb) αντίστοιχα σε θερμοκρασίες 60,70,80 οC με ταχύτητες αέρα 1 και 1,5 (m/s) σε ξηραντήριο συναγωγής με παράλληλη ροή και τα αποτελέσματα ήταν:

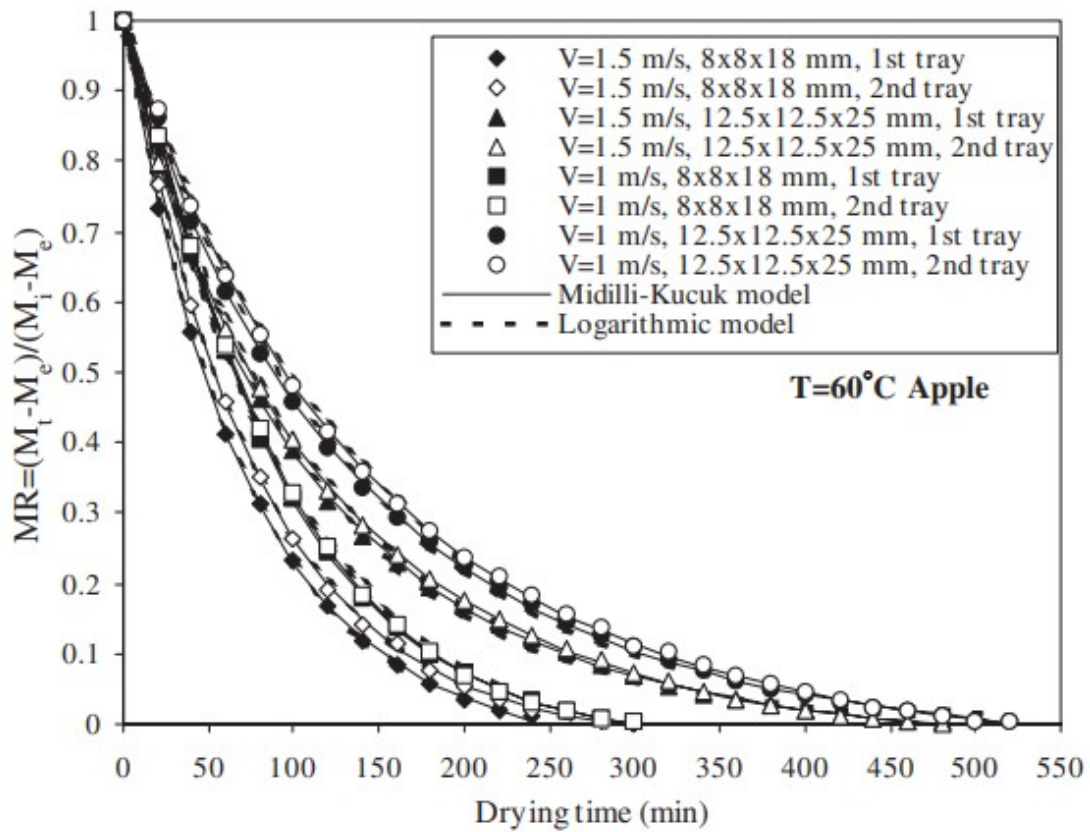
Values of the drying constants and coefficients of different models determined through regression method for potato, apple and pumpkin slices

Model name	Potato (12.5 × 12.5 × 25)		Apple (12.5 × 12.5 × 25)		Pumpkin	
	R	χ^2	R	χ^2	R	χ^2
Newton	0.99871	1.88×10^{-4}	0.99875	2.35×10^{-4}	0.98973	2.14×10^{-3}
Page	0.99942	8.92×10^{-5}	0.99930	1.43×10^{-4}	0.99930	1.55×10^{-4}
Modified Page	0.99942	8.92×10^{-5}	0.99930	1.43×10^{-4}	0.99930	1.55×10^{-4}
Modified Page	0.99871	1.97×10^{-4}	0.99876	2.53×10^{-4}	0.98973	2.26×10^{-3}
Henderson and Pabis	0.99915	1.30×10^{-4}	0.99885	2.34×10^{-4}	0.99235	1.69×10^{-3}
Logarithmic	0.99917	1.34×10^{-4}	0.99993	1.6×10^{-5}	0.99757	5.72×10^{-4}
Two term	0.99970	5×10^{-5}	0.99885	2.76×10^{-4}	0.99235	1.91×10^{-3}
Two-term exponential	0.99970	5.56×10^{-5}	0.99869	2.68×10^{-4}	0.98952	2.31×10^{-3}
Wang and Singh	0.95661	6.63×10^{-3}	0.98977	2.07×10^{-3}	0.99902	2.17×10^{-4}
Diffusion approach	0.99970	4.77×10^{-5}	0.99941	1.31×10^{-4}	0.99912	2.08×10^{-4}
Modified Henderson and Pabis	0.99970	5.56×10^{-5}	0.99885	3.38×10^{-4}	0.99234	2.21×10^{-3}
Verma et al.	0.99969	4.78×10^{-5}	0.99940	1.31×10^{-4}	0.99911	2.09×10^{-4}
Midilli and Kucuk	0.99989	1.79×10^{-5}	0.99996	1.00×10^{-5}	0.99967	8.38×10^{-5}

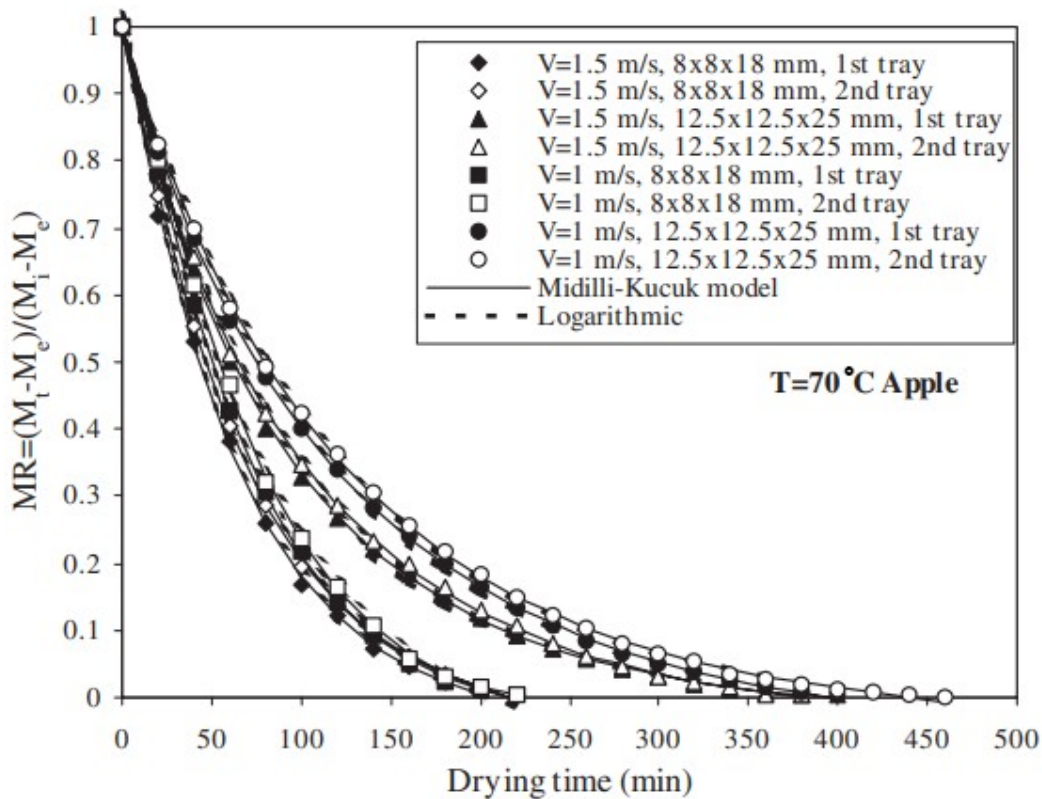
Πίνακας 5.1: Τιμές R και χ^2 για την πρόβλεψη της διαδικασίας ξήρανσης πατάτας, μήλων και κολοκύθας (Akrinar et al., 2006)

Το μοντέλο Midilli-Kucuk έδωσε την μεγαλύτερη τιμή r και την χαμηλότερη τιμή χ^2 με δεύτερο καλύτερο μοντέλο το λογαριθμικό αλλά όλα τα μοντέλα κρίνονται σχετικά ικανοποιητικά καθώς οι τιμές του R είναι πάνω από 0,99 και το χ^2 είναι αρκετά χαμηλό.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται διαγράμματα που σχετίζουν το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας με τον χρόνο για τις θερμοκρασίες 60, 70, 80 °C για ταχύτητες αέρα 1, 1.5 m/s , και διάφορα μεγέθη δείγματος καθώς και την 2η επανάληψη του κάθε πειράματος



Σχήμα 5.1: Καμπύλες ξήρανσης μήλων για θερμοκρασία 60 °C ταχύτητα ρεύματος αέρα 1 και 1.5 m/s με το μοντέλο Midilli-Kucuk και το λογαριθμικό μοντέλο (Akpinar et al., 2006)



Σχήμα 5.2: Καμπύλες ξήρανσης μήλων για θερμοκρασία 70 °C ταχύτητα ρεύματος αέρα 1 και 1.5 m/s με το μοντέλο Midilli-Kucuk και το λογαριθμικό μοντέλο (Akrcinar et al., 2006)

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων ο Akrcinar υπολόγισε τον τρόπο με τον οποίο η θερμοκρασία η ταχύτητα του αέρα και το εμβαδό επηρεάζουν τις τιμές των σταθερών που απαιτούνται για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Και κατέληξε σε εξισώσεις που μας δίνουν την τιμή τους και μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε την περιεχόμενη υγρασία με χρήση του μοντέλου Midilli-Kucuk.

$$MR(a, b, k, b, t) = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = a * \exp(-kt^n) + bt$$

(2)

Όπου οι παράμετροι **a,k,n,b** δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$a=1.004084-0.000073*T-0.001960*V+3.944759*A$$

$$k=-0.006391+0.000065*T+0.009775*V+1.576723*A$$

$$n=1.187734+0.002467*T-0.128878*V-202.536*A$$

$$b=0.000082-0.00002*T-0.000041*V+0.041667*A$$

(3) (4) (5) (6)

Values of the drying constant and coefficients of the Midilli-Kucuk model determined through regression method for apple slices at all drying conditions

Drying air temperature T , °C	Air flow rate V , m/s	Sample area A , m ²	Tray no.	a	k	n	b	r	χ^2
80	1.5	0.000544	1	0.9987	0.0167	1.0520	-0.000185	0.99990	3.50×10^{-5}
70	1.5	0.000544	1	0.9970	0.0140	1.0325	-0.000156	0.99974	7.63×10^{-5}
60	1.5	0.000544	1	0.9988	0.0164	0.9681	-0.000130	0.99995	1.11×10^{-5}
80	1.5	0.001250	1	1.0014	0.0126	0.9893	-0.000137	0.99996	1.00×10^{-5}
70	1.5	0.001250	1	1.0028	0.0147	0.9348	-0.000051	0.99987	2.42×10^{-5}
60	1.5	0.001250	1	1.0003	0.0157	0.8898	-0.000046	0.99990	1.67×10^{-5}
80	1	0.000544	1	0.9991	0.0112	1.1375	-0.000078	0.99997	9.35×10^{-5}
70	1	0.000544	1	0.9990	0.0076	1.1481	-0.000119	0.99991	2.63×10^{-5}
60	1	0.000544	1	0.9996	0.0058	1.1445	-0.000057	0.99997	7.29×10^{-6}
80	1	0.001250	1	1.0011	0.0108	0.9859	-0.000098	0.99994	1.20×10^{-5}
70	1	0.001250	1	0.9988	0.0125	0.9261	-0.000108	0.99993	1.30×10^{-5}
60	1	0.001250	1	1.0076	0.0115	0.9145	-0.000056	0.99982	3.00×10^{-5}
80	1.5	0.000544	2	0.9971	0.0164	1.0546	-0.000130	0.99965	1.16×10^{-4}
70	1.5	0.000544	2	0.9993	0.0121	1.0514	-0.000123	0.99994	1.71×10^{-5}
60	1.5	0.000544	2	0.9982	0.0118	1.0220	-0.000072	0.99991	2.14×10^{-5}
80	1.5	0.001250	2	0.9998	0.0116	1.0021	-0.000110	0.99992	1.86×10^{-5}
70	1.5	0.001250	2	1.0018	0.0144	0.9277	-0.000076	0.99982	3.40×10^{-5}
60	1.5	0.001250	2	0.9990	0.0140	0.9040	-0.000055	0.99983	2.80×10^{-5}
80	1	0.000544	2	0.9999	0.0108	1.1289	-0.000071	0.99998	4.30×10^{-6}
70	1	0.000544	2	0.9983	0.0062	1.1746	-0.000143	0.99984	4.68×10^{-5}
60	1	0.000544	2	0.9984	0.0054	1.1558	-0.000068	0.99997	8.18×10^{-6}
80	1	0.001250	2	0.9998	0.0100	0.9896	-0.000103	0.99994	1.24×10^{-5}
70	1	0.001250	2	0.9973	0.0107	0.9496	-0.000073	0.99989	1.99×10^{-5}
60	1	0.001250	2	1.0071	0.0094	0.9435	-0.000059	0.99987	2.33×10^{-5}

Πίνακας 5.2: τιμές παραμέτρων **a,k,n,b** καθώς και το **r,χ²** με την μέθοδο Midilli-Kucuk για διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες αέρα στην ξήρανση μήλων (Akpinar et al., 2006)

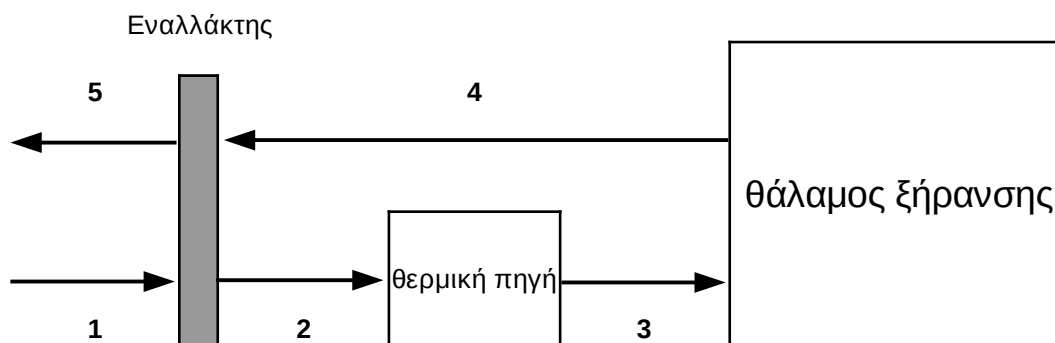
οπότε αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε αυτό το εύρος συνθηκών για να δώσουν ακριβή αποτελέσματα για την υγρασία αυτών των υλικών σε όλες τις στιγμές της διαδικασίας ξήρανσης αυτών των τροφίμων.

6 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντηρίου

6.1 Υποσυστήματα ξηραντηρίου

Σε ένα συμβατικό ξηραντήριο έχουμε 3 κύρια μέρη:

1. Τον θάλαμο ξήρανσης στην περίπτωση που θα μελετηθεί παράλληλης ροής
2. Την θερμική πηγή που αυξάνει την θερμοκρασία του αέρα που προορίζεται για ξήρανση με καύση υδρογονανθράκων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο) ή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.
3. Έναν εναλλάκτη αέρα-αέρα μεταξύ των ροών προσαγωγής-εκροής με στόχο την αξιοποίηση την ενέργειας του ρεύματος που εξέρχεται του θαλάμου ξήρανσης για την θέρμανση του ρεύματος εισροής πριν την είσοδό του στην θερμική πηγή.



Εικόνα 6.1: Γραφική απεικόνιση ενός συμβατικού ξηραντηρίου συναγωγής με χρήση εναλλάκτη θερμότητας

6.1.1 Εναλλάκτης

Για τον εναλλάκτη έγινε η υπόθεση ότι η θερμοχωρητικότητα του αέρα απαγωγής και προσαγωγής παραμένει ίδια καθώς η διαφορά για το εύρος θερμοκρασίας των ρευμάτων είναι αμελητέα και ο βαθμός απόδοσής του σταθερός και ίσος με 0.85 που αντιστοιχεί σε υπαρκτό προϊόν που έχει μελετηθεί και επιβεβαιωθεί πειραματικά (Panaras et al.,2010). Χρησιμοποιώντας την σχέση (Kays et al.,1984) μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία του αέρα πριν την είσοδο στην θερμική πηγή.

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

(1)

και η θερμοκρασία του απορριπτόμενου στο περιβάλλον αέρα από την σχέση

$$T_4 - T_5 = T_2 - T_1$$

(2)

6.1.2 Θερμική πηγή

Θεωρούμε ότι μπορούμε να εγγυηθούμε την σταθερή θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο της θερμικής πηγής καθώς και ότι οι απώλειες κατά την μεταφορά του αέρα στον θάλαμο ξήρανσης είναι μηδενικές κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με καλή μόνωση των σωλήνων που οδηγούν τον αέρα στον θάλαμο ξήρανσης.

6.1.3 Θάλαμος ξήρανσης

Θεωρώντας αδιαβατικό το σύστημα του θαλάμου ξήρανσης μπορούμε να υπολογίσουμε την πτώση θερμοκρασίας του του αέρα ανά χρονικό βήμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της δαπάνης ενέργειας (ενθαλπία εξατμίσεως) για την αφαίρεση υγρασίας από το προϊόν.

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

(3)

όπου:

- \dot{m}_{air} : παροχή μάζας αέρα στο χρονικό βήμα
- \dot{m}_w : παροχή μάζας νερού που έχει εξατμιστεί στο χρονικό βήμα
- c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα
- h_g : η ενθαλπία εξατμίσεως του νερού
- ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισαγωγής και εξαγωγής στον θάλαμο ξήρανσης

Έτσι υπολογίζεται και η θερμοκρασία εξόδου :

$$T_4 = T_3 - \Delta T$$

(4)

όπου:

- T_3 : η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο ξηραντήριο
- T_4 : η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το ξηραντήριο

Η κατανάλωση ενέργειας είναι μία από τις παραμέτρους που είναι εξαιρετικά σημαντική στην μελέτη και αξιολόγηση ενός συστήματος ξήρανσης. Έτσι ένα μέγεθος

ενδιαφέροντος είναι η θερμική ισχύς που απαιτείται για την διασφάλιση της θερμοκρασίας ξήρανσης P_h . Η ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$P_h = \dot{m}_{air} c_p (T_3 - T_2) \quad (5)$$

όπου:

- \dot{m}_{air} : η παροχή μάζας

- C_p : η θερμοχωρητικότητα του αέρα

- T_3 : η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του ξηραντηρίου

- T_2 : η θερμοκρασία του αέρα πριν την θερμική πηγή

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του βαθμού απόδοσης για την ενεργειακή αξιολόγηση της διεργασίας. Και ορίζεται ως ο λόγος του συνόλου της ενέργειας που καταναλώθηκε προς την μάζα του νερού που αφαιρέθηκε κατά την διεργασία. Και υπολογίζεται από την σχέση (Aghbashlo et al.,2008), (Sherma et al.,2006):

$$SEC = \frac{Q_{h,tot}}{m_{w,tot}} \quad (6)$$

όπου:

- $m_{w,tot}$: η συνολική μάζα νερού που αφαιρέθηκε από τον προϊόν κατά την διεργασία

- $Q_{h,tot}$: η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε στον θερμαντήρα κατά την διάρκεια της διεργασίας

Η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της καταναλισκόμενης ενέργειας στον θερμαντήρα σε κάθε χρονικό βήμα συμβολίζεται ως Q_h και είναι το ολοκλήρωμα της ισχύος στο διάστημα ΔT .

$$Q_h = \dot{m}_{air} c_p (T_3 - T_2) \Delta t \quad (7)$$

ή

$$Q_h = P_h \Delta t \quad (8)$$

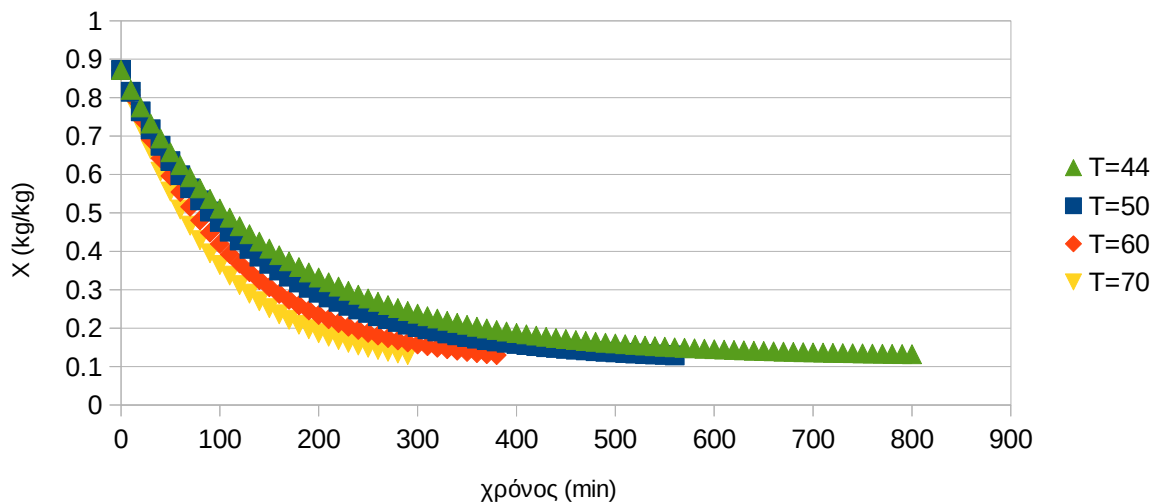
όπου: Δt : το χρονικό βήμα

Αν θεωρήσουμε γνωστή την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_1 και T_3 , την επιθυμητή θερμοκρασία ξήρανσης, μπορούμε να λύσουμε το σύστημα εξισώσεων 1-7 και να υπολογίσουμε όλα τα ενεργειακά μεγέθη. Στην περίπτωση μας έγινε επιλογή χρονικού βήματος $\Delta t=600$ sec.

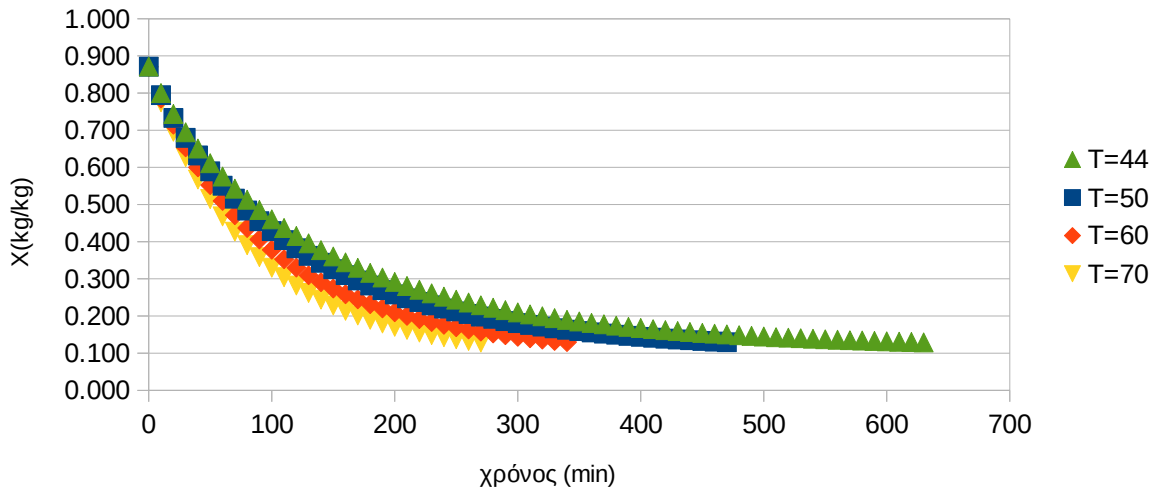
6.2 Αποτελέσματα για μήνα Ιούλιο

Για την διερεύνηση μας έγινε επιλογή συνθηκών περιβάλλοντος $T_a=25$ °C , $w_a=10$ g/kg συνθήκες αντιπροσωπευτικές για τον μήνα Ιούλιο (εθνική μετεωρολογική υπηρεσία), η αρχική περιεκτικότητα των μήλων σε υγρασία 87% και η τελική κάτω από 13% (Akripar 2006). Έγινε διερεύνηση για ταχύτητες αέρα $V=1$ m/s , $V=1.5$ m/s και θερμοκρασίες 44, 50, 60, 70 °C με την υπόθεση ότι το μοντέλο του (Akripar 2006) δίνει ακριβή αποτελέσματα και στους 44 °C. Ενώ τα αποτελέσματα είναι για ξήρανσης φρέσκου προϊόντος 100 κιλών και το εμβαδό εισαγωγής αέρα είναι 2.85 m².

περιεχόμενη υγρασία για $V=1$ m/s

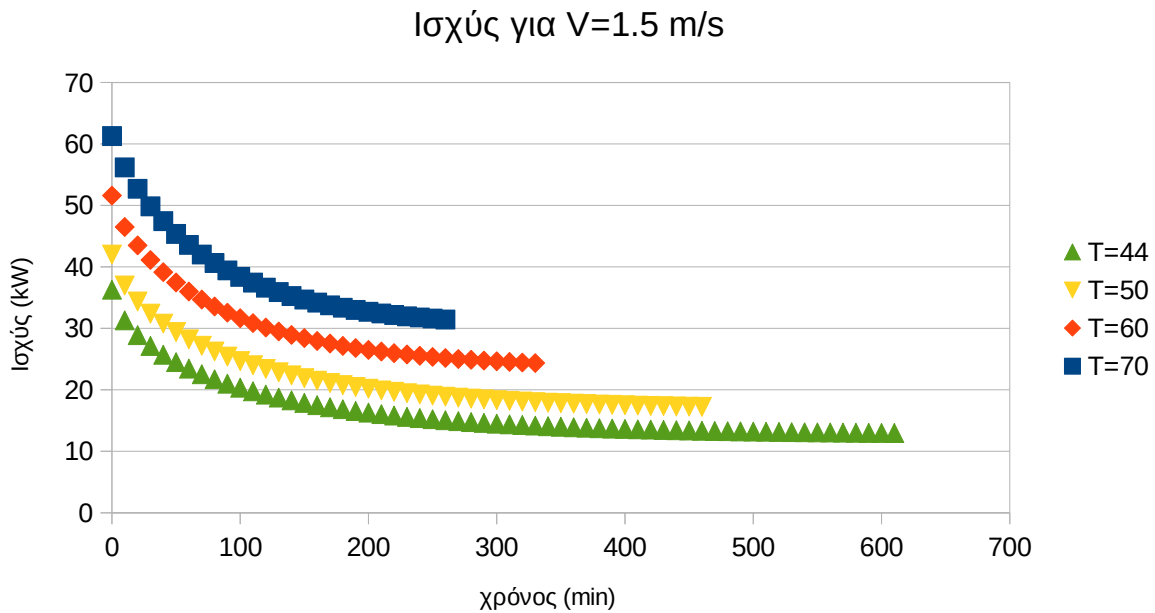
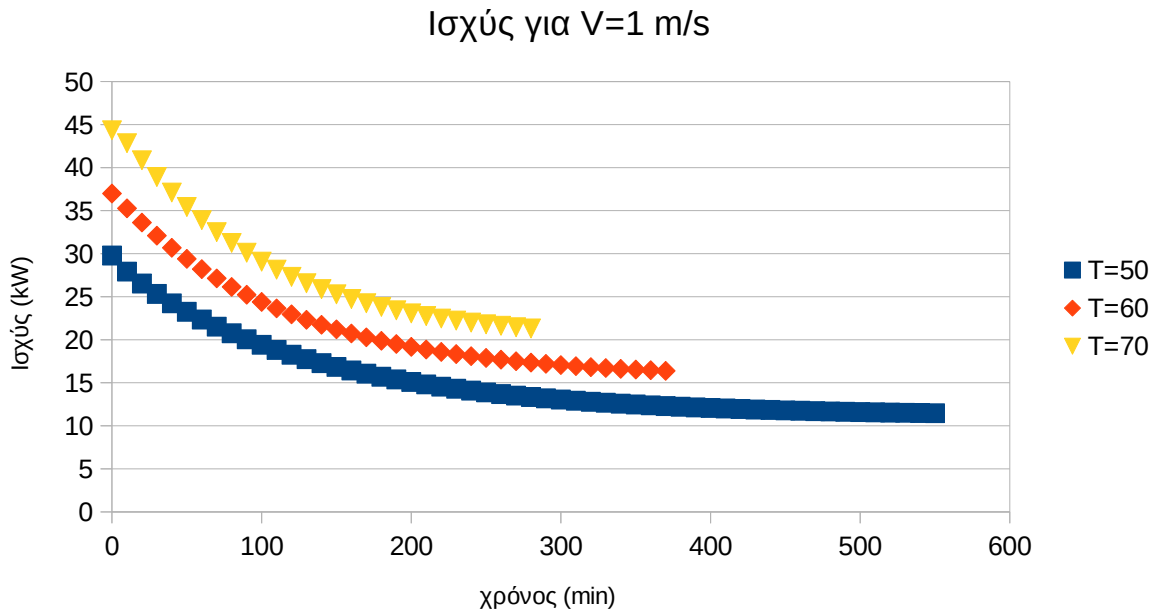


Περιεχόμενη υγρασία για $V=1.5$ m/s



Σχήμα 6.1-2: καμπύλες ξήρανσης για διάφορες συνθήκες για τον μήνα Ιούλιο

Στα σχήματα 6.1-2 βλέπουμε την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας των μήλων σε σχέση με τον χρόνο ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει δραστικά αποτελέσματα για τον χρόνο ξήρανσης 270 λεπτά ανάμεσα σε συνθήκες 50 °C, 1 m/s και 70 °C, 1 m/s. Ενώ για θερμοκρασία 44 °C η περιεχόμενη υγρασία δεν φτάνει ποτέ στην επιθυμητή καθώς η υγρασία ισορροπίας σε αυτήν την θερμοκρασία είναι ίση με $X_e=13.017$ % και συνεπώς οριακά μεγαλύτερη από επιθυμητή τελική υγρασία. Αύξηση της ταχύτητας του αέρα μειώνει τον χρόνο ξήρανσης αλλά όχι τόσο δραματικά όσο η αύξηση της θερμοκρασίας, να σημειωθεί ότι για $V=1$ m/s στους 44 °C η περιεχόμενη υγρασία δεν έφτασε την υγρασία ισορροπίας μετά από 800 λεπτά και για αυτό δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις υπόλοιπες τιμές για αυτές τις συνθήκες ενώ για $V=1.5$ m/s η περιεχόμενη υγρασία φτάνει την ισορροπίας μετά από 620 λεπτά. Σε παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα.

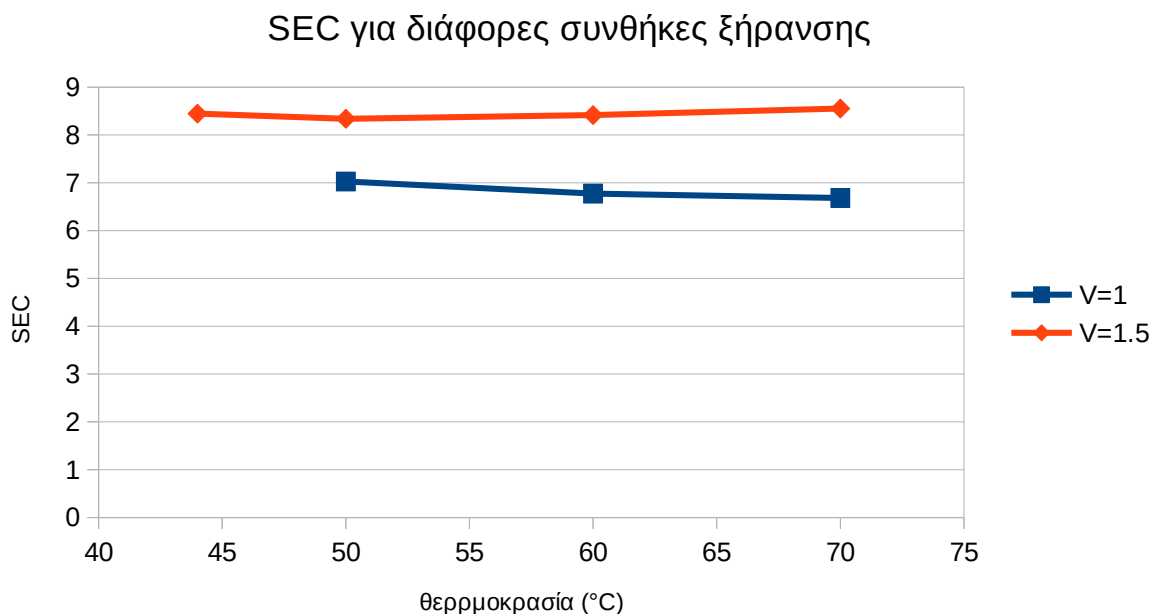


Σχήμα 6.3-4: μεταβολή απαιτούμενης ισχύς κατά την διάρκεια της ξήρανσης για διάφορες συνθήκες για τον μήνα Ιούλιο

Από τα παραπάνω σχήματα (σχ. 6.3-4) παρατηρούμε ότι η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας του ρεύματος ξήρανσης.

Αυξάνοντας την θερμοκρασία ξήρανσης αυξάνεται και η θερμοκρασία η οποία πρέπει να επιτευχθεί στην θερμική πηγή. Ενώ με αύξηση της ταχύτητας του αέρα ξήρανσης αυξάνεται η ποσότητα του αέρα που πρέπει να θερμάνουμε. Αυτά τα φορτία ενέργειας μειώνονται σημαντικά με την χρήση του εναλλάκτη παρόλα αυτά η προσθήκη εξωγενούς ενέργειας στο σύστημα είναι απαραίτητη και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ή της ταχύτητας του ρεύματος.

Η φθίνουσα συμπεριφορά εξηγείται ως εξής: όπως αναφέραμε παραπάνω η θερμοκρασία εξόδου από το ξηραντήριο (T_4) εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που αφαιρέθηκε από το προϊόν καθώς πρέπει να δαπανηθεί ενέργεια από τον αέρα για την εξάτμιση του νερού από το προϊόν. Όσο περνάει ο χρόνος αυτή η ποσότητα μειώνεται καθώς η μειωμένη ποσότητα υγρασίας στο προϊόν κάνει την ξήρανση πιο δύσκολη. Αντίστοιχα με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται και η θερμοκρασία μετά τον εναλλάκτη (T_2) οπότε μειώνονται οι απαιτήσεις ισχύος από την θερμική πηγή η οποία παρουσιάζεται από τα σχήματα 6.3-4.



Σχήμα 6.5: ειδική κατανάλωση ενέργειας για διάφορες συνθήκες ξήρανσης για τον μήνα Ιούλιο

Στο σχήμα 6.5 βλέπουμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μικρότερη οριακά μικρότερη ειδική κατανάλωση για ταχύτητα αέρα 1 m/s. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει δραστικά τον χρόνο ξήρανσης και έτσι αντισταθμίζει και με το παραπάνω την αυξημένη ζήτηση ισχύος. Αύξηση της ταχύτητας του αέρα μειώνει τον χρόνο ξήρανσης αλλά όχι αρκετά ώστε να αντισταθμίσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις ενέργειας. Το ίδιο συμβαίνει και για αύξηση της θερμοκρασίας με ταχύτητα 1.5 m/s,

καθώς μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο για την ξήρανση αλλά όχι αρκετά για έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας.

V = 1 m/s
V = 1.5 m/s

V = 1 m/s				V = 1.5 m/s		
T (°C)	Χρόνος (min)	Q(Mj)	SeC	Χρόνος (min)	Q(Mj)	SeC
44	X	X	X	620	618.18	8.45
50	560	520.14	7.03	470	617.04	8.34
60	380	501.27	6.77	340	622.84	8.42
70	290	494.5	6.68	270	633.02	8.55

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον μήνα Ιούλιο

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ή της ταχύτητας έχουμε μείωση του χρόνου ξήρανσης σε όλες τις περιπτώσεις. Βλέπουμε ότι αυξήσεις της θερμοκρασίας η ταχύτητας αέρα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στον χρόνο ξήρανσης σε χαμηλές θερμοκρασίες.

για **V** = 1 m/s

T 50 → 60 °C μείωση χρόνου 180 min ή 32%

T 60 → 70 °C μείωση χρόνου 90 min ή 23%

για **V** = 1.5 m/s

T 50 → 60 °C μείωση χρόνου 130 min ή 27%

T 60 → 70 °C μείωση χρόνου 70 min ή 20%

Όσο αφορά την ταχύτητα του αέρα αύξηση της παρουσιάζει πιο έντονα αποτελέσματα για χαμηλότερες θερμοκρασίες

για **T** = 50 °C

V 1 → 1.5 m/s μείωση χρόνου 90 min ή 16%

για **T** = 70 °C

V 1 → 1.5 m/s μείωση χρόνου 20 min ή 6%

Ανάλογη σχέση παρατηρείται και για την απόδοση και κατανάλωση ενέργειας. Η αύξηση της ταχύτητας του αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μείωση του χρόνου ξήρανσης εάν δεν είμαστε ευχαριστημένοι από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος όταν αυξάνουμε την θερμοκρασία όπως η γεύση το χρώμα ή η υφή. Ενώ στην περίπτωση ξήρανσης με 44 °C η αύξηση την ταχύτητας μας επιτρέπει να φτάσουμε την υγρασία ισορροπίας.

6.3 Αποτελέσματα για μήνα Ιανουάριο

6.3.1 Εισαγωγή

Το εργοστάσιο λειτουργεί όλο τον χρόνο και παρόλο που συνθήκες δεν είναι ιδανικές είναι χρήσιμο να εξετάσουμε την λειτουργία του ξηραντηρίου και σε εποχές που οι συνθήκες περιβάλλοντος δεν είναι ιδανικές. Για αυτόν τον λόγο θα εξετάζουμε την λειτουργία του ξηραντηρίου για τον μήνα Ιανουάριο. Οι μέσες συνθήκες περιβάλλοντος για τον Ιανουάριο στην Κοζάνη είναι $T_a = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ με σχετική υγρασία $w_a = 0.0033 \text{ kg/kg}$. Η θερμοκρασία ξήρανσης θα παραμείνει ίδια αλλά η υγρασία του αέρα ξήρανσης θα είναι χαμηλότερη καθώς ο ψυχρός αέρας έχει μικρότερη ικανότητα να κατακρατά υγρασία. Η σαφώς χαμηλότερη θερμοκρασία αναμένουμε ότι θα αυξήσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας καθώς η θερμική πηγή θα πρέπει να μεταφέρει περισσότερη θερμότητα στον αέρα ξήρανσης. Η χαμηλότερη υγρασία του αέρα ξήρανσης θα μειώσει τον χρόνο ξήρανσης κάτι που θα έχει θετική επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση. Αλλά η αλλαγή στις συνθήκες περιβάλλοντος αναμένεται να έχει αρνητική επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση στο σύνολο.

6.3.2 Αποτελέσματα

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που εφαρμόσαμε για τον μήνα Ιούλιο καταλήγουμε στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

T (°C)	V=1 m/s			V=1.5 m/s		
	Χρόνος (min)	Q(Mj)	SeC	Χρόνος (min)	Q(Mj)	SeC
44	600	2847.94	38.49	500	3526.89	47.66
50	480	2384.48	32.22	420	3087.03	41.72
60	360	1921.02	25.96	320	2514.6	33.98
70	280	1601.08	21.64	260	2174.75	29.39

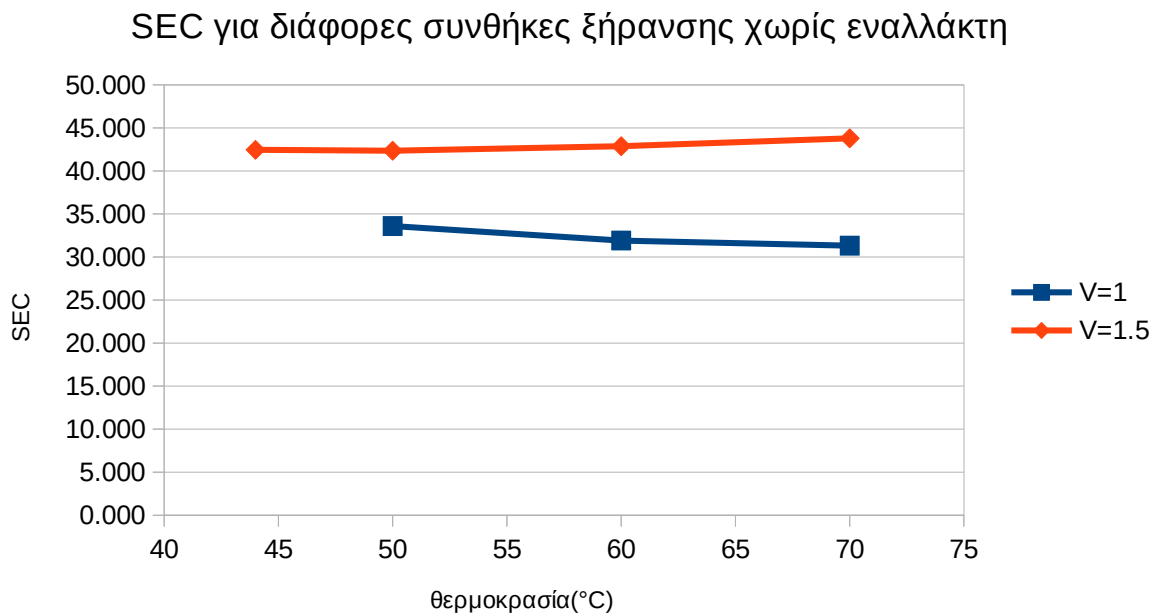
Πίνακας 6.2: Χρόνος ξήρανσης, ενεργειακή κατανάλωση και SEC για διάφορες συνθήκες ξήρανσης για τον μήνα Ιανουάριο

Από τον πίνακα 6.2 και συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα του πίνακα 6.1 μπορούμε να δούμε ότι ο χρόνος ξήρανσης είναι όντως χαμηλότερος όπως και αναμέναμε. Η

κατανάλωση και η SEC έχουν ανέβει σημαντικά και σε μερικές περιπτώσεις έχουν πενταπλασιαστεί. Ένα άλλο ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ότι η ξήρανση στους 44 °C με ταχύτητα αέρα 1 m/s είναι πλέον εφικτή.

6.4 Διεργασία χωρίς Εναλλάκτη

Ο εναλλάκτης συνιστά ένα από τα κύρια μέτρα για την εξοικονόμηση ενέργειας. Η πτώση θερμοκρασίας μέσα στον θάλαμο δεν είναι δραματική κάτι που μας επιτρέπει να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια του αέρα στην έξοδο του θαλάμου ξήρανσης για να θερμάνουμε τον αέρα πριν την είσοδο στην θερμική πηγή.



Σχήμα 6.6: ειδική κατανάλωση ενέργειας για διάφορες συνθήκες ξήρανσης χωρίς εναλλάκτη για τον μήνα Ιούλιο

Από το σχήμα 6.6 είναι φανερό ότι η χρήση εναλλάκτη έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην εξοικονόμηση ενέργειας και η χρήση του κρίνεται απαραίτητη καθώς μειώνει την ειδική κατανάλωση σχεδόν 80% κάτω από όλες τις συνθήκες.

6.5 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω διερεύνηση συμπεραίνουμε ότι οι συνθήκες περιβάλλοντος μπορούν να έχουν σημαντικές επιδράσεις στα κύρια μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Κυρίως η θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας και για αυτό τον λόγο προτείνεται να γίνεται προγραμματισμός της διεργασίας

ώστε να ωφελούμαστε όσο το δυνατόν περισσότερο από υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Μεγαλύτερες θερμοκρασίες ξήρανσης μειώνουν την ενεργειακή κατανάλωση και τον χρόνο ξήρανσης και για αυτό είναι προτιμότερες και θα ήταν καλό να επιλέγονται. Αύξηση της ταχύτητας του αέρα ξήρανσης μειώνει τον χρόνο ξήρανσης κάτι που θα έχει θετική επίδραση στην ποιότητα του προϊόντος αλλά αυξάνει την ενεργειακή κατανάλωση. Η πιο αποδοτικές συνθήκες ξήρανσης είναι η ξήρανση με θερμοκρασία $T_{ξηρ} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $V = 1\text{ m/s}$ με $SEC = 6.68\text{ MJ/kg}$ για τον μήνα Ιούλιο και $SEC = 21.64\text{ MJ/kg}$ για τον Ιανουάριο. Ο πιο σύντομος χρόνος ξήρανσης είναι αυτός για θερμοκρασία ξήρανσης $T_{ξηρ} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ με $V = 1.5\text{ m/s}$ με $t = 280\text{ min}$ με $SEC = 8.55\text{ MJ/kg}$ για τον μήνα Ιούλιο και $SEC = 29.39\text{ MJ/kg}$ για τον Ιανουάριο.

7 Θερμικές πηγές

7.1 Εισαγωγή

Στην προσπάθεια για την εξοικονόμηση ενέργειας δύο είναι οι εμφανείς τρόποι. Η ρύθμιση των συνθηκών ξήρανσης ώστε να είναι όσο δυνατόν πιο αποδοτικές και η επιλογή της θερμικής πηγής.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε διάφορες συνθήκες ξήρανσης και τις επιπτώσεις που έχουν στην αποδοτικότητα της διεργασίας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τις διάφορες επιλογές που υπάρχουν στην επιλογή της θερμικής πηγής και τις επιπτώσεις μεταβολής των τιμών ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 6 υπολογίσαμε τις ενεργειακές ανάγκες της ξήρανσης για μία παρτίδα και για διάφορες συνθήκες ξήρανσης για τον μήνα Ιούλιο και τον μήνα Ιανουάριο. Συγκεκριμένα στους πίνακες 6.1 , 6.2 παρουσιάζεται η απαιτούμενη ενέργεια για την ολοκλήρωση της διεργασίας σε Mj. Μετατρέποντας τις μονάδες σε MWh δημιουργούμε τους παρακάτω πίνακες.

	V=1 m/s			V=1.5 m/s			
T (°C)	50	60	70	44	50	60	70
Q (Mwh)	0.145	0.139	0.137	0.172	0.172	0.173	0.176

Πίνακας 7.1: Κατανάλωση ενέργειας για διάφορες συνθήκες ξήρανσης σε MWh για μήνα Ιούλιο

	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
T (°C)	44	50	60	70	44	50	60	70
Q (Mwh)	0.792	0.663	0.534	0.445	0.980	0.858	0.699	0.605

Πίνακας 7.2: Κατανάλωση ενέργειας για διάφορες συνθήκες ξήρανσης σε MWh για μήνα Ιανουάριο

7.2 Τύποι θερμικών πηγών

Οι κύριοι τρόποι θέρμανσης αέρα για τον σκοπό μας είναι τρεις:

- 1) Καυστήρας αερίου
- 2) Ηλεκτρικός θερμαντήρας
- 3) Αντλία θερμότητας

Ο Ηλεκτρικός θερμαντήρας και η αντλία θερμότητας μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα (power to heat). Ενώ ο καυστήρας αερίου μετατρέπει την χημική ενέργεια του καυσίμου σε αυτήν την περίπτωση φυσικό αέριο σε θερμότητα.

Ένα πλεονέκτημα των θερμικών πηγών που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια είναι ότι μπορεί να γίνει εύκολα η εισαγωγή ηλιακής ενέργειας στην διεργασία με την εγκατάσταση Φ/Β πάνελ για την τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος.

7.3 Τιμές ενέργειας τα τελευταία χρόνια

7.3.1 Εισαγωγή

Για να επιλέξουμε την οικονομικότερη θερμική πηγή είναι σημαντικό να εξετάσουμε τις αυξομειώσεις των τιμών του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τιμή της Ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του φυσικού αερίου είναι συνεχώς μεταβαλλόμενες και τα τελευταία χρόνια με τον πόλεμο στην Ουκρανία έχει υπάρξει σημαντική αύξηση.

Στο παρακάτω κομμάτι θα μελετήσουμε την μεταβολή των τιμών αερίου και ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα αλλά και γενικότερα στην Ευρώπη.

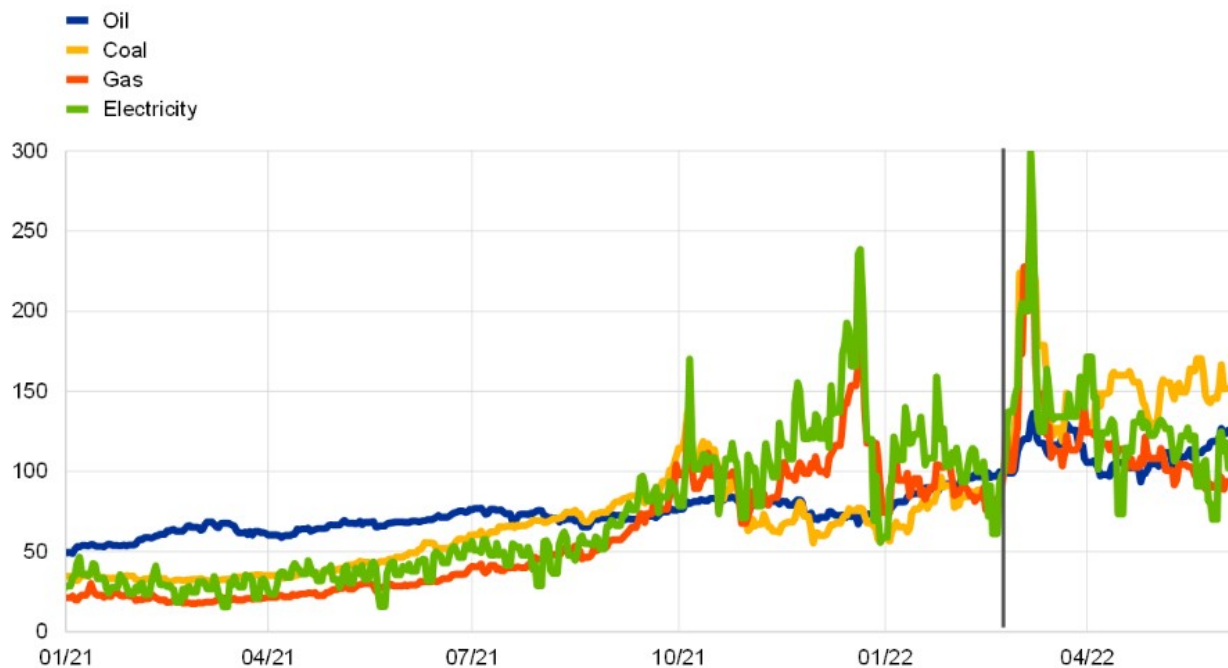
7.3.2 Τιμές Ηλεκτρικού ρεύματος

Ο ΑΔΜΥΕ μας παρουσιάζει στοιχεία για την τιμή του ρεύματος από το 2016 μέχρι σήμερα. Η τιμή της μεγαβατώρας πάντα παρουσίαζε αυξομειώσεις αλλά παρέμενε ανάμεσα στις τιμές των 45 με 70 €/MWh με το 2020 να είναι έτος που παρουσίασε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΑΓΟΡΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΚΑΙ ΕΝΔΟΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΓΟΡΑ (€/MWh)	ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΙ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ (€/MWh)	ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΕΣΟΔΟ ΑΠΕ (ΜΜΚΘΣΣ) (€/MWh)	ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΖΗΜΙΩΣΗΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ (€/MWh)	ΕΤΗΣΙΑ ΕΚΚΑΘΑΡΙΣΗ Λ. Α (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ (€/MWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (MWh)
202001	60,539	0,940	3,756	2,091			67,326	4.846.444
202002	48,206	2,175	3,866	3,485			57,732	4.232.576
202003	42,410	3,208	6,704	4,630			56,952	4.096.795
202004	27,710	1,832	5,905	5,640			41,085	3.459.497
202005	33,637	1,433	4,270	2,451			41,790	3.522.512
202006	33,636	0,988	3,005	1,048			38,677	3.759.911
202007	41,679	0,376	3,494	0,406			45,954	4.832.171
202008	47,114	-0,389	4,328	0,790	1,648		53,491	4.553.153
202009	48,444	-0,299	5,330	1,592	3,287		58,355	4.027.372
202010	48,282	-0,226	6,727	2,649	3,746		61,179	3.651.651
202011	55,421	0,894	16,937	5,515	2,597		81,366	3.814.144
202012	63,830	-0,381	15,945	7,336	2,338		89,068	4.182.540
ΕΤΟΣ 2020	46,503	0,854	6,589	3,048	1,105		58,099	48.978.765

Πίνακας 7.3: Τιμές MWh για το έτος 2020 (ΑΔΜΥΕ)

Οι τιμές του ρεύματος παρουσίασαν ανοδική τάση την περίοδο του COVID και στην συνέχεια ο πόλεμος στην Ουκρανία οδήγησε σε ενεργειακή κρίση και εκτίναξη των τιμών του ρεύματος σε όλη την Ευρώπη αλλά και ιδιαίτερα στην Ελλάδα.



Σχήμα 7.1: Τιμές ενέργειας στην ευροζώνη πριν και μετά τον πόλεμο στην Ουκρανία η μαύρη κάθετη γραμμή υποδηλώνει την έναρξη του πολέμου στην Ουκρανία. (European central bank)

Όπως βλέπουμε από το σχήμα 7.1 και από τις παρατηρήσεις της Ευρωπαϊκής κεντρικής τράπεζας η τιμή των ορυκτών καυσίμων άρχισε να παρουσιάζει αυξομειώσεις από τα τέλη 2021 όταν και άρχισαν οι φήμες για πιθανή εισβολή. Με την αρχή του πολέμου οι τιμές του πετρελαίου, του άνθρακα και του φυσικού αερίου ανέβηκαν κατά 40%, 130% και 180% αντίστοιχα. Αυτή η αύξηση οδήγησε σε αύξηση των τιμών του ρεύματος. Τους επόμενους μήνες οι τιμές παρουσίασαν μια σχετική μείωση με τις τιμές του πετρελαίου και του άνθρακα να ισορροπούν 27% και 50% πιο πάνω από τις τιμές πριν τον πόλεμο και το φυσικό αέριο σε τιμή 11% χαμηλότερη από ότι πριν τον πόλεμο. Συνολικά η τιμή του ρεύματος αυξήθηκε κατά 8% αλλά παρέμεινε εξαιρετικά ασταθής (European central bank).

Στην Ελλάδα από τα δεδομένα του ΑΔΜΥΕ παρατηρούμε μια παρόμοια εικόνα. Το 2021 η τιμή του ρεύματος παρουσιάζει σημαντική αύξηση όπως βλέπουμε από τον πίνακα 7.4.

Μεσοσταθμική Τιμή Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα - ΕΤΟΣ 2021

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΑΓΟΡΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΚΑΙ ΕΝΔΟΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΓΟΡΑ (€/MWh)	ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 1 (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 2 (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 3 (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΩΝ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ (€/MWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (MWh)
202101	55,441	0,830	1,413	0,869	5,357	7,639	63,910	4.370.526
202102	50,787	0,353	1,411	1,197	8,824	11,431	62,571	3.928.218
202103	58,614	1,181	1,400	1,773	6,251	9,424	69,220	4.120.706
202104	64,003	1,902	1,604	1,013	5,404	8,021	73,926	3.711.417
202105	63,172	1,996	1,591	1,158	8,408	11,156	76,324	3.677.657
202106	86,385	1,343	2,023	1,337	7,288	10,648	98,376	4.167.334
202107	103,446	1,500	2,684	1,324	3,526	7,534	112,479	5.499.610
202108	127,446	-0,087	3,337	2,008	4,077	9,423	136,782	5.187.771
202109	136,399	0,856	4,294	1,812	3,753	9,859	147,114	3.988.059
202110	204,052	-0,437	7,130	3,640	6,810	17,580	221,195	3.841.871
202111	236,281	0,259	7,781	2,088	5,552	15,421	251,961	3.946.490
202112	244,459	2,815	8,251	2,182	6,667	17,101	264,375	4.545.712
ΕΤΟΣ 2021	119,934	1,044	3,580	1,696	5,866	11,142	132,120	50.985.372

Πίνακας 7.4: Τιμές MWh για το έτος 2021 (ΑΔΜΥΕ)

Το 2022 οι τιμές φτάνουν στο ιστορικό υψηλό των τελευταίων χρόνων όπως βλέπουμε στον Πίνακα 7.5.

Μεσοσταθμική Τιμή Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα - ΕΤΟΣ 2022

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΑΓΟΡΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΚΑΙ ΕΝΔΟΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΓΟΡΑ (€/MWh)	ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 1 (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 2 (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 3 (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΩΝ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ (€/MWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (MWh)
202201	231,968	2,887	6,659	2,241	7,381	16,281	251,137	4.745.983
202202	214,700	1,425	5,804	1,959	5,985	13,748	229,872	4.062.461
202203	273,927	4,899	8,105	2,698	8,241	19,044	297,870	4.558.210
202204	247,545	2,116	6,737	0,987	8,598	16,322	265,984	3.599.649
202205	223,068	3,741	5,611	1,438	7,980	15,030	241,838	3.808.127
202206	247,768	-0,263	6,467	2,865	6,824	16,156	263,661	4.217.092
202207	339,276	3,676	9,443	4,119	6,887	20,450	363,402	4.884.371
202208	429,388	6,658	10,939	2,742	5,245	18,926	454,971	4.545.425
202209	411,716	9,566	10,790	3,242	11,808	25,840	447,122	3.819.055
202210	232,783	5,653	6,451	3,140	15,475	25,065	263,501	3.548.939
202211	232,252	4,919	6,459	3,879	12,154	22,492	259,663	3.592.420
202212	283,641	3,981	7,661	5,637	10,037	23,335	310,957	3.976.052
ΕΤΟΣ 2022	283,170	4,070	7,671	2,927	8,673	19,271	306,512	49.357.785

Πίνακας 7.5: Τιμές Mwh για το έτος 2022 (ΑΔΜΥΕ)

Τέλος μέχρι τώρα το 2023 η τιμή του ρεύματος έπεσε σχεδόν στα επίπεδα του 2021 αλλά αυτή παραμένει πολύ μεγαλύτερη από την τιμή προ πολέμου όπως και φαίνεται από τον πίνακα 7.6.

Μεσοσταθμική Τιμή Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα - ΕΤΟΣ 2023

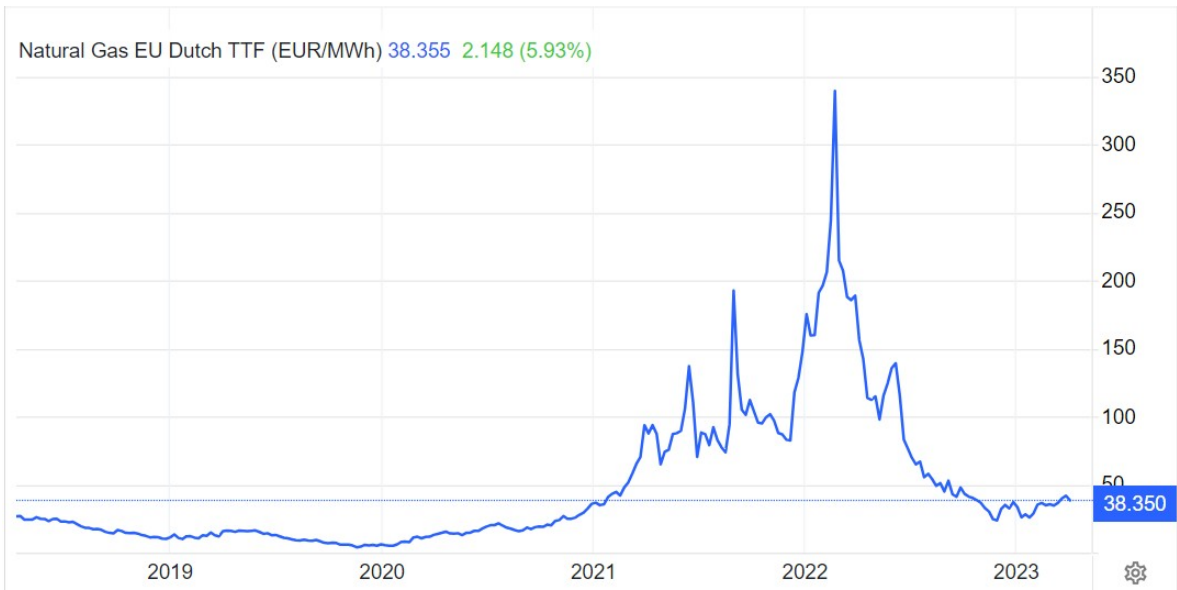
ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΑΓΟΡΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΚΑΙ ΕΝΔΟΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΓΟΡΑ (€/MWh)	ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 1 (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 2 (€/MWh)	ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ 3 (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ ΛΟΓΑΡΙΑΣΜΩΝ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΕΩΝ (€/MWh)	ΣΥΝΟΛΟ (€/MWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (MWh)
202301	186,543	4,863	4,727	2,822	10,602	18,151	209,558	4.144.707
202302	153,307	2,594	3,667	1,541	7,032	12,240	168,140	4.003.618
202303	119,691	2,612	2,610	1,181	6,533	10,325	132,627	3.925.757
202304	115,611	3,514	2,627	2,160	4,972	9,760	128,885	3.530.308
202305	104,984	-0,719	2,218	1,942	6,663	10,823	115,088	3.583.695
202306	90,433	0,659	1,853	1,298	5,598	8,749	99,841	3.824.355
202307	114,019	0,064	2,409	2,061	8,955	13,424	127,507	5.421.834
202308	112,753	-1,572	2,433	2,043	8,245	12,721	123,902	4.841.044
202309	104,758	-2,398	2,571	1,864	9,371	13,806	116,167	3.741.580
202310								
202311								
202312								
ΕΤΟΣ 2023	122,729	0,997	2,790	1,893	7,675	12,359	136,085	37.016.899

Πίνακας 7.6: Τιμές Mwh για το έτος 2023 (ΑΔΜΥΕ)

7.3.3 Τιμές Φυσικού αερίου

7.3.3.1 Τιμές φυσικού αερίου στην Ευρώπη

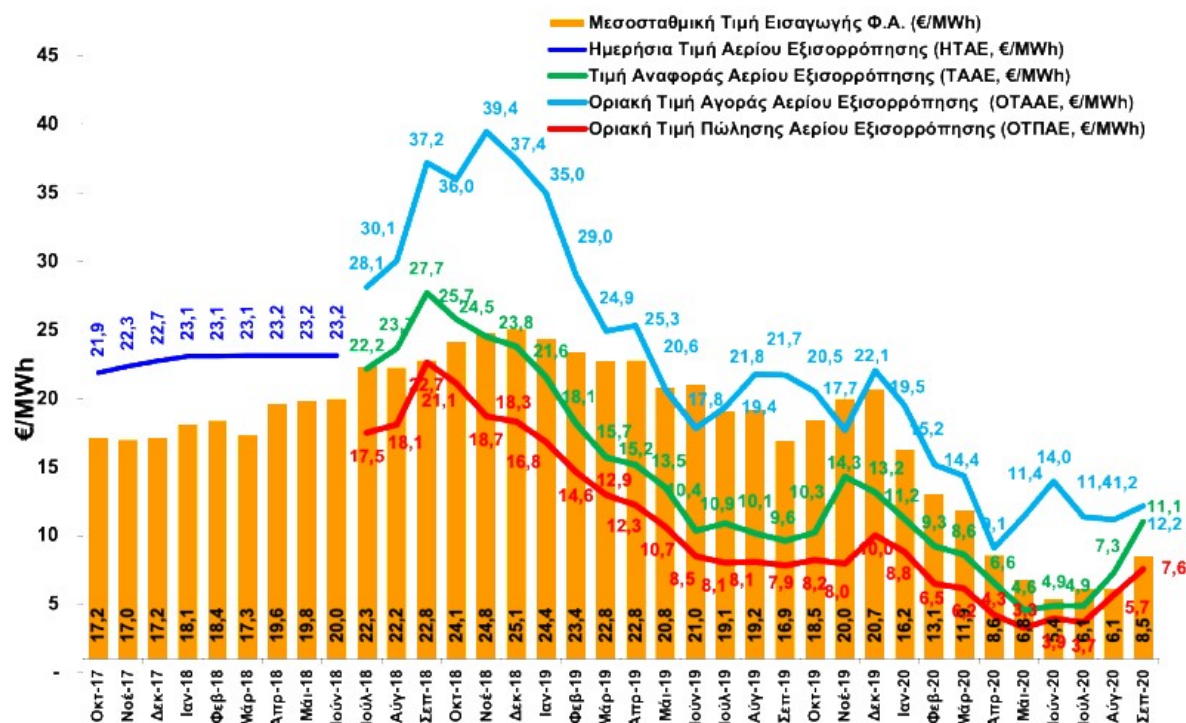
Από το διάγραμμα 7.1 πήραμε μια ιδέα για το τι συνέβη στις τιμές του αερίου στην Ευρώπη κατά το διάστημα του πολέμου στην Ουκρανία. Στο σχήμα 7.2 μπορούμε να δούμε την συνολική εικόνα της τιμής του αερίου τα τελευταία πέντε χρόνια και να εκτιμήσουμε το μέγεθος της αύξησης που έλαβε χώρα το 2022. Η τιμή του αερίου ήταν χαμηλή την περίοδο από το 2018 μέχρι και τις αρχές του 2021 και κυμαινόταν από 8 έως 30 €/MWh . Το 2021 η τιμή άρχισε να αυξάνεται και να παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις. Το 2022 έχουμε εκτίναξη των τιμών με την κορυφή να φτάνει πάνω από 300 €/MWh αλλά κατά την διάρκεια του έτους παρατηρείται σημαντική μείωση της τιμής η οποία ισορροπεί στα τέλη του έτους και κατά την διάρκεια του 2023 σε τιμές σαφώς μεγαλύτερες από αυτές πριν το 2021 αλλά πολύ πιο χαμηλές από την περίοδο 2021-2022. (trading economics)



Σχήμα 7.2: Τιμές φυσικού αερίου στην Ευρώπη τα τελευταία πέντε χρόνια. (trading economics)

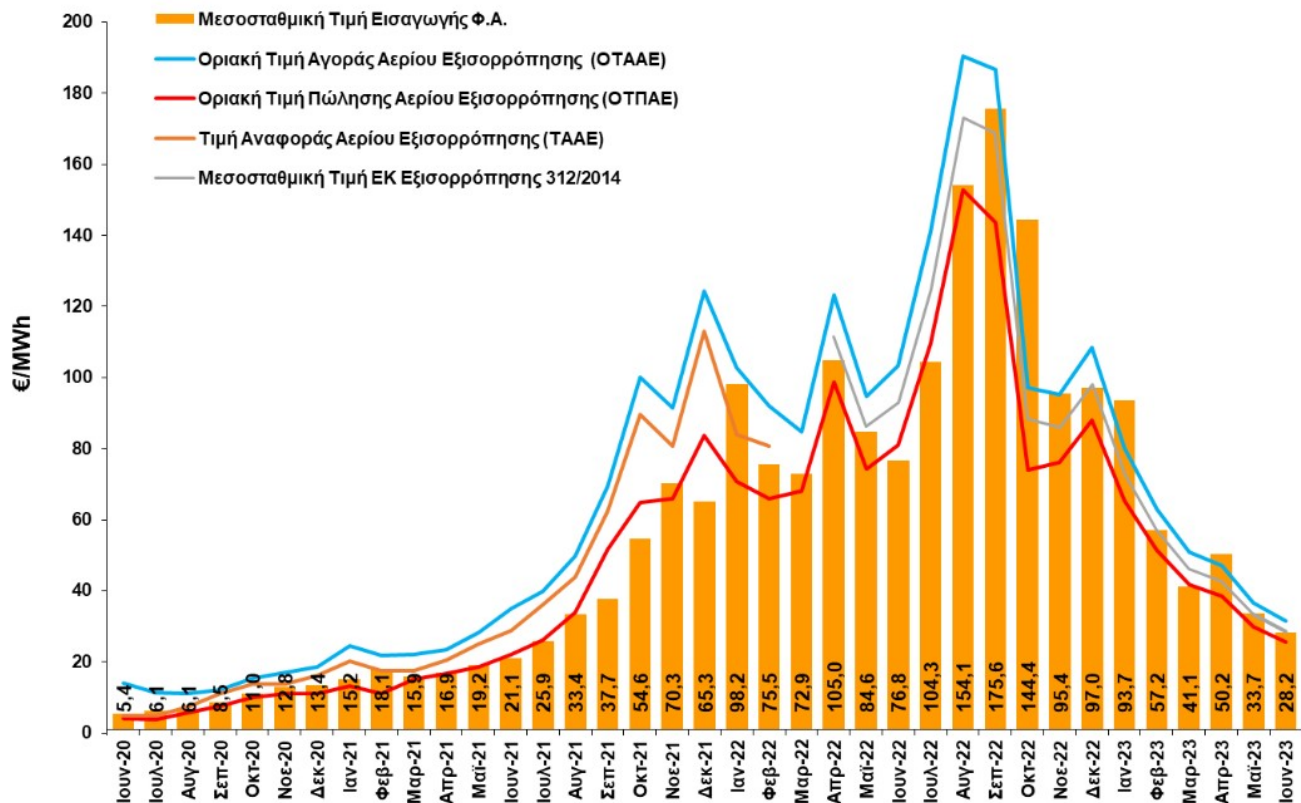
7.3.3.2 Τιμές φυσικού αερίου στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα δεδομένα για την τιμή του φυσικού αερίου μας παρέχει η Ρυθμιστική αρχή αποβλήτων ενέργειας και υδάτων. (ΡΑΑΕΥ)



Σχήμα 7.3: Τιμές εισαγωγής φυσικού αερίου κατά την περίοδο 2017-2020. (ΡΑΑΕΥ)

Από το σχήμα 7.3 παρατηρούμε ότι οι τιμές εισαγωγής του φυσικού αερίου την περίοδο αναφοράς (2017-2020) είναι αρκετά κοντά στις τιμές φυσικού αερίου της Ευρώπης.



Σχήμα 7.4: Τιμές εισαγωγής φυσικού αερίου κατά την περίοδο 2020-2023. (ΡΑΑΕΥ)

Από το σχήμα 7.4 μπορούμε να δούμε ότι η τιμή του φυσικού αερίου στην Ελλάδα δεν πλησιάζει την κορυφή που παρατηρείται στην Ευρώπη αλλά οι τιμές το 2021 και 2022 παραμένουν ιδιαίτερα υψηλές και εμφανίζεται πτώση από τα τέλη του 2022 μέχρι το 2023. Αλλά παρόλα αυτά η τιμή είναι υψηλότερη από την τιμή πριν το 2021.

7.4 Επιλογή τιμών για χρήση στα παραδείγματα

Για να καλύψουμε όλες τις περιπτώσεις στην αυξομείωση των τιμών θα εξετάζουμε τρεις διαφορετικές τιμές από τα τελευταία χρόνια για να καλύψουμε όσο το δυνατόν διαφορετικά σενάρια κόστους. Θα επιλέξουμε ένα κακό σενάριο επιλέγοντας σαν τιμή τον μέσο όρο τιμών κατά το έτος με τις υψηλότερες τιμές. Ένα καλό σενάριο επιλέγοντας σαν τιμή τον μέσο όρο τιμών κατά το έτος με τις χαμηλότερες τιμές και την σημερινή εικόνα επιλέγοντας τον μέσο όρο τιμών το 2023.

Για το φυσικό αέριο παρατηρούμε τις υψηλότερες τιμές το 2022 και ο μέσος όρος τιμών είναι 99.85 €/MWh. Το 2020 παρουσιάζει τις χαμηλότερες με τιμή 9.95 €/MWh. Το 2023 μέχρι τώρα έχουμε τιμή 50.68 €/MWh.

Το ηλεκτρικό ρεύμα ακολουθεί την τάση του φυσικού αερίου. Παρατηρούμε τις υψηλότερες τιμές το 2022 και ο μέσος όρος τιμών είναι 283.17 €/MWh. Το 2020 παρουσιάζει τις χαμηλότερες με τιμή 46.503 €/MWh. Το 2023 μέχρι τώρα έχουμε τιμή 122.729 €/MWh.

7.5 Καυστήρας φυσικού αερίου

7.5.1 Εισαγωγή

Η ένταξη του φυσικού αερίου στην Ελληνική βιομηχανία ήταν ένα καλό βήμα προς τον εκσυγχρονισμό της λόγω των πλεονεκτημάτων του έναντι άλλων υδρογονανθράκων. Όπως οι χαμηλότεροι ρύποι και η υψηλότερη απόδοση. Το 2016 η Ελληνική βιομηχανία κατανάλωσε 3.95 τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (Serkedakis).

Οι κύριες χρήσεις του στην βιομηχανία είναι:

- Ως καύσιμο για την παραγωγή γυαλιού, ασταλιού και σιδήρου, τούβλων, χαρτιού και αποξηραμένων γεωργικών προϊόντων
- Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου
- Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή πετρελαιοειδών όπως καλλυντικά, φάρμακα, συνθετικά υλικά και πλαστικά
- Ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή για την θέρμανση των εγκαταστάσεων

Η απόδοση ενός καυστήρα φυσικού αερίου κυμαίνεται ανάλογα με την κατασκευή και τις συνθήκες λειτουργίας από 75% έως και πάνω από 90% σε ορισμένες περιπτώσεις. Για τον σκοπό αυτής της μελέτης θα επιλέξουμε απόδοση 90%.

7.5.2 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση καυστήρα φυσικού αερίου

Από τον πίνακα 7.1 και με δεδομένο τις τιμές του αερίου που αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος παραγωγής.

T (°C)	V=1 m/s			V=1.5 m/s			
	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	1.603	1.537	1.515	1.902	1.902	1.913	1.946
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	16.087	15.421	15.199	19.082	19.082	19.193	19.526
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	7.349	7.045	6.944	8.718	8.718	8.768	8.920

Πίνακας 7.7: Κόστος παραγωγής μίας παρτίδας για τιμές αερίου που έχουν επιλεγεί για μήνα Ιούλιο

Και από τον πίνακα 7.2 υπολογίζουμε το κόστος παραγωγής για τον Ιανουάριο

T (°C)	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
	44	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	8.753	7.329	5.904	4.921	10.840	9.488	7.728	6.684
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	87.838	73.543	59.249	49.381	108.778	95.212	77.557	67.075
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	40.127	33.597	27.067	22.559	49.694	43.496	35.431	30.642

Πίνακας 7.8: Κόστος παραγωγής μίας παρτίδας για τιμές αερίου που έχουν επιλεγεί για μήνα Ιανουάριο

Είναι εμφανές από τους πίνακες 7.7 και 7.8 ότι η αύξηση της τιμής του φυσικού αερίου που έλαβε χώρα το 2022 έχει δραματική επίδραση στο κόστος της διεργασίας κάτι που μπορεί να γίνει ακόμα πιο αισθητό τον χειμώνα όπου η απόδοση της ξήρανσης είναι σαφώς χαμηλότερη. Το κόστος έχει πέσει σύμφωνα με τις σημερινές τιμές αλλά παραμένει ακόμα υψηλό σε σχέση με τις πολύ χαμηλές τιμές του 2020. Εάν η πτωτική πορεία συνεχιστεί τότε θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων.

7.6 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα

7.6.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες βρίσκουν χρήση στην βιομηχανία λόγω της ικανότητας να ελέγχουν την θερμοκρασία του ρευστού που θερμαίνουν με μεγάλη ακρίβεια. Η απόδοση τους μπορεί να αγγίξει το 100% καθώς η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα είναι πού εύκολη. Δεν εκπέμπουν ρύπους κατά την λειτουργία τους. Είναι μικρότεροι σε μέγεθος σε σχέση με άλλες θερμικές πηγές ίδια ισχύος και ο χρόνος απόκρισης τους είναι πολύ μικρός σε περίπτωση αλλαγής της επιθυμητής θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της διεργασίας.

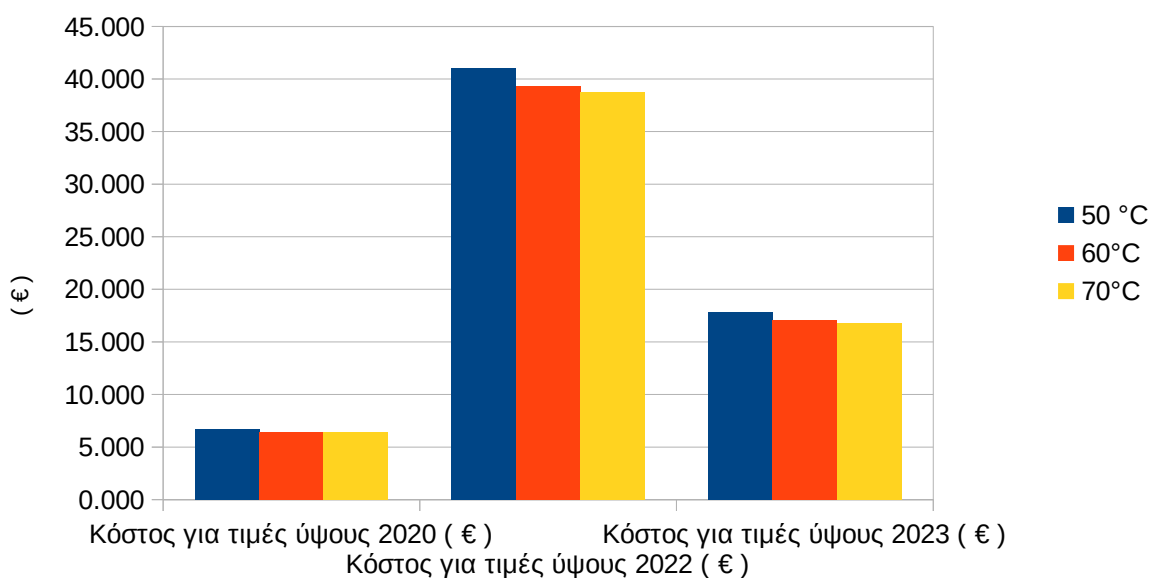
7.6.2 Υπολογισμός κόστους με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα

Από τον πίνακα 7.1-2 και με δεδομένο τις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος που αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος παραγωγής.

T (°C)	V=1 m/s			V=1.5 m/s			
	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	6.743	6.464	6.371	7.999	7.999	8.045	8.185
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	41.060	39.361	38.794	48.705	48.705	48.988	49.838
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	17.796	17.059	16.814	21.109	21.109	21.232	21.600

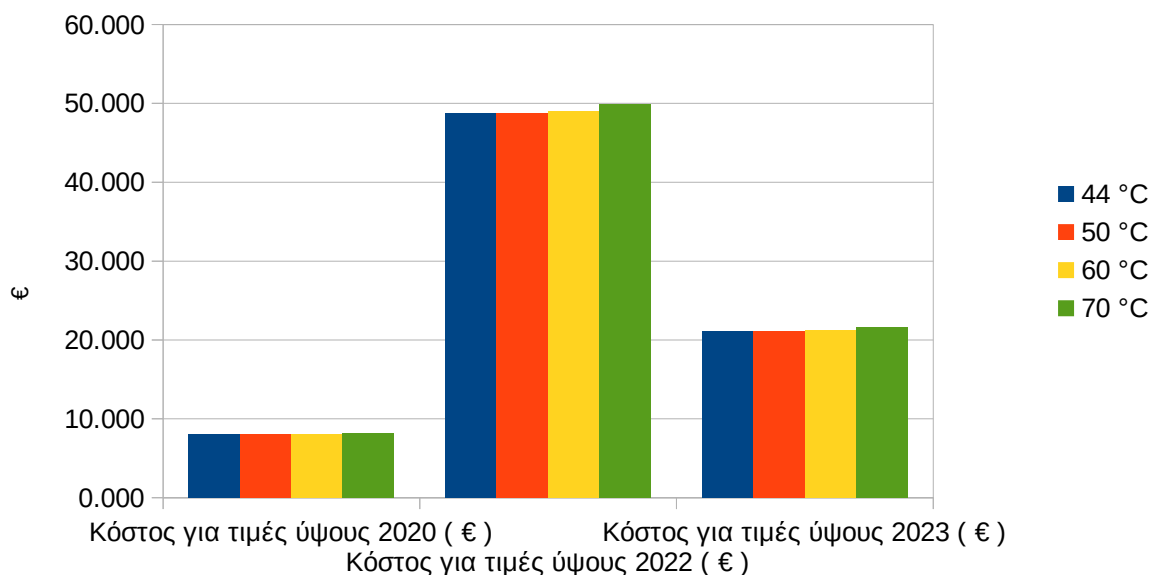
Πίνακας 7.9: Κόστος παραγωγής μίας παρτίδας για τιμές ηλεκτρικού ρεύματος που έχουν επιλεγθεί για μήνα Ιούλιο

Κόστος διεργασίας για V=1 (m/s) με ηλεκτρικό θερμαντήρα τον Ιούλιο



διάγραμμα 7.1: Κόστος παραγωγής μίας παρτίδας τον Ιούλιο για V=1 m/s με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα σε σχέση με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος τα τελευταία χρόνια

Κόστος διεργασίας για $V=1.5(m/s)$ με ηλεκτρικό θερμαντήρα τον Ιούλιο

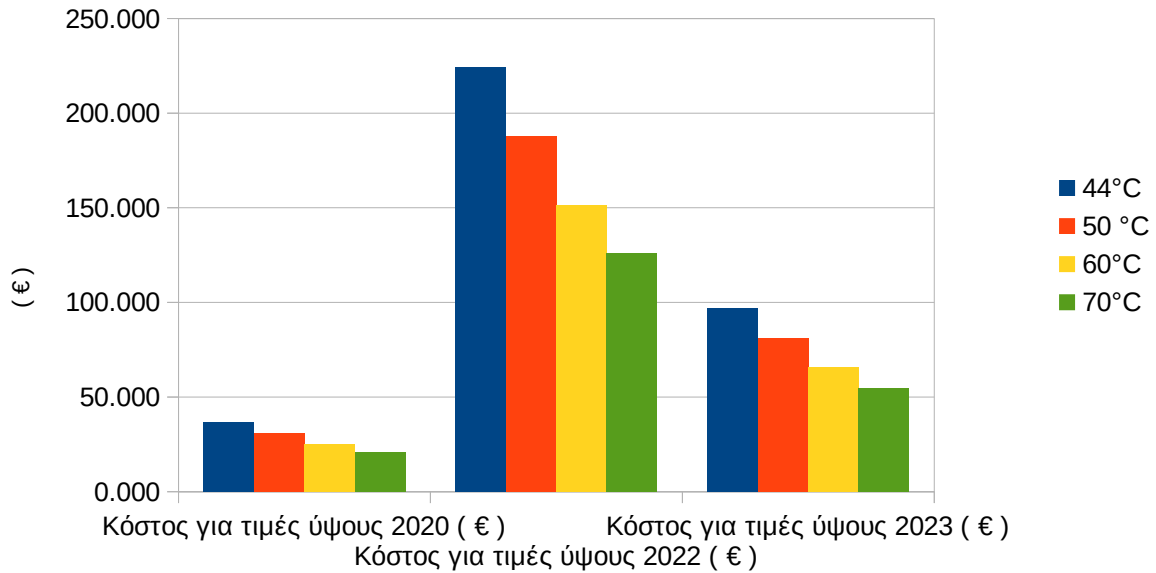


διάγραμμα 7.2: Κόστος παραγωγής μιας παρτίδας τον Ιούλιο για $V=1.5 m/s$ με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα σε σχέση με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος τα τελευταία χρόνια

T (°C)	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
	44	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	36.818	30.826	24.835	20.699	45.595	39.909	32.508	28.115
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	224.193	187.709	151.225	126.039	277.641	243.015	197.952	171.199
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	97.168	81.355	65.543	54.627	120.333	105.325	85.795	74.200

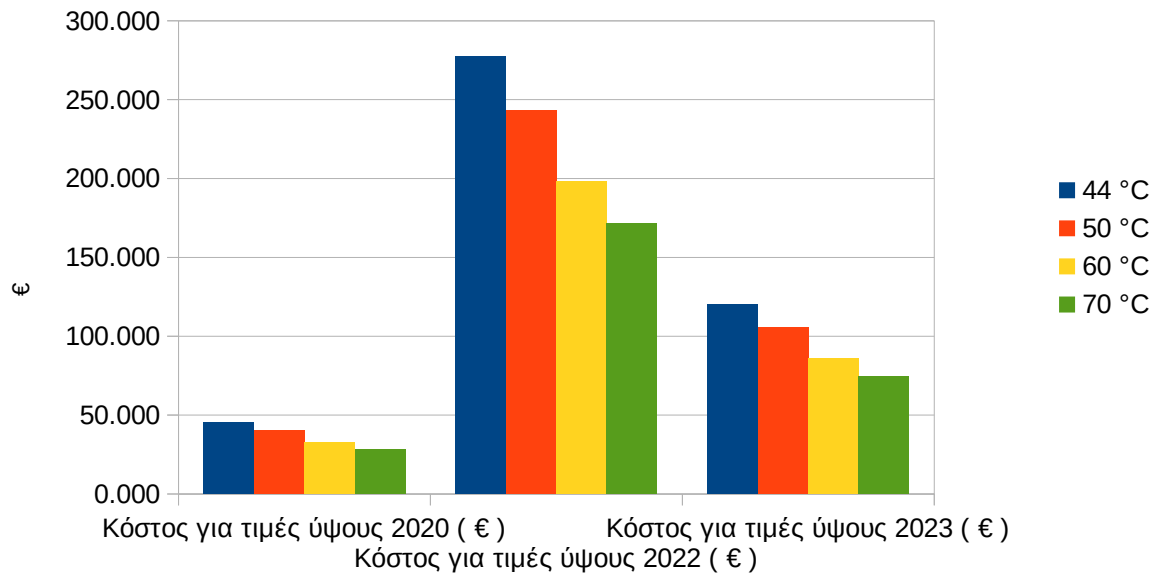
Πίνακας 7.10: Κόστος παραγωγής μίας παρτίδας για τιμές ηλεκτρικού ρεύματος που έχουν επιλεχθεί για μήνα Ιανουάριο

Κόστος διεργασίας για $V=1$ (m/s) για ηλεκτρικό θερμαντήρα τον Ιανουάριο



διάγραμμα 7.3: Κόστος παραγωγής μιας παρτίδας τον Ιανουάριο για $V=1$ m/s με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα σε σχέση με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος τα τελευταία χρόνια

Κόστος διεργασίας για $V=1.5$ (m/s) με ηλεκτρικό θερμαντήρα τον Ιανουάριο



διάγραμμα 7.4: Κόστος παραγωγής μιας παρτίδας τον Ιανουάριο για $V=1.5$ m/s με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα σε σχέση με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος τα τελευταία χρόνια

Από τους πίνακες 7.9 , 7.10 και τα διαγράμματα 7.1-74 παρατηρούμε ότι το κόστος της διεργασίας παρουσιάζει μια παρόμοια εικόνα με το κόστος της διεργασίας με χρήση καυστήρα φυσικού αερίου. Αλλά είναι επίσης φανερό ότι το κόστος της διεργασίας είναι υψηλότερο με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα σε σχέση με τον καυστήρα φυσικού αερίου. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας όμως έχει τα πλεονεκτήματα ότι είναι πιο εύκολη η διαχείρισή της και μπορεί εύκολα να γίνει η ένταξη ηλιακής ενέργειας με την εγκατάσταση Φ/Β.

7.7 Θέρμανση με αντλία θερμότητας

7.7.1 Εισαγωγή

Για τον σκοπό του εργοστασίου και για την διασφάλιση της πιο αποδοτικής θερμοκρασίας ξήρανσης και για άλλα προϊόντα είναι χρήσιμο να μπορούμε να παράγουμε αέρα θερμοκρασίας ακόμα και μεγαλύτερο από 70 °C. Οι απλές αντλίες θερμότητας αδυνατούν να παράγουν τόσο μεγάλες θερμοκρασίες έχουν σχεδιαστεί όμως αντλίες θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας (High temperature heat pumps, HTHPs) που μπορούν να ανταπεξέλθουν στις αυξημένες απαιτήσεις.

Η ισχύς των HTHPs κυμαίνεται από 20 Kw μέχρι 20 Mw. Οι περισσότερες αντλίες αντλίες είναι ενός σταδίου και διαφέρουν στο είδος του ψυκτικού που χρησιμοποιούν (R245fa, R717, R744, R134a or R1234ze(E)) καθώς και στο είδος του συμπιεστή. Ο συντελεστής απόδοσης (Coefficient of Performance, COP) κυμαίνεται από 2.4 μέχρι 5.8 και μπορούν να παράγουν θερμοκρασιακή διαφορά από 95 μέχρι 40 °C (Cordin Arpagaus et al.,).

7.7.2 Επιλογή αντλίας θερμότητας

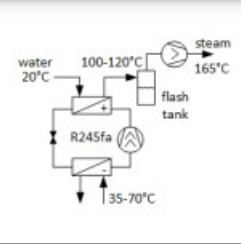
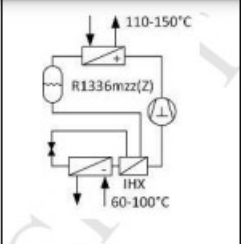
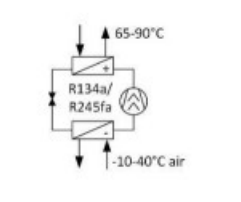
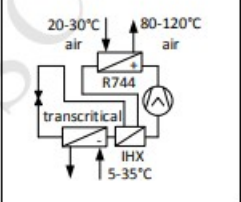
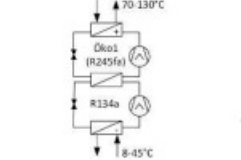
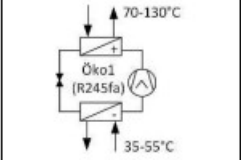
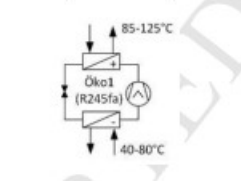
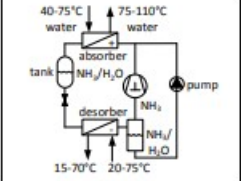
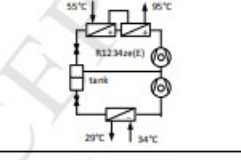
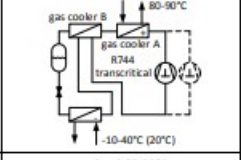
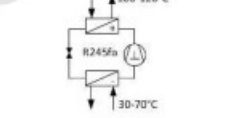
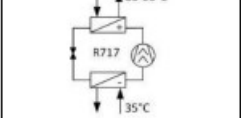
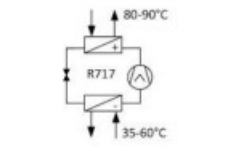
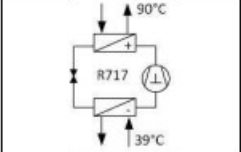
Για να επιλέξουμε αντλία θερμότητας τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι τα εξής:

- θερμοκρασία εισόδου
- θερμοκρασία εξόδου
- Εύρος ισχύος λειτουργίας
- θερμότητα στην έξοδο
- COP

Ιδανικά η αντλία θερμότητας θα παράγει θερμό αέρα και όχι νερό καθώς έτσι δεν έχουμε ανάγκη για επιπλέον εναλλάκτη.

Manufacturer	Product	Refrigerant	Max. heat sink temperature	Heating capacity	Compressor type
Kobe Steel (Kobelco steam grow heat pump)	SGH 165	R134a/R245fa	165 °C	70 to 660 kW	Twin screw
	SGH 120	R245fa	120 °C	70 to 370 kW	
	HEM-HR90,-90A	R134a/R245fa	90 °C	70 to 230 kW	
Vicking Heating Engines AS	HeatBooster S4	R1336mzz(Z) R245fa	150 °C	28 to 188 kW	Piston
Ochsner	IWWDS R2R3b	R134a/ÖKO1	130 °C	170 to 750 kW	Screw
	IWWDS ER3b	ÖKO (R245fa)	130 °C	170 to 750 kW	
	IWWHS ER3b	ÖKO (R245fa)	95 °C	60 to 850 kW	
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717/R718 (NH ₃ /H ₂ O)	120 °C	0.25 to 2.5 MW	Piston
Mayekawa	Eco Sirocco	R744 (CO ₂)	120 °C	65 to 90 kW	Screw
	Eco Cute Unimo	R744 (CO ₂)	90 °C	45 to 110 kW	
Combitherm	HWW 245fa	R245fa	120 °C	62 to 252 kW	Piston
	HWW R1234ze	R1234ze(E)	95 °C	85 to 1301 kW	
Dürr thermea	thermeCO ₂	R744 (CO ₂)	110 °C	51 to 2'200 kW	Piston (up to 6 in parallel)
Friothem	Unitop 22	R1234ze(E)	95 °C	0.6 to 3.6 MW	Turbo (two-stage)
	Unitop 50	R134a	90 °C	9 to 20 MW	
Star Refrigeration	Neatpump	R717 (NH ₃)	90 °C	0.35 to 15 MW	Screw (Vilter VSSH 76 bar)
GEA Refrigeration	GEA Grasso FX P 63 bar	R717 (NH ₃)	90 °C	2 to 4.5 MW	Twin screw (63 bar)
Johnson Controls	HeatPAC HPX	R717 (NH ₃)	90 °C	326 to 1'324 kW	Piston (60 bar)
	HeatPAC Screw	R717 (NH ₃)	90 °C	230 to 1'315 kW	Screw
	Titan OM	R134a	90 °C	5 to 20 MW	Turbo
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90 °C	340 to 600 kW	Turbo (two-stage)
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze(E)	90 °C	148 to 390 kW	Piston (2-3 in parallel)

Πίνακας 7.11: Διάφοροι ΗΤΗΡs που μπορούν να παράγουν θερμοκρασίες πάνω από 90 °C (Cordin Arpagaus et al.,)

<p>Kobe Steel Kobelco SGH 120/165 [5, 13, 61, 62]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>65/120 steam (65)</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>55/120 steam (65)</td><td>3.1</td></tr> <tr><td>45/120 steam (75)</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>35/120 steam (85)</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>25/120 steam (95)</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>70/165 steam (95)</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>60/165 steam (105)</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>50/165 steam (115)</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>35/165 steam (130)</td><td>1.6</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	65/120 steam (65)	3.5	55/120 steam (65)	3.1	45/120 steam (75)	2.7	35/120 steam (85)	2.3	25/120 steam (95)	2.0	70/165 steam (95)	2.5	60/165 steam (105)	2.2	50/165 steam (115)	2.0	35/165 steam (130)	1.6	<p>Viking HeatBooster S4 [63, 64]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100/140 (40)</td><td>4.7</td></tr> <tr><td>80/120 (40)</td><td>4.3</td></tr> <tr><td>100/150 (50)</td><td>4.1</td></tr> <tr><td>90/140 (50)</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>70/120 (50)</td><td>3.6</td></tr> <tr><td>90/150 (60)</td><td>2.9</td></tr> <tr><td>80/140 (60)</td><td>2.8</td></tr> <tr><td>60/120 (60)</td><td>2.1</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	100/140 (40)	4.7	80/120 (40)	4.3	100/150 (50)	4.1	90/140 (50)	4.0	70/120 (50)	3.6	90/150 (60)	2.9	80/140 (60)	2.8	60/120 (60)	2.1
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
65/120 steam (65)	3.5																																						
55/120 steam (65)	3.1																																						
45/120 steam (75)	2.7																																						
35/120 steam (85)	2.3																																						
25/120 steam (95)	2.0																																						
70/165 steam (95)	2.5																																						
60/165 steam (105)	2.2																																						
50/165 steam (115)	2.0																																						
35/165 steam (130)	1.6																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
100/140 (40)	4.7																																						
80/120 (40)	4.3																																						
100/150 (50)	4.1																																						
90/140 (50)	4.0																																						
70/120 (50)	3.6																																						
90/150 (60)	2.9																																						
80/140 (60)	2.8																																						
60/120 (60)	2.1																																						
<p>Kobelco HEM-HR90 [61, 83]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>40 air/90 (50)</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>30 air/90 (60)</td><td>2.9</td></tr> <tr><td>20 air/90 (70)</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>10 air/90 (80)</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>0 air/90 (90)</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>-10 air /90 (100)</td><td>1.7</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	40 air/90 (50)	3.0	30 air/90 (60)	2.9	20 air/90 (70)	2.6	10 air/90 (80)	2.3	0 air/90 (90)	2.0	-10 air /90 (100)	1.7	<p>Mayekawa Eco Sirocco [5, 13, 70]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>35/120 air (85)</td><td>3.1</td></tr> <tr><td>25/120 air (95)</td><td>2.9</td></tr> <tr><td>15/120 air (105)</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>5/120 air (115)</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>35/100 air (65)</td><td>3.6</td></tr> <tr><td>25/100 air (75)</td><td>3.4</td></tr> <tr><td>15/100 air (85)</td><td>3.1</td></tr> <tr><td>5/100 air (95)</td><td>2.8</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	35/120 air (85)	3.1	25/120 air (95)	2.9	15/120 air (105)	2.7	5/120 air (115)	2.6	35/100 air (65)	3.6	25/100 air (75)	3.4	15/100 air (85)	3.1	5/100 air (95)	2.8						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
40 air/90 (50)	3.0																																						
30 air/90 (60)	2.9																																						
20 air/90 (70)	2.6																																						
10 air/90 (80)	2.3																																						
0 air/90 (90)	2.0																																						
-10 air /90 (100)	1.7																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
35/120 air (85)	3.1																																						
25/120 air (95)	2.9																																						
15/120 air (105)	2.7																																						
5/120 air (115)	2.6																																						
35/100 air (65)	3.6																																						
25/100 air (75)	3.4																																						
15/100 air (85)	3.1																																						
5/100 air (95)	2.8																																						
<p>Ochsner IWWDSS R2R3b [43, 66, 68, 81, 95]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>45/90 (45)</td><td>4.0</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	45/90 (45)	4.0	<p>Ochsner IWWDSS ER3b [66, 68]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50/105 (55)</td><td>2.7</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	50/105 (55)	2.7																														
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
45/90 (45)	4.0																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
50/105 (55)	2.7																																						
<p>Ochsner IWWDSS ER3c4 [67, 68]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>65/90 (25)</td><td>5.8</td></tr> <tr><td>45/85 (40)</td><td>3.7</td></tr> <tr><td>50/105 (55)</td><td>2.7</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	65/90 (25)	5.8	45/85 (40)	3.7	50/105 (55)	2.7	<p>Hybrid Heat Pump [16, 17, 69]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>20/95 (75)</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>40/100 (60)</td><td>4.5</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	20/95 (75)	2.4	40/100 (60)	4.5																								
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
65/90 (25)	5.8																																						
45/85 (40)	3.7																																						
50/105 (55)	2.7																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
20/95 (75)	2.4																																						
40/100 (60)	4.5																																						
<p>Friotherm Unitop 22/22 [74, 75]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>34/90 (56)</td><td>3.7</td></tr> <tr><td>34/95 (61)</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>12/75 (63)</td><td>2.7</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	34/90 (56)	3.7	34/95 (61)	3.5	12/75 (63)	2.7	<p>Dürr Thermeco2 HHR1000 [5, 72, 73]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>20/80 (60)</td><td>3.9</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	20/80 (60)	3.9																										
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
34/90 (56)	3.7																																						
34/95 (61)	3.5																																						
12/75 (63)	2.7																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
20/80 (60)	3.9																																						
<p>Combitherm HWW R245fa [23, 24]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50/100 (50)</td><td>3.4</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	50/100 (50)	3.4	<p>GEA Grasso FX P [77]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>35/80 (45)</td><td>5.0</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	35/80 (45)	5.0																														
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
50/100 (50)	3.4																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
35/80 (45)	5.0																																						
<p>Star Refrigeration Neatpump [76, 80]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>40/90 (50)</td><td>3</td></tr> <tr><td>55/90 (35)</td><td>4</td></tr> <tr><td>60/90 (30)</td><td>5</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	40/90 (50)	3	55/90 (35)	4	60/90 (30)	5	<p>Johnson Controls SABROE HeatPAC HPX [78]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>39/90 (51)</td><td>4.0</td></tr> </tbody> </table> 	T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP	39/90 (51)	4.0																										
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
40/90 (50)	3																																						
55/90 (35)	4																																						
60/90 (30)	5																																						
T_{L1}/T_{H1} (ΔT_{L1})	COP																																						
39/90 (51)	4.0																																						

Πίνακας 7.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά, COP, θερμοκρασίες εισαγωγής και εξαγωγής για τις HTHPs του πίνακα 7.11 (Cordin Arpagaus et al.,)

Εξετάζοντας τους πίνακες 7.11 και 7.12 μπορούμε να επιλέξουμε τον καταλληλότερο για τις ανάγκες μας. Εκτός από την θερμοκρασία η Αντλία θερμοκρασίας που θα χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να λειτουργεί κάτω από τις ανάγκες ισχύος του ξηραντηρίου. Για τον μήνα Ιούλιο η μέγιστη ισχύς που απαιτείται από την θερμική πηγή είναι 388 Kw κατά την αρχική θέρμανση του αέρα όταν ο εναλλάκτης θερμότητας δεν λειτουργεί ενώ η ελάχιστη είναι 11 Kw κατά τα τελικά στάδια της ξήρανσης. Είναι

φανερó ότι καμία από τις ΗΤΗΡs του πίνακα 7.1 δεν μπορεί να λειτουργήσει σε ολόκληρο το διάστημα της ξήρανσης. Τέλος ένα ακόμα χαρακτηριστικό που είναι απαραίτητο είναι η απαιτούμενη θερμοκρασία εισόδου.

Η ΗΤΗΡs που επιλέγουμε είναι η Eco Sirocco που παράγεται από την εταιρία Mayekawa Mfg.

Από το φυλλάδιο της εταιρίας μπορούμε να πάρουμε περισσότερες πληροφορίες (Eco Sirocco).

Από της πληροφορίες του φυλλαδίου μαθαίνουμε ότι η συγκεκριμένη ΗΤΗΡ έχει σχεδιαστεί ιδικά για διεργασίες ξήρανσης. Χρησιμοποιεί σαν ψυκτικό μέσο το R744 , χρησιμοποιεί νερό θερμοκρασίας 0-40 °C σαν θερμική πηγή και παράγει θερμό αέρα θερμοκρασίας 60-120 °C ενώ η μέγιστη θερμική ισχύς είναι 100 Kw.

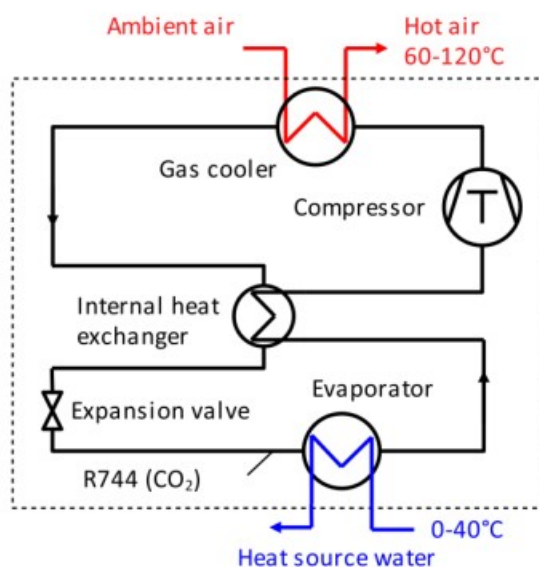


Figure 2: System configuration

Table 1: Performance

$T_{source,in}$ [°C]	$T_{source,out}$ [°C]	$T_{sink,in}$ [°C]	$T_{sink,out}$ [°C]	$COP_{heating}$ [-]
30	25	20	120	3.1
30	25	20	100	3.7
30	25	20	80	4.5
30	25	20	60	5.5

Σχήμα 7.5: Σχηματική απεικόνιση και συνθήκες λειτουργίας της ΗΤΗΡ Eco Sirocco καθώς και η αντίστοιχη COP για αυτές (Eco Sirocco)

Από το σχήμα 7.5 μπορούμε δούμε ότι στην περίπτωση μας η **COP** θα είναι περίπου 4.5

καθώς μπορούμε εύκολα να ικανοποιήσουμε τις συνθήκες για λειτουργία σε αυτό το σημείο. Τα 100 Kw θερμικής ισχύος δεν είναι αρκετά για να εκκινήσουν την διεργασία είναι όμως αρκετά για καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες από εκεί και πέρα τουλάχιστον για τον μήνα Ιούλιο. Οπότε είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιας άλλης θερμικής πηγής. Για τον μήνα Ιανουάριο οι χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος έχουν ως αποτέλεσμα η απαιτούμενη ισχύς να ξεπερνάει τα 100 Kw σε πολλές περιπτώσεις και έτσι η ΗΤΗΡ θα έχει ως σκοπό την προθέρμανση του αέρα πριν από την είσοδο του στον καυστήρα αερίου.

7.7.3 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση Αντλίας θερμότητας για τον μήνα Ιούλιο

Κατά τον μήνα Ιούλιο η ισχύς της αντλίας θερμότητας είναι αρκετή ώστε να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες την ξήρανσης άρα τα μόνα ενεργειακά έξοδα που έχουμε είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τον πίνακα 7.1 και με δεδομένο τις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος που αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος παραγωγής.

T (°C)	V=1 m/s			V=1.5 m/s			
	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	1.498	1.436	1.416	1.777	1.777	1.788	1.819
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	9.124	8.747	8.621	10.823	10.823	10.886	11.075
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	3.955	3.791	3.736	4.691	4.691	4.718	4.800

Πίνακας 7.13: Κόστος παραγωγής μίας παρτίδας για τιμές ηλεκτρικού ρεύματος που έχουν επιλεγεί για μήνα Ιούλιο

Από τον πίνακα 7.13 και συγκρίνοντας με τους πίνακες 7.7 και 7.9 είναι φανερό ότι το κόστος παραγωγής είναι μειωμένο σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους θερμικών πηγών.

7.7.4 Υπολογισμός κόστους διεργασίας με χρήση Αντλίας θερμότητας για τον μήνα Ιανουάριο

Τον μήνα Ιανουάριο η θερμική ισχύς της αντλίας θερμότητας δεν είναι αρκετή για τις ανάγκες της ξήρανσης για αυτό θα χρησιμοποιηθεί καυστήρας αερίου και αντλία θερμότητας θα λειτουργεί σαν προθέρμανση του αέρα.

T(°C)	V=1 m/s		V= 1.5 m/s	
	Qe(kwh)	Qg(kwh)	Qe(kwh)	Qg(kwh)
44	0.79	X	0.980	X
50	0.66	X	0.701	0.158
60	0.53	0.0010	0.534	0.165
70	0.44	0.0067	0.434	0.171

Πίνακας 7.14: κάλυψη ενεργειακών αναγκών για τον μήνα Ιανουάριο

Από τον πίνακα 7.14 βλέπουμε την κατανάλωση ενέργειας τον μήνα Ιανουάριο και το πόσο οι δύο θερμικές πηγές συνεισφέρουν ώστε να παράγουν αρκετή θερμική ενέργεια. Από τα αποτελέσματα του πίνακα μπορούμε να τώρα να υπολογίσουμε το κόστος.

T (°C)	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
	44	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	8.182	6.850	5.508	4.531	10.132	7.240	5.516	4.482
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	49.821	41.713	33.541	27.588	61.698	44.084	33.588	27.290
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	21.593	18.079	14.537	11.957	26.741	19.106	14.557	11.828

Πίνακας 7.15: κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για μία παρτίδα τον μήνα Ιανουάριο με χρήση αντλίας θερμότητας

T (°C)	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
	44	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	X	X	0.011	0.074	X	1.743	1.827	1.889
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	X	X	0.113	0.742	X	17.489	18.339	18.961
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	X	X	0.052	0.339	X	7.989	8.378	8.662

Πίνακας 7.16: κόστος φυσικού αερίου για μία παρτίδα τον μήνα Ιανουάριο με χρήση αντλίας θερμότητας


T (°C)	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
	44	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	8.182	6.850	5.520	4.605	10.132	8.982	7.343	6.371
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	49.821	41.713	33.655	28.330	61.698	61.573	51.927	46.251
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	21.593	18.079	14.589	12.296	26.741	27.096	22.935	20.490

Πίνακας 7.17: συνολικό κόστος ενέργειας για μία παρτίδα τον μήνα Ιανουάριο με χρήση αντλίας θερμότητας

7.8 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάσαμε τις αυξομειώσεις του κόστους ενέργειας και το πως αυτές επηρεάζουν το τελικό κόστος παραγωγής μιας παρτίδας για τους μήνες Ιούλιο και Ιανουάριο. Εξετάσαμε τρεις διαφορετικές θερμικές πηγές και είναι φανερό ότι ο ηλεκτρικός θερμαντήρας επιφέρει με διαφορά το μεγαλύτερο κόστος παρά την μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από τον καυστήρα αερίου καθώς μία MWh

ηλεκτρικού ρεύματος τείνει να είναι σημαντικά ακριβότερη από μία MWh φυσικού αερίου. Οι δύο ανταγωνιστικές πηγές είναι ο καυστήρας φυσικού και η ΗΤΗΡ. Παρακάτω στους πίνακες 7.18 και 7.19 παρουσιάζουμε το κόστος των δύο πηγών μαζί για να γίνουν πιο κατανοητές οι διαφορές τους.

 : ΗΤΗΡ
 : Καυστήρας φυσικού αερίου

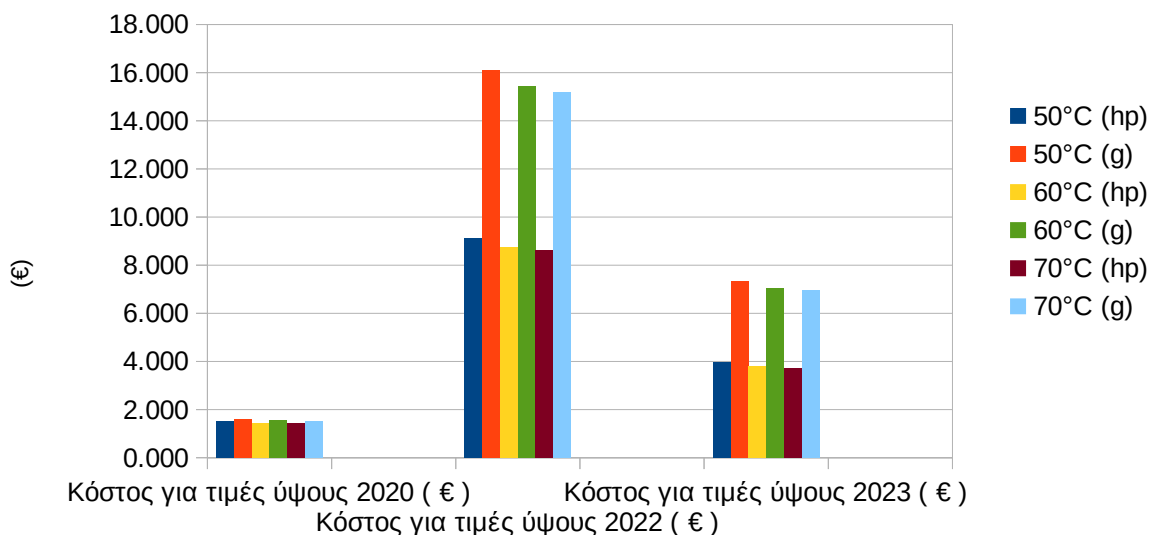
T (°C)	V=1 m/s				V=1.5 m/s			
	44	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	8.182	6.850	5.520	4.605	10.132	8.982	7.343	6.371
	8.753	7.329	5.904	4.921	10.840	9.488	7.728	6.684
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	49.821	41.713	33.655	28.330	61.698	61.573	51.927	46.251
	87.838	73.543	59.249	49.381	108.778	95.212	77.557	67.075
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	21.593	18.079	14.589	12.296	26.741	27.096	22.935	20.490
	40.127	33.597	27.067	22.559	49.694	43.496	35.431	30.642

Πίνακας 7.18: συνολικό κόστος ενέργειας για μία παρτίδα τον μήνα Ιανουάριο με χρήση αντλίας θερμότητας ή χρήση καυστήρα φυσικού αερίου

T (°C)	V=1 m/s			V=1.5 m/s			
	50	60	70	44	50	60	70
Κόστος για τιμές ύψους 2020 (€)	1.498	1.436	1.416	1.777	1.777	1.788	1.819
	1.603	1.537	1.515	1.902	1.902	1.913	1.946
Κόστος για τιμές ύψους 2022 (€)	9.124	8.747	8.621	10.823	10.823	10.886	11.075
	16.087	15.421	15.199	19.082	19.082	19.193	19.526
Κόστος για τιμές ύψους 2023 (€)	3.955	3.791	3.736	4.691	4.691	4.718	4.800
	7.349	7.045	6.944	8.718	8.718	8.768	8.920

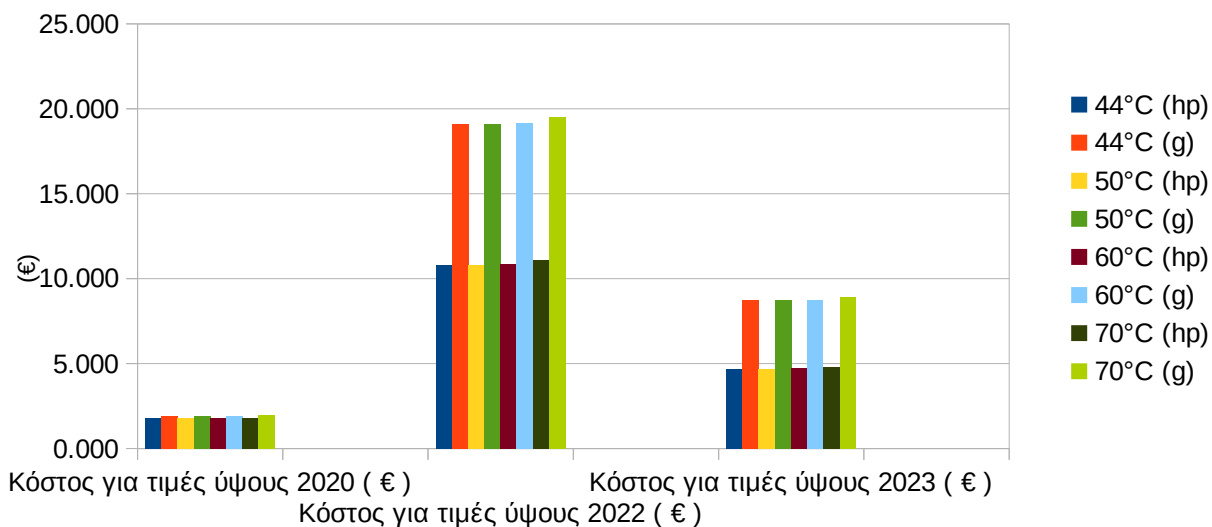
Πίνακας 7.19: συνολικό κόστος ενέργειας για μία παρτίδα τον μήνα Ιούλιο με χρήση αντλίας θερμότητας ή χρήση καυστήρα φυσικού αερίου

Σύγκριση τιμών ανάμεσα σε καυστήρα αερίου και Α.Θ για V=1 m/s και μήνα Ιούλιο



διάγραμμα 7.5: Σύγκριση κόστους ενέργειας για μία παρτίδα με V=1 m/s τον μήνα Ιούλιο με χρήση αντλίας θερμότητας ή χρήση καυστήρα φυσικού αερίου όπου (hp) Αντλία θερμότητας και (g) καυστήρας αερίου.

Σύγκριση τιμών ανάμεσα σε καυστήρα αερίου και Α.Θ για V=1.5 m/s και μήνα Ιούλιο



διάγραμμα 7.6: Σύγκριση κόστους ενέργειας για μία παρτίδα με V=1.5 m/s τον μήνα Ιούλιο με χρήση αντλίας θερμότητας ή χρήση καυστήρα φυσικού αερίου.

Από τους πίνακες 7.18 και 7.19 καθώς και διαγράμματα 7.5 και 7.6 βλέπουμε ότι η ΗΤΗΡ είναι πιο οικονομική κάτω από όλες τις συνθήκες για όλα τα επίπεδα τιμών. Η διαφορά είναι πιο έντονη όταν οι τιμές ήταν υψηλές. Ενώ για τιμές στα επίπεδα του 2020 η διαφορά είναι πολύ μικρή. Εάν στο μέλλον η τιμή του φυσικού αερίου κατεβεί ενώ η τιμή του ρεύματος είναι ακόμα υψηλή είναι εύκολο ο καυστήρας φυσικού αερίου να γίνει πιο οικονομικός. Αλλά με τα σημερινά δεδομένα η ΗΤΗΡ είναι 33 με 46 % πιο οικονομική. Άσχετα με το κόστος πλεονέκτημα της ΗΤΗΡ είναι πιο εύκολο να γίνει ένταξη ηλιακής ενέργειας στην διεργασία με την εγκατάσταση Φ/Β πάνελ. Ενώ μειονέκτημα είναι η ανάγκη παρουσίας δεύτερης θερμικής πηγής για την εκκίνηση της διεργασίας μέχρι η θερμοκρασία στην έξοδο του ξηραντηρίου να είναι αρκετά υψηλή ώστε μπορεί να τροφοδοτήσει την ΗΤΗΡ με την απαιτούμενη θερμότητα για την λειτουργία της.

8 Εγκατάσταση Φ/Β για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών

8.1 Εισαγωγή

Η Ελλάδα βρίσκεται σε προνομιακή θέση για την εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας. Καθώς από ότι είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο μια αντλία θερμότητας, που είναι η πιο αποδοτική θερμική πηγή, αλλά και ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα είναι χρήσιμο να ερευνηθεί η εγκατάσταση Φ/Β πάνελ για την προμήθεια αυτής της ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποτέλεσμα την μηδενική έκλυση διοξειδίου του άνθρακα άλλα και μηδενισμό τού κόστους παραγωγής.

8.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Ο υπολογισμός της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθε στιγμή στη επιφάνεια των Φ/Β είναι το πιο σημαντικό βήμα στην έρευνα για το πως θα γίνει η ένταξή τους στο ξηραντήριο καθώς είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η εποχή, η θέση και η κλίση των Φ/Β αλλά και από την παρουσία συννεφιάς ή άλλων εμποδίων που μπορούν να σκιάσουν την επιφάνεια των Φ/Β. Καθώς το εργοστάσιο βρίσκεται σε θέση όπου είναι το πιο ψηλό κτήριο και υπάρχει απουσία δέντρων που μπορούν να σκιάσουν τα Φ/Β μπορούμε να αγνοήσουμε την παρουσία εμποδίων.

Για τον υπολογισμό την προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μπορούμε να ακολουθήσουμε την μέθοδο που προτείνεται από το TOTEE (TOTEE 20701-3_2010).

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχιάλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Άραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7

Πίνακας 8.1 : Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m².mo)

Ο πίνακα 8.1 μας δίνει την μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία **H**. Η Κοζάνη απουσιάζει από τον πίνακα οπότε στην απουσία της θα επιλέξουμε τα δεδομένα για Καστοριά.

Η μέση ολική μηνιαία ακτινοβολία για νότιο προσανατολισμό υπολογίζεται από την σχέση:

$$\bar{H}_T = (\bar{H} - \bar{H}_d) * \bar{R}_b + 0.5 * \bar{H}_d * (1 + \cos \beta) + 0.5 * \rho * \bar{H} * (1 - \cos \beta) \quad (1)$$

όπου:

H: Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m².mo)

H_d: Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m².mo)

R_b: Μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας για νότιο προσανατολισμό (γ=0)

β : η κλίση της επιφάνειας ως προς το έδαφος

ρ: η ανακλαστικότητα του εδάφους, θεωρείται ίση με 0.15

Η ιδανική γωνία **β** είναι πολύ σημαντική για εξασφαλίσουμε την μέγιστη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β και αλλάζει ανάλογα με την εποχή από ΤΟΤΕΕ

μπορούμε να δούμε ότι η βέλτιστη γωνία είναι 9-16° για τούς θερινούς μήνες ενώ είναι 25-35° για τους χειμερινούς.

Η H_d μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_T} = 0.755 + 0.00653 * (\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455 * (\omega_s - 90)] * \cos(115 * \bar{k}_t - 103)$$

(2)

όπου:

H_T : μέση ολική μηνιαία ακτινοβολία για νότιο προσανατολισμό (kWh/m².mo)

ω_s : η ωριαία γωνία δύσης για την μέση αντιπροσωπευτική μέρα του μήνα (°)

k_t : συντελεστής αιθριότητας

ή εναλλακτικά από τον πίνακα:

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα, Ελληνικό	25,1	32,2	50,3	65,7	81,9	85,5	85,3	73,7	55,5	40,1	26,5	22,0
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	25,1	32,0	50,4	65,6	81,8	85,5	85,2	73,7	55,5	40,1	26,3	21,8
Αγρίνιο	24,6	31,7	50,0	65,2	81,9	85,8	85,5	73,6	55,1	39,5	25,9	21,4
Αγχιάλος	23,9	30,9	49,1	65,1	82,1	86,1	85,7	73,5	54,7	38,5	24,8	20,5
Αλεξανδρούπολη	21,4	29,1	47,5	64,2	82,2	86,8	86,2	73,2	53,6	37,1	23,0	18,3
Αλιάρτος	23,1	31,0	49,8	65,7	82,2	85,7	85,4	73,7	55,3	39,4	25,8	20,8
Ανδραβίδα	25,6	32,6	51,0	65,9	82,0	85,6	85,3	73,8	55,6	40,4	26,8	22,4
Άραξος	24,9	32,1	50,4	65,7	82,0	85,6	85,3	73,7	55,4	40,0	26,3	21,7
Άργος (Πυργέλα)	25,9	32,9	51,2	66,0	82,0	85,4	85,2	73,8	55,8	40,6	27,1	22,6
Αργοστόλι	25,1	32,1	50,6	65,8	82,1	85,7	85,4	73,7	55,4	40,0	26,4	21,8
Άρτα	24,3	31,4	49,7	65,1	82,1	86,1	85,6	73,5	54,8	39,1	25,4	21,0
Ζάκυνθος	25,4	32,2	49,8	65,9	81,8	85,3	85,2	73,8	55,7	40,1	26,3	21,8
Ηράκλειο	27,6	34,4	52,6	66,8	81,5	84,3	84,3	74,1	57,2	42,8	29,4	24,8
Θεσσαλονίκη	21,8	29,2	47,3	64,2	82,0	86,6	86,1	73,1	53,6	36,9	23,1	18,7
Ιεράπετρα	28,6	35,3	53,4	67,1	81,5	84,1	84,2	74,1	57,4	43,3	30,2	25,8
Ιωάννινα	22,4	29,6	48,1	64,0	81,8	86,2	85,8	73,4	54,1	38,0	23,9	19,3
Καλαμάτα	26,4	33,2	51,5	66,0	81,8	85,1	84,9	73,8	56,1	41,1	27,6	23,1
Καστοριά	22,5	29,7	48,1	64,3	81,7	86,6	86,0	73,2	53,7	37,4	23,5	19,1

Πίνακας 8.2 : Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m².mo)

Ακολουθώντας την διαδικασία που προτείνεται και τις σχέσεις που παραθέτει το ΤΟΤΕΕ υπολογίζουμε την $H_T = 206.6$ kWh/m².mo για τον μήνα Ιούλιο και $H_T = 103$ kWh/m².mo για τον Ιανουάριο.

Έχοντας τώρα γνωστή την H_T για τους μήνες που μας ενδιαφέρουν μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίση και τυχαίο προσανατολισμό από την σχέση:

$$\bar{I}_\beta = I_T * \left[\left(1 - \frac{I_d}{I_t}\right) * R_b + \frac{0.5 * I_d}{I_T} * (1 + \cos(\beta)) + 0.5 * \rho * (1 - \cos(\beta)) \right]$$

(3)

όπου:

I_T : Ολική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία (kWh/(m².hr))

I_d : Η μέση διάχυτη ωριαία ηλιακή ακτινοβολία (kWh/(m².hr))

R_b : Γεωμετρικός παράγοντας

ρ, β : παραμένουν ίδιες με την σχέση 1

Ακολουθώντας και πάλι την διαδικασία και τις σχέσεις που προσφέρονται από το ΤΟΤΕΕ υπολογίζουμε την I_β για τον Ιούλιο και τον Ιανουάριο.



H.X	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I_β (kwh/m ² .hour)	X	X	26.64	24.43	25.82	27.08	27.54	27.08	25.82	24.43	26.64	X	X
I_β (kwh/m ² .hour)	21.21	36.40	48.55	58.50	65.99	70.65	72.23	70.65	65.99	58.50	48.55	36.40	21.21

Πίνακας 8.3: Μέση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία για τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο

Στον πίνακα 8.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Η ενέργεια αυτή μπορεί να αυξηθεί ακόμα παραπάνω εάν στα Φ/Β εγκατασταθεί σύστημα περιστροφής σε έναν η δύο άξονες καθώς αυτοί μπορούν να διατηρήσουν ιδανικό προσανατολισμό και κλίση σε όλες τις εποχές και ώρες της ημέρας με μέγιστη αύξηση έως και 30% (ΤΟΤΕΕ) αλλά αυτή η αύξηση προϋποθέτει μεγαλύτερο αρχικό κεφάλαιο και κόστος συντήρησης. Έχοντας γνωστή την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από κάθε τετραγωνικό μέτρο Φ/Β πάνελ. Με την σύγχρονη τεχνολογία και τα σημερινά εμπορικά διαθέσιμα πάνελ η απόδοση τους είναι 20%. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από κάθε τετραγωνικό μέτρο Φ/Β πάνελ είναι:

H.X	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
w_e (kw/m ²)	X	X	5.33	4.89	5.16	5.42	5.51	5.42	5.16	4.89	5.33	X	X
w_e (kw/m ²)	4.24	7.28	9.71	11.70	13.20	14.13	14.45	14.13	13.20	11.70	9.71	7.28	4.24

Πίνακας 8.4: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανά τετραγωνικό Φ/Β πάνελ

Από τον πίνακα 8.4 βλέπουμε ότι η εποχή παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς τους χειμερινούς μήνες μειώνεται και η διαθέσιμη ισχύς αλλά και οι ώρες στις οποίες μπορούμε να παράγουμε ενέργεια. Τα προβλήματα αυτά μπορούν μειωθούν με χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας αλλά παρόλα αυτά η ξήρανση τους θερινούς μήνες θα απαιτεί πολύ λιγότερα τετραγωνικά μέτρα Φ/Β. Η χρήση μπαταριών μπορεί επίσης να καταστήσει δυνατή την λειτουργία του ξηρατηρίου τις ώρες που δεν είναι διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Οι εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες υπάρχουν σε πληθώρα ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας και τιμών από 2.61 Kwh με τιμή 63€ έως 33.6 Kwh με τιμή 339€ και η διάρκεια ζωής τους με σωστή χρήση είναι 5-8 χρόνια (eshops.gr).

8.3 Υπολογισμός επιφάνειας Φ/Β για ηλεκτρικό θερμαντήρα

Στο κεφάλαιο 7 είδαμε ότι η ξήρανση με ηλεκτρικό θερμαντήρα ως θερμική πηγή είναι η ακριβότερη επιλογή εάν χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο αλλά είναι εύκολο να χρησιμοποιήσουμε την ενέργεια από τα Φ/Β για να καλύψουμε τις ενεργειακές ανάγκες με μηδενικό κόστος. Το χρονικό διάστημα που θα λάβει χώρα η ξήρανση επηρεάζει την επιφάνεια Φ/Β που χρειαζόμαστε για αυτό είναι χρήσιμο η ξήρανση να αρχίσει σε τέτοιο χρόνο ώστε να εξασφαλίσουμε την μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία κατά την αρχή της διεργασίας όπου οι απαιτήσεις ισχύος είναι υψηλές αλλά ταυτόχρονα η ξήρανση να ολοκληρωθεί στο διάστημα που υπάρχει ακόμα ηλιακή ακτινοβολία. Η χρήση μπαταριών μπορεί να βοηθήσει πολύ στην ευελιξία του προγραμματισμού αυτού.

T(°C)	V=1 m/s		V=1.5 m/s	
	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)
44	X	X	8	3.7
50	9	2.7	10	3.1
60	11	2.6	12	3.5
70	12	3	12	4.2

Πίνακας 8.5 : Ώρα έναρξης και αντίστοιχη απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β για ξήρανση σε διάφορες συνθήκες για ηλεκτρικό θερμαντήρα τον μήνα Ιούλιο

T(°C)	V=1 m/s		V=1.5 m/s	
	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)
44	8	17.67	8	25.67
50	8	18.42	8	26.72
60	8	19.67	8	28.50
70	12	20.89	12	29.31

Πίνακας 8.6 : Ώρα έναρξης και αντίστοιχη απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β για ξήρανση σε διάφορες συνθήκες για ηλεκτρικό θερμαντήρα τον μήνα Ιανουάριο

Από τον πίνακα 8.5 βλέπουμε ότι λόγω της μεγάλης διάρκειας την ξήρανσης σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι ανάγκη να εκκινήσουμε την ξήρανση σε ώρες που δεν είναι ιδανικές και έτσι υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη επιφάνεια Φ/Β ιδιαίτερα για ξήρανση στους 44°C αλλά αυτό το φαινόμενο αντιστρέφεται στους 70°C όπου οι αυξημένες απαιτήσεις ισχύος καλούν για μεγαλύτερη επιφάνεια Φ/Β.

Από τον πίνακα 8.6 φαίνεται η μεγάλη επιρροή της εποχής στην απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β καθώς και οι ψυχρότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος αυξάνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία μειώνει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Οι λίγες ώρες ηλιοφάνειας μας αναγκάζουν να αρχίσουμε την διεργασία τις πρωινές ώρες σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την ξήρανση στους 70°C όπου η διάρκεια ξήρανσης είναι αρκετά μικρή ώστε να μας επιτρέψει να εκκινήσουμε την ξήρανση το μεσημέρι.

Γενικά αύξηση της ταχύτητας του αέρα ξήρανσης αυξάνει της απαιτούμενη ισχύ και συνεπώς και τη απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β. Αύξηση της θερμοκρασία παράγει ανάμεικτα αποτελέσματα ανάλογα με την εποχή και την θερμοκρασία. Η διαφορά ανάμεσα στον Ιανουάριο και τον Ιούλιο είναι μεγάλη καθώς για την ίδια διεργασία μπορεί να χρειαζόμαστε έως και 25 m² Φ/Β παραπάνω.

8.3 Υπολογισμός επιφάνειας Φ/Β για αντλία θερμότητας

Ο υψηλός βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας αναμένεται να μειώσει την επιφάνεια των Φ/Β που χρειαζόμαστε.

T(°C)	V=1 m/s		V=1.5 m/s	
	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)
44	X	X	8	0.83
50	9	0.60	10	0.71
60	11	0.58	12	0.79
70	12	0.68	12	0.94

Πίνακας 8.7 : Ώρα έναρξης και αντίστοιχη απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β για ξήρανση σε διάφορες συνθήκες για αντλία θερμότητας τον μήνα Ιούλιο

Από τον πίνακα 8.7 και συγκρίνοντας και με τον πίνακα 8.5 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αυξημένη αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας μεταφράζεται σε μειωμένη επιφάνεια απαιτούμενων Φ/Β. Η διαφορά είναι αρκετά μεγάλη για θερμοκρασία 70°C και ταχύτητα αέρα 1.5 m/s η απαιτούμενη επιφάνεια μειώνεται κατά 3.26 m².

T(°C)	V=1 m/s		V=1.5 m/s	
	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)	t έναρξης (H.X)	Επιφάνεια(m ²)
44	8	3.93	8	11.07
50	8	4.09	8	12.12
60	8	4.87	8	13.90
70	12	5.24	12	15.19

Πίνακας 8.8 : Ώρα έναρξης και αντίστοιχη απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β για ξήρανση σε διάφορες συνθήκες για αντλία θερμότητας τον μήνα Ιανουάριο

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 7 η κατάσταση τον Ιανουάριο είναι πιο περίπλοκη καθώς η ισχύς της αντλίας θερμότητας δεν επαρκεί για τις ανάγκες της διεργασίας σε πολλές συνθήκες κυρίως για ταχύτητα αέρα 1.5 m/s αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές του πίνακα 8.8 και του πίνακα 8.6 να μην έχουν την δραματική διαφορά που θα περιμέναμε καθώς γίνεται χρήση και αντλίας θερμότητας και ηλεκτρικού θερμαντήρα. Για θερμοκρασία 50°C και ταχύτητα αέρα 1 m/s που είναι οι πιο ενεργειακά απαιτητικές συνθήκες για τις οποίες η ισχύς της αντλίας επαρκεί η μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας σε σχέση με την περίπτωση του ηλιακού θερμαντήρα είναι 14.34 m² ή 77% ενώ για θερμοκρασία 70°C και ταχύτητα αέρα 1.5 m/s η μείωση είναι 14.12 m² ή 48%. Αυτή η ποσοστιαία μικρότερη μείωση οφείλεται στην χρήση και των δύο θερμικών πηγών.

8.4 Συμπεράσματα

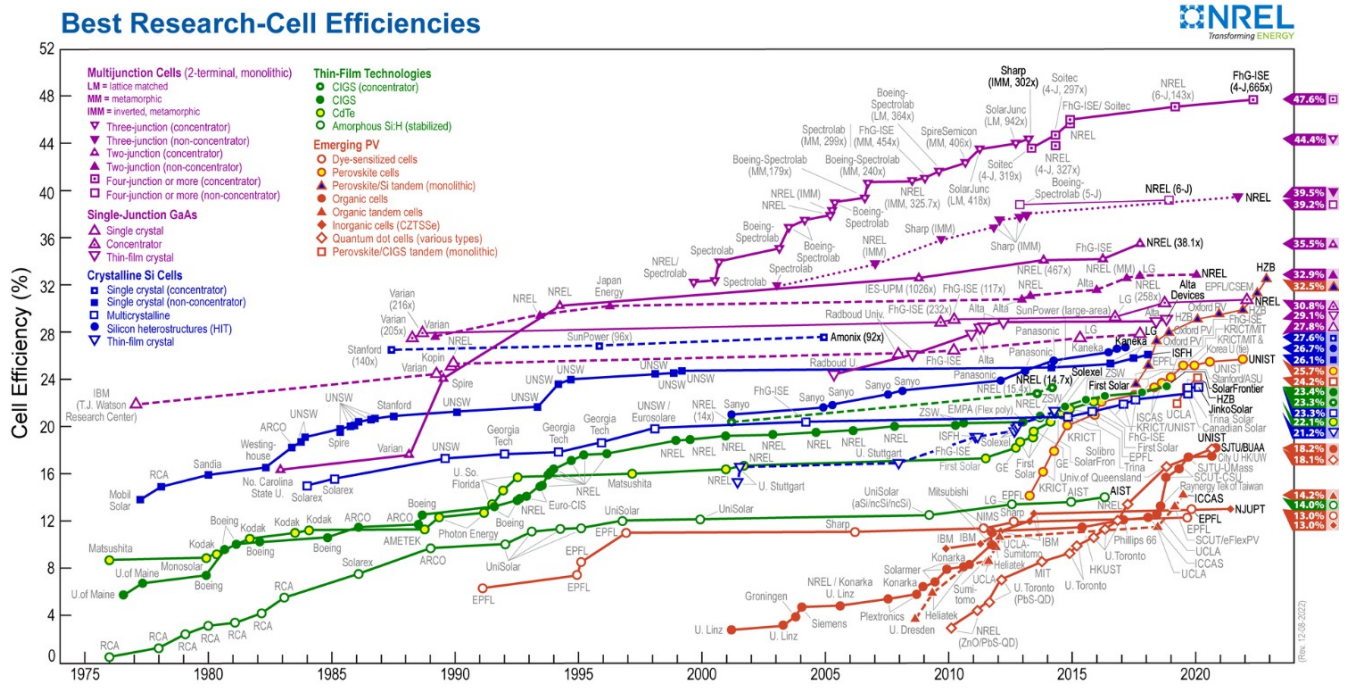
Η εγκατάσταση Φ/Β πάνελ για την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας στην θερμική πηγή μπορεί να είναι εξαιρετικά επωφελής ειδικά του θερινούς μήνες όπου υπάρχει ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία. Είναι σημαντικό να γίνει σωστή επιλογή προσανατολισμού και κλίσης των Φ/Β για την μεγιστοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εγκατάσταση μπαταριών μπορεί να είναι χρήσιμη για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται όταν το εργοστάσιο δεν έχει σχεδιασμένη παραγωγή προϊόντων εναλλακτικά μπορεί να γίνει προώθηση του ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο μέσω των προγραμμάτων που προσφέρει η Δ.Ε.Η. Η ισχύς και η διάρκεια την ηλιακής ακτινοβολίας είναι αρκετή για διεκπεραίωση της ξήρανσης στις αντιπροσωπευτικές συνθήκες κάθε μήνα αλλά στην περίπτωση εκτεταμένης νέφωσης κατά την ημέρα λειτουργίας του ξηραντηρίου υπάρχει περίπτωση η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας να μην επαρκεί για όλη την διάρκεια της διεργασίας και θα πρέπει να καταναλώσουμε ενέργεια από το δίκτυο ή από μπαταρίες.

Η αντλία θερμότητας έχει αρκετούς περιορισμούς στις συνθήκες λειτουργίας της ώστε να μην είναι χρήσιμο να στηριχτούμε αποκλειστικά σε αυτήν ως θερμική πηγή καθώς υπάρχει περίπτωση να μπορεί εν εξυπηρέτησει τις ανάγκες της ξήρανσης σε μερικές

περιπτώσεις, επίσης δεν διαθέτει την ισχύ για να εκκινήσει την διεργασία και χρειάζεται να φτάσει θερμός αέρας στον εναλλάκτη πριν αυτή αρχίσει να λειτουργεί σωστά. Ο ηλεκτρικός θερμαντήρας με την απλή κατασκευή του και την ευελιξία του είναι ιδανικός για χρήση παράλληλα με αυτήν καθώς καταναλώνει την ίδια πρωτογενή ενέργεια (ηλεκτρισμό) και δεν απαιτεί ειδικές συνθήκες λειτουργίας. Μπορεί να βοηθήσει στην εκκίνηση της διεργασίας και να χρησιμοποιηθεί ως κύρια θερμική πηγή στην περίπτωση που χρειαστεί να εκτελεστεί κάποια διεργασία ξήρανσης που η αντλία θέρμανσης δεν μπορεί να εξυπηρετήσει.

Για να βρούμε την ελάχιστη επιφάνεια Φ/Β θα πρέπει να κοιτάξουμε τους χειμερινούς μήνες με ηλεκτρικό θερμαντήρα ως την κύρια θερμική πηγή καθώς η απαιτούμενη επιφάνεια είναι πολύ μεγαλύτερη εκεί. Για να ικανοποιήσουμε την ξήρανση μίλων κάτω από όλες τις συνθήκες η επιφάνεια θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 29.31 m². Η τιμή αυτή είναι για τις μέσες συνθήκες του Ιανουαρίου. Στην πραγματικότητα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη εάν επιθυμούμε να έχουμε την ικανότητα ανεξάρτητης ξήρανσης καθώς εάν ο καιρός είναι ιδιαίτερα νεφελώδης τότε χρειάζεται μεγαλύτερη επιφάνεια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Η εξέλιξη της Φ/Β τεχνολογίας απασχολεί πολύ τους ερευνητές και η απόδοσή τους αυξάνετε συνεχώς. Καινούργια υλικά εξετάζονται πειραματικά και γίνονται εμπορικά διαθέσιμα βοηθώντας περαιτέρω στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 8.1: Μέγιστη απόδοση διάφορων τύπων Φ/Β κελιών σε σχέση με τον χρόνο (www.nrel.gov)

Στην εικόνα 8.1 μπορούμε να δούμε την εξέλιξη της τεχνολογίας των Φ/Β όσο αφορά την μέγιστη απόδοσή τους. Η μέγιστη απόδοση που έχει σημειωθεί κάτω από πειραματικές συνθήκες είναι 47.1% από ηλιακό κελί σχεδιασμένο στο National Renewable Energy Laboratory (NREL) ενώ το ίδιο ερευνητικό κέντρο έχει και το ρεκόρ για την μέγιστη απόδοση κάτω από πραγματικές συνθήκες 39.5% (France et al., 2022). Εάν αυτές οι αποδόσεις μπορέσουν να επιτευχθούν από εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα τότε θα υπήρχαν σημαντικά κέρδη τόσο στον τομέα της ζήρασης αλλά και σε ολόκληρο το βιομηχανικό τομέα γενικώς.

9 Συμπεράσματα και προτάσεις

Αντικείμενο αυτής της Διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική διερεύνηση της ξήρανσης καθώς και η εφαρμογή αυτής της βιβλιογραφίας στην μοντελοποίηση της ξήρανσης μήλων καθώς και η διερεύνηση μεθόδων και τεχνολογίας για την μείωση του κόστους παραγωγής και αύξησης της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

Στο πρώτο κομμάτι της εργασίας μελετάμε βιβλιογραφικά την διεργασία της ξήρανσης με στόχο την κατανόηση τις διεργασίας και την απόκτηση γνώσης όσο αφορά τις συνθήκες αλλά και τις συνηθέστερες μεθόδους.

Στο δεύτερο κομμάτι εφαρμόζουμε τις γνώσεις από την βιβλιογραφία για να αναπτύξουμε ένα μοντέλο ξήρανσης μήλων για τον εργοστάσιο της 4G. Ερευνούμε διάφορες συνθήκες ξήρανσης και εξετάσουμε τις συνέπειες που έχουν στην ποιότητα του προϊόντος και στην ενεργειακή κατανάλωση. Έπειτα μελετούμε την αγορά ενέργειας των τελευταίων χρόνων και την εγκατάσταση διαφόρων θερμικών πηγών στον ξηραντήριο με σκοπό την εύρεση τις οικονομικότερης λύσης. Τέλος εξετάζουμε την εγκατάσταση Φ/Β πάνελ με σκοπό την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Στην συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των συμπερασμάτων από αυτήν τη διερεύνηση.

Στην βιβλιογραφία η μοντελοποίηση της ξήρανσης και η ενεργειακή κατανάλωση δεν αποτελεί συχνά το κύριο θέμα καθώς οι περισσότερες έρευνες αφορούν την πειραματική ξήρανση μικρών ποσοτήτων προϊόντος σε διάφορες συνθήκες ξήρανσης και την εξέταση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Οι ερευνητές εξετάζουν μια πληθώρα από τύπους ξηραντηρίων. Δεν μελετούν πάντα τις ίδιες παραμέτρους και δεν χρησιμοποιούν τις ίδιες μεθόδους μέτρησης. Επίσης η τελική υγρασία των μήλων δεν είναι πάντα η ίδια ενώ και η ποικιλία μήλων δεν είναι η ίδια σε όλες τις έρευνες κάτι όμως που δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς οι διάφορες ποικιλίες συμπεριφέρονται παρόμοια κατά την ξήρανση.

Εξετάζουμε την ξήρανση του μήλου τόσο για τον Ιούλιο όσο και για τον Ιανουάριο καθώς το εργοστάσιο λειτουργεί όλο τον χρόνο. Γενικά για τις συνθήκες ξήρανσης μπορούμε να πούμε ότι:

Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει τον χρόνο ξήρανσης και την συνολική απαιτούμενη ενέργεια αλλά αυξάνει την απαιτούμενη ισχύ. Μειώνει την περιεχόμενη συνολική φαινόλη αλλά δεν έχει σημαντική επίδραση στην υφή και το χρώμα.

Η αύξηση της ταχύτητας του αέρα μειώνει τον χρόνο ξήρανσης αυξάνει την ομοιομορφία της αλλά αυξάνει την συνολική κατανάλωση ενέργειας για τις ταχύτητες που εξετάσαμε. Αναμένεται να βελτιώσει την ποιότητα του προϊόντος σε όλες τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν.

Όσο αφορά τις διαφορές ανάμεσα στην ξήρανση στους θερινούς μήνες και στους χειμερινούς μήνες:

- Η μεγάλη διαφορά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος επιβαρύνει σημαντικά το ενεργειακό κόστος και την απαίτηση ισχύος καθώς η διαφορά θερμοκρασίας που καλείται να καλύψει η θερμική πηγή είναι σημαντικά μεγαλύτερη.
- Καθώς τον χειμώνα ο αέρας περιβάλλοντος έχει μικρότερη απόλυτη υγρασία κάτι που μεταφράζεται σε μικρότερη υγρασία στον θάλαμο ξήρανσης έχουμε μείωση στον χρόνο ξήρανσης. Επίσης η ξήρανση με αέρα χαμηλότερης υγρασίας βελτιώνει τη ποιότητα του τελικού προϊόντος επομένως περιμένουμε η ποιότητα για τα προϊόντα που ξηράνθηκαν τον χειμώνα να είναι ελαφρώς βελτιωμένη.

Έπειτα ακολουθεί η μελέτη της αγοράς ενέργειας η οποία τα τελευταία χρόνια λόγω COVID και του πολέμου στην Ουκρανία έχει δει τις τιμές του φυσικού αερίου και του ηλεκτρικού ρεύματος να εκτοξεύονται. Η τιμή της ηλεκτρική ενέργεια φαίνεται να εξαρτάται ως κάποιο βαθμό από την τιμή του φυσικού αερίου. Ταυτόχρονα η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι σταθερά μεγαλύτερη από την τιμή του φυσικού αερίου.

Η επιλογή θερμικής πηγής εξαρτάται σε ένα βαθμό από επίπεδα τιμών ενέργειας. Ο καυστήρας αερίου εκμεταλλεύεται τις χαμηλές τιμές φυσικού αερίου και καθιστά μια φθηνή και αξιόπιστη επιλογή. Ο ηλεκτρικός θερμαντήρας με τον πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης που αγγίζει το 100% δεν μπορεί μεν να συναγωνιστεί με τον καυστήρα φυσικού αερίου σε επίπεδο οικονομίας λόγω της υψηλότερης τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά η μετατροπή της πρωτογενούς ενέργειας του ξηραντηρίου σε ηλεκτρική προσφέρει μια καλή ευκαιρία για εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας. Τέλος μια αντλία θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας βρίσκουμε ότι μας προσφέρει την πιο οικονομική επιλογή αλλά ο περιορισμός στην μέγιστη ισχύ, οι περιορισμοί στις θερμοκρασίες εισόδου και η περιπλοκότητά της κάνουν την χρήση της πιο δύσκολη σε σχέση με άλλες δύο πηγές. Η περιορισμένη ισχύς της αντλίας θερμότητας καθιστά απαραίτητη την παρουσία μιας βοηθητικής θερμικής πηγής για την εκκίνηση, αλλά ιδιαίτερα τον χειμώνα και την ολοκλήρωση της διεργασίας.

Τέλος η μελέτη εγκατάστασης Φ/Β πάνελ έχει σκοπό την ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην διεργασία με όλα τα πλεονεκτήματα που αυτές προσφέρουν. Η Κοζάνη

δεν βρίσκεται σε γεωγραφικά ιδανικό σημείο καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι στα ίδια επίπεδα με ένα μεγάλο μέρος της Ελλάδος και η συχνές νεφώσεις την μειώνουν περαιτέρω. Παρόλα αυτά είναι αρκετή για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών τις διεργασίας μέσα στις συνθήκες που έχουμε επιλέξει. Η μέγιστη επιφάνεια που χρειαζόμαστε υπολογίζεται στους χειμερινούς μήνες καθώς οι μεγαλύτερες απαιτήσεις ενέργειας καθώς και η μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία αυξάνουν την επιφάνεια Φ/Β που απαιτείται για την ικανοποίηση των συνθηκών ξήρανσης.

Με αυτά τα συμπεράσματα μπορούμε να τονίσουμε τους τομείς που χρειάζονται περαιτέρω έρευνα και τις τεχνολογίες που θα βοηθούσαν στην πιο οικονομική και ποιοτική παραγωγή αποξηραμένων μήλων.

- Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται στην μοντελοποίηση την ξήρανσης των μήλων σε περισσότερους συνδυασμούς θερμοκρασιών και ταχύτητας αέρα, καθώς και για μεγαλύτερες ποσότητες για να διαπιστωθεί εάν η ξήρανσης εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο.
- Δεν υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία για το πως ξήρανση με υγρασία αέρα σημαντικά μικρότερο από αυτήν του περιβάλλοντος επηρεάζει την διεργασία και το τελικό προϊόν καθώς με την ύπαρξη αφυγραντικών συσκευών αυτές οι υγρασίες μπορούν να επιτευχθούν.
- Περαιτέρω έρευνα πάνω στις ΗΤΗΡ και την εφαρμογή τους στην διεργασία της ξήρανσης. Κυρίως στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών αλλά και ασφαλών ψυκτικών υγρών και με προσπάθεια η λειτουργία των αντλιών να γίνει πιο ευέλικτη ώστε να μπορεί να ικανοποιεί μεγαλύτερο φάσμα συνθηκών ξήρανσης.
- Μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μειώνουν την τιμή του και το ανεξαρτητοποιούν από την τιμή του φυσικού αερίου μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση του κόστους της διεργασίας.

Βιβλιογραφία

ABDELGAIED, Mohamed, et al. Adsorption air conditioning: a comprehensive review in desiccant materials, system progress, and recent studies on different configurations of hybrid solid desiccant air conditioning systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30.11: 28344-28372.

AGHBASHLO, Mortaza, et al. 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*, 2008, 49.10: 2865-2871.

AGHILINATEGH, Nahid, et al. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food Science & Nutrition*, 2015, 3.6: 519-526.

Airaksinen, Sari. (2023). Role of Excipients in Moisture Sorption and Physical Stability of Solid Pharmaceutical Formulations.

AKPINAR, Ebru Kavak. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of food engineering*, 2006, 73.1: 75-84.

ANDRADE P, Ricardo D.; LEMUS M, Roberto; PÉREZ C, Carmen E. Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations. *Vitae*, 2011, 18.3: 325-334.

ARGYROPOULOS, Dimitrios; MÜLLERA, Joachim. Effect of convective drying on quality of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). *Procedia Food Science*, 2011, 1: 1932-1939.

ARPAGAUS, Cordin, et al. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, 2018, 152: 985-1010.

ASHWORTH, J. C.; KEEY, R. B. The evaporation of moisture from wet surfaces. *Chemical Engineering Science*, 1972, 27.10: 1797-1806.

BAKSHI, Amarjit S.; SINGH, R. Paul. Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during rice parboiling. *Journal of Food Science*, 1980, 45.5: 1387-1392.

BALA, B. K., et al. Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. *Renewable Energy*, 2003, 28.2: 183-190.

BARROZO, M. A. S.; MUJUMDAR, A.; FREIRE, J. T. Air-drying of seeds: a review. *Drying Technology*, 2014, 32.10: 1127-1141.

[Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL 2023](#)

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying Cereal Grains. The AVI Pub. Co. Inc. Westport. Connecticut, 1974.

- CHEMKHI, Saber; ZAGROUBA, Fethi; BELLAGI, Ahmed. Drying of agricultural crops by solar energy. *Desalination*, 2004, 168: 101-109.
- COPELAND, Lawrence O., et al. Seed drying. *Principles of Seed Science and Technology*, 2001, 268-276.
- CRANK, P. The mathematics of diffusion, 2nd edn Oxford Univ Press. 1975.
- CRUZ, Ana Catarina; GUINÉ, Raquel PF; GONÇALVES, João Carlos. Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). *International Journal of Fruit Science*, 2015, 15.1: 54-78.
- DEMARCHI, Silvana M., et al. Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers. *Food and bioproducts processing*, 2013, 91.4: 310-318.
- DIAMANTE, Lemuel M.; MUNRO, Peter A. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar energy*, 1993, 51.4: 271-276.
- DJEBLI, Ahmed, et al. Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. *Renewable Energy*, 2020, 145: 1494-1506.
- EKECHUKWU, O. V. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy conversion and management*, 1999, 40.6: 593-613.
- ERBAY, Zafer; ICIER, Filiz. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2010, 50.5: 441-464.
- European Pharmacopoeia, 2005. Ph.Eur. 5.00. Deutscher Apotheker Verlag, Stuttgart, 4392
- FORTES, Mauri; OKOS, Martin R. Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. *Aiche journal*, 1981, 27.2: 255-262.
- FRANCE, Ryan M., et al. Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices. *Joule*, 2022, 6.5: 1121-1135.
- FRANCINI, Alessandra; SEBASTIANI, Luca. Phenolic compounds in apple (*Malus x domestica* Borkh.): compounds characterization and stability during postharvest and after processing. *Antioxidants*, 2013, 2.3: 181-193.
- GHOLAMI, Hassan; RØSTVIK, Harald Nils. Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. *Energy*, 2020, 204: 117931.
- GINER, S. A.; CALVELO, A. Modelling of wheat drying in fluidized beds. *Journal of Food science*, 1987, 52.5: 1358-1363.
- HENDERSON, S. M. Grain drying theory, I. Temperature effect on drying coefficient. *J. Agr. Eng. Res.*, 1961, 6.3: 169-173.

<https://moisturecontrol.weebly.com/drying-curve.html>

<https://olivenet.gr/dihtya-apoxiransis-stafidas-sykon/>

<https://tradingeconomics.com/commodity/natural-gas> 2023

<https://www.admie.gr/agora/enimerotika-deltia/mesostathmiki-timi-agoras> 2023

<https://www.ertnews.gr/perifereiakoi-stathmoi/pirgos/xiransi-stafidas-sto-periferiako-symvoulia/> 2017

<https://www.eshops.gr/en/αγορα-κοστος/batteries-photovoltaics/> 2023

<https://www.olivemagazine.gr/estiatoria-bars/reportaz-estiatoria-bars/golden-black-sti-skia-tis-mavris-stafidas/> 2020

<https://www.rae.gr/psysiko-aerio/agora/mesostathmiki-timi-eisagogis/> 2023

<https://www.ypaidhros.gr/ekdoseis/aromatika-farmakeutika-fita-stin-ellada> 2018

KAYA, Ahmet; AYDIN, Orhan. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50.1: 118-124.

KAYS, William Morrow; LONDON, Alexander Louis. Compact heat exchangers. 1984.

KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Heat and mass transfer model building in drying with multiresponse data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38.3: 463-480.

LIKITRATTANAPORN, Charun, et al. Performance evaluation of a mobile rotary dryer for high moisture paddy. In: *Proceedings of the Third Asia-Pacific Drying Conference*. 2003. p. 1-3.

LINGAYAT, Abhay Bhanudas, et al. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops–Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Applied Energy*, 2020, 258: 114005.

LUIKOV, Aleksei Vasilevič. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and mass transfer*, 1975, 18.1: 1-14.

MARINOS-KOURIS, Dimitris; MAROULIS, Z. B. Transport properties in the drying of solids. *Handbook of industrial drying*, 2020, 2: 113-159.

MCCORMACK, J. H. *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 US*. McCormack, 2004.

MISHA, Suhaimi, et al. Review on the application of a tray dryer system for agricultural products. *World applied sciences journal*, 2013, 22.3: 424-433.

MUJUMDAR, A. S. *Drying fundamentals. Industrial drying of foods*, 1997, 7-30.

MUJUMDAR, Arun S.; DEVAHASTIN, Sakamon. *Fundamental principles of drying. Exergex, Brossard, Canada*, 2000, 1.1: 1-22.

MUSTAYEN, A. G. M. B.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 463-470.

NADIAN, Mohammad Hossein, et al. Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying. *Food and bioproducts processing*, 2015, 94: 263-274.

NUNES, Larissa Peixoto, et al. Drum drying process of jabuticaba pulp using corn starch as an additive. *Brazilian Journal of Food Technology*, 2020, 23.

ÖZILGEN, Mustafa; ÖZDEMİR, Murat. A review on grain and nut deterioration and design of the dryers for safe storage with special reference to Turkish hazelnuts. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2001, 41.2: 95-132.

OZTEKIN, Serdar; MARTINOV, Milan. *Medicinal and aromatic crops: harvesting, drying, and processing*. CRC Press, 2014.

PANARAS, G., et al. Theoretical and experimental investigation of the performance of a desiccant air-conditioning system. *Renewable energy*, 2010, 35.7: 1368-1375.

PARRY, J. L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1985, 32.1: 1-29.

QU, Fengfeng, et al. Effect of different drying methods on the sensory quality and chemical components of black tea. *Lwt*, 2019, 99: 112-118.

RAO, Thota SS Bhaskara; MURUGAN, S. Solar drying of medicinal herbs: A review. *Solar Energy*, 2021, 223: 415-436.

ROCHA, R. P.; MELO, E. C.; RADÜNZ, L. L. Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, 5.33: 7076-7084.

[Rotary Drum Dryer | Rotary Dryer for Cement Industry | AGICO \(cementplantsupplier.com\)](#)

SAWHNEY, R. L.; PANGAVHANE, D. R.; SARSAVADIA, P. N. Drying studies of single layer Thompson Seedless Grapes. In: *International solar food processing conference*. 2009. p. 14-16.

SHARAPIN, NIKOLAI, et al. Fundamentos de tecnologia de produtos fitoterápicos. *Santafé de Bogotá: Cytel*, 2000, 145-157.

SHARMA, G. P.; PRASAD, Suresh. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy*, 2006, 31.12: 1921-1926.

[technologymayekawaecosirocco-1.pdf](#)

TEPE, Tolga Kağan; TEPE, Begüm. The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices. *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56.11: 3047-3057.

[The impact of the war in Ukraine on euro area energy markets \(europa.eu\)](#) 2022

ZHANG, Min, et al. Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low-vacuum dehydration. *Drying Technology*, 2003, 21.3: 569-579.

[Βιολογική καλλιέργεια Τσάι του Ολύμπου από την οικογένεια Ζιώρα \(herbsgreece.blogspot.com\)](#) 2016

ΓΑΡΔΕΛΗ, Χρυσσαυγή. Μελέτη της χημικής σύστασης αιθερίων ελαίων ορισμένων αρωματικών φυτών της ελληνικής χλωρίδας. 2012.

ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ, Θεόδωρος Ν. Ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με στερεά αφυγραντικά μέσα. 2014. Bachelor's Thesis.

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

ΣΕΡΚΕΔΑΚΗΣ, Αριστοτέλης. Χρήση φυσικού αερίου συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας. 2016.

ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ, Βασίλειος. Μελέτη, κατασκευή και λειτουργία έμμεσου ηλιακού ξηρακτηρίου για την ξήρανση κορινθιακής σταφίδας στην περιοχή του Αιγίου. 2006. PhD Thesis.

ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, Μ. Ν. Σταφιδοποιία. έκδοση Γεωπονικού Πανεπιστημίου, Αθήνα, 1986.

TOTEE 20701-3_2010