



NATIONAL
TECHNICAL
UNIVERSITY OF
ATHENS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΠΟΥΛΟΠΟΥΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΑΣ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: ΚΟΡΩΝΑΚΗ ΕΙΡΗΝΗ PhD
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, [Τομέας Θερμότητας](#),

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ξήρανση τροφίμων με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα ηλιακής ενέργειας, βιομάζας και γεωθερμικής ενέργειας. Στο πρώτο κεφάλαιο μελετήθηκε η ξήρανση τροφίμων με τη χρήση ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν ο μηχανισμός της ηλιακής ξήρανσης και τα τεχνικά στοιχεία. Στη συνέχεια έγινε η ταξινόμηση των διάφορων τύπων ηλιακών ξηραντήρων και δόθηκε η αναλυτική περιγραφή τους. Έπειτα μελετήθηκαν οι εφαρμογές της ηλιακής ξήρανσης στην Ελλάδα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετήθηκαν εφαρμογές της ξήρανσης τροφίμων με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας και βιομάζας σε διάφορες χώρες και για μια ποικιλία γεωργικών προϊόντων. Συγκεκριμένα έγινε η αναλυτική περιγραφή των ξηραντήρων και της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Στη συνέχεια δόθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα και έγινε σύγκριση της συνδυασμένης ξήρανσης με την ηλιακή ξήρανση, την ξήρανση με βιομάζα και την παραδοσιακή φυσική ηλιακή ξήρανση.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετήθηκε η ξήρανση τροφίμων με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας. Αρχικά έγινε μία εισαγωγή στη γεωθερμική ενέργεια. Μελετήθηκαν τα γεωθερμικά πεδία και η προέλευση των γεωθερμικών ρευστών. Στη συνέχεια μελετήθηκε ο μηχανισμός της ξήρανσης με γεωθερμική ενέργεια και έγινε η ταξινόμηση των ξηραντήρων γεωθερμικής ενέργειας. Τέλος μελετήθηκαν εφαρμογές της ξήρανσης με γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**1 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

1.1 Αναγκαιότητα χρήσης ηλιακών ξηραντήρων	8
1.2 Πώς γίνεται η ξήρανση	8
1.3 Τεχνικά στοιχεία ξήρανσης	10
1.3.1 Περιεκτικότητα σε υγρασία	10
1.3.2 Δράση του νερού	11
1.3.3 Υγρασία ισορροπίας	12
1.3.4 Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης	12
1.3.5 Χρόνος ασφαλούς αποθήκευσης	13
1.3.6 Ισόθερμες ρόφησης	15
1.3.7 Οι εξισώσεις ρόφησης	15
1.3.7.1Η εξίσωση BET	16
1.3.7.2Η εξίσωση GAB	16
1.3.8Μοντέλα υγρασίας ισορροπίας	17
1.3.9 Ρυθμοί ξήρανσης	20
1.3.9.1 Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης	20
1.3.9.2 Περίοδος φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης	21
1.3.10 Ανάλυση ξήρανσης λεπτού στρώματος	22
1.3.11 Ανάλυση ξήρανσης βαθιάς κλίσης	24
1.3.12 Ψυχομετρική ανάλυση της ξήρανσης καλλιεργείων	26
1.4 Ταξινόμηση συστημάτων ξήρανσης	28
1.4.1 Ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας	28
1.4.2 Ξηραντήρες χαμηλής θερμοκρασίας	28
1.4.3 Ταξινόμηση συστημάτων ξήρανσης ηλιακής ενέργειας	28
1.4.3.1 Παθητικά συστήματα ξήρανσης ηλιακής ενέργειας	30
1.4.3.2 Φυσική ηλιακή ξήρανση	30
1.4.3.3 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας	30
1.4.3.4 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας τύπου διανομής	31
1.4.3.5 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου	32
1.4.3.6 Παθητικοί ηλιακοί ξηραντήρες κιβωτίου	33
1.4.3.7 Ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας θερμοκηπίου	33
1.4.3.8 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας μικτού τύπου	34
1.4.3.9 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ξήρανσης	35
1.4.3.10 Ενεργητικά συστήματα ξήρανσης ηλιακής ενέργειας ενιαίου τύπου	35
1.4.3.11 Ξηραντήρες άμεσης απορρόφησης	36
1.4.3.12 Ηλιακοί ξηραντήρες συλλογής οροφής/συλλογής τοίχου	37
1.4.3.13 Ξηραντήρες θερμοκηπίου με εσωτερικό θάλαμο απορρόφησης	38
1.4.3.14 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ξήρανσης τύπου διανομής	39
1.4.3.15 Ενεργητικοί ηλιακοί ξηραντήρες μικτού τύπου	40
1.5 Ανασκόπηση τεχνολογιών ηλιακής ξήρανσης	41
1.5.1 Ηλιακή ξήρανση σε διάφορες χώρες	42
1.5.2 Σχεδιασμός, ανάπτυξη και αξιολόγηση απόδοσης διάφορων τύπων ξηραντήρων	43
1.5.3 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής συναγωγής	46
1.5.4 Ηλιακοί ξηραντήρες θερμοκηπίου	47
1.5.5 Ηλιακοί ξηραντήρες έμμεσου τύπου	48
1.5.6 Έμμεσοι ηλιακοί ξηραντήρες πολλαπλών ραφιών	49
1.5.7 Ηλιακοί ξηραντήρες κιβωτίου	50
1.5.8 Ηλιακοί ξηραντήρες τύπου σήραγγας	50
1.5.9 Ηλιακοί ξηραντήρες ενιαίου τύπου	51
1.5.10 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής συναγωγής μεικτής λειτουργίας	52
1.5.11 Ηλιακοί ξηραντήρες καμινάδας	53
1.5.12 Ηλιακοί ξηραντήρες οπίσθιου περάσματος και πολλαπλού περάσματος	53
1.5.13 Οικιακοί και βιομηχανικοί ηλιακοί ξηραντήρες χαμηλού κόστους	54
1.5.14 Ξήρανση σε ώρες μη ηλιοφάνειας	55
1.5.15 Συστήματα ξήρανσης βασισμένα σε αποξηραντικά για νυχτερινή λειτουργία	56
1.6 Εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης στην Ελλάδα	58
1.6.1 Ξήρανση φρούτων (δαμάσκινο)	58
1.6.1.1 Τεχνική	59
1.6.1.2 Οι μέθοδοι αποξηρανσης	59
1.6.2 Έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας για την ξήρανση κορινθιακής Σταφίδας στην περιοχή του Αιγίου	60
1.7 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα χαμηλής θερμοκρασίας για εφαρμογές ξήρανσης καλλιεργείων	60
1.7.1 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα	61
1.7.2 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα γυμνής πλάκας	61
1.7.3 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα καλυμμένης πλάκας	62
1.7.4 Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης πλάκας εμπρόσθιου περάσματος	62

1.7.5	Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης πλάκας οπίσθιου περάσματος.....	63
1.7.6	Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης επιπρόσθετης πλάκας.....	63
1.7.7	Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης διάτρητης πλάκας.....	64
1.7.8	Θεωρία αξιολόγησης απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών επίπεδης πλάκας.....	65
1.7.9	Σχεδιασμός ηλιακών συλλεκτών θέρμανσης αέρα.....	66
1.8	Μοντέλο προσομοίωσης για μια διαδικασία ηλιακής ξήρανσης.....	68
1.8.1	Μοντέλο ηλιακού θερμαντήρα αέρα	69
1.8.2	Το μοντέλο ξήρανσης.....	71
1.8.2.1	Ισοζύγιο μάζας.....	71
1.8.2.2	Ενεργειακό ισοζύγιο.....	71
1.8.2.3	Αρχικές και οριακές συνθήκες	71
1.8.2.4	Αριθμητική επίλυση.....	72
1.8.3	Προσομοίωση της διαδικασίας ηλιακής ξήρανσης.....	72
1.8.3.1	Επίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα.....	72
1.8.3.2	Επίπτωση της ταχύτητας του αέρα	73
1.8.3.3	Επίπτωση της υγρασίας του αέρα.....	74
1.8.4	Συμπεράσματα.....	74
2	ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	75
2.1	Ξηραντήρας βιομάζας για ξήρανση κόπρας.....	75
2.1.1	Υλικά και μέθοδοι.....	75
2.1.2	Καθορισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία.....	75
2.1.3	Πειραματική διάταξη.....	75
2.1.4	Ξηραντήρας βιομάζας.....	75
2.1.5	Παραδοσιακός ξηραντήρας <i>machan</i>	77
2.1.6	Ηλιακή ξήρανση.....	77
2.1.7	Εκτίμηση της θερμικής απόδοσης.....	78
2.1.8	Ταξινόμηση.....	78
2.1.9	Ανάλυση κόστους οφέλους	79
2.1.10	Αποτελέσματα.....	79
2.1.11	Θερμική απόδοση της ξήρανσης	81
2.1.12	Ταξινόμηση της κόπρας.....	81
2.1.13	Ανάλυση κόστους οφέλους.....	82
2.1.14	Παρατηρήσεις.....	83
2.1.15	Συμπεράσματα.....	84
2.2	Ξηραντήρας με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας – βιομάζας για ξήρανση μήλων.....	84
2.2.1	Σχεδιασμός υβριδικού ξηραντήρα.....	84
2.2.2	Ηλιακός συλλέκτης.....	85
2.2.3	Εστία αεριοποίησης βιομάζας.....	86
2.2.5	Συμπεράσματα.....	87
2.3	Ξηραντήρας με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας και βιομάζας για ξήρανση γλυκοπατάτας.....	87
2.3.1	Θεωρία.....	88
2.3.2	Καθορισμός της συνεισφοράς θερμότητας στην ξήρανση.....	88
2.3.3	Υλικά και μέθοδοι.....	90
2.3.4	Αποτελέσματα και παρατηρήσεις.....	91
2.3.5	Κατανομή θερμοκρασίας.....	91
2.3.6	Απώλεια υγρασίας με ηλιακή ξήρανση.....	92
2.3.7	Απώλεια υγρασίας με ξήρανση με βιομάζα.....	93
2.3.8	Απώλεια υγρασίας με συνδυασμένη ξήρανση ηλιακής ενέργειας και βιομάζας.....	94
2.3.9	Συμπεράσματα.....	95
2.4	Ξηραντήρας βιομάζας για ξήρανση αραβοσίτου.....	96
2.4.1	Υλικά και μέθοδοι	96
2.4.2	Προετοιμασία των δειγμάτων αραβοσίτου για ξήρανση.....	96
2.4.3	Ξήρανση αραβοσίτου χρησιμοποιώντας ξηραντήρα βιομάζας.....	96
2.4.4	Ξήρανση του αραβοσίτου σε γυμνό έδαφος.....	97
2.4.5	Αποθήκευση των αποξηραμένων δειγμάτων.....	97
2.4.6	Καθορισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία	97
2.4.7	Καθορισμός της ζημιάς από έντομα.....	97
2.4.8	Καθορισμός εμφάνισης μούχλας	98
2.4.9	Καθορισμός της μόλυνσης από αφλατοξίνη	98
2.4.10	Καθορισμός ποσοστού βλαστικής ικανότητας.....	98
2.4.11	Ανάλυση δεδομένων	98
2.4.12	Αποτελέσματα.....	99

2.4.13	Αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία του αραβοσίτου και στη θερμοκρασία της βιομάζας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης.....	99
2.4.14	Αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία του αραβοσίτου και στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σε γυμνό έδαφος.....	99
2.4.15	Αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου σε γυμνό έδαφος αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.....	100
2.4.16	Αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου με βιομάζα αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.....	101
2.4.17	Σύγκριση μεταξύ της ποιότητας των σπόρων αραβοσίτου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο βιομάζας και τη μέθοδο του γυμνού εδάφους.....	101
2.4.18	Επίπτωση της μορφής αποθήκευσης στις παραμέτρους ποιότητας του αραβοσίτου που ξηράνθηκε χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας και αυτού που ξηράνθηκε σε γυμνό έδαφος	102
2.4.19	Επιπτώσεις της ξήρανσης του αραβοσίτου με βιομάζα στη βιωσιμότητα των πυρήνων ...	103
2.4.20	Παρατηρήσεις.....	103
2.4.21	Συμπεράσματα.....	105
2.5	Έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας με εφεδρικό καυστήρα βιομάζας για ξήρανση καρπών πιπεριού ...	106
2.5.1	Μεθοδολογία	106
2.5.2	Μοντελοποίηση του ηλιακού ξηραντήρα.....	107
2.5.3	Αποτελέσματα και παρατηρήσεις.....	111
2.5.4	Συμπεράσματα.....	114
2.6	Ηλιακός ξηραντήρας μεικτής λειτουργίας με καυστήρα βιομάζας για ξήρανση αράπικων Φιστικιών.....	115
2.6.1	Σχεδιασμός ξηραντήρα.....	115
2.6.2	Υλικά και όργανα για την αξιολόγηση του ξηραντήρα.....	116
2.6.3	Αποτελέσματα και παρατηρήσεις	117
2.6.4	Αποτελεσματικότητα ηλιακού συλλέκτη.....	117
2.6.5	Αποτελεσματικότητα του ξηραντήρα χωρίς φορτίο	118
2.6.6	Χωρητικότητα και χρόνοι ξήρανσης.....	119
2.6.7	Ομοιογένεια ξήρανσης και θερμοκρασίες αέρα ξήρανσης.....	121
2.6.8	Ρυθμοί ροής αέρα	122
2.6.9	Αποδόσεις.....	122
2.1.6.10	Ηλιακός ξηραντήρας.....	122
2.1.6.11	Εφεδρικός θερμαντήρας.....	123
2.1.6.12	Συμπεράσματα.....	123
2.7	Ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας – βιομάζας για ξήρανση κάσιους.....	124
2.7.1	Πειράματα.....	124
2.7.2	Ηλιακός συλλέκτης	124
2.7.3	Θερμαντήρας βιομάζας.....	124
2.7.4	Μονάδα ξήρανσης.....	125
2.7.5	Φυσητήρας.....	125
2.7.6	Καμινάδα.....	125
2.7.7	Σύστημα λειτουργίας.....	126
2.7.8	Προϊόν ξήρανσης.....	126
2.7.9	Πειραματική διαδικασία.....	126
2.7.10	Όργανα.....	126
2.7.11	Υπολογισμός απόδοσης.....	127
2.7.12	Ανάλυση θερμοκρασιακού προφίλ μέσα στον ξηραντήρα.....	128
2.7.13	Απώλεια υγρασίας και ρυθμός ξήρανσης.....	130
2.7.14	Θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη και του ξηραντήρα.....	131
2.7.15	Αποτελεσματικότητα της ξήρανσης.....	133
2.7.16	Αξιολόγηση ποιότητας και οφέλη εξοικονόμησης ενέργειας.....	133
2.7.17	Συμπεράσματα.....	133
2.8	Ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας – βιομάζας χωρίς φορτίο.....	134
2.8.1	Πυθμίσεις παραμέτρων υβριδικού συστήματος ηλιακής ενέργειας και βιομάζας.....	134
2.8.2	Ηλιακός συλλέκτης.....	134
2.8.3	Θάλαμος ξήρανσης.....	134
2.8.4	Θερμική εφεδρική μονάδα	134
2.8.5	Πειραματική διάταξη και όργανα.....	134
2.8.6	Αποτελέσματα και συζήτηση για τον υβριδικό ξηραντήρα χωρίς φορτίο.....	135
2.8.7	Συμπεράσματα.....	138

3 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Γεωθερμία.....	139
3.1.1 Γεωθερμικά πεδία.....	139
3.1.2 Προέλευση των γεωθερμικών ρευστών.....	141
3.1.3 Γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας.....	142
3.1.4 Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας.....	142
3.1.5 Εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας.....	143
3.2 Ξήρανση γεωργικών προϊόντων με γεωθερμική ενέργεια.....	144
3.2.1 Βασικά στοιχεία.....	144
3.2.2 Ο αέρας ως ρευστό ξήρανσης.....	144
3.2.3 Εναλλάκτες θερμότητας και γεωθερμική ενέργεια.....	144
3.2.4 Γεωθερμική πηγή	145
3.2.5 Διαδικασίες προ – ξήρανσης και μετα – ξήρανσης.....	145
3.2.6 Ξηραντήρες γεωθερμικής ενέργειας.....	146
3.2.6.1 Σχεδιασμός ξηραντήρων.....	146
3.2.6.2 Ξηραντήρες συναγωγής	146
3.2.6.3 Τύποι ξηραντήρων συναγωγής.....	147
3.2.6.4 Ξηραντήρες θαλάμου.....	147
3.2.6.5 Ξηραντήρες σήραγγας (διαδρόμου).....	148
3.2.6.6 Ξηραντήρες μεταφορέα.....	149
3.2.6.7 Ξηραντήρες τυμπάνου.....	150
3.2.6.8 Ξηραντήρες πεπιεσμένου αέρα.....	151
3.3 Εφαρμογές ξήρανσης με γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα.....	152
3.3.1 Μονάδα αφυδάτωσης ντομάτας με χρήση γεωθερμικής ενέργειας	152
3.3.2 Περιγραφή της μονάδας και της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας	152
3.3.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις	154
3.3.4 Συμπεράσματα	155
3.4 Εφαρμογές ξήρανσης με γεωθερμική ενέργεια σε άλλες χώρες.....	156
3.4.1 Γεωθερμική μονάδα ξήρανσης ρυζιού.....	156
3.4.2 Ξηραντήρας γεωθερμίας για ξήρανση φρούτων	156
3.4.2.1 Σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας.....	158
3.4.2.2 Σχεδιασμός μονάδας ανεμιστήρα.....	160
3.4.2.3 Εκτιμώμενα κόστη.....	161
3.4.2.4 Συμπεράσματα.....	161
4 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	162

1

ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Αναγκαιότητα χρήσης ηλιακών ξηραντήρων

Σε πολλές αγροτικές περιοχές στην Αφρική και στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες, η διασυνδεδεμένη ηλεκτρική ενέργεια και οι προμήθειες άλλων μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι δυσεύρετες, αναξιόπιστες ή για πολλούς αγρότες πολύ ακριβές. Επομένως σε τέτοιες περιοχές, τα συστήματα ξήρανσης καλλιεργειών που χρησιμοποιούν μηχανοκίνητους ανεμιστήρες και ηλεκτρική θέρμανση είναι ακατάλληλα. Τα υψηλά αρχικά και λειτουργικά κόστη των ξηραντήρων ορυκτών καυσίμων παρουσιάζουν τέτοια εμπόδια που σπάνια υιοθετούνται από αγρότες μικρής κλίμακας.

Η παραδοσιακή φυσική ηλιακή ξήρανση που χρησιμοποιείται ευρέως από τους αγρότες έχει κάποιους περιορισμούς. Υψηλές απώλειες καλλιεργειών που οφείλονται σε ανεπαρκή ξήρανση, προσβολή από μύκητες, καταπάτηση από έντομα, πουλιά και τρωκτικά, απροσδόκητες βροχές και άλλα καιρικά φαινόμενα.

Σε τέτοιες συνθήκες οι ξηραντήρες ηλιακής ενέργειας αποτελούν μια ελκυστική οικονομική πρόταση. Οι κλιματικές συνθήκες έχουν μεγάλη επιρροή στην έκταση των απωλειών καλλιεργειών και στην αλλοίωση κατά τη διάρκεια της ηλιακής ξήρανσης. Αν ένα κλίμα είναι θερμό και ξηρό, οι καλλιέργειες μπορούν να ξηρανθούν στον αγρό. Για να είναι αυτό εφικτό, η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της περιόδου συγκομιδής πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή ώστε να εξασφαλίζει ότι η καλλιέργεια, όταν ξηρανθεί μέχρι την υγρασία ισορροπίας, μπορεί να αποθηκευτεί με ασφάλεια. Τα μετεωρολογικά δεδομένα, ακόμα και για τις πιο ευνοημένες περιοχές, δείχνουν ότι αυτό δεν είναι πάντα εφικτό [1]. Η καλλιέργεια απαιτεί επίσης ανεπιθύμητα μεγάλη περίοδο για να φτάσει την υγρασία ισορροπίας.

Σε θερμά και υγρά κλίματα, η αλλοίωση των καλλιεργειών είναι προφανώς χειρότερη, καθώς η ζέστη και η υγρασία προωθούν την ανάπτυξη μυκήτων, βακτηρίων, ακάρεων και εντόμων στις καλλιέργειες. Η ζέστη και η ξηρασία είναι ευνοϊκές συνθήκες για τη φυσική ηλιακή ξήρανση.

Δυστυχώς, οι τροπικές περιοχές χαρακτηρίζονται από ζεστά και υγρά κλίματα. Αν η σχετική υγρασία του αέρα περιβάλλοντος είναι πολύ υψηλή για να διευκολύνει την ξήρανση στον αγρό, τέτοιος αέρας θα ήταν προφανώς περιορισμένης αξίας για την ξήρανση της καλλιέργειας [1]. Έτσι, αυτές οι κλιματικές συνθήκες υπαγορεύουν την ανάγκη για πιο αποτελεσματικές μεθόδους ξήρανσης.

1.2 Πώς γίνεται η ξήρανση

Σκοπός της ξήρανσης είναι να μειώσει την υγρασία ενός προϊόντος σε τέτοιο επίπεδο που να αποτρέπει την αλλοίωση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο ονομάζεται «χρόνος ασφαλούς αποθήκευσης» [2].

Η ξήρανση αποτελείται από δύο στάδια:

1. Μεταφορά θερμότητας από την πηγή θερμότητας στο προϊόν.
2. Μεταφορά υγρασίας από το εσωτερικό του προϊόντος στην επιφάνεια και από την επιφάνεια στον περιβάλλοντα αέρα.

Η ξήρανση περιλαμβάνει την εξαγωγή υγρασίας απ' το προϊόν μέσω της θέρμανσης και το πέρασμα της μάζας αέρα γύρω του ώστε να απομακρύνει τον απελευθερωμένο ατμό.

Σε συνθήκες περιβάλλοντος αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η τάση ατμών της υγρασίας του προϊόντος να ισούται με αυτήν της ατμόσφαιρας [1,2]. Τότε ο ρυθμός εκρόφησης υγρασίας απ' το προϊόν στο περιβάλλον και ο ρυθμός απορρόφησης απ' το περιβάλλον βρίσκονται σε ισορροπία και η υγρασία της καλλιέργειας σ' αυτό το σημείο λέγεται «υγρασία ισορροπίας».

Σε συνθήκες περιβάλλοντος η ξήρανση είναι αργή και σε περιοχές με υψηλή σχετική υγρασία, η υγρασία ισορροπίας είναι ανεπαρκώς χαμηλή για ασφαλή αποθήκευση [1,2].

Σκοπός του ξηραντήρα είναι να παρέχει στο προϊόν περισσότερη θερμότητα από αυτήν που είναι διαθέσιμη σε συνθήκες περιβάλλοντος, αυξάνοντας έτσι επαρκώς την τάση ατμών της υγρασίας

της καλλιέργειας και μειώνοντας σημαντικά τη σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης έτσι ώστε να αυξηθεί η ικανότητά του για μεταφορά υγρασίας, εξασφαλίζοντας μ' αυτόν τον τρόπο επαρκώς χαμηλή υγρασία ισορροπίας [2].

Στην ηλιακή ξήρανση, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται είτε ως μοναδική πηγή της απαιτούμενης θερμότητας είτε ως συμπληρωματική πηγή. Η ροή αέρα μπορεί να παραχθεί με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή. Η διαδικασία θέρμανσης μπορεί να περιλαμβάνει το πέρασμα προθερμασμένου αέρα μέσα απ' το προϊόν ή απευθείας έκθεση του προϊόντος στην ηλιακή ακτινοβολία ή συνδυασμό των δύο [2]. Η βασική απαίτηση είναι η μεταφορά θερμότητας στο υγρό προϊόν με συναγωγή και αγωγή από τον περιβάλλοντα αέρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες του προϊόντος ή με ακτινοβολία κυρίως απ' τον ήλιο και σε μικρότερο βαθμό από τις περιβάλλουσες θερμές επιφάνειες, ή με αγωγή από θερμαινόμενες επιφάνειες σε επαφή με το προϊόν [2]. Η απορρόφηση θερμότητας απ' το προϊόν παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την εξάτμιση του νερού απ' το προϊόν [1].

Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του προϊόντος είναι απλά εξάτμιση. Το νερό αρχίζει να εξατμίζεται απ' την επιφάνεια του υγρού προϊόντος όταν η απορροφημένη ενέργεια έχει αυξήσει τη θερμοκρασία του επαρκώς ώστε η τάση υδρατμών της υγρασίας του προϊόντος να ξεπεράσει την τάση ατμών του περιβάλλοντα αέρα.

Η αναπλήρωση υγρασίας στην επιφάνεια γίνεται με διάχυση από το εσωτερικό και αυτή η διαδικασία εξαρτάται απ' τη φύση του προϊόντος και από την περιεκτικότητά του σε υγρασία. Αν ο ρυθμός διάχυσης είναι αργός τότε γίνεται ο περιοριστικός παράγοντας της διαδικασίας ξήρανσης ενώ αν είναι επαρκώς γρήγορος τότε ο παράγοντας ελέγχου είναι ο ρυθμός εξάτμισης στην επιφάνεια [2]. Η τελευταία περίπτωση ισχύει στην έναρξη της ξήρανσης.

Στην ξήρανση άμεσης ακτινοβολίας μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας εισχωρεί στο υλικό και απορροφάται μέσα στο ίδιο το προϊόν, παράγοντας έτσι θερμότητα στο εσωτερικό και στην επιφάνεια, και κατά συνέπεια ενισχύοντας τη μεταφορά θερμότητας.

Η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας απ' το προϊόν είναι σημαντικός παράγοντας στην άμεση ηλιακή ξήρανση. Ευτυχώς, τα περισσότερα γεωργικά υλικά έχουν σχετικά υψηλές απορροφήσεις (μεταξύ 0.67 και 0.90) [3]. Η θερμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας είναι επίσης σημαντική, ειδικά αν το στρώμα ξήρανσης είναι τόσο βαθύ ώστε να χρειάζεται αγωγή θερμότητας μεταξύ των μοριών.

Για οικονομικούς λόγους απαιτούνται μέγιστοι ρυθμοί ξήρανσης, όμως η ποιότητα του προϊόντος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Επιπρόσθετα, η υπερβολική θερμοκρασία (η οποία μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς ιδιότητες της καλλιέργειας όπως τη βλαστικότητα) πρέπει να αποφεύγεται κατά την ξήρανση συγκεκριμένων καλλιεργειών.

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, μερικές καλλιέργειες έχουν την τάση να σχηματίζουν στρώματα ξηρής επιφάνειας τα οποία είναι αδιαπέραστα σε μετέπειτα μεταφορά υγρασίας αν ο ρυθμός ξήρανσης είναι πολύ ταχύς. Για να αποφευχθεί αυτό απαιτείται αποτελεσματικός έλεγχος της διαδικασίας ξήρανσης. Η μεταφορά θερμότητας και οι ρυθμοί εξάτμισης πρέπει να ελέγχονται έτσι ώστε να εξασφαλίζονται βέλτιστοι ρυθμοί ξήρανσης. Ο έλεγχος της διαδικασίας ξήρανσης στους ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας παρουσιάζει ένα μείζον πρόβλημα, καθώς τέτοιοι ξηραντήρες είναι σχεδιασμένοι να ελαχιστοποιούν τα αρχικά και λειτουργικά κόστη. Έτσι, ειδικοί μηχανισμοί ελέγχου είναι ακατάλληλοι. Η καλύτερη προσέγγιση είναι να ενσωματώνονται στο σχεδιασμό των ξηραντήρων τέτοια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που να εξασφαλίζουν ότι δεν επικρατούν ακραίες συνθήκες στον ξηραντήρα υπό τις προβλεπόμενες κλιματικές συνθήκες και ιδιότητες καλλιεργειών [2]. Μια τέτοια προσέγγιση, η οποία ρυθμίζει την περίοδο παραμονής του αέρα ξήρανσης στο θάλαμο ξήρανσης για ηλιακούς ξηραντήρες φυσικής συναγωγής είναι η ενσωμάτωση καμινάδων.

1.3 Τεχνικά στοιχεία ξήρανσης

1.3.1 Περιεκτικότητα σε υγρασία

Η ποσότητα υγρασίας σε ένα υλικό μπορεί να εκφραστεί είτε σε υγρή βάση είτε σε ξηρή βάση και μπορεί να εκφραστεί είτε ως δεκαδικός είτε ως ποσοστό. Η περιεκτικότητα σε υγρασία σε υγρή βάση είναι το βάρος της υγρασίας του προϊόντος ανά μονάδα βάρους υγρού υλικού.

$$M_{wb} = \frac{W_o - W_d}{W_o} \quad (1)$$

Η περιεκτικότητα σε υγρασία σε ξηρή βάση είναι το βάρος της υγρασίας του προϊόντος ανά μονάδα βάρους ξηρού υλικού.

$$M_{db} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (2)$$

$$\text{Percentage } M_{wb} = M_{wb} \times 100 \quad (3)$$

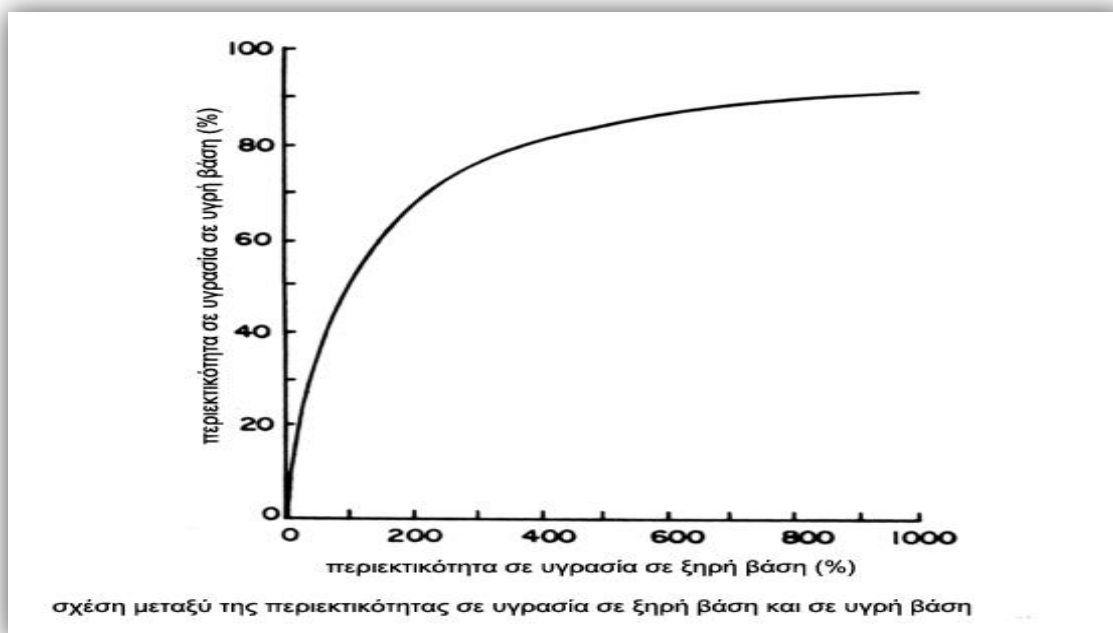
$$\text{Percentage } M_{db} = M_{db} \times 100 \quad (4)$$

Οι περιεκτικότητες σε υγρασία σε υγρή και ξηρή βάση συνδέονται με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{wb} = 1 - \left[\frac{1}{(M_{db} + 1)} \right] \quad (5)$$

$$M_{db} = \left[\frac{1}{(1 - M_{wb})} \right] - 1 \quad (6)$$

Η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρασία σε υγρή και σε ξηρή βάση απεικονίζεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1 [62]σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρασία σε ξηρή βάση και σε υγρή βάση

Η περιεκτικότητα σε υγρασία σε υγρή βάση χρησιμοποιείται για εμπορικούς σκοπούς, ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία σε ξηρή βάση τείνει να χρησιμοποιείται για προσδιορισμό μηχανολογικής έρευνας, επειδή η αλλαγή βάρους που σχετίζεται με κάθε ποσοστιαία μονάδα μείωσης υγρασίας σε ξηρή βάση είναι σταθερή σε αντίθεση με την υγρή βάση όπου η ποσότητα νερού που εμπλέκεται στην αφαίρεση υγρασίας κατά 1% αλλάζει καθώς η ξήρανση εξελίσσεται, επειδή το βάρος του νερού και το συνολικό βάρος καλλιέργειας αλλάζουν [33,36,37].

Για πειράματα ξήρανσης, όπου οι απώλειες βάρους καταγράφονται, η στιγμιαία περιεκτικότητα σε υγρασία σε κάθε δεδομένη στιγμή μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{tdb} = \left[\frac{(M_{odb} + 1)W_o}{W_t} \right] - 1 \quad (7)$$

$$M_{twb} = 1 - \left[\frac{(1 - M_{owb})W_o}{W_t} \right] \quad (8)$$

1.3.2 Η δράση του νερού

Η δράση του νερού a_w , είναι μέγιστης σημασίας για τη συντήρηση τροφίμων καθώς είναι μέτρο και κριτήριο της ανάπτυξης μικροοργανισμών και πιθανόν της απελευθέρωσης τοξινών, της ενζυματικής και μη ενζυματικής αμαύρωσης κλπ. Για κάθε τρόφιμο ή γεωργικό προϊόν υπάρχει ένα όριο δράσης κάτω απ' το οποίο οι μικροοργανισμοί σταματούν να αναπτύσσονται.

Ο Beuchat (1981) αναφέρει ότι η συντριπτική πλειοψηφία των βακτηρίων αναπτύσσονται περίπου σε $a_w = 0.85$, η μούχλα και η ζύμη περίπου σε $a_w = 0.61$, οι μύκητες σε $a_w < 0.70$ κλπ.

Σ' αυτές τις περιπτώσεις η δράση του νερού ρυθμίζεται λεπτομερώς, μετά την ξήρανση με την προσθήκη κάποιων διαλυμάτων σακχάρων, αμύλου κλπ. Το νερό στα τρόφιμα και στις γεωργικές καλλιέργειες, είναι στη μορφή ενός διαλύματος το οποίο περιέχει άλατα, σάκχαρα, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες κλπ., τα οποία σε σταθερή θερμοκρασία βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η δράση του νερού δίνεται απ' την ακόλουθη εξίσωση:

$$a_w = \left(p_w / p_w^* \right)_T \approx \varphi \quad (9)$$

όπου p_w είναι η μερική πίεση του διαλύματος νερού και p_w^* είναι η μερική πίεση του καθαρού νερού, στην ίδια θερμοκρασία, φ είναι η σχετική υγρασία του υλικού στην ίδια θερμοκρασία.

1.3.3 Υγρασία ισορροπίας

Μία καλλιέργεια έχει μία χαρακτηριστική τάση υδρατμών σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και σε μία συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε υγρασία. Αυτό καθορίζει αν η καλλιέργεια θα απορροφήσει ή θα εκροφήσει υγρασία με την έκθεση στον αέρα.

Έτσι, η υγρασία ισορροπίας ενός υγροσκοπικού προϊόντος αναφέρεται στην περιεκτικότητα σε υγρασία του προϊόντος αφότου έχει εκτεθεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον για μία απεριόριστα μεγάλη χρονική περίοδο. Σ' αυτή την περιεκτικότητα σε υγρασία, η τάση ατμών που ασκείται από την υγρασία μέσα στο προϊόν ισούται με την τάση ατμών του περιβάλλοντα αέρα.

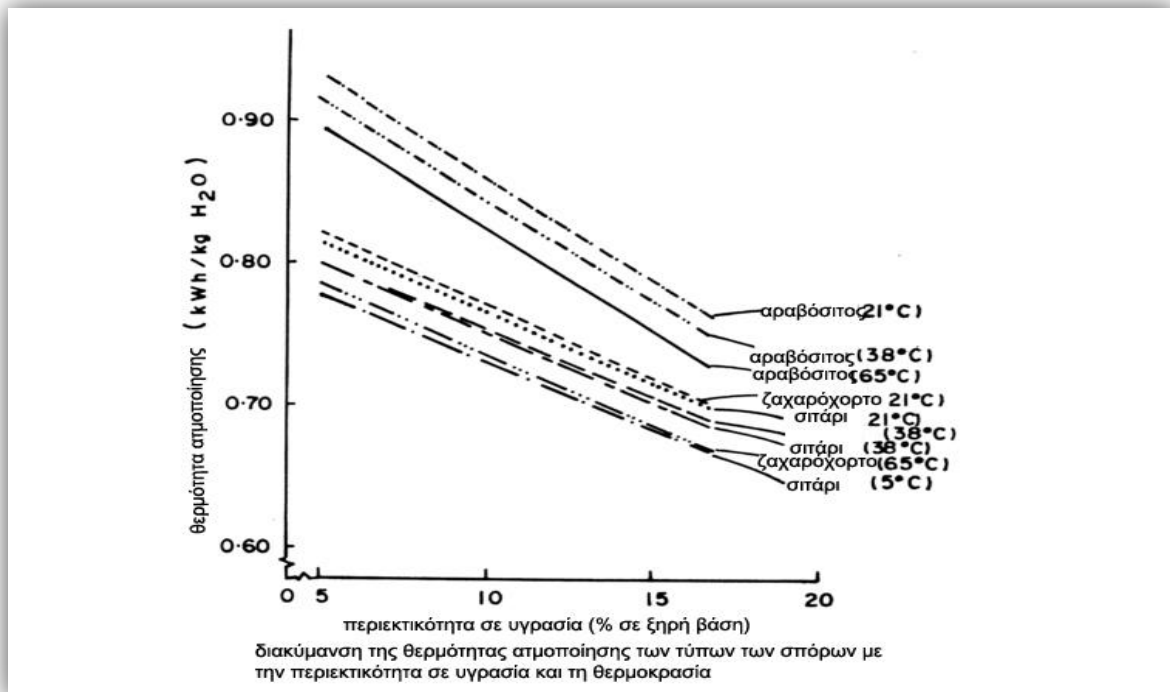
Αυτό υποδηλώνει μια κατάσταση ισορροπίας, έτσι ο ρυθμός εκρόφησης υγρασίας από το προϊόν στο περιβάλλον του ισούται με το ρυθμό απορρόφησης της υγρασίας του από το περιβάλλον. Η σχετική υγρασία του περιβάλλοντα αέρα σ' αυτή την κατάσταση (η οποία είναι επίσης σε ισορροπία με το περιβάλλον) είναι γνωστή ως σχετική υγρασία ισορροπίας.

Αν ο περιβάλλοντα αέρας αντικαθίσταται συνεχώς από αέρα χαμηλότερης τάσης ατμών, δημιουργείται ένα έλλειμμα ατμών και η καλλιέργεια συνεχίζει να εκροφεί υγρασία στον αέρα. Η υγρασία ισορροπίας επηρεάζεται από ορισμένες ιδιότητες όπως είδος, ωριμότητα και ιστορικό της καλλιέργειας (οι οποίες μπορεί να αλλάξουν σημαντικά τη χημική σύσταση της καλλιέργειας). Καλλιέργειες με υψηλή περιεκτικότητα σε λάδι τείνουν να απορροφούν λιγότερη υγρασία απ' το περιβάλλον σε σχέση με τις αμυλούχες καλλιέργειες [36].

Η υγρασία ισορροπίας μπορεί να καθοριστεί πειραματικά ελέγχοντας θερμοστατικά τη θερμοκρασία του αέρα σε ένα κλειστό χώρο που περιέχει την καλλιέργεια, ενώ η τάση ατμών του περιβάλλοντα αέρα ρυθμίζεται είτε με διάλυμα οξέος είτε με διάλυμα κορεσμένου αλατιού. Μία πιο ακριβής, αν και πιο ακριβή, μέθοδος καθορισμού της υγρασίας ισορροπίας είναι η χρήση ενός εκκενωμένου περιέκτη. Η θερμοκρασία και η τάση ατμών του κλειστού χώρου και η περιεκτικότητα σε υγρασία της καλλιέργειας καταγράφονται όταν η καλλιέργεια και το περιβάλλον της φτάσουν σε ισορροπία, δηλαδή όταν η διάχυση υγρασίας από την καλλιέργεια στο κενό σταματήσει. Τα διαγράμματα της υγρασίας ισορροπίας σε συνάρτηση με τη σχετική υγρασία σε σταθερή θερμοκρασία οδηγούν σε σιγμοειδείς καμπύλες που είναι γνωστές ως ισόθερμες υγρασίας ισορροπίας [36].

1.3.4 Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης

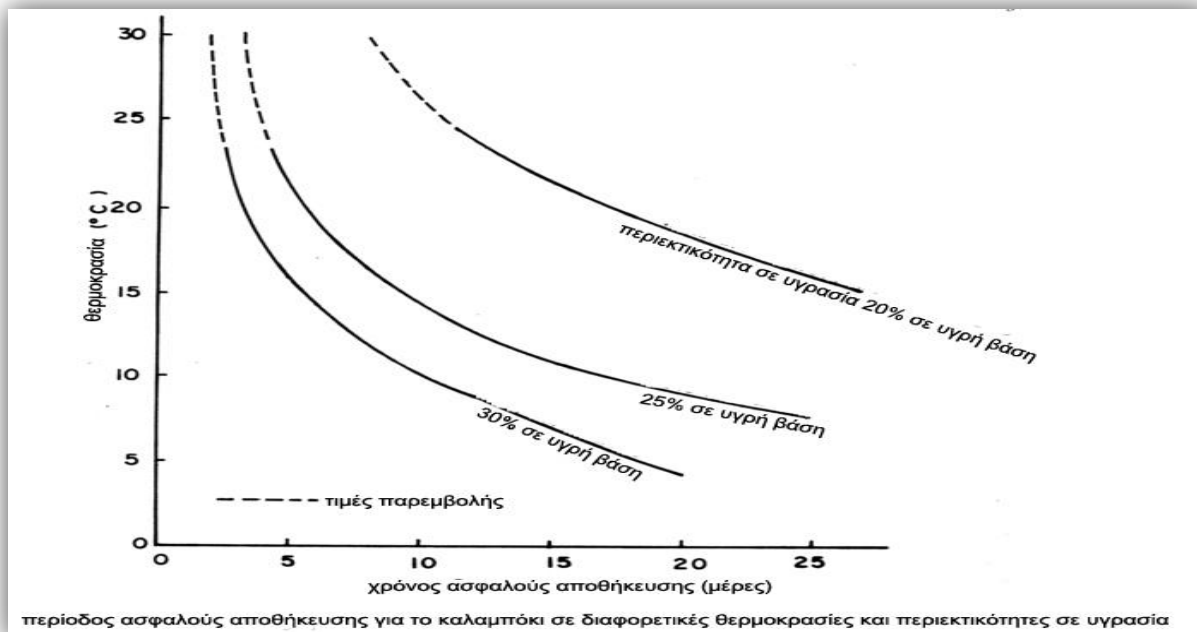
Αυτή είναι η ποσότητα ενέργειας που πρέπει να απορροφηθεί από το προϊόν για να εξατμίσει την υγρασία του. Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης απορροφάται από τον περιβάλλοντα αέρα καθώς ρέει δίπλα απ' το προϊόν. Εξαρτάται από το προϊόν, την περιεκτικότητα του σε υγρασία και τη θερμοκρασία. Όσο πιο υψηλή είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία και η θερμοκρασία, τόσο πιο χαμηλή είναι η θερμότητα ατμοποίησης. Η διακύμανση της θερμότητας ατμοποίησης μερικών σπόρων ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία και τη θερμοκρασία [36,38] φαίνεται στο Σχ. 2.



Σχ. 2 [62] διακύμανση της θερμότητας ατμοποίησης των τύπων των σπόρων με την περιεκτικότητα σε υγρασία και τη θερμοκρασία

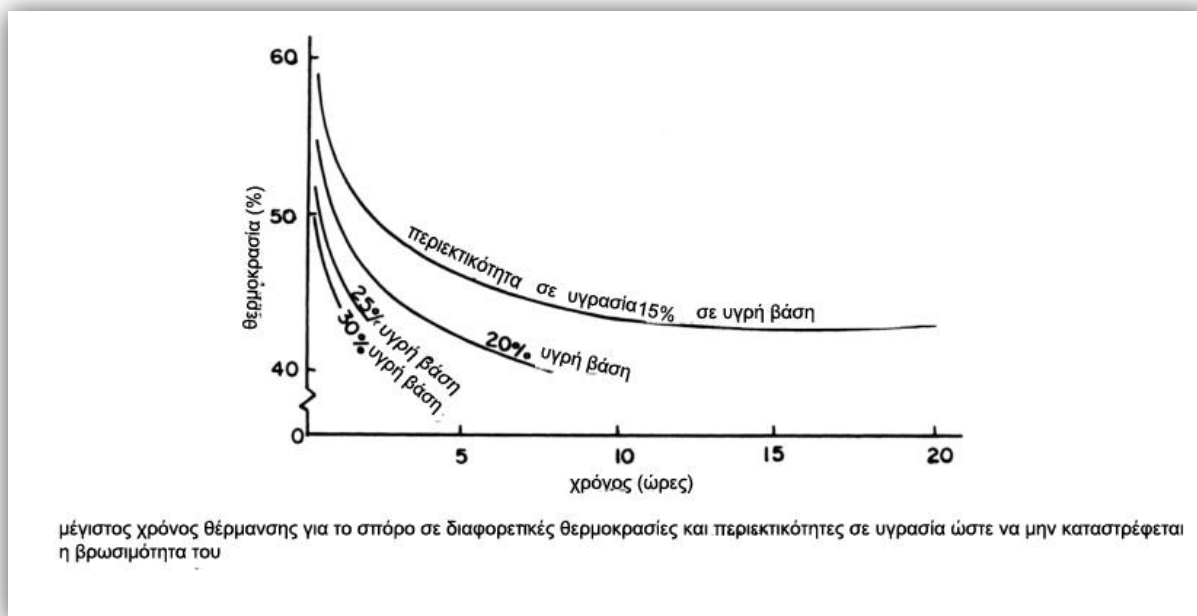
1.3.5 Χρόνος ασφαλούς αποθήκευσης

Αυτή είναι η περίοδος έκθεσης ενός προϊόντος με μία συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε υγρασία σε μία συγκεκριμένη σχετική υγρασία και θερμοκρασία κάτω απ' τις οποίες μπορεί να υπάρξει αλλοίωση και πέρα απ' τις οποίες η καλλιέργεια μπορεί να χειροτερέψει. Για να κρατηθούν οι απώλειες σε χαμηλό επίπεδο, οι καλλιέργειες πρέπει να ξηραίνονται στην περιεκτικότητα σε υγρασία ασφαλούς αποθήκευσης (δηλαδή την περιεκτικότητα σε υγρασία που απαιτείται για μακροπρόθεσμη αποθήκευση) μέσα στο χρόνο ασφαλούς αποθήκευσης. Σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές περιεκτικότητες σε υγρασία, η καλλιέργεια θα απαιτούσε σύντομο χρονικό διάστημα για να ξηρανθεί. Οι υψηλές θερμοκρασίες πρέπει να αποφεύγονται για καλλιέργειες που προορίζονται για αναφύτευση. Το Σχ. 3 δείχνει την περίοδο ασφαλούς αποθήκευσης για το καλαμπόκι σε διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεκτικότητες σε υγρασία [36,38] το οποίο δείχνει ότι, για ζεστά και υγρά κλίματα όπου οι καλλιέργειες συγκομίζονται σε σχετικά υψηλές περιεκτικότητες σε υγρασία, ο χρόνος ασφαλούς αποθήκευσης είναι μικρός.



Σχ. 3 [62]περίοδος ασφαλούς αποθήκευσης για το καλαμπόκι σε διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεκτικότητες σε υγρασία

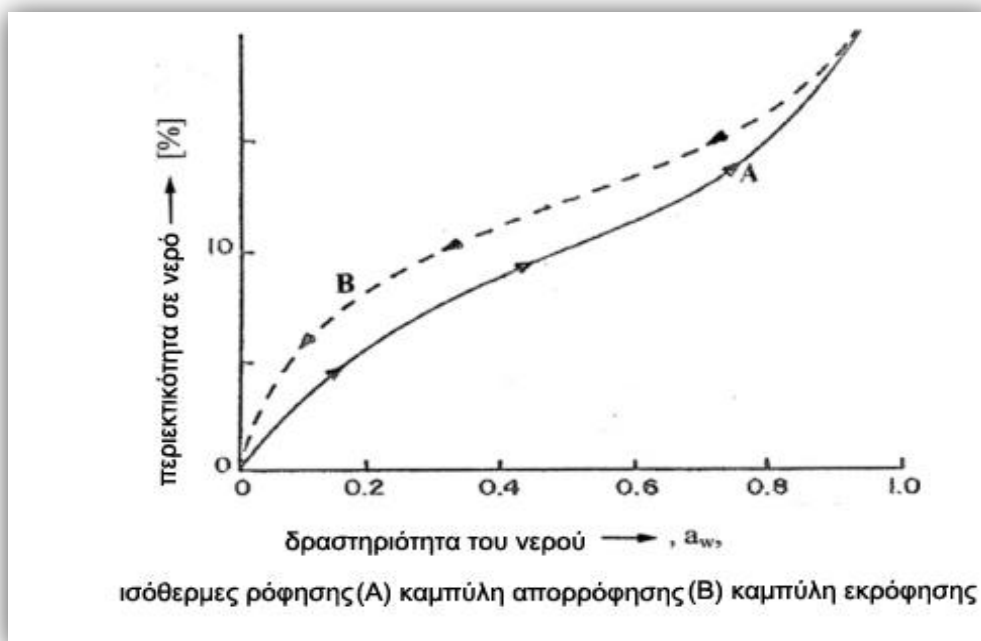
Μια απεικόνιση του μέγιστου χρόνου θέρμανσης για κάποιους σπόρους σε διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεκτικότητες σε υγρασία ο οποίος δε θα επηρεάσει τη βιωσιμότητα του σπόρου φαίνεται στο Σχ. 4 [38].



Σχ. 4 [38]μέγιστος χρόνος θέρμανσης για το σπόρο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεκτικότητες σε υγρασία ώστε να μην καταστρέφεται η βιωσιμότητα του

1.3.6 Ισόθερμες ρόφησης

Οι ισόθερμες ρόφησης είναι γραφικές αναπαραστάσεις της σχέσης μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρασία της αντίστοιχης δράσης του νερού a_w , σε ένα εύρος τιμών σε σταθερή θερμοκρασία. Το Σχ. 5 παρουσιάζει τις ισόθερμες απορρόφησης και εκρόφησης.



Σχ. 5 [63] Ισόθερμες ρόφησης (A) καμπύλη απορρόφησης (B) καμπύλη εκρόφησης

Είναι προφανές ότι υπάρχει μια μικρή υστέρηση στην εκ νέου απορρόφηση του νερού όταν το προϊόν έχει ξηρανθεί. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμα μαθηματικά μοντέλα, θεωρητικές, εμπειρικές και ημι-εμπειρικές σχέσεις, που έχουν αναπτυχθεί για διάφορα γεωργικά προϊόντα, καλλιέργειες, σπόρους κλπ. Τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ξήρανση τροφίμων περιγράφονται παρακάτω.

1.3.7 Οι εξισώσεις ρόφησης

Για την περιγραφή των φαινομένων ρόφησης έχει προταθεί ένας αριθμός μαθηματικών εξισώσεων αλλά μόνο οι εξισώσεις BET και GAB είναι ευρέως αποδεκτές ειδικά για καλλιέργειες. Βασίζονται στη θεωρία των μοριακών στρωμάτων του νερού που απορροφούνται στην επιφάνεια του υλικού, μία τροποποίηση για απορρόφηση πολλαπλών στρωμάτων, της μονοστρωματικής εξίσωσης μορίων νερού του Langmuir (1918):

$$a_w \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_{mon}} \right) = \frac{1}{C \cdot X} \quad (10)$$

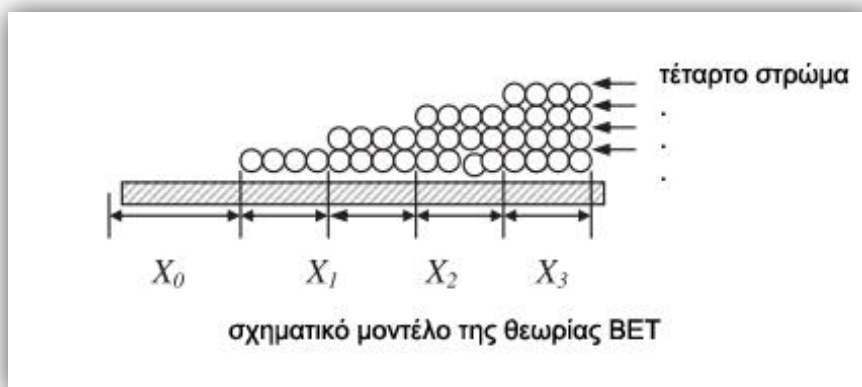
όπου X , η περιεκτικότητα σε υγρασία κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατήρησης, X_{mon} η μονοστρωματική περιεκτικότητα σε υγρασία και C η σταθερά του Langmuir.

Όπως φαίνεται στο σχηματικό μοντέλο του Kei στο Σχ. 6 (Τοει, 1996) θεωρείται ότι, αναφορικά με τα εξωτερικώς εκτεθειμένα μόρια σε κάθε στρώμα του πολλαπλού στρώματος, η δυναμική ισορροπία μεταξύ των ρυθμών προσρόφησης-εκρόφησης του Langmuir διατηρείται ακόμα για τα εκτεθειμένα μόρια σε κάθε στρώμα.

1.3.7.1 Η εξίσωση BET

Η εξίσωση BET (Brunauer, 1938) είναι μια τροποποίηση της προηγούμενης εξίσωσης του Langmuir, ευρέως αποδεκτή για τρόφιμα. Η εξίσωση έχει τη μορφή:

$$\frac{a_w}{(1-a_w) \cdot X} = \frac{1}{X_{mon} \cdot C} + \frac{C-1}{X_{mon} \cdot C} \cdot a_w \quad (11)$$



Σχ. 6 [63]σχηματικό μοντέλο της θεωρίας BET

Οι Chirife και Inglesias (1978) βρήκαν ότι για μια ποικιλία τροφίμων έχει αξιόπιστη εφαρμογή στην περιοχή δράσης νερού a_w , $0.45 < a_w < 0.50$. Ο Brunauer (1945) εξέφρασε αργότερα μία τροποποιημένη εξίσωση BET, για να υπολογίσει την περιεκτικότητα σε υγρασία, υποθέτοντας η στρώματα απορρόφησης:

$$X = \left[\frac{X_{mon} \cdot C \cdot a_w}{(1-a_w)} \right] \cdot \left[\frac{1 - [n+1] \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}}{1 - (C-1) \cdot a_w - C \cdot a_w^{n+1}} \right] \quad (12)$$

1.3.7.2 Η εξίσωση GAB

Η εξίσωση GAB (Guggenheim 1966, Anderson 1946, de Boer 1953) είναι το ευρύτερα αποδεκτό ισόθερμο μοντέλο καθώς ταιριάζει ισόθερμες προϊόντων σε ένα εύρος δράσης νερού από $a_w = 0$ έως $a_w = 0.99$ (Van der Berg, 1981, 1984). Είναι μία επέκταση των θεωριών Langmuir και BET:

$$\frac{X}{X_{mon}} = \frac{C_b \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C_b \cdot K \cdot a_w)} \quad (13)$$

όπου C_b και K είναι σταθερές σχετικές με τις ενθαλπίες ρόφησης. Όταν το K είναι μονάδα η εξίσωση είναι η εξίσωση BET.

Ο Singh (1996) ανέλυσε λεπτομερώς την εγκυρότητα του μοντέλου GAB για ισόθερμες μίας ποικιλίας τροφίμων. Πινακοποίησε, εκτιμώμενες παραμέτρους για το μοντέλο GAB που λήφθηκαν από διάφορους συγγραφείς και τις σύγκρινε με προβλεπόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία.

ζώνη ($X = X_{eq}, T = T_{in}$). B° : ζώνη ξήρανσης.

C : μη αποξηραμένη ζώνη ($X = X_{in}, T = T_{out}$)

1.3.8 Μοντέλα υγρασίας ισορροπίας

Έχουν γίνει προσπάθειες [39-55] στη θεωρητική, ημι-θεωρητική και εμπειρική μοντελοποίηση της υγρασίας ισορροπίας στις καλλιέργειες, κυρίως στους σπόρους δημητριακών. Οι θεωρητικές εξισώσεις υγρασίας ισορροπίας δεν έχουν κατορθώσει να προβλέψουν με ακρίβεια την υγρασία ισορροπίας των περισσότερων καλλιεργειών για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και σχετικών υγρασιών λόγω της υπέρ απλοποίησης των παραδοχών στην ανάπτυξη των μοντέλων. Ωστόσο, ενισχύουν την κατανόηση της φυσικής της ρόφησης υγρασίας. Καθαρὰ εμπειρικές εξισώσεις για συγκεκριμένες συνθήκες προσφέρουν καλύτερες εναλλακτικές μέχρι να αναπτυχθούν ακριβή θεωρητικά ή ημι-θεωρητικά μοντέλα.

Η εξίσωση (14) περιγράφει ένα μοντέλο του Kelvin [39] το οποίο εξετάζει την απορρόφηση υγρασίας σε ένα στερεό με βάση την τριχοειδή συμπύκνωση μέσα στους πόρους του υλικού. Η εξίσωση του Kelvin εκφράζει τη σχέση μεταξύ της τάσης ατμών για ένα υγρό σε ένα τριχοειδές και της τάσης κορεσμένων ατμών στην ίδια θερμοκρασία ως

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_{vs}}\right) = \frac{2\sigma V \cos a}{r'R_oT} \quad (14)$$

Το βασικό έλλειμμα του μοντέλου του Kelvin είναι ο περιορισμός του σε ένα εύρος υψηλής σχετικής υγρασίας (>95%) [36] όπου συμβαίνει η τριχοειδής συμπύκνωση. Το ισοθερμικό μοντέλο υγρασίας ισορροπίας του Langmuir [40] είναι βασισμένο στο κλασσικό κινητικό μοντέλο της ισορροπίας των ρυθμών εξάτμισης και συμπύκνωσης του ατμού για μια μονοστοιβάδα υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια των υλικών. Αυτό δίνει τον όγκο του νερού που απορροφάται από ένα προϊόν ισοθερμικά σε μία τάση ατμών P_v ως,

$$V_v = V_m \left[\frac{bP_v}{(1+bP_v)} \right] \quad (15)$$

Ο περιορισμός αυτού του μοντέλου είναι ότι δεν αντιπροσωπεύει την πολυστρωματική απορρόφηση και την αλληλεπίδραση μεταξύ των απορροφούμενων μορίων νερού [36]. Ο Brunauer [41] τροποποίησε το μοντέλο του Langmuir ώστε να αντιπροσωπεύει την πολυστρωματική απορρόφηση θεωρώντας ότι οι εσωτερικές επιφάνειες του υλικού αποτελούνται από μία διάταξη χώρων απορρόφησης ικανή να απορροφήσει περισσότερα από ένα μόρια νερού, σε αντίθεση με την υπόθεση του Langmuir για μονοστοιβάδα απορρόφησης υγρασίας.

$$\frac{P_v}{V_v(P_{vs} - P_v)} = \frac{1}{V_m c} + \left(\frac{c-1}{V_m c} \right) \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \quad (16)$$

Η εξίσωση (17) από τους Harkins και Jura [42], βασισμένη στη θεωρία ύπαρξης ενός δυναμικού πεδίου πάνω απ' τις επιφάνειες του υλικού, θεωρεί μία ισορροπία μεταξύ του έργου που απαιτείται για να απορροφηθεί ή να εκροφηθεί ένα μόριο νερού και το άθροισμα του έργου έναντι του δυναμικού πεδίου για να έρθει ένα μόριο ατμού στην επιφάνεια και της ενέργειας συμπύκνωσης,

$$\ln(P_v / P_{vs}) = d - e/V_v^2 \quad (17)$$

Η εξίσωση (18) που αναπτύχθηκε από τον Smith [43] θεωρεί ότι η απορροφημένη υγρασία αποτελείται από δεσμευμένη υγρασία που κρατείται από διαμοριακές δυνάμεις οι οποίες είναι μεγαλύτερες απ' τις δυνάμεις για συμπύκνωση και από αδέσμευτη (κανονικά συμπυκνωμένη) υγρασία. Αυτό το μοντέλο θεωρεί το πολυστρωματικό σενάριο του Brunauer [41] για τη συμπυκνωμένη υγρασία και χρησιμοποιεί το μοντέλο του Langmuir [40] για τη σχέση μεταξύ της δεσμευμένης υγρασίας και της σχετικής υγρασίας.

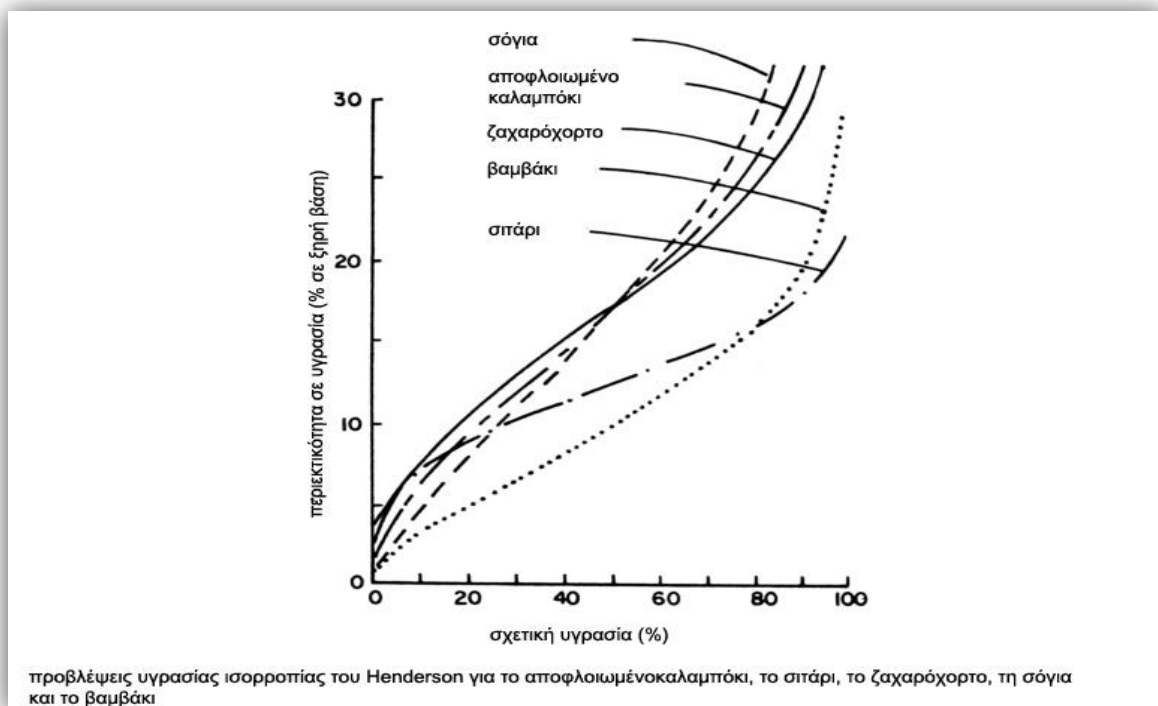
$$V_v = f - g \ln(1 - P_v / P_{vs}) \quad (18)$$

Το ημι-θεωρητικό μοντέλο του Henderson [44] που είναι το πιο ευέλικτο μοντέλο υγρασίας ισορροπίας μέχρι στιγμής, εκφράζει τη σχέση μεταξύ της υγρασίας ισορροπίας και της σχετικής υγρασίας ισορροπίας σε μία δεδομένη θερμοκρασία ως,

$$1 - \phi_e = e^{-kTM^n} \quad (19)$$

Το Σχ. 7 δείχνει τα διαγράμματα των προβλέψεων του Henderson για τις ακόλουθες καλλιέργειες:

- αποφλοιωμένο καλαμπόκι ($k = 1.10 \times 10^{-5}$, $n = 1.90$ at $T = 298 K$)
- σιτάρι ($k = 5.59 \times 10^{-7}$, $n = 3.03$ at $T = 305.2 K$)
- ζαχαρόχορτο ($k = 3.40 \times 10^{-6}$, $n = 2.31$ at $T = 294.1 K$)
- σόγια ($k = 3.20 \times 10^{-5}$, $n = 1.52$ at $T = 298 K$)
- βαμβάκι ($k = 4.91 \times 10^{-5}$, $n = 1.70$ at $T = 298 K$)

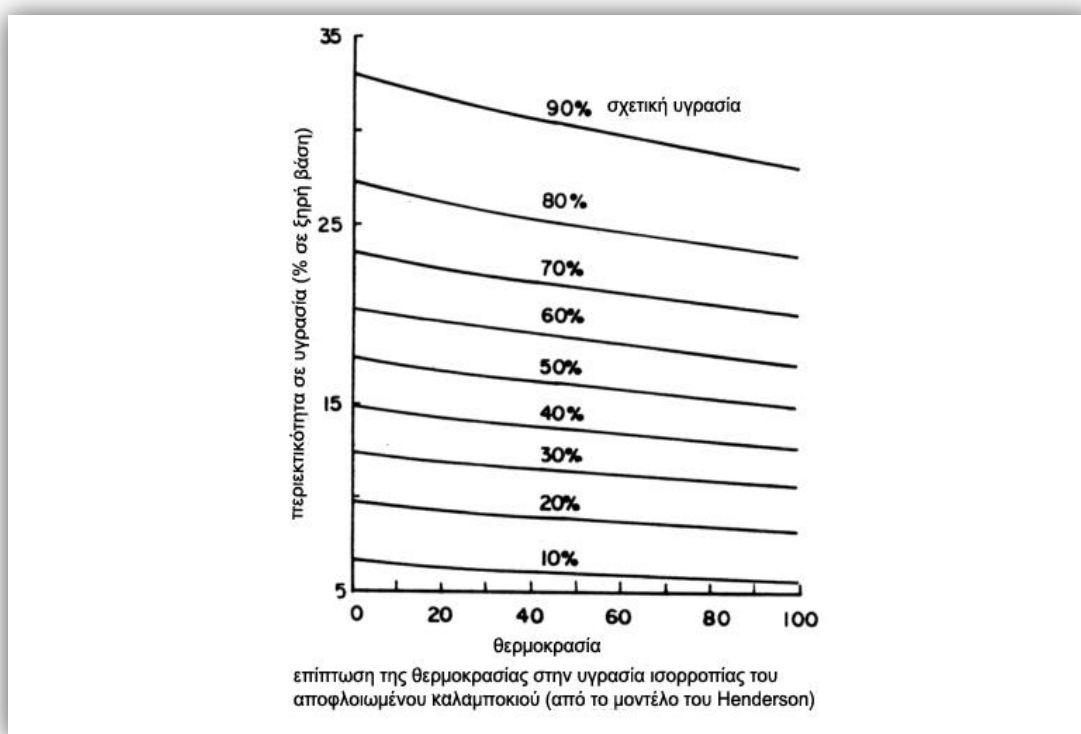


Σχ. 7 [62]προβλέψεις υγρασίας ισορροπίας του Henderson για το αποφλοιωμένο καλαμπόκι , το σιτάρι , το ζαχαρόχορτο ,τη σόγια και το βαμβάκι

Αναδιάταξη της εξίσωσης (19) δίνει τη σχέση μεταξύ της υγρασίας ισορροπίας και της θερμοκρασίας σε σταθερή σχετική υγρασία, ως,

$$\frac{\ln(1 - \phi_e)}{-KT} = M_e^n \quad (20)$$

Το Σχ. 8 [44] δείχνει ότι η υγρασία ισορροπίας σε μία δεδομένη σχετική υγρασία ποικίλει ελάχιστα με τη θερμοκρασία για ένα μικρό θερμοκρασιακό εύρος, με το καθαρό αποτέλεσμα να είναι μία ελαφρά μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία σ' αυτή τη σχετική υγρασία.



Σχ. 8 [44]επίπτωση της θερμοκρασίας στην υγρασία ισορροπίας του αποφλοιωμένου καλαμποκιού(από το μοντέλο του Henderson)

Έχουν γίνει αρκετές εμπειρικές τροποποιήσεις στην εξίσωση του Henderson ώστε να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια συγκεκριμένες περιπτώσεις. Οι Day και Nelson [19] τροποποίησαν την εξίσωση του Henderson για το σιτάρι,

$$1 - \varphi_e = e^{-jM_e^k} \quad (21)$$

όπου $j = 5.7336 \times 10^{-10} T^{3.3718}$ and $K = 14.863 T^{-0.41733}$

Η εμπειρική τροποποίηση του Thompson [52] για το καλαμπόκι ήταν της μορφής,

$$1 - \varphi_e = e^{-a'(T+50)M_e^{b'}} \quad (22)$$

όπου $a' = -3.8195 \times 10^5$ and $b' = 2$

Μία καθαρά εμπειρική εξίσωση, που αναπτύχθηκε από τον Haynes [53], έδωσε την ακόλουθη σχέση για την υγρασία ισορροπίας των σπόρων.

$$\ln P_v = p_1 + p_2 \ln P_{vs} + p_3 \ln M_e + p_4 \ln P_{vs}^2 + p_5 \ln P_{vs} M_e \quad (23)$$

όπου $p_1 - p_5$ είναι σταθερές του προϊόντος.

Η εξίσωση του Haynes δίνει καλή συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα μέσα στα εύρη θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για τα οποία έχουν καθοριστεί οι σταθερές του προϊόντος [36]. Οι Bakker-Arkema [54] ανέπτυξαν κι αυτοί μία σειρά εμπειρικών εξισώσεων για αποφλοιωμένο καλαμπόκι, κάθε μια απ' τις οποίες αντιστοιχεί σε κάποιο μικρό εύρος σχετικής υγρασίας, οι οποίες δίνουν λογική συμφωνία με πειραματικά δεδομένα μέσα στο θερμοκρασιακό εύρος $4^\circ \text{C} - 60^\circ \text{C}$ [55].

1.3.9 Ρυθμοί ξήρανσης

Τα γεωργικά προϊόντα διαφέρουν από τα υπόλοιπα υλικά που ξηραίνονται συχνά, όπως τα υφάσματα σε ένα πλυντήριο, η άμμος, η πέτρα, η σκόνη ή το χαρτί. Τα τελευταία υλικά είναι γνωστά ως μη υγροσκοπικά, και η υγρασία μέσα τους κρατείται χαλαρά και θεωρείται ως αδέσμευτη [35]. Για γεωργικά προϊόντα (τα οποία είναι υγροσκοπικά), η υγρασία που κρατείται μέσα τους είναι συνήθως δεσμευμένη υγρασία, όπως η υγρασία που παγιδεύεται σε κλειστά τριχοειδή αγγεία, το συστατικό νερό χυμών ή νερού που κρατείται από επιφανειακές δυνάμεις καθώς και το αδέσμευτο νερό που κρατείται μέσα στο υλικό από την επιφανειακή τάση του ίδιου του νερού. Για μη υγροσκοπικά υλικά, η ξήρανση μπορεί να συνεχιστεί μέχρι μηδενική περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ για γεωργικά προϊόντα, υπάρχει πάντα εναπομένουσα υγρασία [35].

Όταν ένα προϊόν θερμαίνεται σε σταθερή περιεκτικότητα σε υγρασία, η τάση ατμών του αυξάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση της υγρασίας στο περιβάλλον της το οποίο βρίσκεται σε χαμηλότερη τάση ατμών. Ο ρυθμός ροής της υγρασίας είναι μόνο περίπου ανάλογος με τη διαφορά της τάσης ατμών του προϊόντος και του περιβάλλοντος λόγω της αντίστασης της καλλιέργειας στη ροή υγρασίας. Υπάρχουν δύο βασικές περιόδους ρυθμού ξήρανσης για τα γεωργικά προϊόντα, η περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης και η περίοδος φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης.

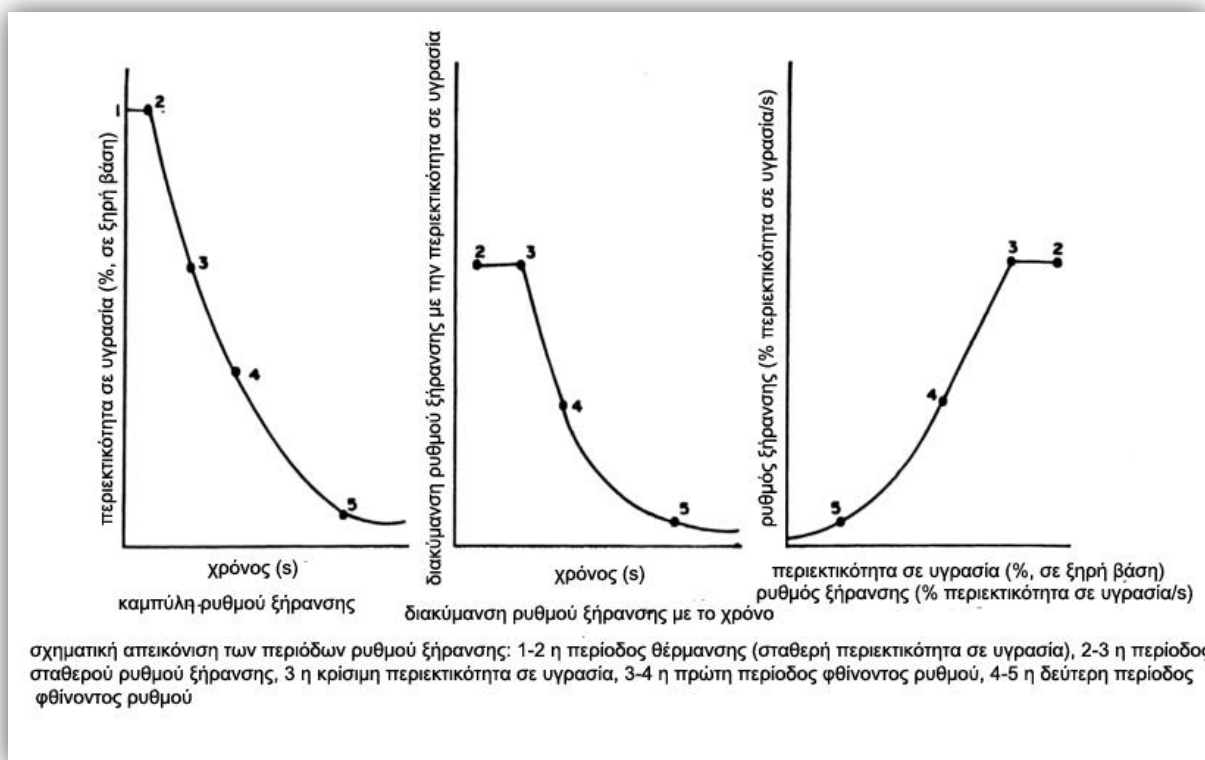
1.3.9.1 Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης

Κατά τη διάρκεια της περιόδου σταθερού ρυθμού ξήρανσης (Σχ. 9 [33]), η ξήρανση λαμβάνει χώρα από την επιφάνεια του προϊόντος και είναι απλά η εξάτμιση υγρασίας από την χωρίς νερό επιφάνεια. Ο ρυθμός αφαίρεσης υγρασίας κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες περιβάλλοντος και επηρεάζεται μόνο λίγο από τη φύση του προϊόντος. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η επιφάνεια του προϊόντος είναι κορεσμένη σε υγρασία με τη θερμοκρασία της σχεδόν σταθερή και περίπου ίση με τη θερμοκρασία υγρού βολβού. Το τέλος της περιόδου σταθερού ρυθμού ξήρανσης χαρακτηρίζεται από μία μείωση στο ρυθμό μετάβασης της υγρασίας από το εσωτερικό του προϊόντος, αρκετή ώστε να αναπληρώσει την υγρασία που εξατμίζεται από την επιφάνεια. Σε αυτό το στάδιο, που καθορίζει την κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία (Σχ. 9), οι περιβαλλοντικές συνθήκες παύουν να παίζουν μεγάλο ρόλο στο ρυθμό ξήρανσης. Για μη υγροσκοπικά υλικά, όλη η ξήρανση λαμβάνει χώρα μέσα στην περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης.

Περιβαλλοντικοί παράγοντες, και συγκεκριμένα η διαφορά της τάσης ατμών μεταξύ του αέρα ξήρανσης και της υγρής επιφάνειας, η έκταση επιφάνειας του προϊόντος που εκτίθεται στον αέρα ξήρανσης, ο συντελεστής μεταφοράς μάζας και η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης, σχετίζονται με το ρυθμό ξήρανσης σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση [33,56],

$$\frac{dw}{dt} = \frac{K_m A_s}{R_o T} (P_v - P_{va}) = K_f \frac{A(T_a - T_s)}{L} \quad (24)$$

Η θερμική αγωγιμότητα του φιλμ αέρα, K_f , είναι συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα.



Σχ. 9 [33]σχηματική απεικόνιση των περιόδων ρυθμού ξήρανσης

1.3.9.2 Περίοδος φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης

Η κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία του προϊόντος, που είναι η ελάχιστη περιεκτικότητα σε υγρασία στην οποία ο ελάχιστος ρυθμός μεταφοράς ελεύθερης υγρασίας από το εσωτερικό του προϊόντος προς την επιφάνεια ισούται με το μέγιστο ρυθμό εξάτμισης υγρασίας από την επιφάνεια [33], είναι μια συνθήκη ισορροπίας. Κάτω απ' την κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία είναι η περίοδος φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης (Σχ. 9). Αυτό το σύστημα ρυθμού ξήρανσης εξαρτάται ουσιαστικά από το ρυθμό διάχυσης υγρασίας από το εσωτερικό του προϊόντος προς την επιφάνεια και επίσης από την αφαίρεση υγρασίας από την επιφάνεια. Χωρίζεται συνήθως σε δύο στάδια, και συγκεκριμένα [33]:

- Την πρώτη περίοδο φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης που περιλαμβάνει την ξήρανση της ακόρεστης επιφάνειας,
- Τη δεύτερη περίοδο φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης όπου ο ρυθμός διάχυσης υγρασίας προς την επιφάνεια είναι αργός και είναι ο καθοριστικός παράγοντας.

Για γεωργικά προϊόντα, η διάρκεια καθεμιάς απ' αυτές τις περιόδους εξαρτάται από την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία και την περιεκτικότητα σε υγρασία ασφαλούς αποθήκευσης. Για σπόρους, η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία είναι συνήθως κάτω απ' την κρίσιμη, έτσι όλη η ξήρανση λαμβάνει χώρα μέσα στην περίοδο φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης. Ωστόσο, για τα φρούτα, τα περισσότερα λαχανικά και τις περισσότερες τροπικές καλλιέργειες κονδύλων, η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία είναι συνήθως πάνω απ' την κρίσιμη, έτσι η ξήρανση αυτών των προϊόντων λαμβάνει χώρα και μέσα στην περίοδο σταθερού ρυθμού και μέσα στην περίοδο φθίνοντος ρυθμού. Οι εξωτερικοί παράγοντες καθώς και οι εσωτερικοί μηχανισμοί που ελέγχουν τις διαδικασίες ξήρανσης στις δύο βασικές περιόδους είναι σημαντικοί για τον καθορισμό του συνολικού ρυθμού ξήρανσης των προϊόντων.

1.3.10 Ανάλυση ξήρανσης λεπτού στρώματος

Μία υπόθεση εγγενής στα μοντέλα υγρασίας ισορροπίας είναι ότι ο εξερχόμενος αέρας βρίσκεται σε ισορροπία ατμών με την υγρασία του υλικού. Αυτή είναι μία συνθήκη μέγιστου ρυθμού ξήρανσης η οποία δεν είναι η συνήθης κατάσταση. Έτσι, ο ρυθμός ξήρανσης ποικίλει με άλλες παραμέτρους τις οποίες η ανάλυση ξήρανσης υγρασίας ισορροπίας αγνοεί.

Στη συμβατική προσέγγιση της μοντελοποίησης της ξήρανσης λεπτού στρώματος, η υπόθεση είναι ότι ο λόγος του όγκου του αέρα προς τον όγκο της καλλιέργειας είναι απείρως μεγάλος. Έτσι, καθορίζει έναν χαρακτηριστικό ρυθμό ξήρανσης που εξαρτάται μόνο από τον τύπο και το μέγεθος του σπόρου, την περιεκτικότητα σε υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης [37]. Ο συνδυασμός εξωτερικών επιδράσεων, όπως αντιπροσωπεύεται από την κινητήρια δύναμη της κίνησης της υγρασίας και οι εσωτερικοί παράγοντες της αντίστασης της καλλιέργειας στη ροή υγρασίας, μπορούν να παρασταθούν ξαναγράφοντας την εξίσωση (24) ως [33],

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{P_v - P_{va}}{(1/K_m A_s) R_o T} = -\frac{K_m A_s (P_v - P_{va})}{R_o T} \quad (25)$$

Το $(P_v - P_{va})$ αντιπροσωπεύει την εξωτερική κινητήρια δύναμη λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, ενώ το $(1/K_m A_s)$ είναι η παράμετρος αντίστασης της καλλιέργειας. Μία παρόμοια εξίσωση από τον Hukill [57] συσχετίζει τη μεταφορά μάζας μεταξύ ενός υλικού και του αέρα ξήρανσης με το ρυθμό ξήρανσης ως,

$$\frac{dM}{dt} = -c'(P_v - P_{va}) \quad (26)$$

όπου

$P_v > P_{va}$ συνεπάγεται ότι η ξήρανση λαμβάνει χώρα

$P_v = P_{va}$ συνεπάγεται μία συνθήκη ισορροπίας και όχι καθαρή μεταφορά υγρασίας

$P_v < P_{va}$ συνεπάγεται επαναπορρόφηση υγρασίας απ' το υλικό

Υποθέτοντας μία γραμμική σχέση μεταξύ του P_v και της περιεκτικότητας σε υγρασία του υλικού και υποθέτοντας επίσης ότι το P_{va} είναι ανάλογο της σχετικής υγρασίας ισορροπίας, η οποία είναι, με τη σειρά της, γραμμική με την υγρασία ισορροπίας στο εύρος των τιμών στο οποίο λαμβάνει χώρα η ξήρανση (Σχ. 7), τότε η εξίσωση (26) μπορεί να ξαναγραφτεί ως,

$$\frac{dM}{dt} = -K'(M_t - M_e) \quad (27)$$

Το μείον υποδηλώνει τη μείωση της υγρασίας με το χρόνο.

Χωρίζοντας τις μεταβλητές και ολοκληρώνοντας στα χρονικά όρια 0 και t, και στα όρια περιεκτικότητας σε υγρασία M_o και M_e , η λύση της εξίσωσης (27) γίνεται,

$$\frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)} = e^{-K't} \quad (28)$$

Εισάγοντας τον παράγοντα σχήματος της καλλιέργειας, a [58], η εξίσωση (28) γίνεται,

$$\frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)} = e^{-aK't} \quad (29)$$

Ένα καθαρά θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Luikov [59] για την περιγραφή της ξήρανσης για τριχοειδή πορώδη προϊόντα βασίστηκε σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς διάχυσης υγρασίας, όπως τη μεταφορά ατμών λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης υγρασίας (διάχυση ατμών), τη

διάχυση ατμών εξαρτώμενη από τη βαθμίδα θερμοκρασίας (θερμική διάχυση), τη μεταφορά νερού και ατμού λόγω διαφορών ολικής πίεσης (υδροδυναμική ροή), τη ροή υγρού εξαρτώμενη απ' τις επιφανειακές δυνάμεις (τριχοειδής ροή), τη μεταφορά υγρού εξαρτώμενη απ' τη βαθμίδα υγρασίας (διάχυση υγρού) και τη διάχυση υγρού εξαρτώμενη από τη διάχυση υγρασίας στις πορώδεις επιφάνειες (επιφανειακή διάχυση).

Το μοντέλο του Luϊκον είναι μία σειρά μερικών διαφορικών εξισώσεων της μορφής,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T + \nabla^2 k_{13} P \quad (30)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 k_{21} M + \nabla^2 k_{22} T + \nabla^2 k_{23} P \quad (31)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 k_{31} M + \nabla^2 k_{32} T + \nabla^2 k_{33} P \quad (32)$$

όπου k_{11} , k_{22} και k_{33} είναι συγκεκριμένοι φαινομενολογικοί συντελεστές και

k_{12} , k_{13} , k_{21} , k_{23} , k_{31} και k_{32} είναι συντελεστές σύζευξης.

Η εφαρμογή του μοντέλου του Luϊκον είναι περιορισμένη λόγω της έλλειψης γνώσης των φαινομενολογικών συντελεστών για τα περισσότερα γεωργικά προϊόντα. Οι συντελεστές σύζευξης αντιπροσωπεύουν τη συνδυασμένη επίδραση της υγρασίας, της θερμοκρασίας και των βαθμίδων ολικής πίεσης στη μεταφορά υγρασίας, ολικής μάζας και ενέργειας. Ωστόσο, επειδή οι διαφορές ολικής πίεσης είναι σημαντικές μόνο σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (πάνω απ' τις θερμοκρασίες ξήρανσης συνήθως) και υποθέτοντας ότι οι θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στο προϊόν είναι αμελητέες, οι όροι πίεσης και θερμοκρασίας στην εξίσωση (30) μπορούν να αμεληθούν, οδηγώντας σε μία πιο απλή μορφή του μοντέλου, οπότε,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M \quad (33)$$

Ο φαινομενολογικός συντελεστής k_{11} είναι γνωστός ως συντελεστής διάχυσης, D καθώς η μεταφορά υγρασίας μέσα στα περισσότερα προϊόντα είναι διάχυση. Για σταθερές τιμές του D η εξίσωση (33) μπορεί να ξαναγραφτεί ως,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{a}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (34)$$

όπου $a=0$ για επίπεδα, $a=1$ για κυλινδρικά σχήματα, και $a=2$ για σφαιρικά σχήματα [36].

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες που υποθέτονται για τη λύση της εξίσωσης (34) είναι [36],

$$M(r, 0) = M_o \quad (35)$$

και

$$M(r_o, t) = M_e \quad (36)$$

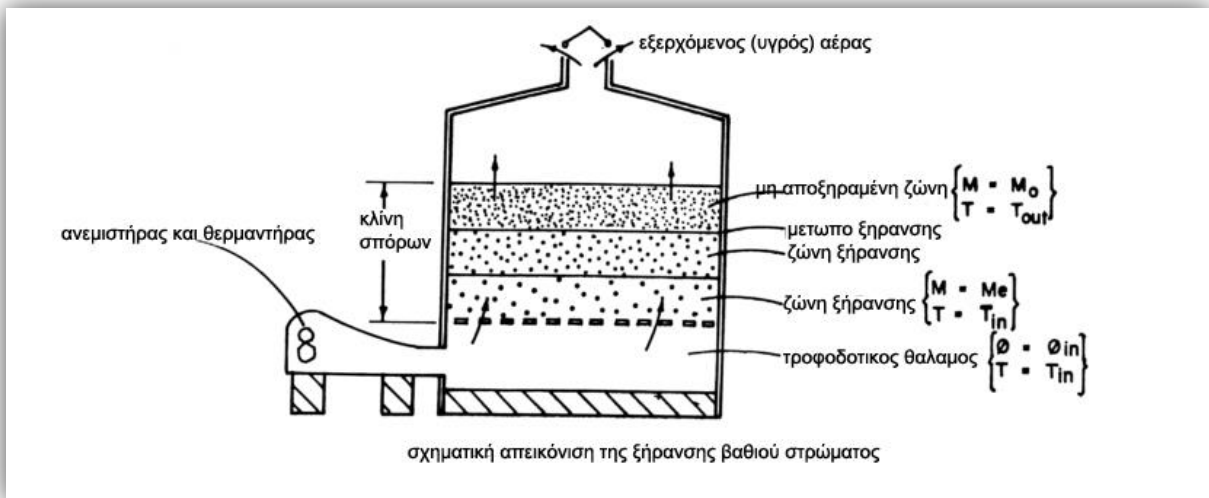
Πολλές εμπειρικές εξισώσεις έχουν προταθεί για τους ρυθμούς ξήρανσης μίας σειράς προϊόντων [36,52,60,61]. Το εμπειρικό μοντέλο του Thompson [52] για την πρόβλεψη του χρόνου ξήρανσης αναποφλοϊώτου καλαμποκιού στο θερμοκρασιακό εύρος $60^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}$ δίνεται ως,

$$t = A' \ln \left[\frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)} \right] + B' \left\{ \ln \left[\frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)} \right] \right\}^2 \quad (37)$$

όπου $A' = 1.86178 + 0.00488T$, $B' = 427.2640e^{-0.03301T}$.

1.3.11 Ανάλυση ξήρανσης βαθιάς κλίνης

Η γραφική απεικόνιση ενός συστήματος ξήρανσης βαθιάς κλίνης φαίνεται στο Σχ. 10.



Σχ. 10 [62]σχηματική απεικόνιση της ξήρανσης βαθιού στρώματος

Ο αέρας ξήρανσης κινείται από τον πυθμένα προς την κορυφή της κλίνης της καλλιέργειας. Γενικά, καθώς ο αέρας ξήρανσης κινείται δια μέσου της μάζας της καλλιέργειας, εξάγει υγρασία απ' την καλλιέργεια, υποθέτοντας ότι βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία και χαμηλότερη υγρασία. Αυτή η κίνηση της υγρασίας από την καλλιέργεια στον αέρα ξήρανσης λαμβάνει χώρα κυρίως σε ένα σαφώς καθορισμένο βάθος της κλίνης της καλλιέργειας που θεωρείται ως ζώνη ξήρανσης.

Στην έναρξη της ξήρανσης, αυτή η ζώνη βρίσκεται στον πυθμένα της κλίνης και κινείται προς τα πάνω στην κατεύθυνση του αέρα ξήρανσης καθώς η ξήρανση προχωράει μέχρι να περάσει από όλη τη μάζα της καλλιέργειας. Έτσι, η καλλιέργεια διατηρείται σε ισορροπία με τον αέρα ξήρανσης. Στο Σχ. 10, η καθορισμένη ζώνη ξήρανσης βρίσκεται στο μέσον της κλίνης της καλλιέργειας. Η μάζα της καλλιέργειας κάτω απ' αυτή τη ζώνη έχει φτάσει σε ισορροπία υγρασίας με τον αέρα ξήρανσης και έχει περιεκτικότητα σε υγρασία ίση με την υγρασία ισορροπίας, M_e . Στη μάζα της καλλιέργειας πάνω απ' τη ζώνη ξήρανσης, η ξήρανση δεν έχει αρχίσει, έτσι η καλλιέργεια έχει ακόμα την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία, M_o . Ο αέρας που περνάει απ' αυτή τη ζώνη είναι ακόμα σε ισορροπία με την αρχική υγρασία της καλλιέργειας. Καθώς ο αέρας ξήρανσης περνάει δια μέσου της μάζας της καλλιέργειας, δε λαμβάνει χώρα περαιτέρω ξήρανση κάτω απ' τη ζώνη ξήρανσης η οποία βρίσκεται σε ισορροπία υγρασίας με τον αέρα ξήρανσης.

Η ξήρανση λαμβάνει χώρα μόνο μέσα στη ζώνη ξήρανσης όπου υπάρχει διαφορά υγρασίας μέχρι ο αέρας να βρεθεί σε ισορροπία υγρασίας με το M_o , πάνω απ' το μετωπο ξήρανσης. Η εξαγωγή υγρασίας από την καλλιέργεια γίνεται με εξάτμιση, με αποτέλεσμα την ψύξη του αέρα ξήρανσης στην T_{out} . Έτσι, υπάρχει μία προκύπτουσα βαθμίδα περιεκτικότητας σε υγρασία από το M_e μέχρι το M_o , μία βαθμίδα θερμοκρασίας από την T_{in} μέχρι την T_{out} και, συνεπώς, μία

βαθμίδα σχετικής υγρασίας από την ϕ_{in} μέχρι την ϕ_{out} . Υποτίθεται ότι η θερμοκρασία της καλλιέργειας καθ' όλο το βάθος είναι ίση με τη θερμοκρασία του αέρα οποιαδήποτε στιγμή. Η βαθμίδα υγρασίας που δημιουργείται είναι ένα μέτρο του ρυθμού ξήρανσης. Για συστήματα ξήρανσης σταθερής κλίνης, το βάθος της κλίνης, ο ρυθμός ροής αέρα και η θερμοκρασία ξήρανσης είναι κρίσιμοι παράγοντες. Για ρηχές κλίνες καλλιεργιών κάτω από υψηλούς ρυθμούς ροής αέρα, η ζώνη ξήρανσης μπορεί να επεκτείνεται πλήρως διαμέσου της κλίνης και η επιθυμητή τελική μέση περιεκτικότητα σε υγρασία να επιτυγχάνεται πριν το κάτω στρώμα φτάσει σε ισορροπία με τον αέρα ξήρανσης.

Αυτό εξασφαλίζει ότι δεν προκύπτει υπέρ-ξηράνση. Ωστόσο, για μεγάλα βάθη καλλιέργειών, υπάρχει μία τάση να προκύπτει υπέρ-ξηράνση για τις περιοχές κάτω απ' τη ζώνη ξήρανσης. Η θερμοκρασία και οι ρυθμοί ροής αέρα πρέπει να επιλέγονται ώστε η υγρασία ισορροπίας της καλλιέργειας για αυτήν την κατάσταση να είναι η επιθυμητή. Μία βασική διαφορά μεταξύ της ανάλυσης βαθιάς κλίνης και του μοντέλου λεπτού στρώματος είναι ότι ο ρυθμός ροής αέρα στο μοντέλο λεπτού στρώματος δεν είναι τόσο κρίσιμος όσο στο μοντέλο βαθιού στρώματος.

Υποθέτοντας ότι η απώλεια αισθητής θερμότητας από τον αέρα ξήρανσης στην καλλιέργεια ισούται με τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης για την καλλιέργεια και αμελώντας θερμοκρασιακές αλλαγές στην καλλιέργεια και τη συμπύκνωση που μπορεί να συμβεί στα ανώτερα στρώματα της μάζας της καλλιέργειας στην έναρξη της διαδικασίας ξήρανσης, ένα ισοζύγιο θερμότητας για τη διαδικασία ξήρανσης μπορεί να γραφτεί ως,

$$\rho_a FC_a (T_{in} - T_{out}) t = W_d (M_o - M_e) L \quad (38)$$

Εισάγοντας το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, h , από τον αέρα προς την υγρή επιφάνεια της καλλιέργειας, (ο οποίος είναι ανάλογος με το ρυθμό ροής αέρα), ως,

$$h = \frac{\rho_a FC_a}{A} \quad (39)$$

και συμπεριλαμβάνοντας το εμβαδόν διατομής της κλίνης ξήρανσης, A (σε επαφή με τον αέρα ξήρανσης σε κάθε περίπτωση), η εξίσωση (38) γίνεται,

$$\frac{dw}{dt} = hA \frac{(T_{in} - T_{out})}{L} = \frac{hAdT}{L} \quad (40)$$

Η ξήρανση βαθιού στρώματος σχετίζεται συνήθως με δύο περιόδους ρυθμού ξήρανσης, και συγκεκριμένα, την περίοδο μέγιστου ρυθμού ξήρανσης και την περίοδο φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης. Η περίοδος μέγιστου ρυθμού ξήρανσης είναι η περίοδος από την έναρξη της ξήρανσης μέχρι το μέτωπο ξήρανσης να φτάσει την κορυφή της κλίνης και αντιπροσωπεύεται από την ακόλουθη εξίσωση [33],

$$\frac{M_o - M_1}{t_1} = \frac{d\bar{M}}{dt} = AF_m \frac{(H_s - H_o)}{W_d} \quad (41)$$

Έτσι,

$$t_1 = \frac{W_d (M_o - M_1)}{AF_m (H_s - H_o)} \quad (42)$$

Ο ρυθμός ξήρανσης κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου εξαρτάται μόνο από την ικανότητα μεταφοράς υγρασίας του αέρα ξήρανσης.

Η περίοδος φθίνοντος ρυθμού αρχίζει αμέσως αφότου το μέτωπο ξήρανσης φτάσει την κορυφή της κλίνης, και αντιπροσωπεύεται ως [33],

$$\frac{dM}{dt} = K' (\bar{M} - M_e) \quad (43)$$

με δεδομένο ότι $K' = 2.3 K''$,

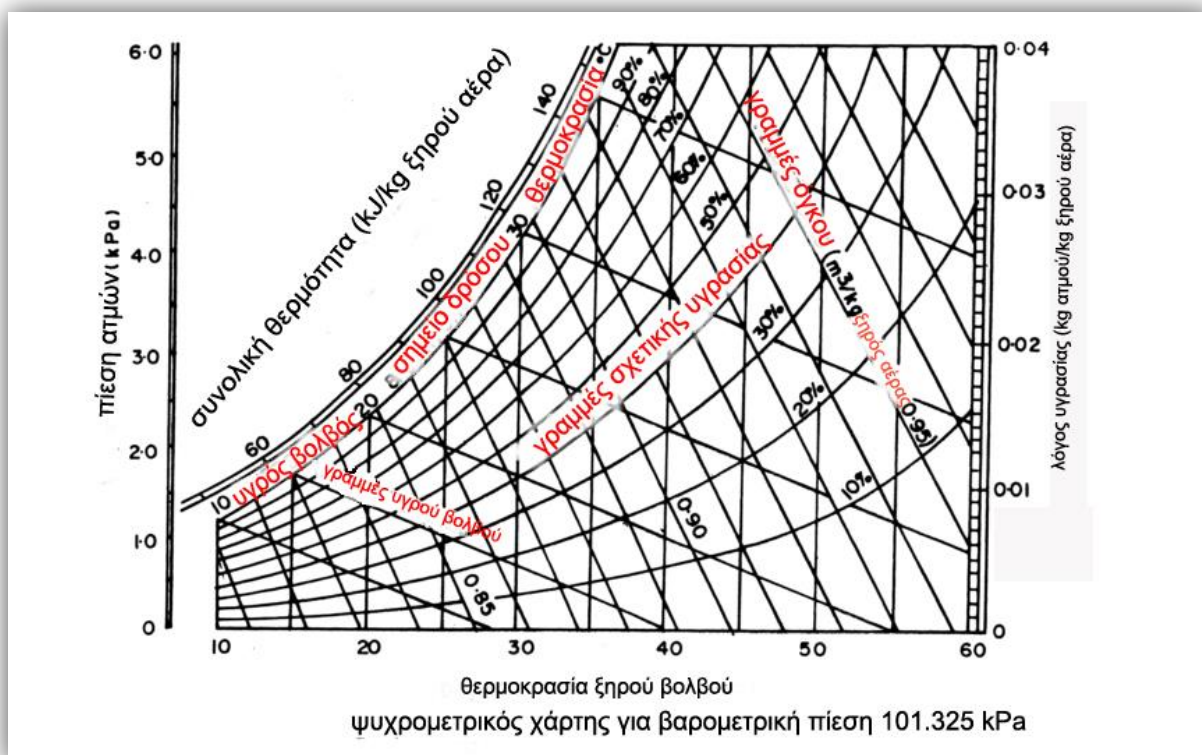
$$t_2 = \frac{1}{K''} \log \frac{(M_1 - M_e)}{(M_2 - M_e)} \quad (44)$$

και

$$t_t = t_1 + t_2 \quad (45)$$

1.3.12 Ψυχομετρική ανάλυση της ξήρανσης καλλιιεργειών

Η διαδικασία της ξήρανσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αλλαγές που συμβαίνουν στις ιδιότητες του υγρού αέρα (ξηρός αέρας και υδατμός) που αποτελεί τον αέρα ξήρανσης. Η ψυχομετρία είναι μια οργανωμένη παρουσίαση αυτών των ιδιοτήτων.



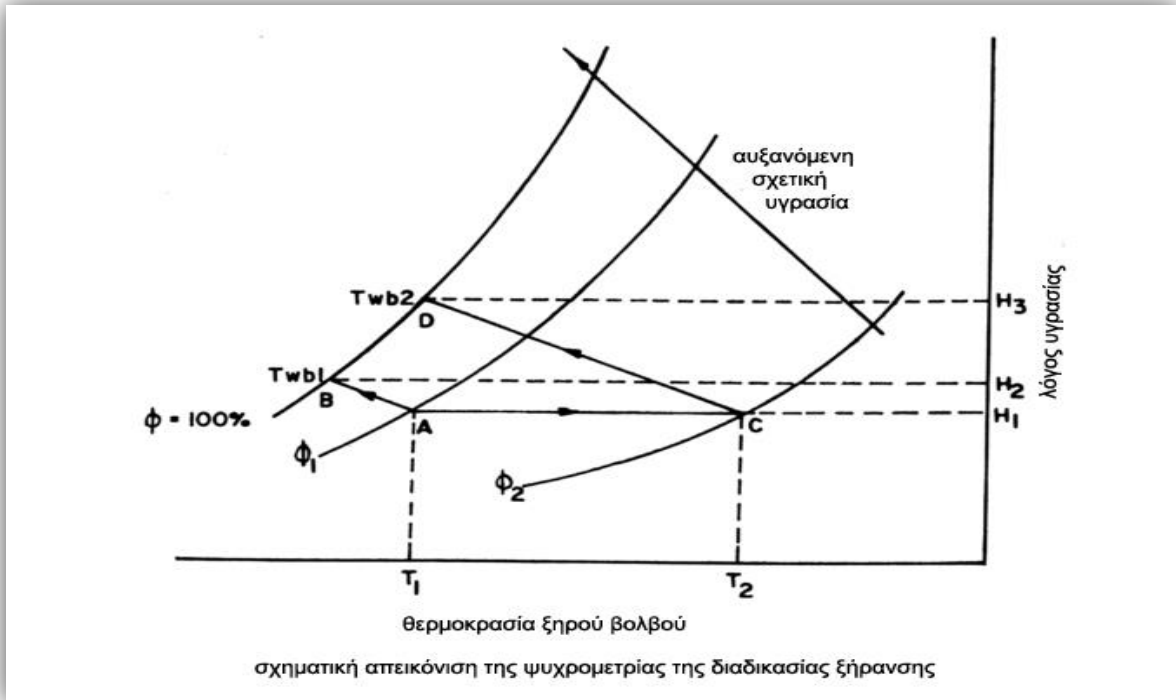
Σχ. 11 [35] ψυχομετρικός χάρτης για βαρομετρική πίεση 101.325 kPa

Ένα ψυχομετρικό διάγραμμα (Σχ. 11) [35] έχει ως εξής.

- Η τεταγμένη παριστά την απόλυτη υγρασία με τη θερμοκρασία ξηρού βολβού ως τετμημένη.
- Οι θερμοκρασίες του σημείου δρόσου βρίσκονται στην ανώτερη καμπύλη η οποία είναι η γραμμή κορεσμού που αντιστοιχεί στο 100% της σχετικής υγρασίας.
- Οι καμπύλες σταθερής σχετικής υγρασίας είναι οι ακόλουθες καμπύλες κάτω από τη γραμμή κορεσμού.
- Οι γραμμές σταθερού υγρού βολβού είναι οι ευθείες γραμμές που κατεβαίνουν ομαλά προς τα δεξιά,
- Ενώ οι αντίστοιχες πιο απότομες γραμμές παριστούν τις γραμμές σταθερού όγκου.
- Η διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης σε σταθερή απόλυτη υγρασία γίνεται κατά μήκος των οριζώντιων γραμμών.
- Η σχετική υγρασία μειώνεται με τη θέρμανση κατά μήκος της γραμμής και αυξάνεται με την ψύξη.
- Οι γραμμές υγρού βολβού αντιστοιχούν στις γραμμές αδιαβατικής ψύξης (γραμμές σταθερής ενθαλπίας), που προκύπτουν από ψύξη με εξάτμιση του αέρα που ρέει πάνω από μία υγρή επιφάνεια και από απόκτηση λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης.

Μια διαδικασία ξήρανσης μπορεί να χρησιμοποιεί μη-θερμαινόμενο ή προθερμασμένο αέρα. Καθώς ο αέρας ρέει δίπλα απ' τον προϊόν, η θερμότητα μεταφέρεται στο προϊόν από τον αέρα. Αυτό οδηγεί στην εξάτμιση της υγρασίας από το προϊόν στον αέρα (διαδικασία ταυτόχρονης μεταφοράς

θερμότητας και μάζας) και στη μετέπειτα αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα, καθώς η διαδικασία συμβαίνει με μία μείωση στη θερμοκρασία ξηρού βολβού σε σταθερή θερμοκρασία υγρού βολβού. Μια σχηματική απεικόνιση της ψυχομετρίας μιας τυπικής διαδικασίας ξήρανσης φαίνεται στο Σχ. 12.



Σχ. 12 [62]σχηματική απεικόνιση της ψυχομετρίας της διαδικασίας ξήρανσης

Θεωρούμε ακόρεστο αέρα περιβάλλοντος σε θερμοκρασία ξηρού βολβού, T_1 και θερμοκρασία υγρού βολβού, T_{w1} και σε σχετική υγρασία, ϕ_1 , με απόλυτη υγρασία H_1 . Η ικανότητα μεταφοράς υγρασίας αυτού του αέρα εξαρτάται απ' το αν είναι θερμαινόμενος ή όχι. Υποθέτοντας ότι ο αέρας χρησιμοποιείται στην ξήρανση χωρίς προθέρμανση, η διαδικασία εξελίσσεται κατά μήκος της σταθερού υγρού βολβού T_{w1} αδιαβατικής γραμμής ψύξης AB (Σχ. 12). Η αισθητή απώλεια θερμότητας από τον αέρα εξατμίζει υγρασία από την καλλιέργεια.

Αν η διαδικασία συνεχιστεί μέχρι τον κορεσμό, αυτό αντιστοιχεί σε μία τελική απόλυτη υγρασία H_2 . Αυτό υποδηλώνει μία μέγιστη ικανότητα μεταφοράς υγρασίας $H_2 - H_1$. Αν, όμως, ο ίδιος αέρας περιβάλλοντος προθερμανθεί (πριν χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση), σε μία σταθερή απόλυτη υγρασία H_1 , μέχρι μια θερμοκρασία ξηρού βολβού T_2 , που αντιστοιχεί σε μία χαμηλότερη σχετική υγρασία, ϕ_2 (γραμμή AC στο Σχ. 12), η διαδικασία ξήρανσης ακολουθεί τη γραμμή αδιαβατικής ψύξης που αντιστοιχεί σε μια νέα θερμοκρασία υγρού βολβού, T_{w2} (γραμμή CD στο Σχ. 12). Στον κορεσμό, υπάρχει μία καινούρια απόλυτη υγρασία H_3 . Αυτό αντιστοιχεί σε μία μέγιστη ικανότητα μεταφοράς υγρασίας $H_3 - H_1$. Μέσα στο θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο συμβαίνει η ξήρανση, η ικανότητα μεταφοράς υγρασίας ενός kg ακόρεστου υγρού αέρα αυξάνεται κατά $3.6 \times 10^{-4} \text{ kg}$ ανά $^\circ\text{C}$ αύξηση στη θερμοκρασία του [33].

Ο μέγιστος όγκος αέρα που απαιτείται για να κρατήσει συγκεκριμένη ποσότητα υγρασίας μπορεί να υπολογιστεί, υποθέτοντας ότι ο εξερχόμενος αέρας του ξηραντήρα βρίσκεται σε 100% σχετική υγρασία. Μία σχετικά μικρή ποσότητα θέρμανσης μπορεί να ενισχύσει κατά πολύ την ικανότητα μεταφοράς υγρασίας του αέρα. Θερμαίνοντας τον αέρα, για παράδειγμα από μία

θερμοκρασία 20° C σε σχετική υγρασία 59% μέχρι μία θερμοκρασία 35° C σε σχετική υγρασία 25%, αυξάνεται η ικανότητα μεταφοράς υγρασίας του τρεις φορές [35]. Αυτό δείχνει το τεράστιο πλεονέκτημα της προθέρμανσης αέρα στη διαδικασία ξήρανσης.

1.4 Ταξινόμηση συστημάτων ξήρανσης

Τα συστήματα ξήρανσης μπορούν να ταξινομηθούν αρχικά με βάση τα θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας τους σε δύο βασικές κατηγορίες.

- Ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας
- Ξηραντήρες χαμηλής θερμοκρασίας.

Ωστόσο, οι ξηραντήρες συνήθως ταξινομούνται σύμφωνα με τις πηγές θέρμανσης τους σε

- Ξηραντήρες ορυκτών καυσίμων (γνωστοί και ως συμβατικοί ξηραντήρες)
- Ξηραντήρες ηλιακής ενέργειας.

Οι ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας είναι σχεδόν πάντα ξηραντήρες ορυκτών καυσίμων ενώ οι χαμηλής θερμοκρασίας είναι είτε ορυκτών καυσίμων είτε ηλιακοί.

1.4.1 Ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας

Οι ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας είναι απαραίτητοι όταν απαιτείται πολύ γρήγορη ξήρανση. Χρησιμοποιούνται συνήθως όταν τα προϊόντα απαιτούν σύντομη έκθεση στον αέρα ξήρανσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους είναι τέτοιες ώστε, αν ο αέρας ξήρανσης παραμένει σε επαφή με το προϊόν μέχρι την υγρασία ισορροπίας, εμφανίζεται σοβαρή υπέρ-ξηρανση. Έτσι, τα προϊόντα ξηραίνονται μέχρι τις απαιτούμενες περιεκτικότητες υγρασίας και αργότερα ψύχονται [1]. Χωρίζονται σε [1,4,5]

- Ξηραντήρες δέσμης
- Ξηραντήρες συνεχούς ροής

Στους ξηραντήρες δέσμης τα προϊόντα ξηραίνονται σε ένα δοχείο και στη συνέχεια μεταφέρονται για αποθήκευση. Είναι γνωστοί και ως ξηραντήρες δέσμης σε δοχείο [4].

Οι ξηραντήρες συνεχούς ροής είναι θερμαινόμενες στήλες μέσα στις οποίες το προϊόν ρέει με τη βοήθεια της βαρύτητας και εκτίθεται στο θερμό αέρα κατεβαίνοντας [5]. Εξαιτίας των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων που επικρατούν στους ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας, οι περισσότεροι είναι ηλεκτρικοί ή ορυκτών καυσίμων.

Μόνο μερικοί ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας είναι ηλιακοί [2].

1.4.2 Ξηραντήρες χαμηλής θερμοκρασίας

Στα συστήματα ξήρανσης χαμηλής θερμοκρασίας η περιεκτικότητα σε υγρασία του προϊόντος φτάνει σε ισορροπία με τη βοήθεια του αέρα ξήρανσης, με συνεχή αερισμό. Κατά συνέπεια μπορούν να ανεχθούν διακοπτόμενη ή μεταβλητή είσοδο θερμότητας. Η χαμηλής θερμοκρασίας ξήρανση επιτρέπει στις καλλιέργειες να ξηραίνονται μαζί και είναι κατάλληλη για συστήματα μακροχρόνιας αποθήκευσης. Οι ξηραντήρες χαμηλής θερμοκρασίας είναι γνωστοί και ως μαζικοί ξηραντήρες ή ξηραντήρες αποθήκευσης [1].

Η ικανότητά τους να δέχονται διακοπτόμενη είσοδο θερμότητας τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές ηλιακής ενέργειας. Έτσι, μερικοί συμβατικοί ξηραντήρες και οι περισσότεροι ηλιακοί είναι χαμηλής θερμοκρασίας.

1.4.3 Ταξινόμηση συστημάτων ξήρανσης ηλιακής ενέργειας

Η ταξινόμηση των συστημάτων ξήρανσης ηλιακής ενέργειας γίνεται με βάση τους τρόπους θέρμανσης και τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται η ηλιακή θερμότητα. Έτσι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες [2].

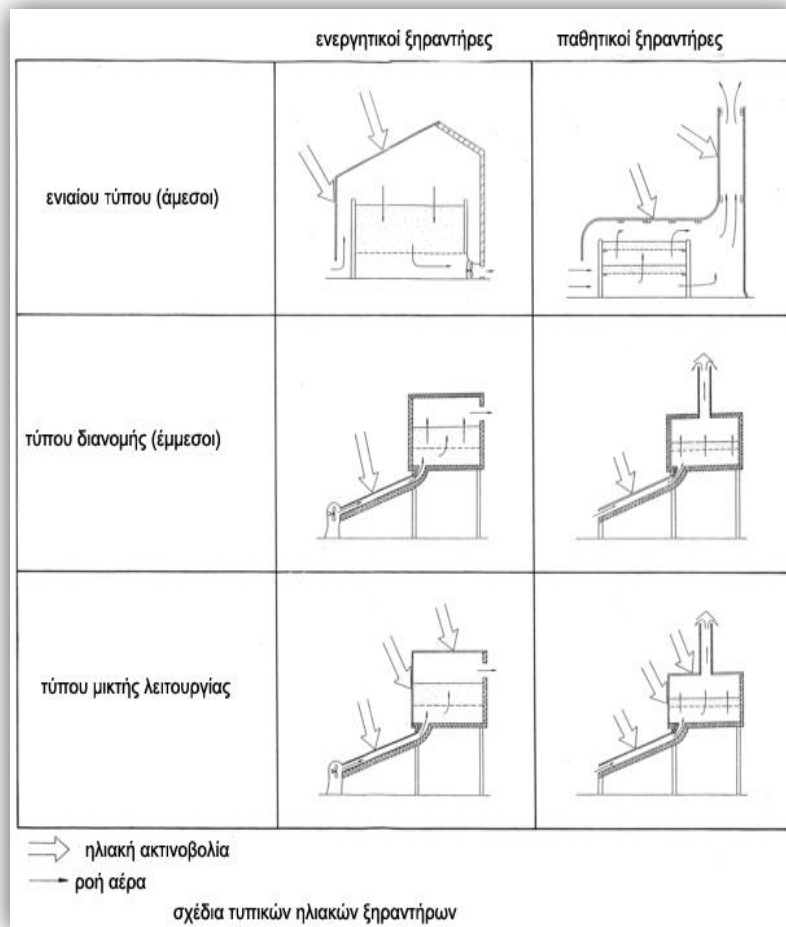
- Ενεργητικά συστήματα ξήρανσης ηλιακής ενέργειας (περισσότερα απ' τα οποία είναι γνωστά ως υβριδικοί ηλιακοί ξηραντήρες)

- Παθητικά συστήματα ξήρανσης ηλιακής ενέργειας (γνωστά και ως ηλιακά συστήματα ξήρανσης φυσικής κυκλοφορίας)

Τρεις υποκατηγορίες των ενεργητικών και παθητικών ηλιακών συστημάτων ξήρανσης (οι οποίες διαφέρουν κυρίως στη διάταξη των συνιστωσών του συστήματος και στον τρόπο χρήσης της ηλιακής θερμότητας) είναι [2]:

- Ηλιακοί ξηραντήρες ενιαίου τύπου
- Ηλιακοί ξηραντήρες τύπου διανομής
- Ηλιακοί ξηραντήρες μικτού τύπου

Τα βασικά χαρακτηριστικά των τυπικών σχεδίων των διάφορων κατηγοριών των ηλιακών ξηραντήρων φαίνονται στο Σχ. 13.



Σχ.13[32]σχέδια τυπικών ηλιακών ξηραντήρων

1.4.3.1 Παθητικά συστήματα ξήρανσης ηλιακής ενέργειας

1.4.3.2 Φυσική ηλιακή ξήρανση

Υπάρχουν δύο παραδοσιακές προσεγγίσεις με τις οποίες γίνεται η παθητική ηλιακή ξήρανση καλλιεργείων στις τροπικές χώρες [2].

- Το φυτό που φέρει την καλλιέργεια αφήνεται να ξηρανθεί, είτε σε επαφή με το χώμα είτε κόβεται αλλά δεν αφαιρείται κι έτσι η καλλιέργεια ξηραίνεται «επιτόπου»
- Η καλλιέργεια εξαπλώνεται στο ματ, τσιμεντένιο έδαφος ή τοποθετείται σε οριζόντια ή κάθετα ράφια, εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία και τα ρεύματα φυσικού αέρα.

Η καλλιέργεια συνήθως περιστρέφεται κατά διαστήματα έτσι ώστε να εκτίθενται διαφορετικά μέρη της στον ήλιο και να γίνεται πιο ταχεία αφαίρεση του κορεσμένου αέρα.

Παρά τη στοιχειώδη φύση των διαδικασιών αυτών, τέτοιες τεχνικές εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται συχνά. Επειδή οι απαιτήσεις σε ενέργεια (από την ηλιακή ακτινοβολία και την ενθάλπια του αέρα) είναι διαθέσιμες στο περιβάλλον, το κόστος κεφαλαίου είναι από μικρό έως μηδενικό και τα λειτουργικά κόστη είναι χαμηλά, αυτές είναι συχνά οι μοναδικές οικονομικά βιώσιμες μέθοδοι ξήρανσης γεωργικών προϊόντων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Αν και χρησιμοποιούμενες ευρέως, οι τεχνικές φυσικής ηλιακής ξήρανσης έχουν εγγενείς περιορισμούς. Υψηλές απώλειες καλλιεργείων που προκύπτουν από ανεπαρκή ξήρανση, προσβολή από μύκητες και έντομα, καταπάτηση από πουλιά και τρωκτικά, και καιρικά φαινόμενα. Η διαδικασία είναι διακοπτόμενη καθώς επηρεάζεται από συννεφιά και απροσδόκητες βροχές

Η παραγωγή είναι χαμηλή και μπορεί να είναι πολύ κακής ποιότητας. Για τα τροπικά κλίματα, η φυσική ηλιακή ξήρανση παρουσιάζει σοβαρά πρακτικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της υγρής εποχής, καθώς περιοδικά αλλά ακανόνιστα, η καλλιέργεια πρέπει να αποθηκεύεται ή να προστατεύεται από τη βροχή. Η ποιότητα του αποξηραμένου προϊόντος είναι συνήθως υποβαθμισμένη σοβαρά, μερικές φορές πέραν βρωσιμότητας. Σήμερα, ένα μεγάλο ποσοστό της παγκόσμιας προμήθειας αποξηραμένων φρούτων και λαχανικών εξακολουθούν να ξηραίνονται στον ήλιο κάτω από πρωτόγονες συνθήκες. Ενώ πιο αποτελεσματικές μέθοδοι ηλιακής ξήρανσης αναπτύσσονται, οι παραδοσιακές μέθοδοι ξήρανσης έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος κεφαλαίου
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα

1.4.3.3 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας

Οι ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας βασίζονται αποκλειστικά στην ηλιακή ενέργεια. Σ' αυτά τα συστήματα ο αέρας που θερμαίνεται από τον ήλιο κυκλοφορεί μέσα στην καλλιέργεια με τη βοήθεια των δυνάμεων της άνωσης ή ως αποτέλεσμα της πίεσης του ανέμου ή με συνδυασμό των δύο. Αυτοί οι ξηραντήρες ονομάζονται παθητικοί για να ξεχωρίσουν απ' τους ενεργητικούς που χρησιμοποιούν ανεμιστήρες για την κυκλοφορία του αέρα.

Οι ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας είναι οι πιο ελκυστικοί για χρήση σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές. Υπερέχουν λειτουργικά και οικονομικά της φυσικής ηλιακής ξήρανσης. Τα πλεονεκτήματά των ηλιακών ξηραντήρων φυσικής κυκλοφορίας που τους καθιστούν ανταγωνιστικούς οικονομικά με τις παραδοσιακές τεχνικές ξήρανσης είναι:

- Απαιτούν μικρότερη έκταση γης για την ξήρανση
- Προσφέρουν υψηλή ποσότητα και ποιότητα καλλιεργείων
- Η περίοδος ξήρανσης είναι μικρότερη και κατά συνέπεια οι ρυθμοί διακίνησης προϊόντος είναι υψηλότεροι
- Προσφέρουν προστασία από ξαφνικές βροχές
- Τα κόστη κεφαλαίου και συντήρησης είναι χαμηλά

Υπάρχουν τρεις τύποι ηλιακών ξηραντήρων φυσικής κυκλοφορίας και όλοι διατηρούν τα πλεονεκτήματα της παραδοσιακής φυσικής ηλιακής ξήρανσης.

- Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου
- Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας τύπου διανομής
- Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας μικτού τύπου

1.4.3.4 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας τύπου διανομής

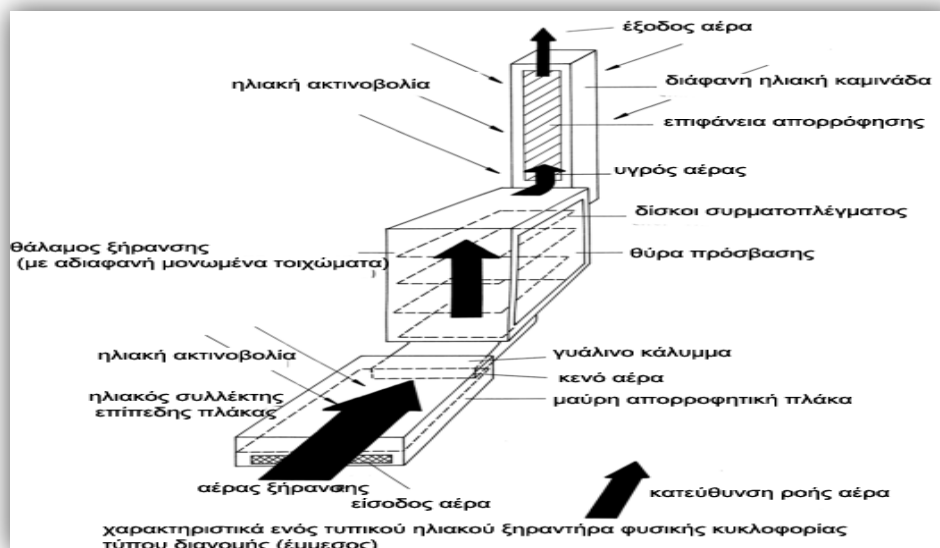
Ονομάζονται και έμμεσοι παθητικοί ηλιακοί ξηραντήρες. Εδώ η καλλιέργεια τοποθετείται σε δίσκους ή ράφια μέσα στον αδιαφανή θάλαμο ξήρανσης και θερμαίνεται από τον κυκλοφορούμενο αέρα ο οποίος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ροής του από έναν χαμηλής πτώσης πίεσης θερμοσιφωνικό ηλιακό συλλέκτη [6].

Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία δεν έρχεται σε άμεση επαφή με την καλλιέργεια, δεν υπάρχουν φαινόμενα καραμελοποίησης και τοπικής θερμικής βλάβης [2,7]. Αυτοί οι ξηραντήρες συνίστανται για ορισμένα ευαλλοίωτα τρόφιμα και φρούτα στα οποία το περιεχόμενό τους σε βιταμίνες μειώνεται σημαντικά και η διατήρηση του χρώματός τους επηρεάζεται από την απευθείας έκθεση στον ήλιο [7]. Οι παθητικοί ξηραντήρες τύπου διανομής λειτουργούν με υψηλότερες θερμοκρασίες και παράγουν προϊόντα καλύτερης ποιότητας. Επίσης συνίστανται για ξήρανση βαθιού στρώματος [8].

Τα μειονεκτήματά τους είναι οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του αέρα, που καθιστούν δύσκολη τη διατήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας και η δυσκολία φόρτωσης και εκφόρτωσης των δίσκων και περιστροφής του προϊόντος [8]. Παρόλα αυτά οι ξηραντήρες τύπου διανομής έχουν μια εγγενή τάση για καλύτερη απόδοση, καθώς οι συνιστώσες τους μπορούν να σχεδιαστούν για βέλτιστη απόδοση των αντίστοιχων λειτουργιών τους [7]. Είναι, όμως, περίτεχνες κατασκευές που απαιτούν μεγάλη επένδυση κεφαλαίων στον εξοπλισμό και επιφέρουν μεγαλύτερα λειτουργικά κόστη από τους ξηραντήρες ενιαίου τύπου [2].

Ένας τυπικός ηλιακός ξηραντήρας φυσικής κυκλοφορίας τύπου διανομής αποτελείται από τις εξής βασικές μονάδες (Σχ. 14):

- Ηλιακό συλλέκτη για τη θέρμανση του αέρα
- Κατάλληλα μονωμένο αγωγό
- Θάλαμο ξήρανσης
- Καμινάδα



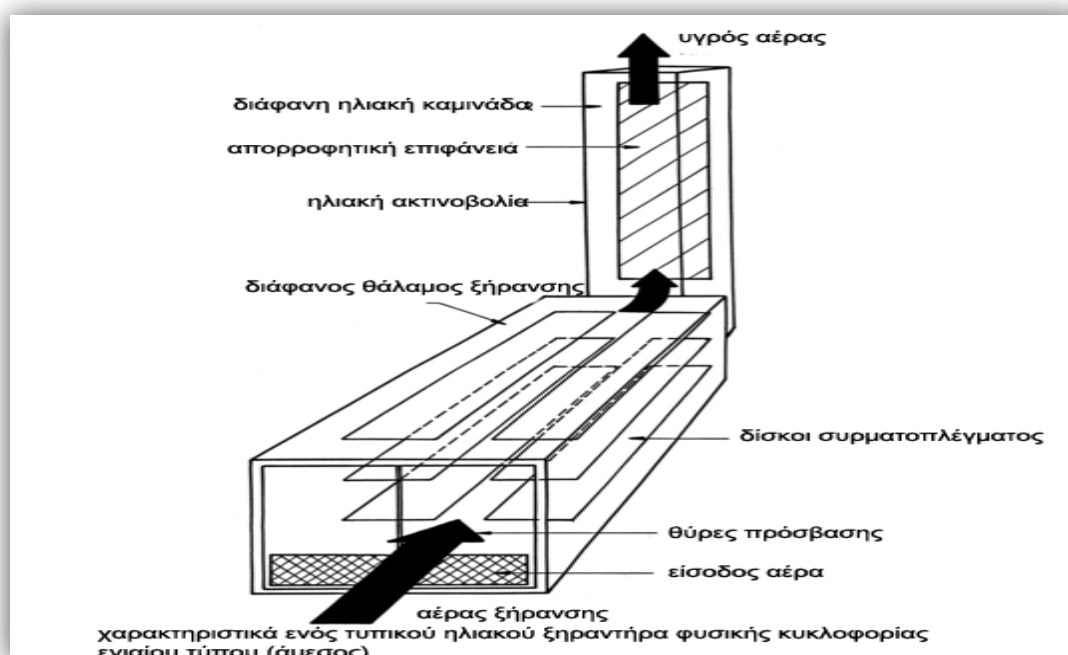
Σχ. 14 [32] χαρακτηριστικά ενός τυπικού ηλιακού ξηραντήρα φυσικής κυκλοφορίας τύπου διανομής (έμμεσος)

Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι ηλιακοί ξηραντήρες τύπου διανομής εξαναγκασμένης συναγωγής είναι πιο αποτελεσματικοί και πιο ελεγχόμενοι από τους φυσικής κυκλοφορίας [7]. Από τους ξηραντήρες τύπου διανομής φυσικής κυκλοφορίας οι περισσότεροι είναι μικτού τύπου.

1.4.3.5 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου

Στους ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου η καλλιέργεια τοποθετείται σε ένα θάλαμο ξήρανσης με διαφανή τοιχώματα που επιτρέπουν τη μετάδοση της απαραίτητης για την ξήρανση ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι η ηλιακή ακτινοβολία προσκρούει κατευθείαν στον προϊόν. Η θερμότητα αφαιρεί την υγρασία από την καλλιέργεια και ταυτόχρονα μειώνει τη σχετική υγρασία του αέρα, αυξάνοντας έτσι την ικανότητα μεταφοράς υγρασίας του. Επιπρόσθετα διαστέλλει τον αέρα στο θάλαμο, παράγοντας την κυκλοφορία του και τη μετέπειτα αφαίρεση της υγρασίας μαζί με το θερμό αέρα

Τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού παθητικού ηλιακού ξηραντήρα ενιαίου τύπου φαίνονται στο Σχ. 15.



Σχ. 15 [32]χαρακτηριστικά ενός τυπικού ηλιακού ξηραντήρα φυσικής κυκλοφορίας(άμεσος)

Η άμεση έκθεση στον ήλιο ενισχύει την κατάλληλη ωρίμανση χρώματος των πράσινων φρούτων, επιτρέποντας κατά τη διάρκεια της αφυδάτωσης την αποσύνθεση της εναπομένουσας χλωροφύλλης στον ιστό [2,7]. Για συγκεκριμένες ποικιλίες σταφυλιών και χουρμάδων η έκθεση στον ήλιο θεωρείται απαραίτητη για την ανάπτυξη του απαιτούμενου χρώματος στο αποξηραμένο προϊόν και για τον αραβικό καφέ μία περίοδος έκθεσης στον ήλιο θεωρείται απαραίτητη για την ανάπτυξη πλήρους γεύσης στον καβουρδισμένο κόκκο [2,7,9].

Οι ενιαίου τύπου φυσικής κυκλοφορίας ξηραντήρες είναι απλούστεροι και φθηνότεροι από τους ξηραντήρες τύπου διανομής [10,11]. Δε χρειάζονται περίτεχνες κατασκευές, όπως ξεχωριστούς συλλέκτες για τη θέρμανση του αέρα και αγωγούς. Το μειονέκτημα τους όμως είναι η πιθανότητα τοπικής υπερθέρμανσης και οι σχετικά χαμηλοί ρυθμοί ξήρανσης [10-12].

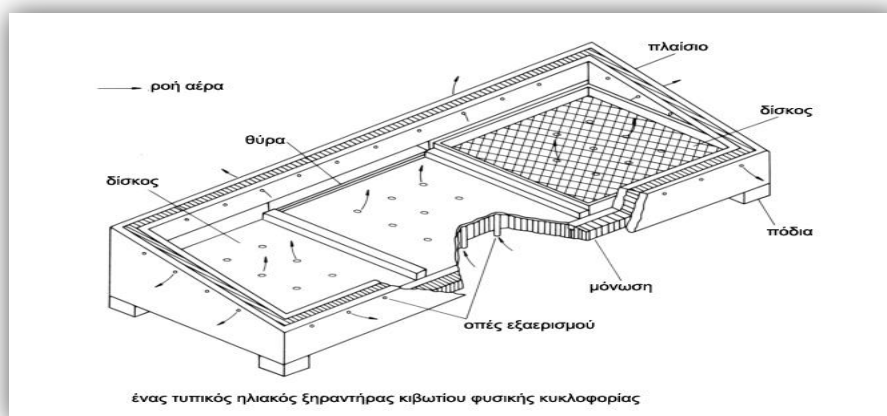
Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ηλιακή καμινάδα η οποία αυξάνει τη δύναμη άνωσης που ασκείται στη ροή του αέρα κι έτσι παρέχει μεγαλύτερη ταχύτητα ροής και κατά συνέπεια ταχύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υγρασίας. Υπάρχουν δύο τύποι ξηραντήρων ενιαίου τύπου:

1.4.3.6 Παθητικοί ηλιακοί ξηραντήρες κιβωτίου

Είναι συνήθως σχετικά μικρές μονάδες που χρησιμοποιούνται για να διατηρούν «οικιακές» ποσότητες φρούτων, λαχανικών, ψαριών και κρεάτων. Είναι μονωμένα θερμά κουτιά, με μονά ή διπλά τζάμια, που έχουν τρύπες στη βάση και στα ανώτερα τμήματα των τοιχωμάτων.

Η ηλιακή ακτινοβολία που είναι απαραίτητη για την ξήρανση μεταδίδεται μέσα από το κάλυμμα και απορροφάται από τις μαυρισμένες εσωτερικές επιφάνειες καθώς και απ' το προϊόν. Η ροή του αέρα παρέχεται από το θερμό, υγρό αέρα που φεύγει μέσω των άνω ανοιγμάτων με τη βοήθεια των δυνάμεων της άνωσης ενώ φρέσκος αέρας αναπλήρωσης εισχωρεί από τη βάση.

Οι παθητικοί ηλιακοί ξηραντήρες κιβωτίου έχουν το πλεονέκτημα της φτηνής και εύκολης κατασκευής από τοπικά διαθέσιμα υλικά. Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι η κακή αφαίρεση υγρού αέρα η οποία μειώνει τους ρυθμούς ξήρανσης και οι πολύ υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες που μπορεί να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση του προϊόντος. Οι θερμοκρασίες ξήρανσης αυτών των ξηραντήρων που κυμαίνονται από 70-100 °C είναι υπερβολικές για τα περισσότερα προϊόντα, ιδιαίτερα για τα ευαλλοιώτα τρόφιμα για τα οποία αυτοί οι ξηραντήρες προορίζονται. Μεγαλύτερες εισοδοί αέρα και βελτιωμένες ηλιακές καμινάδες χαμηλού κόστους συνίστανται για ενισχυμένους ρυθμούς ροής, ελαχιστοποιώντας έτσι τις υπερβολικές εσωτερικές θερμοκρασίες και βελτιώνοντας τους ρυθμούς ξήρανσης.



Σχ. 16[32]ένας τυπικός ηλιακός ξηραντήρας κιβωτίου φυσικής κυκλοφορίας

1.4.3.7 Ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας θερμοκηπίου

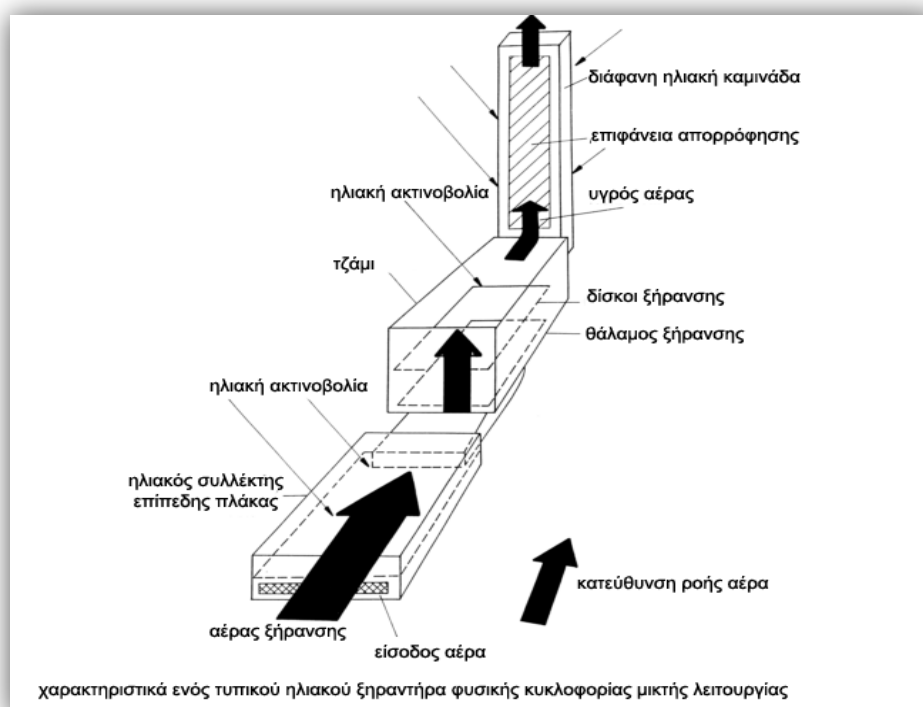
Συχνά ονομάζονται και ξηραντήρες σκηνής και είναι ουσιαστικά τροποποιημένα θερμοκήπια. Είναι εξοπλισμένοι με αεραγωγούς κατάλληλου μεγέθους και κατάλληλης τοποθέτησης, για τον έλεγχο της ροής του αέρα. Χαρακτηρίζονται από τις μεγάλες γυάλινες επιφάνειες στις πλευρές τους. Μονωτικά πάνελ μπορούν να καλύπτουν τα τζάμια τη νύχτα για μείωση των θερμικών απωλειών και εγκαταστάσεις αποθήκευσης θερμότητας μπορούν να παρέχονται. Οι ξηραντήρες θερμοκηπίου επιτρέπουν μεγαλύτερο βαθμό ελέγχου της διαδικασίας ξήρανσης σε σχέση με τους ξηραντήρες κιβωτίου [8] και είναι κατάλληλοι για ξήρανση μεγάλης κλίμακας.



Σχ. 17 [32] Ξηραντήρας σκηνής πολυαιθυλενίου φυσικής κυκλοφορίας

1.4.3.8 Ηλιακοί Ξηραντήρες φυσικής κυκλοφορίας μικτού τύπου

Αυτοί οι ξηραντήρες συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των ξηραντήρων ενιαίου τύπου και των ξηραντήρων διανομής. Εδώ η συνδυασμένη δράση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει απευθείας στο προϊόν προς ξήρανση και του προθερμασμένου σε έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για τη διαδικασία της ξήρανσης [10-12]. Ένας τυπικός ξηραντήρας φυσικής κυκλοφορίας μικτού τύπου (σχ.18) έχει τα ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά με τους ξηραντήρες τύπου διανομής, αλλά επιπρόσθετα, τα τοιχώματα του θαλάμου ξήρανσης έχουν τζάμια ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει απευθείας στο προϊόν όπως στους ξηραντήρες ενιαίου τύπου [10-12].



Σχ. 18 [32] χαρακτηριστικά ενός τυπικού ηλιακού ξηραντήρα φυσικής κυκλοφορίας μικτής λειτουργίας

1.4.3.9 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ξήρανσης

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ξήρανσης βασίζονται εν μέρει στην ηλιακή ενέργεια. Χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια ή/και ηλεκτρικά ή ορυκτού καυσίμου συστήματα θέρμανσης και μηχανοκίνητους ανεμιστήρες ή/και αντλίες για τη ροή του αέρα. Όλοι οι ενεργητικοί ηλιακοί ξηραντήρες είναι εξαναγκασμένης συναγωγής.

Ένας τυπικός ενεργητικός ηλιακός ξηραντήρας εξαρτάται απ' την ηλιακή ενέργεια ως πηγή θερμότητας αλλά χρησιμοποιεί μηχανοκίνητους ανεμιστήρες ή/και αντλίες για εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα ξήρανσης.

Άλλες βασικές εφαρμογές ενεργητικών ηλιακών ξηραντήρων υπάρχουν σε μεγάλης κλίμακας εμπορικές λειτουργίες ξήρανσης στις οποίες ηλιακοί συλλέκτες συμπληρώνουν τους συμβατικούς αφυγραντήρες ορυκτού καυσίμου [13-29], μειώνοντας έτσι την ολική κατανάλωση συμβατικής ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα τον έλεγχο των συνθηκών ξήρανσης.

Αν είναι αρκετά θερμός, ο θερμαινόμενος απ' τον ήλιο αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη διαδικασία της ξήρανσης, αλλιώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί αφυγραντήρας ορυκτού καυσίμου για να αυξήσει τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης στο απαιτούμενο επίπεδο (για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιόδους με χαμηλό επίπεδο ηλιακής κτινοβολίας), αποφεύγοντας έτσι τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων στην παραγωγή ενέργειας απ' τον ηλιακό συλλέκτη, καθώς το σύστημα ορυκτού καυσίμου μπορεί να ελέγχεται αυτόματα για να παρέχει τις βέλτιστες συνθήκες ξήρανσης.

Οι ενεργητικοί ηλιακοί ξηραντήρες που ενσωματώνουν αφυγραντήρες για συμπληρωματική θέρμανση λέγονται υβριδικοί ηλιακοί ξηραντήρες.

Επειδή η ξήρανση υψηλής θερμοκρασίας απαιτεί υψηλούς ρυθμούς ροής αέρα (εξαιτίας της απαίτησης περιορισμένης έκθεσης του προϊόντος στον πολύ θερμό αέρα ξήρανσης), όλες οι εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιούν ενεργητικούς ηλιακούς ξηραντήρες.

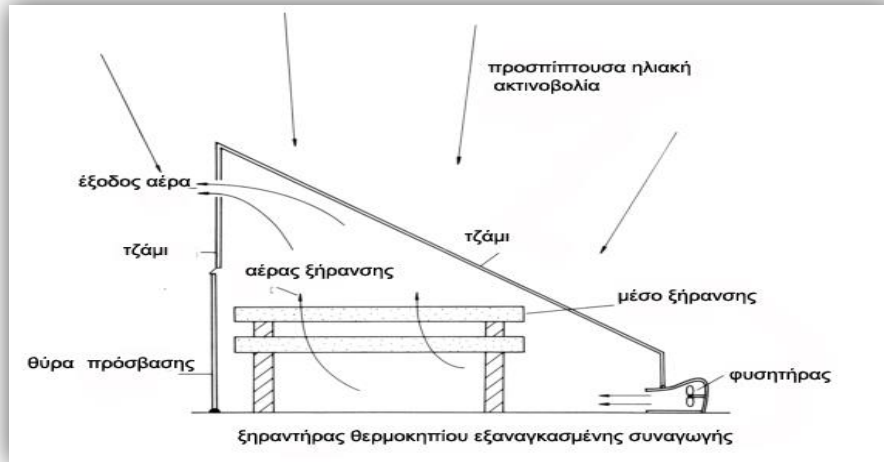
Οι ενεργητικοί ηλιακοί ξηραντήρες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Ενιαίου τύπου, τύπου διανομής και μικτού τύπου.

1.4.3.10 Ενεργητικά συστήματα ξήρανσης ηλιακής ενέργειας ενιαίου τύπου

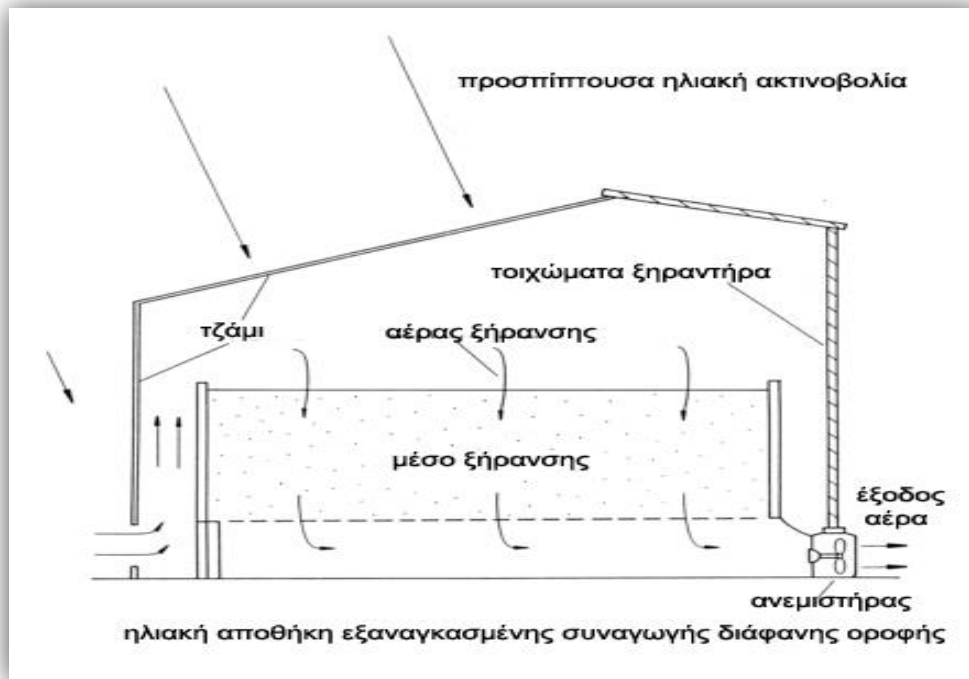
Σ' αυτά η μονάδα συλλογής ηλιακής ενέργειας αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος κι έτσι δε χρειάζεται ειδική σωλήνωση για τη διοχέτευση του αέρα σε ξεχωριστό θάλαμο. Υπάρχουν τρεις τύποι ενεργητικών ηλιακών ξηραντήρων ενιαίου τύπου :

1.4.3.11 Ξηραντήρες άμεσης απορρόφησης

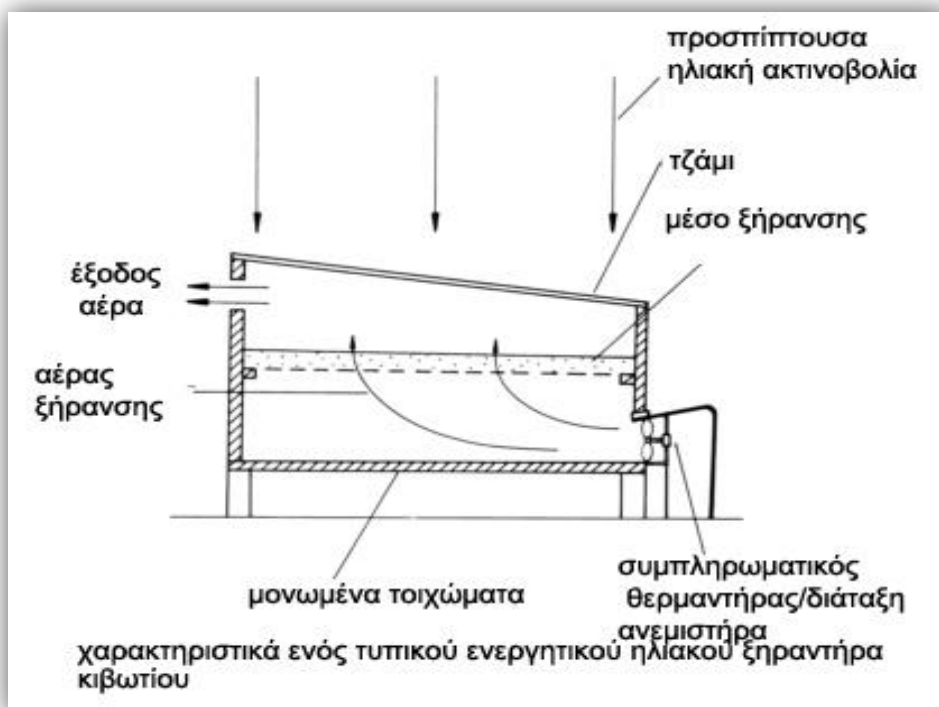
Σ' αυτούς τους ξηραντήρες το προϊόν απορροφά απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία κι έτσι δε χρειάζονται ξεχωριστοί ηλιακοί συλλέκτες,



Σχ. 19 [32] Ξηραντήρας θερμοκηπίου εξαναγκασμένης συναγωγής



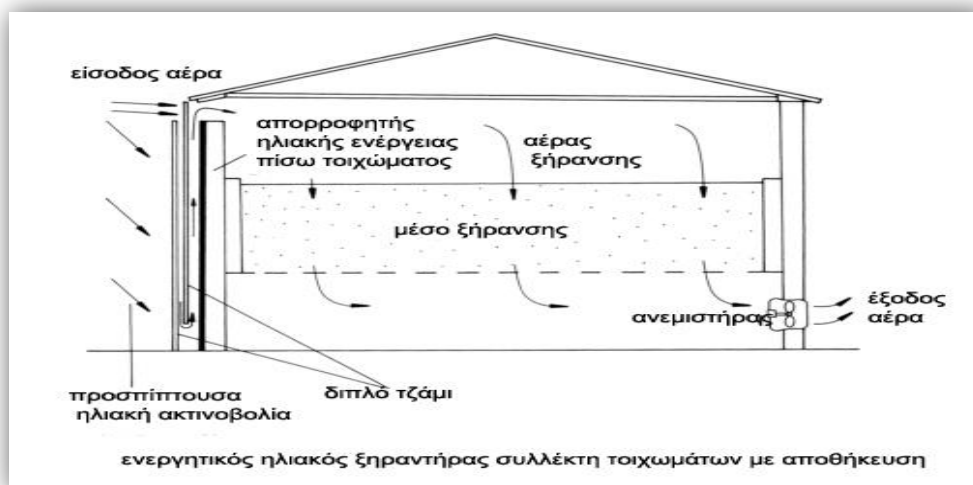
Σχ. 20 [32] ηλιακή αποθήκη εξαναγκασμένης συναγωγής διάφανης οροφής



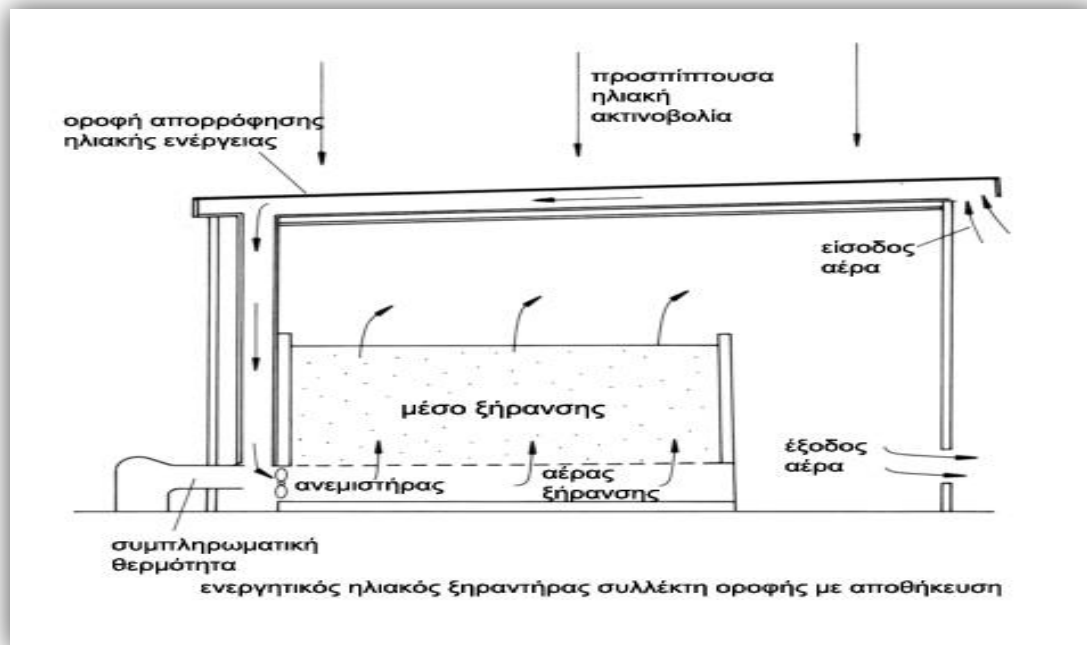
Σχ. 21 [32] χαρακτηριστικά ενός τυπικού ενεργητικού ηλιακού ξηραντήρα κιβωτίου

1.4.3.12 Ηλιακοί ξηραντήρες συλλογής οροφής συλλογής τοίχου

Συνήθως είναι ξηραντήρες τύπου αποθήκευσης, σ' αυτούς ο ηλιακός συλλέκτης αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της οροφής ή/και του τοίχου του θαλάμου ξήρανσης/αποθήκευσης.



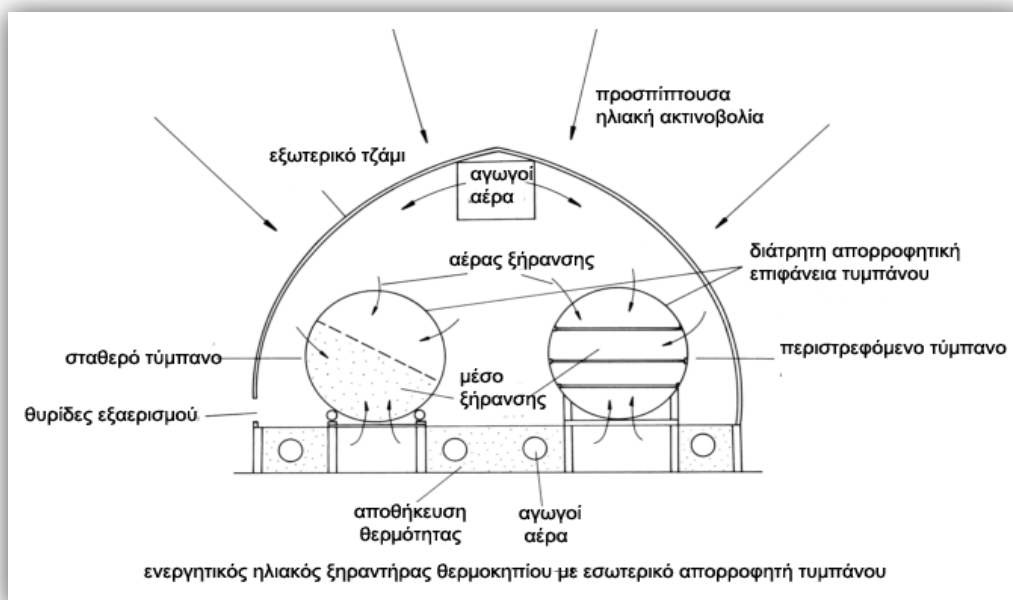
Σχ. 22 [32] ενεργητικός ηλιακός ξηραντήρας συλλέκτη τοιχωμάτων με αποθήκευση



Σχ. 23 [32] ενεργητικός ηλιακός ξηραντήρας συλλέκτη οροφής με αποθήκευση

1.4.3.13 Ξηραντήρες θερμοκηπίου με εσωτερικό θάλαμο απορρόφησης

Αποτελούνται από ένα διαφανές εξωτερικό (ή εξωτερικό κέλυφος θερμοκηπίου) που δρα σαν ηλιακός συλλέκτης και από έναν εσωτερικό θάλαμο ξήρανσης που είναι επίσης απορροφητήρας.

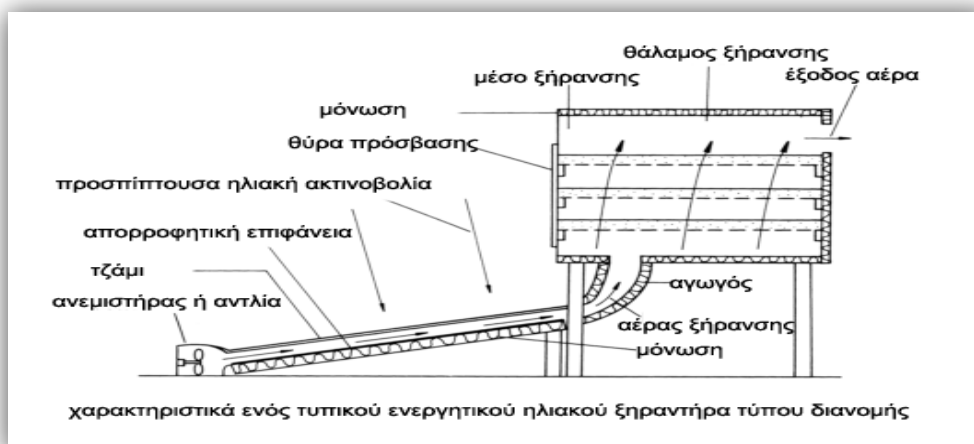


Σχ. 24 [32] ενεργητικός ηλιακός ξηραντήρας θερμοκηπίου με εσωτερικό απορροφητή τυμπάνου

1.4.3.14 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ξήρανσης τύπου διανομής

Σ' αυτά ο ηλιακός συλλέκτης και ο θάλαμος ξήρανσης είναι ξεχωριστά κομμάτια. Ένας τέτοιος ξηραντήρας (Σχ. 25) αποτελείται από:

- Θάλαμο ξήρανσης
- Ηλιακό θερμαντήρα αέρα
- Ανεμιστήρα ή/και αντλία
- Σωληνώσεις



Σχ. 25 [32] χαρακτηριστικά ενός τυπικού ενεργητικού ηλιακού ξηραντήρα τύπου διανομής

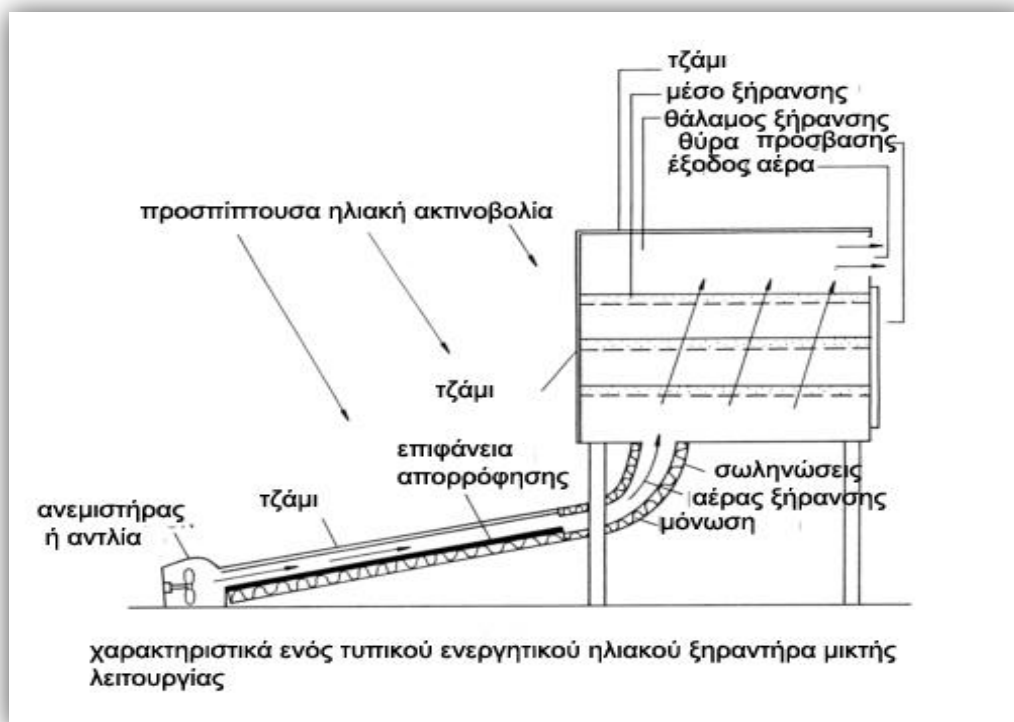
Για συμβατικά συστήματα ξήρανσης, η απόδοση της ξήρανσης αυξάνεται με τη θερμοκρασία, ενθαρρύνοντας έτσι την ξήρανση σε θερμοκρασίες τόσο υψηλές όσο το προϊόν μπορεί να αντέξει. Ωστόσο, για ενεργητικούς ηλιακούς ξηραντήρες τύπου διανομής, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία μπορεί να μη δώσει το βέλτιστο σχέδιο του ξηραντήρα, καθώς η αποδοτικότητα των ηλιακών συλλεκτών μειώνεται με υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου.

Έτσι, μια κρίσιμη απόφαση στο σχεδιασμό αυτών των ξηραντήρων είναι είτε να επιλεγθούν υψηλές θερμοκρασίες ξήρανσης και κατά συνέπεια, αναγκαστικά, χαμηλότεροι ρυθμοί ροής αέρα (που σημαίνει χρήση μικρότερων ανεμιστήρων και απαίτηση για υψηλά επίπεδα μόνωσης στους αγωγούς) ή να χρησιμοποιηθούν χαμηλές θερμοκρασίες ξήρανσης, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος της μόνωσης, καθώς οι απώλειες θερμότητας είναι χαμηλές. Ωστόσο, η απόδοση των ξηραντήρων υψηλής θερμοκρασίας βελτιώνεται σημαντικά με υψηλούς ρυθμούς ροής αέρα, επομένως πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ του μεγέθους των ανεμιστήρων και του επιπέδου της μόνωσης για έναν οικονομικά αποδοτικό σχεδιασμό.

1.4.3.14 Ενεργητικοί ηλιακοί ξηραντήρες μικτού τύπου

Οι μικτού τύπου ξηραντήρες συνδυάζουν χαρακτηριστικά των ξηραντήρων ενιαίου τύπου και των ξηραντήρων τύπου διανομής. Ένας τυπικός ξηραντήρας μικτού τύπου [30,31] αποτελείται από έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα, αγωγούς αέρα, έναν ξεχωριστό θάλαμο ξήρανσης και έναν ανεμιστήρα ή/και αντλία. Ωστόσο, ο θάλαμος ξήρανσης έχει τζάμια ώστε το προϊόν να απορροφά απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία.

Χαρακτηριστικά ενός ενεργητικού ηλιακού ξηραντήρα μικτού τύπου φαίνονται στο Σχ. 26.



Σχ. 26 [32] χαρακτηριστικά ενός τυπικού ενεργητικού ηλιακού ξηραντήρα μικτής λειτουργίας

1.5 Ανασκόπηση τεχνολογιών ηλιακής ξήρανσης

Σημαντικές εξελίξεις της τελευταίας δεκαετίας στον τομέα της ηλιακής ξήρανσης τροφίμων επανεξετάστηκαν από τον Muhlbauer, τονίζοντας το γεγονός ότι η ηλιακή ενέργεια είναι πιο εφαρμόσιμη στα συστήματα ξήρανσης χαμηλής θερμοκρασίας με αποθήκευση και έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία την τελευταία δεκαετία για την ξήρανση σπόρων και σανού [64].

Ο Purohit ανέπτυξε ένα απλό πλαίσιο για να διευκολύνει τη σύγκριση της οικονομικής δυνατότητας της ηλιακής ξήρανσης σε σχέση με τη φυσική ηλιακή ξήρανση, έχοντας παρουσιάσει τα αποτελέσματα μερικών υπολογισμών και μία σύντομη συζήτηση [65]. Ο Ekechukwu παρουσίασε μία συνολική ανασκόπηση των θεμελιωδών αρχών και θεωριών της διαδικασίας ξήρανσης μαζί με βασικούς ορισμούς [66]. Μία συνολική ανασκόπηση των διάφορων σχεδίων, λεπτομερειών κατασκευής και λειτουργικών αρχών των συστημάτων ηλιακής ξήρανσης παρουσιάστηκε από τους Ekechukwu και Norton.

Μια συστηματική προσέγγιση για την κατηγοριοποίηση των ηλιακών ξηραντήρων εξελίχθηκε, αναγνωρίζοντας δύο βασικές κατηγορίες, τους παθητικούς ή φυσικής κυκλοφορίας ξηραντήρες και τους ενεργητικούς ή εξαναγκασμένης συναγωγής [67]. Μια ανασκόπηση των διάφορων σχεδίων και της εκτίμησης απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών επίπεδης πλάκας για εφαρμογές ξήρανσης χαμηλής θερμοκρασίας (μεταξύ 10 °C και 35 °C πάνω απ' του περιβάλλοντος) παρουσιάστηκε από τους Ekechukwu και Norton. Επίσης τονίστηκαν η καταλληλότητα του κάθε σχεδίου και η επιλογή των υλικών [68].

Ο Fudholi επανεξέτασε διάφορους τύπους ηλιακών ξηραντήρων αναφορικά με το προϊόν, τεχνικά και οικονομικά ζητήματα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ηλιακοί ξηραντήρες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, τους άμεσους, τους έμμεσους, τους μικτής λειτουργίας και τους υβριδικούς [69]. Τεχνολογίες ξήρανσης χαμηλού κόστους κατάλληλες για αγροτικές περιοχές παρουσιάστηκαν από τους Chua και Chou.

Παρουσιάστηκε μια σύντομη εισαγωγή σε καθεμιά απ' τις τεχνολογίες, ρευστοποιημένης κλίσης, κλίσης έκχυσης, υπέρυθρη, ηλιακή, απλής συναγωγής, και αποξηραντικού και ακολούθησαν τεχνικές λεπτομέρειες για τη λειτουργία τους [70].

Ο Sharma έδωσε μία προκαταρκτική οικονομική ανάλυση για έναν έμμεσο ξηραντήρα φρούτων και λαχανικών και η ανάλυση έδειξε ότι οι πιο σημαντικές οικονομικές παράμετροι στην κοστολόγηση του κύκλου ζωής του συστήματος είναι η περίοδος αποπληρωμής και ο συντελεστής εσωτερικής απόδοσης, επιπρόσθετα με άλλες σημαντικές παραμέτρους όπως αρχική επένδυση, τιμή καυσίμου, φόρος επί της τιμής καυσίμου, κλπ. [71]

1.5.1 Ηλιακή Ξήρανση σε διάφορες χώρες

Τα αποτελέσματα της χρήσης ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ενέργειας, την απόσταξη υφάλμυρου νερού, την ψύξη και τον κλιματισμό, τη θέρμανση νερού, την ξήρανση καλλιεργειών, κλπ. στην ευημερία των αναπτυσσόμενων χωρών συζητήθηκαν από τον Saif-Ul-Rehman, παρουσιάζοντας με λεπτομέρεια την ανάλυση των δυσκολιών στη χρήση της ηλιακής ενέργειας λόγω οικονομικών περιορισμών σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα [72]. Η παραδοσιακή μέθοδος ηλιακής ξήρανσης στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού είναι η φυσική ηλιακή ξήρανση όπου το προϊόν εκτίθεται απευθείας στον ήλιο. Έχοντας επισκεφθεί διάφορες χώρες, ο Ong μελέτησε τα διάφορα σχέδια για ηλιακή ξήρανση σ' αυτή την περιοχή.

Τρεις τύποι ηλιακών ξηραντήρων βρέθηκαν να έχουν τις καλύτερες δυνατότητες για ανάπτυξη στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού [73],

- Ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής κιβωτίου
- Έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας εξαναγκασμένης συναγωγής
- Ηλιακός ξηραντήρας θερμοκηπίου

Ο Vecchia περιέγραψε τη μεθοδολογία και τα αποτελέσματα μιας μελέτης, η οποία περιορίστηκε στις θερμικές μορφές κατανάλωσης ενέργειας, που έγινε σύμφωνα με τη σύμβαση της επιτροπής Ευρωπαϊκών κοινοτήτων. Επίσης δόθηκε μία εκτίμηση των δυνατοτήτων της ένταξης ηλιακών τεχνολογιών στις Ευρωπαϊκές χώρες στους τομείς [74]

- των εξοχικών κατοικιών (θέρμανση χώρου, παραγωγή ζεστού νερού)
- της θέρμανσης καταφυγίων
- της παραγωγής ζεστού νερού για κτηνοτροφία
- της θέρμανσης θερμοκηπίων
- της ξήρανσης καλλιεργειών

Τα αποτελέσματα έρευνας και τα πειράματα που λήφθηκαν τα τελευταία 20 χρόνια στην Ευρώπη δείχνουν ότι η χρήση ηλιακών συλλεκτών επίπεδης πλάκας στις διαδικασίες ξήρανσης έχει πολλές δυνατότητες και μειώνει την κατανάλωση καυσίμου.

Ο Wisniewski ένιωσε ότι η εμπορική ανάπτυξη των ηλιακών ξηραντήρων δεν έχει μόνο οικονομικά πλεονεκτήματα αλλά καλύπτει και τις κοινωνικές ανάγκες σε τοπικό επίπεδο, ενώ παράλληλα ενημέρωσε σχετικά με την εμπορική ανάπτυξη των τεχνολογιών ηλιακής ξήρανσης στην Πολωνία και την Ευρώπη [75].

Ο Arinze συνειδητοποίησε την ανάγκη για εφαρμογή τεχνητών τεχνολογιών ξήρανσης έτσι ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος αλλοίωσης της καλλιέργειας, για την ξήρανση κτηνοτροφικών φυτών, στη διαδικασία κατασκευής σανού στη Βόρεια Αμερική, ως ένα εργαλείο διαχείρισης στη ζωική παραγωγή, στην επιλογή των κατάλληλων συστημάτων ξήρανσης για κτηνοτροφικά φυτά. Ανέπτυξε λοιπόν ένα πρόγραμμα προσομοίωσης των ηλιακών συστημάτων ξήρανσης σανού και το επικύρωσε συγκρίνοντας τα προβλεπόμενα αποτελέσματα του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν από έναν ξηραντήρα δέσμης και από ξήρανση τριφυλλιού στον αγρό.

Οι επιπτώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, του ρυθμού ροής αέρα, της θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα, της αρχικής περιεκτικότητας σε υγρασία, της πυκνότητας ξηρής ύλης και του ύψους της στοίβας του σανού στους χρόνους ξήρανσης για τελική περιεκτικότητα σε υγρασία 18% ερευνήθηκαν και βρέθηκε ότι υπάρχει εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας ανεμιστήρα περίπου 30 και 45% με τη χρήση ηλιακών ξηραντήρων σε αντίθεση με τη φυσική ηλιακή ξήρανση τον Ιούνιο και τον Αύγουστο αντίστοιχα στο Saskatoon [76].

Οι Kumar και Kandpal επιχείρησαν να εκτιμήσουν τις δυνατότητες της ηλιακής ξήρανσης για μερικές καλλιέργειες στην Ινδία. Οι δυνατότητες για μείωση των καθαρών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ορυκτής προέλευσης λόγω της εξοικονόμησης διάφορων καυσίμων με την ηλιακή ξήρανση στην Ινδία εκτιμήθηκαν μαζί με το μοναδιαίο κόστος μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [77].

Ηλιακοί θερμαντήρες αέρα διάφορων τύπων αναπτύχθηκαν στην Ινδία και οι επιδόσεις τους μελετήθηκαν με λεπτομέρεια από τον Bansal. Επίσης οι δυνατότητες των ηλιακών θερμαντήρων για

τη διαδικασία ξήρανσης μερικών καλλιεργειών αξιολογήθηκαν με λεπτομέρεια [78]. Η εφαρμογή συστημάτων ηλιακής ξήρανσης παρουσιάστηκε στο Νεπάλ για τη συντήρηση τροφίμων και για προσοδοφόρες δραστηριότητες.

Μία έρευνα σε εθνικό επίπεδο αποκάλυψε ότι τρεις τύποι συστημάτων ηλιακής ξήρανσης χρησιμοποιούνταν συνήθως, τύπου κιβωτίου για οικιακή χρήση, τύπου ραφιών για εμπορική χρήση και τύπου σήραγγας για βιομηχανική χρήση.

Τροποποιήσεις στο σχεδιασμό, στα υλικά κατασκευής και στη χωρητικότητα έγιναν από τον Joshi ώστε να καλυφθούν οι τοπικές ανάγκες και να βελτιωθεί η απόδοση αυτών των ξηραντήρων [79]. Η τεχνική και οικονομική απόδοση ενός υπάρχοντος ξηραντήρα στο Khao-Kor της Ταϊλάνδης αξιολογήθηκε από τον Tshewang Lhendup, για πιθανή αντιγραφή στο Bhutan. Το τσίλι και το βοδινό κρέας επιλέχθηκαν ως προϊόντα προς ξήρανση καθώς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της μαγειρικής τους. Το σύστημα ηλιακής ξήρανσης αποδείχθηκε φθηνότερο για το βοδινό ενώ ένα σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης αποδείχθηκε φθηνότερο για το τσίλι [80].

Η έρευνα και ανάπτυξη στην ηλιακή ξήρανση που έγινε στην Ταϊλάνδη τα τελευταία 15 χρόνια επανεξετάστηκε από τον Somchart Sorongnonnarit και τα τεχνικά και οικονομικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ηλιακή ξήρανση για κάποιες καλλιέργειες όπως το αναποφλοιώτο ρύζι, πολλαπλές καλλιέργειες και φρούτα είναι δυνατή [81]. Το longan είναι ένα απ' τα πιο ευρέως ανεπτυγμένα φρούτα στη Βόρεια Ταϊλάνδη, όπου μία σημαντική ποσότητα της ετήσιας συγκομιδής ξηραίνεται και εξάγεται ως εμπόρευμα. Το υγραέριο χρησιμοποιείται συνήθως ως πηγή ενέργειας για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης.

Ο Roman χρησιμοποίησε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για έναν επίπεδης πλάκας ηλιακό θερμαντήρα αέρα για να εκτιμήσει τη δυνατότητα της προθέρμανσης του αέρα ξήρανσης με δεδομένες τις συνθήκες διάφορων εγκαταστάσεων ξήρανσης longan. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να αντικαταστήσουν έως και 19.6% της απαιτηθείσας θερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της εποχής ξήρανσης και η ετήσια εξοικονόμηση χρημάτων μπορεί να φτάσει έως 1402 € [82].

Ο Oztek ερεύνησε την παρούσα κατάσταση της ξήρανσης γεωργικών καλλιεργειών στην Τουρκία, δίνοντας μία ευρεία προοπτική στην έμφαση της ξήρανσης στην αγοραστική αξία, την ετήσια παραγωγή και την αξία εξαγωγής μερικών σημαντικών καλλιεργειών [83].

Ο Salihoglu ερεύνησε και βρήκε μια οικονομική λύση στο πρόβλημα διαχείρισης της λάσπης στην πόλη Bursa της Τουρκίας και πρότεινε περιορισμένη ασβέστωση και ηλιακή ξήρανση ως μία εναλλακτική στην ασβεστωμένη και μηχανικά αφυδατωμένη λάσπη. Αποδείχθηκε ότι αν η περιορισμένη ασβέστωση και η ηλιακή ξήρανση εφαρμοστούν μετά τη μηχανική αφυδάτωση αντί για μόνο ασβέστωση, η συνολική ποσότητα της λάσπης που απορρίπτεται μειώνεται κατά 40%, το οποίο οδηγεί σε μείωση του κόστους μεταφοράς, διαχείρισης και υγειονομικής ταφής [84].

Ηλιακές θερμικές συσκευές χρησιμοποιούνται στις δυτικές Ινδίες για πάνω από έναν αιώνα. Παραδοσιακά, οι καλλιέργειες όπως το ρύζι και το κακάο ξηραίνονταν απευθείας στον ήλιο. Τα τελευταία 25 χρόνια ηλιακοί θερμαντήρες νερού έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμοι και πάνω από 30000 χρησιμοποιούνται στα Barbados και περίπου 2000 στη Jamaica. Επίσης ηλιακοί αποστακτήρες και ηλιακοί ξηραντήρες έχουν αναπτυχθεί και ηλιακοί συλλέκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτούν ηλιακούς φούρνους και ψύκτες προσρόφησης [85]. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ηλιακών ξηραντήρων που χρησιμοποιούνται για την ξήρανση διάφορων καλλιεργειών στην Καραϊβική περιγράφηκαν από τον Headley [86].

Ένας μικρός ηλιακός ξηραντήρας, αποτελούμενος από μία μονάδα ξήρανσης, αποθήκευση θερμότητας και ηλιακό συλλέκτη, σχεδιάστηκε για τις κλιματικές συνθήκες της Parua στη Νέα Γουϊνέα και κατασκευάστηκε και ελέγχθηκε στο τμήμα ενεργειακής έρευνας του πανεπιστημίου της Parua, από τον Lawrence. Λεπτομερείς πειραματικές έρευνες έγιναν για την ξήρανση ταπιόκα, καθώς και ο έλεγχος της μονάδας ξήρανσης με και χωρίς αποθήκευση θερμότητας [87].

Μια περιεκτική μελέτη για τη δυνατότητα χρήσης ηλιακής ξήρανσης στη Σαουδική Αραβία επιτεύχθηκε από τον Zahed. Δεδομένα σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία και τα σημαντικά για τη χώρα γεωργικά προϊόντα (σιτάρι, χουρμάς) παρουσιάστηκαν, και έγινε μία συζήτηση για διάφορα συστήματα ηλιακής ξήρανσης καλλιεργειών.

Τέσσερα απ' αυτά τα συστήματα προτάθηκαν να έχουν χαρακτηριστικά όπως χρήση ταυτόχρονης τεχνικής ξήρανσης, χρήση αγωγών θερμότητας, αποθήκευση θερμότητας και ενισχυτές και μία μελέτη προσομοίωσης για το προτεινόμενο σύστημα ταυτόχρονης ξήρανσης σπόρων έδειξε πάνω από 35% εξοικονόμηση ενέργειας όταν η θερμότητα διανέμεται από τον ηλιακό συλλέκτη του συστήματος [88].

Οι Chearok και Pornpareay έδωσαν μία περιγραφή της προσπάθειας που γίνεται στο πλαίσιο της περιφερειακής έρευνας και του προγράμματος διάδοσης, που υποστηρίζουν την ανάπτυξη ηλιακών ξηραντήρων στην Cambodia, για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη δοκιμή δύο τύπων ηλιακών ξηραντήρων (ξηραντήρα κιβωτίου και ξηραντήρα καμινάδας) που ταιριάζουν στις ανάγκες και απαιτήσεις στην Cambodia. Πειραματικές δοκιμές σ' αυτούς τους ξηραντήρες έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία έδειξαν ότι είναι κατάλληλοι για τοπική διάδοση [89].

Η τρέχουσα και προβλεπόμενη συντήρηση τροφίμων και η διαθεσιμότητα των ηλιακών ξηραντήρων δόθηκαν από τους Ben Mabrouk και Belghith, καθώς και οι πιθανές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Τυνησία [90]. Ο Roman παρουσίασε μια συνοπτική έρευνα σχετικά με την ηλιακή ξήρανση καλλιεργειών με επεξηγήσεις για την παραδοσιακή ξήρανση, τη βιομηχανική ξήρανση και τις τεχνικές ξήρανσης γενικότερα. Η ηλιακή ξήρανση στη Χιλή και τα πλεονεκτήματα της παρουσιάστηκαν τότε λεπτομερώς [91].

1.5.2 Σχεδιασμός, ανάπτυξη και αξιολόγηση απόδοσης διάφορων τύπων ξηραντήρων

Ο Sharma παρουσίασε μια συνολική ανασκόπηση των διάφορων σχεδίων, λεπτομερειών κατασκευής και λειτουργικών αρχών των συστημάτων ηλιακής ξήρανσης. Επίσης αναπτύχθηκε μια συστηματική προσέγγιση για την κατηγοριοποίηση των ηλιακών ξηραντήρων [92]. Συστήματα ηλιακής ξήρανσης διάφορων σχεδίων και οι διαδικασίες δοκιμών τους επανεξετάστηκαν από τους Sodha και Chandra [93].

Ο Augustus Leon παρουσίασε μια λεπτομερή ανασκόπηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή και αξιολόγηση διάφορων τύπων ηλιακών ξηραντήρων, τόνισε τις ελλείψεις των παραμέτρων που έχουν αναφερθεί και πρότεινε επιπλέον παραμέτρους. Σύμφωνα με την ανασκόπηση, προτάθηκε μία διαδικασία, δίνοντας τη μεθοδολογία, τις συνθήκες δοκιμών και ένα φύλλο αξιολόγησης δείγματος, τα οποία θα βοηθούσαν στην αξιολόγηση της απόδοσης ενός ηλιακού ξηραντήρα και θα διευκόλυναν τη σύγκριση διάφορων ηλιακών ξηραντήρων [94].

Ο Ramana Murthy επανεξέτασε διάφορες πτυχές των ηλιακών ξηραντήρων και τους συνήθεις τύπους ξηραντήρων στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού και νέοι τύποι ξηραντήρων με βελτιωμένες τεχνολογίες συζητήθηκαν. Η αξιολόγηση της απόδοσης ενός ξηραντήρα συζητήθηκε με λεπτομέρεια και αποδείχθηκε ότι υπάρχει πιο σύντομος τρόπος για την εκτίμηση της απόδοσης ενός ξηραντήρα [95]. Οι Arata και Sharma ερεύνησαν την πιο κατάλληλη και οικονομικά αποδοτική τεχνολογία συντήρησης τροφίμων που είναι κατάλληλη για εφαρμογή με περιορισμένους οικονομικούς πόρους, δηλαδή οι ξηραντήρες μπορούν να κατασκευαστούν με απλά εργαλεία και σχετικά φτηνά και τοπικά διαθέσιμα υλικά από βιομηχανίες μικρής κλίμακας [96].

Ο Sharma παρουσίασε μια πειραματική έρευνα τριών διαφορετικών τύπων ηλιακών ξηραντήρων βασισμένη στην αρχή της φυσικής καθώς και εξαναγκασμένης συναγωγής και έγιναν προσπάθειες για την επιλογή του πιο κατάλληλου σχεδίου για οικιακή, αγροτική και βιομηχανική κλίμακα [97].

Διάφορες πειραματικές τεχνικές περιγράφηκαν από τους Chandra και Sodha που επιτρέπουν στην καθαρή θερμική απόδοση μιας ακτινοβολημένης συστοιχίας ηλιακού θερμαντήρα αέρα να αναπαραχθεί σε εσωτερικό χώρο. Η επίπτωση των διαρροών αέρα ενσωματώθηκε στις εξισώσεις απόδοσης.

Επίσης περιγράφηκαν και άλλες γνωστές διαδικασίες δοκιμών. Περιγράφηκε μία μέθοδος για την παραγωγή σχεδιαστικών δεδομένων για ηλιακούς θερμαντήρες αέρα [98]. Διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών ενεργού αέρα εξετάστηκαν από τους Henriksso και Gustafsson, για δύο βασικές εφαρμογές, την ξήρανση γεωργικών καλλιεργειών και τη θέρμανση ζωοστασίων. Αποδείχθηκε ότι υπάρχουν πλεονεκτήματα όταν ο ηλιακός συλλέκτης είναι ενσωματωμένος μέσα στο κτίριο και οι τύποι ξηραντήρων που έχουν δοκιμαστεί έχουν τη δυνατότητα να συναγωνιστούν οικονομικά με το πετρέλαιο ως πηγή θερμότητας [99].

Έξι διαφορετικοί τύποι ηλιακών συλλεκτών φυσικής κυκλοφορίας σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν και αναλύθηκαν για την απόδοση τους από τον Turhan Koyuncu.

- Μοντέλο-1: μονός πλαστικός υαλοπίνακας, μαύρος απορροφητής ινσανίδων και εμπρόσθιο πέρασμα
- Μοντέλο-2: μονός πλαστικός υαλοπίνακας, μαύρος απορροφητής επίπεδης πλάκας και εμπρόσθιο πέρασμα

- Μοντέλο-3: μονός πλαστικός υαλοπίνακας, μαύρος απορροφητής πλάκας ζιγκ-ζαγκ και εμπρόσθιο πέρασμα
- Μοντέλο-4: μονός πλαστικός υαλοπίνακας, μαύρος απορροφητής επίπεδης πλάκας και οπίσθιο πέρασμα
- Μοντέλο-5: μονός πλαστικός υαλοπίνακας, , μαύρος απορροφητής πλάκας ζιγκ-ζαγκ και οπίσθιο πέρασμα
- Μοντέλο-6: διπλός πλαστικός υαλοπίνακας, μαύρος απορροφητής επίπεδης πλάκας και οπίσθιο πέρασμα

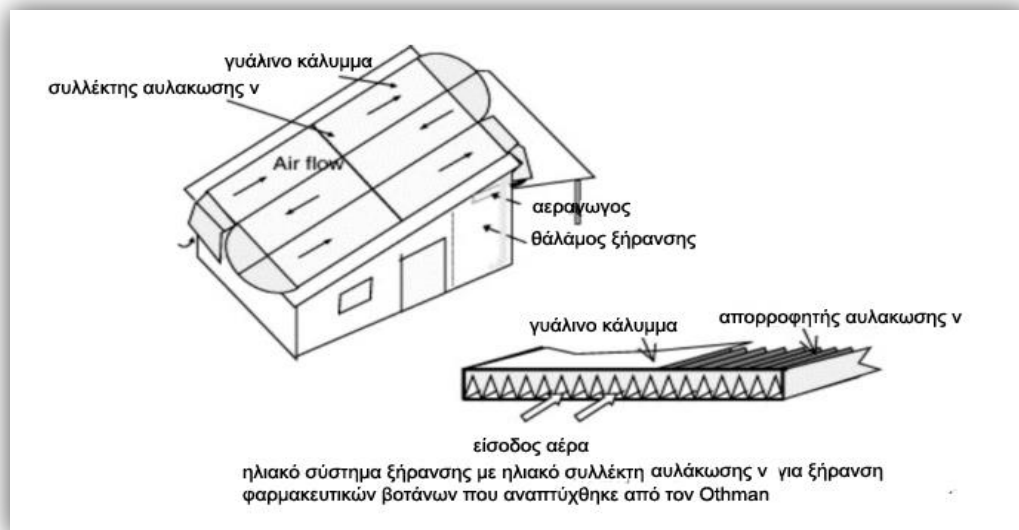
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι επιδόσεις των έξι μοντέλων ήταν αντίστοιχα 42.11%, 45.88%, 44.23%, 39.76%, 39.05% και 36.94%, και η απόδοση του πιο αποτελεσματικού συλλέκτη (Μοντέλο-2) είναι περίπου 9% μεγαλύτερη από αυτήν του λιγότερο αποτελεσματικού (Μοντέλο-6) [100].

Ένας μη μηχανικός ηλιακός ξηραντήρας βασισμένος στη μεταφορά θερμότητας και μάζας με συναγωγή, με αποθήκευση ενέργειας, κατασκευάστηκε από τοπικά διαθέσιμα υλικά και δοκιμάστηκε από τους Ayensu και Asiedu Bondzie για να ερευνηθούν τα χαρακτηριστικά της ξήρανσης διάφορων τροπικών προϊόντων [101].

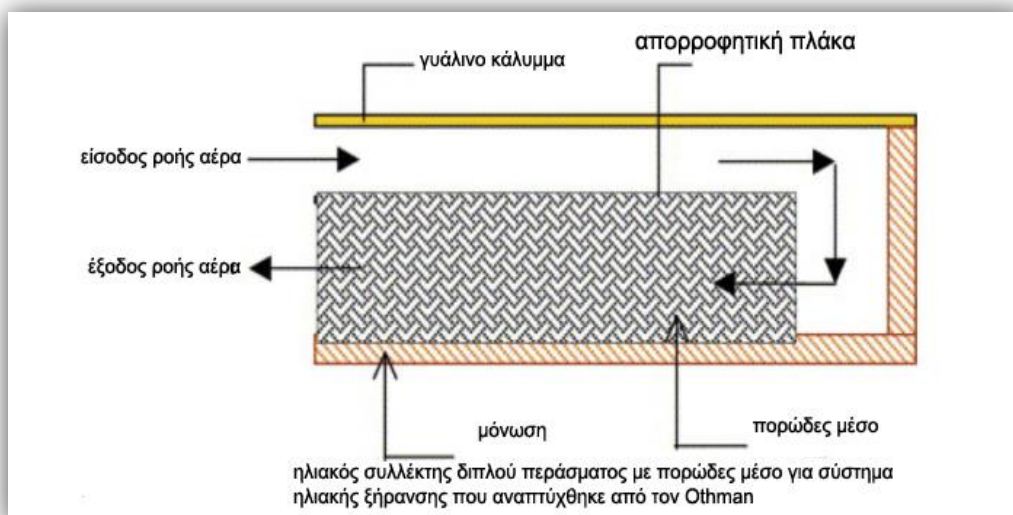
Ο Othman ανέπτυξε τέσσερα συστήματα ηλιακής ξήρανσης,

- Ηλιακό συλλέκτη αυλάκωσης V
- Ηλιακό συλλέκτη διπλού περάσματος με ενσωματωμένο σύστημα αποθήκευσης
- Ηλιακό σύστημα αφύγρανσης για ιατρικά βότανα
- Σύστημα φωτοβολταϊκού θερμικού συλλέκτη

που έχουν τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης θερμότητας, της βοηθητικής πηγής ενέργειας, του ενσωματωμένου συστήματος ελέγχου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία ποικιλία γεωργικών προϊόντων [102].



Σχ. 27 [102]ηλιακό σύστημα ξήρανσης με ηλιακό συλλέκτη αυλάκωσης v για ξήρανση φαρμακευτικών βοτάνων που αναπτύχθηκε από τον Othman



Σχ. 28 [102]ηλιακός συλλέκτης διπλού περάσματος με πορώδες μέσο για σύστημα ηλιακής ξήρανσης που αναπτύχθηκε από τον Othman

Ηλιακοί θερμαντήρες επιπρόσθετης πλάκας εγκαταστάθηκαν σε αγροκτήματα στο Tennessee για να παρέχουν θερμότητα για την ξήρανση σπόρων και καλλιεργειών.

Οι θερμαντήρες παρακολουθούνταν με τηλεμετρία από τον Womac για να προσδιοριστεί η θερμική απόδοση και να επιτραπεί περαιτέρω ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας. Τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης αποκάλυψαν ότι οι ηλιακοί θερμαντήρες παρέχουν επιτυχώς την κατάλληλη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια των περισσότερων συνθηκών ξήρανσης [103]. Ένα απλό σύστημα ξήρανσης με ηλιακό συλλέκτη περιγράφηκε από τον Garg με σκοπό να αναγνωριστεί ένα κατάλληλο σύστημα ξήρανσης μέτριας χωρητικότητας και να μελετηθούν αναλυτικά και πειραματικά τα χαρακτηριστικά απόδοσης αυτού του συστήματος [104].

Ο Tiris ασχολήθηκε με την κατασκευή και απόδοση ενός συστήματος ηλιακής ξήρανσης που αποτελείται από έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα και ένα θάλαμο ξήρανσης. Οι θερμικές αποδόσεις τόσο του ηλιακού θερμαντήρα όσο και του θαλάμου ξήρανσης ως συνάρτηση των τυπικών φυσικών παραμέτρων και τα πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικά τρόφιμα σε διαφορετικούς ρυθμούς ροής αέρα συζητήθηκαν.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το παρόν σύστημα ξήρανσης έχει θερμικές αποδόσεις μεταξύ 0.3 και 0.8 κατά τη διάρκεια πειραμάτων ξήρανσης και ότι οι υψηλότεροι ρυθμοί ροής αυξάνουν τη συνολική απόδοση και αποτελεσματικότητα [105].

Οι εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου για έναν παθητικό ηλιακό ξηραντήρα με αβαθή κλίση, συμπεριλαμβανομένης της επίπτωσης ενός ανακλαστήρα τοποθετημένου πάνω απ' το τοίχωμα της καμινάδας γράφτηκαν από την άποψη του σχεδιασμού και των κλιματικών παραμέτρων από τον Tiwari. Λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της αποθήκευσης θερμότητας και την καλλιέργεια, αναλυτικές εκφράσεις για τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου του συλλέκτη και η θερμοκρασία του υλικού αποθήκευσης και της καλλιέργειας λήφθηκαν και παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος ξήρανσης μειώνεται σημαντικά εξαιτίας της αύξησης της θερμικής ενέργειας στο συλλέκτη από τον ανακλαστήρα [106].

Ο Pitt έλαβε υπόψη τη σχέση μεταξύ της εξάτμισης σε δοχείο και της ξήρανσης καλλιεργειών στον αγρό, μετά την κοπή, και τις πηγές της μεταβλητότητας σ' αυτή τη σχέση. Η εξάτμιση σε δοχείο είναι μία κλιματική μέτρηση που ενσωματώνει τις επιπτώσεις της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου, της υγρασίας, και της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στο ρυθμό ξήρανσης. Η ξήρανση καλλιεργειών μοντελοποιήθηκε σαν μία στοχαστική διάχυση μορίων νερού έξω από τις επιφάνειες της καλλιέργειας. Το μοντέλο προέβλεψε ότι η αναμενόμενη αναλογία υγρασίας θα είναι μια εκθετικά φθίνουσα λειτουργία της συσσωρευμένης εξάτμισης σε δοχείο. Τα αποτελέσματα πειραμάτων έδειξαν ότι ο ρυθμός ξήρανσης ενός οποιουδήποτε κτηνοτροφικού δείγματος μπορεί να χαρακτηριστεί επακριβώς από τη σταθερά ξήρανσης μετρούμενη σε σχέση με την εξάτμιση σε δοχείο [107]. Η βασική εφαρμογή για ηλιακή ενέργεια στις νότιες μεσογειακές χώρες στη γεωργία είναι η ξήρανση γεωργικών καλλιεργειών.

Ο Chemkhi παρουσίασε μία μελέτη που αφορά τη θερμική συμπεριφορά ενός ηλιακού θερμαντήρα αέρα ως πηγή ενέργειας για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων, με σκοπό να υπολογίσει τη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού, την παραγωγή ενέργειας που χρησιμοποιείται και τη θερμική απόδοση σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του ανέμου και του ρυθμού ροής της μάζας αέρα [108].

Η γνώση των συντελεστών της διάχυσης υγρασίας, $Deff$ και της μεταφοράς μάζας με συναγωγή, hm κατά τη διάρκεια της ξήρανσης τροφίμων είναι απαραίτητη για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση των ηλιακών ξηραντήρων.

Οι Tripathy και Kumar πρότειναν μια μεθοδολογία για τον καθορισμό αυτών των συντελεστών χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους ξήρανσης (παράγοντας υστέρησης, ko και συντελεστής ξήρανσης, k). Ηλιακός ξηραντήρας μεικτής λειτουργίας με κυλίνδρους και φέτες πατάτας χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν διάφορα (εξαρτούμενα από τη θερμοκρασία) ko και k από την κινητική ξήρανσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν την τάση αύξησης των $Deff$ και hm με τη θερμοκρασία και οι τιμές τους βρέθηκαν να είναι υψηλότερες για τους κυλίνδρους απ' ό,τι για τις φέτες. Η αύξηση της θερμοκρασίας από $33^\circ C$ έως $48^\circ C$ για τους κυλίνδρους κατά τη διάρκεια της ξήρανσης οδήγησε σε αύξηση κατά 85.6% και 159% των $Deff$ και hm αντίστοιχα, ενώ αυτά τα ποσοστά ήταν 72% και 89% για τις φέτες [109].

Μία προσπάθεια έγινε από τους Anwar και Tiwari για να αξιολογήσουν το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή για τη φυσική ηλιακή ξήρανση. Οι τιμές των σταθερών C και n λήφθηκαν με ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης από πειραματικά δεδομένα για έξι καλλιέργειες, πράσινες πιπεριές, αρακά, ρεβίθι, κρεμμύδι, πατάτα και κουνουπίδι. Επίσης έγινε μία ανάλυση για το ρεβίθι κάτω από φυσικές συνθήκες ψύξης. Με βάση τις τιμές των C και n , καθορίστηκαν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή γι' αυτές τις καλλιέργειες [110].

Μία μελέτη προσομοίωσης έγινε από τους Anwar και Tiwari για να καθοριστούν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή για έξι καλλιέργειες, πράσινες πιπεριές, αρακάς, ρεβίθι, κρεμμύδι, πατάτα και κουνουπίδι για ξήρανση εξαναγκασμένης συναγωγής. Δεδομένα που λήφθηκαν από πειράματα για ανοιχτές και κλειστές συνθήκες προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστούν οι τιμές των συντελεστών C και n και κατά συνέπεια ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή [111].

1.5.3 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής συναγωγής

Ο Sharma ερευνήσε τα μέσα για συντήρηση τροφίμων χρησιμοποιώντας διαδικασίες κατάλληλες για εφαρμογή σε αγροτικές περιοχές, όπου οι πηγές ενέργειας είναι σπάνιες και κατασκεύασε διάφορους τύπους ηλιακών ξηραντήρων φυσικής συναγωγής, λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό κόστος επένδυσης κεφαλαίου και δυνατοτήτων αξιοποίησης που έχει η γεωργική ξήρανση.

Παρουσίασε την απόδοση διάφορων τύπων ηλιακών ξηραντήρων, καθώς και μία προκαταρκτική ανάλυση μεταφοράς θερμότητας [112]. Ένα παροδικό αναλυτικό μοντέλο παρουσιάστηκε από τον Jain για να μελετηθεί το νέο σενάριο ενός ηλιακού ξηραντήρα με συλλέκτη ανάστροφης απορροφητικής πλάκας και αποθήκευση θερμότητας, με φυσική ροή αέρα.

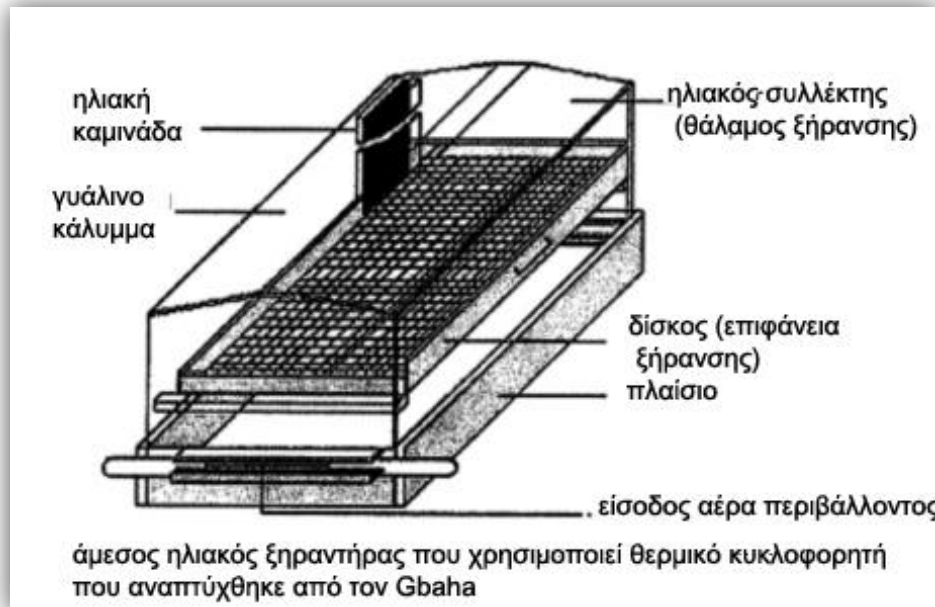
Η παραμετρική μελέτη περιλάμβανε την επίπτωση του πλάτους του καναλιού ροής αέρα και του ύψους της σταθερής κλίνης στη θερμοκρασία της καλλιέργειας και παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία της καλλιέργειας και ο ρυθμός ξήρανσης μειώνονται με το χρόνο ξήρανσης της ημέρας [113].

Ένας ηλιακός ξηραντήρας φυσικής κυκλοφορίας άμεσου τύπου και ένας απλός καυστήρας βιομάζας συνδυάστηκαν από τους Benon Bena και Fuller για να δείξουν μία τεχνολογία ξήρανσης κατάλληλη για μικρής κλίμακας επεξεργασία αποξηραμένων φρούτων και λαχανικών σε μη ηλεκτροδοτούμενες περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών. Τα βασικά χαρακτηριστικά του καυστήρα βιομάζας ήταν η προσθήκη θερμικής μάζας στην άνω επιφάνεια, μια εσωτερική πλάκα εκτροπής για την επιμήκυνση του διαδρόμου εξόδου καυσαερίων και μια μεταβλητή βαλβίδα εισαγωγής αέρα.

Επίσης προτάθηκαν περαιτέρω τροποποιήσεις για τη βελτίωση της απόδοσης τόσο των ηλιακών συνιστωσών όσο και των συνιστωσών βιομάζας [114]. Ένας νέος ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής αποτελούμενος από ένα θάλαμο ξήρανσης και έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα αναπτύχθηκε από τον Rangavhane. Αυτός ο ξηραντήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση διάφορων γεωργικών προϊόντων όπως φρούτων και λαχανικών.

Η ποιοτική ανάλυση έδειξε ότι η παραδοσιακή φυσική ηλιακή ή υπό σκιά ξήρανση χρειάζεται 7 και 15 μέρες αντίστοιχα για την ξήρανση των σταφυλιών ενώ ο ηλιακός ξηραντήρας χρειάστηκε μόνο

4 μέρες και παρήγαγε καλύτερης ποιότητας σταφύλια [115]. Ένας ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής άμεσου τύπου σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τοπικά υλικά (ξύλο, λεπίδες γυαλιού και μέταλλα) και δοκιμάστηκε πειραματικά στην ξήρανση τροφίμων (κασάβα, μπανάνες και μάνγκο) από τον Gbaha. Έγινε μία πειραματική προσέγγιση που αποτελείται από την ανάλυση της συμπεριφοράς του ξηραντήρα και αφορά κυρίως την κινητική και την καθιέρωση ισοζυγίων θερμότητας ξήρανσης [116].



Σχ. 29 [116] άμεσος ηλιακός ξηραντήρας που χρησιμοποιεί θερμικό κυκλοφορητή που αναπτύχθηκε από τον Gbaha

1.5.4 Ηλιακοί ξηραντήρες θερμοκηπίου

Το ηλιακό σύστημα θερμοκηπίου (μαζικής σκλήρυνσης/σύστημα θερμοκηπίου ή ηλιακός αχυρώνας) είναι ένας μεγάλος ηλιακός συλλέκτης στον οποίο η διαδικασία σκλήρυνσης και ξήρανσης ή η διαδικασία φυτικής παραγωγής λαμβάνει χώρα για αποτελεσματική ετήσια αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στη γεωργική παραγωγή.

Ο έλεγχος με μικροϋπολογιστή της διαδικασίας σκλήρυνσης του καπνού με ένα τέτοιο σύστημα υλοποιήθηκε από τους Huang και Toksoy και εφαρμόστηκε επιτυχώς για τη μεγιστοποίηση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας. Μελέτες της ανάπτυξης και απόδοσης έδειξαν ότι δενδρύλλια ανεπτυγμένα σε ηλιακούς αχυρώνες προσαρμόζονται σε πλήρως αυτόματη αναφύτευση και ότι καλύτερη ανάπτυξη και απόδοση επιτυγχάνεται απ' αυτά τα δενδρύλλια. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος, των θεωρητικών εκτιμήσεων, των μαθηματικών μοντέλων και της ανάλυσης που παρουσιάστηκαν συμφωνούσαν ευνοϊκά με τα μετρούμενα δεδομένα [117].

Ο Janjai παρουσίασε την πειραματική και προσομοιωμένη απόδοση ενός φωτοβολταϊκά αεριζόμενου ηλιακού ξηραντήρα θερμοκηπίου για την ξήρανση αποφλοιωμένου longan και αποφλοιωμένης μπανάνας. Ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει τη μεταφορά μάζας και θερμότητας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης στον ηλιακό ξηραντήρα θερμοκηπίου αναπτύχθηκε και επιλύθηκε αριθμητικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Η αριθμητική λύση προγραμματίστηκε σε Compaq Visual Fortran version 6.5. Αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει σχεδιαστικά δεδομένα και είναι απαραίτητο για βέλτιστο σχεδιασμό του ξηραντήρα [118].

Ο Jain παρουσίασε ένα παροδικό αναλυτικό μοντέλο για τη μελέτη της εφαρμογής ενός θερμοκηπίου με αποθήκευση θερμότητας σταθερής κλίνης για την ξήρανση καλλιέργειών και αξιολόγησε την απόδοση ενός θερμοκηπίου με σταθερή κλίνη και ξηραντήρα όμοιου σχήματος για την ξήρανση κρεμμυδιών.

Εδώ, η παραμετρική μελέτη περιλάμβανε τις επιπτώσεις του μήκους και του πλάτους του θερμοκηπίου και του ρυθμού ροής μάζας του αέρα στη θερμοκρασία της καλλιέργειας [119]. Ένας

συμβατικός ηλιακός ξηραντήρας θερμοκηπίου με εμβαδό δαπέδου $6 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m}^2$ (ανατολικός – δυτικός προσανατολισμός) βελτιώθηκε από τους Sethi και Arora για ταχύτερη ξήρανση χρησιμοποιώντας κεκλιμένη αντανάκλαση του βόρειου τοίχου (INWR) υπό φυσικής καθώς και εξαναγκασμένης συναγωγής λειτουργία. Χρησιμοποιώντας την αρχή της αντανάκλασης του βόρειου τοίχου, το προϊόν έλαβε πλήρως την ανακλώμενη ακτινοβολία (η οποία διαφορετικά φεύγει μέσω του βόρειου τοίχου) επιπρόσθετα με την άμεση συνολική ηλιακή ακτινοβολία που είναι διαθέσιμη στην οριζόντια επιφάνεια κατά τη διάρκεια διαφορετικών ωρών ξήρανσης. Αυτό ενίσχυσε το ρυθμό ξήρανσης του προϊόντος αυξάνοντας την εσωτερική θερμοκρασία αέρα και τη θερμοκρασία της καλλιέργειας του ξηραντήρα [120].

1.5.5 Ηλιακοί ξηραντήρες έμμεσου τύπου

Ο Sharma περιέγραψε το σχέδιο και την απόδοση ενός ξηραντήρα φρούτων και λαχανικών έμμεσου τύπου που αναπτύχθηκε στον τομέα της ενέργειας, στο τμήμα SIRE, στο πειραματικό τμήμα μηχανικών του ENEA-C.R.E., στην Trisaia και τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κάτω από ανεπιθύμητες καιρικές συνθήκες, η μονάδα μπορεί να παράγει καλής ποιότητας προϊόντα και εξαιτίας της χαμηλής επένδυσης που απαιτείται, ο ηλιακός ξηραντήρας προορίζεται για εφαρμογές σε μικρά αγροκτήματα [121].

Ένα καινούριο πρωτότυπο ενός έμμεσου ενεργητικού υβριδικού ηλιακού – ηλεκτρικού ξηραντήρα για γεωργικά προϊόντα κατασκευάστηκε και ερευνήθηκε στο εργαστήριο LENREZA, στο πανεπιστήμιο του Ouargla από τον Boughali. Πειραματικές δοκιμές με και χωρίς φορτίο έγιναν τη χειμερινή περίοδο για να μελετηθεί η θερμική συμπεριφορά του ξηραντήρα και η επίπτωση της υψηλής ροής μάζας αέρα στο συλλέκτη και την απόδοση του συστήματος και ερευνήθηκε ο λόγος της συμβολής ηλιακής και ηλεκτρικής ενέργειας προς το ρυθμό ροής μάζας αέρα.

Μια οικονομική αξιολόγηση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το κριτήριο της περιόδου αποπληρωμής η οποία ήταν πολύ μικρή 1.27 χρόνια συγκριτικά με τη ζωή του ξηραντήρα [122]. Ένας ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής έμμεσου τύπου σχεδιάστηκε ώστε να μπορούν να εισαχθούν διάφορα υλικά αποθήκευσης κάτω απ' την απορροφητική πλάκα για να βελτιωθεί η διαδικασία ξήρανσης, κατασκευάστηκε και ερευνήθηκε πειραματικά από τον El – Sebaïi, κάτω από τις καιρικές συνθήκες της Tanta.

Πειράματα ξήρανσης διεξάχθηκαν με και χωρίς υλικά αποθήκευσης για διαφορετικά σφαιρικά φρούτα, όπως σταφύλια χωρίς κουκούτσι, σύκα και μήλα, καθώς και λαχανικά, όπως αρακάς, ντομάτες και κρεμμύδια και η ηλιακή ακτινοβολία, η κατανομή της θερμοκρασίας σε διάφορα μέρη του συστήματος, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία του αέρα εισόδου και εξόδου καταγράφηκαν. Αποδείχτηκε επίσης ότι η αποθήκευση και η χημική προεπεξεργασία προκάλεσαν σημαντική μείωση στο χρόνο ξήρανσης για τις συγκεκριμένες καλλιέργειες [123]. Η ανάλυση ενέργειας και εξέργειας της διαδικασίας ξήρανσης υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου (OMW) χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό ξηραντήρα φυσικής συναγωγής έμμεσου τύπου παρουσιάστηκαν από τους Celma και Cuadros και αποδείχθηκε ότι οι εξεργειακές αποδόσεις του θαλάμου ξήρανσης μειώνονταν καθώς η θερμοκρασία εισόδου αυξανόταν, εφόσον οι απώλειες εξέργειας γίνονταν πιο σημαντικές [124].

Ένας ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής έμμεσου τύπου με ενσωματωμένο ηλιακό θερμαντήρα συλλογής-αποθήκευσης και εφεδρικό θερμαντήρα βιομάζας σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε από τους Madhloro και Ngwalo. Ο ξηραντήρας κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας απλά υλικά, εργαλεία και δεξιότητες, και δοκιμάστηκε σε τρεις τρόπους λειτουργίας (ηλιακή, βιομάζα, και ηλιακή-βιομάζα) με την ξήρανση δώδεκα παρτίδων φρέσκου ανανά, με κάθε παρτίδα να ζυγίζει περίπου 20kg. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμική μάζα ήταν ικανή να αποθηκεύει μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας και θερμότητα από τον καυστήρα. Οι μέσες τιμές της απόδοσης πρόσληψης υγρασίας την τελευταία μέρα ήταν 15%, 11% και 13% στις λειτουργίες ηλιακή, βιομάζα και ηλιακή-βιομάζα αντίστοιχα [125].

Η απόδοση των παθητικών ηλιακών ξηραντήρων έμμεσου τύπου τείνει να είναι κακή εξαιτίας των χαμηλών ρυθμών ροής αέρα που επικρατούν σ' αυτούς τους ξηραντήρες.

Δύο τρόποι για βελτίωση της απόδοσης είναι:

- Η χρήση καυσίμων αποβλήτων για να αυξηθούν οι δυνάμεις άνωσης θερμαίνοντας τον αέρα σε μία καμινάδα συνδεδεμένη με τον ξηραντήρα.

- Η μείωση του κενού αέρος μεταξύ του άνω διαφανούς καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας στο συλλέκτη με σκοπό την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας στον αέρα.

Ο Bassegy παρουσίασε τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης στα οποία οι επιπτώσεις της θέρμανσης του αέρα σε καμινάδα και οι επιπτώσεις της αλλαγής του κενού του συλλέκτη στην απόδοση του ξηραντήρα μετρήθηκαν και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση του ξηραντήρα μπορεί να βελτιωθεί αν οι θερμοκρασίες στις καμινάδες διατηρούνται στους 50 °C πάνω απ' τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για παραπάνω από 4 ώρες και αν η καμινάδα έχει τουλάχιστον 2m ύψος και ότι οι μέσοι ρυθμοί ξήρανσης στον ξηραντήρα μπορούν να βελτιωθούν μειώνοντας το ύψος του κενού στο συλλέκτη το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά τα 4cm [126].

1.5.6 Έμμεσοι ηλιακοί ξηραντήρες πολλαπλών ραφιών

Οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες και οι μελέτες απόδοσης που έγιναν με έμμεσο ξηραντήρα φρούτων και λαχανικών πολλαπλών ραφιών αναφέρθηκαν από τον Sharma. Πειραματικά αποτελέσματα για την ξήρανση διάφορων φρούτων με και χωρίς χημική προεπεξεργασία και κάτω από διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης αναλύθηκαν και στην ξήρανση φρούτων παρατηρήθηκε πειραματικά ότι η χρήση χημικής προεπεξεργασίας προσφέρει όχι μόνο σημαντική αύξηση του ρυθμού ξήρανσης αλλά επίσης υψηλότερη απόδοση ξηραντήρα με καλύτερης ποιότητας προϊόν [127].

Ο Singh ανέπτυξε έναν ηλιακό ξηραντήρα, ο οποίος έχει σχεδιασμό πολλαπλών ραφιών με ενδιάμεση θέρμανση, παθητικό, ενιαίο, άμεσο/έμμεσο και φορητό ηλιακό ξηραντήρα, για να επιτρέψει στους αγρότες να προσθέτουν αξία στο προϊόν τους ξηραίνοντας το στον αγρό και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε βιοτεχνίες σε απομακρυσμένα μέρη, με το νέο χαρακτηριστικό της ξήρανσης του προϊόντος υπό σκιά ή διαφορετικά ανάλογα τις απαιτήσεις. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα μείωσης της απόδοσης τη δεύτερη και τρίτη μέρα ξήρανσης, ερευνήθηκε ένας ημι-συνεχής τρόπος φόρτωσης, με τον οποίο η απόδοση παραμένει σχεδόν ίδια σε όλες τις μέρες ξήρανσης και η διάρκεια ζωής του προϊόντος είναι πάνω από ένα χρόνο [128].



Σχ. 30 [128] ηλιακός ξηραντήρας φορητής μορφής PAU που αναπτύχθηκε από τον Singh

Ο Singh ανέπτυξε και δοκίμασε έναν ηλιακό ξηραντήρα φυσικής συναγωγής με σχεδιασμό πολλαπλών ραφιών, αποτελούμενο από τρεις διάτρητους δίσκους τοποθετημένους ο ένας πάνω στον άλλο, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση διάφορων προϊόντων στο σπίτι κάτω από υγιεινές συνθήκες με την εγγύηση μη νοθευμένου προϊόντος. Είχε δύο νέα χαρακτηριστικά, τη μεταβλητή κλίση για τη δέσμευση περισσότερης ηλιακής ενέργειας σε διαφορετικές εποχές και την επιλογή για ξήρανση των προϊόντων υπό σκιά ή όχι ανάλογα με τις απαιτήσεις [129].

1.5.7 Ηλιακοί ξηραντήρες κιβωτίου

Ένα σύστημα ξήρανσης κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε από τον Al-Juamily αποτελούμενο από τρία μέρη (ηλιακό συλλέκτη, θάλαμο ξήρανσης και φυσητήρα) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο πιο σημαντικός παράγοντας του ρυθμού ξήρανσης είναι η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο κιβώτιο. Η επίπτωση της μεταβολής της ταχύτητας του αέρα μέσα στο κιβώτιο είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί και η σχετική υγρασία του αέρα που βγαίνει από το κιβώτιο ήταν μικρή (μεταξύ 25-30%) και κατά συνέπεια δεν υπάρχει ανάγκη για αέρα μεγάλης ταχύτητας μέσα στο κιβώτιο [130]. Μία μεταβατική ανάλυση ενός ηλιακού ξηραντήρα κιβωτίου διεξήχθη από τον Dutta, με απλουστευμένες αλλά πρακτικές παραδοχές και το μοντέλο προβλέπει τις στιγμιαίες θερμοκρασίες μέσα στον ξηραντήρα, την περιεκτικότητα σε υγρασία και τους ρυθμούς ξήρανσης. Η ανάλυση έγινε χωρίς φορτίο και με φορτία που κυμαίνονται από 10 έως 40kg [131].

Μία προσπάθεια έγινε από τον Sharma να αναλύσει τον ηλιακό ξηραντήρα κιβωτίου γράφοντας τις μεταβατικές εξισώσεις για τις διάφορες συνιστώσες του συστήματος και οι λύσεις τους επιχειρήθηκαν μέσα στα πλαίσια της περιοδικής ανάλυσης. Το μοντέλο ήταν ικανό να προβλέπει τη στιγμιαία θερμοκρασία μέσα στον ξηραντήρα, την περιεκτικότητα σε υγρασία και τους ρυθμούς ξήρανσης και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από θεωρητικές και πειραματικές παρατηρήσεις αναφέρθηκαν [132]. Η ανάπτυξη και δοκιμή ενός νέου τύπου αποδοτικού ηλιακού ξηραντήρα, με δύο διαμερίσματα, ενός για συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας και παραγωγή θερμικής ενέργειας και ενός για διασπορά του προς ξήρανση προϊόντος, προορισμένου κυρίως για φρούτα και λαχανικά, περιγράφηκε από τον Sreekumar.

Μία λεπτομερής ανάλυση απόδοσης έγινε με τρεις μεθόδους,

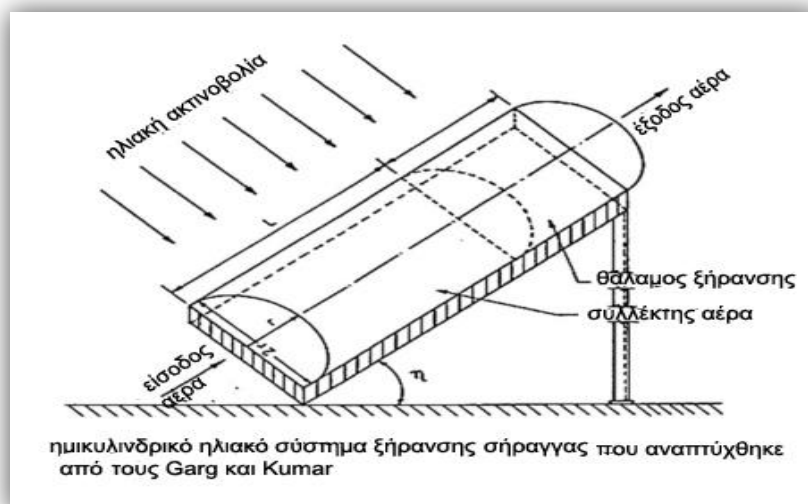
- Μέθοδο ετήσιου κόστους
- Μέθοδο παρούσας αξίας ετήσιων αποταμιεύσεων
- Μέθοδο παρούσας αξίας συνολικών αποταμιεύσεων

Το κόστος ξήρανσης για 1kg πικρής κολοκύθας υπολογίστηκε ως 0.2 € έναντι 0.5 € στην περίπτωση ηλεκτρικού ξηραντήρα [133].

Ο απορροφητής ανάστροφης επίπεδης πλάκας είναι ένας μη συγκεντρωτικός συλλέκτης που μπορεί να συλλέξει την ηλιακή ενέργεια σε υψηλή θερμοκρασία, σε αντίθεση με τους συμβατικούς μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Το σενάριο ενός συλλέκτη ανάστροφης επίπεδης πλάκας χρησιμοποιήθηκε από τους Goyal και Tiwari ως ένα μέσο θέρμανσης αέρα για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων σε έναν ξηραντήρα κιβωτίου. Η θερμική απόδοση αυτού του νέου ξηραντήρα αναλύθηκε επιλύοντας τις διάφορες εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου και συγκρίθηκε με την απόδοση ενός συμβατικού ξηραντήρα κιβωτίου. Αποδείχτηκε ότι ο ξηραντήρας με συλλέκτη με απορροφητή ανάστροφης επίπεδης πλάκας είχε καλύτερη απόδοση [134].

1.5.8 Ηλιακοί ξηραντήρες τύπου σήραγγας

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης και της θερμικής απόδοσης του συλλέκτη ενός ημικυλινδρικού ηλιακού ξηραντήρα σήραγγας παρουσιάστηκαν από τους Garg και Kumar. Η απόδοση εκτιμήθηκε κάτω από φυσική κυκλοφορία καθώς και εξαναγκασμένη κυκλοφορία και υπολογίστηκε για διάφορες κλίσεις του ξηραντήρα, για το κλίμα του Delhi (28.58 N γεωγραφικό πλάτος). Η ανάπτυξη του ξηραντήρα σήραγγας φυσικής κυκλοφορίας είναι πολύ σημαντική γιατί έχει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι του υπάρχοντος ξηραντήρα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας [135].



Σχ. 31 [135] ημικυλινδρικό ηλιακό σύστημα ξήρανσης σήραγγας που αναπτύχθηκε από τους Garg και Kumar

Ένας ηλιακός ξηραντήρας σήραγγας πολλαπλού σκοπού αποτελούμενος από ένα μικρό φυγοκεντρικό φυσητήρα, ένα συλλέκτη και ένα θάλαμο ξήρανσης σήραγγας, που αναπτύχθηκε αρχικά για χρήση σε άγονες ζώνες, τροποποιήθηκε από τον Amir, για να επιτρέπει λειτουργία κάτω από τροπικές καιρικές συνθήκες, με μία εστία βιομάζας και έναν εναλλάκτη θερμότητας ενσωματωμένο στο σύστημα ξήρανσης για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης κατά τη διάρκεια βροχερών και συννεφιασμένων ημερών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε σύγκριση με τη φυσική ηλιακή ξήρανση, ο χρόνος ξήρανσης του κακάου, του καφέ και της καρύδας μπορούσε να μειωθεί μέχρι και 40% και οι έρευνες έδειξαν ότι ακόμα και κατά τη διάρκεια της βροχερής περιόδου ήταν πιθανό να γίνει ξήρανση των προϊόντων μέχρι την τελική περιεκτικότητα σε υγρασία το οποίο χρειάζεται για αποθήκευση και εμπορευματοποίηση και ότι το αρθρωτό σύστημα επιτρέπει την προσαρμογή σε διαφορετικά μεγέθη αγροκτημάτων καθώς και σε συνεταιριστική χρήση [136].

1.5.9 Ηλιακοί ξηραντήρες ενιαίου τύπου

Μία περιεκτική μελέτη της συμπεριφοράς ενός μεγάλης κλίμακας ηλιακού ξηραντήρα φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου κατάλληλου για χρήση στις τροπικές περιοχές πραγματοποιήθηκε από τους Ekechukwu και Norton, σε όλο το εύρος των καιρικών συνθηκών που συναντώνται σε ένα τυπικό τροπικό κλίμα. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η εγκατάσταση του ξηραντήρα και η υπολογισμένη μεταβατική του αποτελεσματικότητα αναφέρθηκαν και λήφθηκαν γραμμικές συσχετίσεις μετρούμενων δεδομένων μεταξύ μιας ομαδοποιημένης παραμέτρου των ιδιοτήτων περιβάλλοντος και καλλιέργειας και της περιεκτικότητας σε υγρασία. Αυτό μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη σχεδιαστικών διαγραμμάτων ηλιακών ξηραντήρων [137].

Μία πλήρης συγκριτική ανάλυση της μετρούμενης απόδοσης ενός μεγάλης κλίμακας ηλιακού ξηραντήρα φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου κατάλληλου για χρήση σε τροπικές περιοχές παρουσιάστηκε από τους Ekechukwu και Norton για τις δύο επικρατέστερες τροπικές υγρές και ξηρές περιόδους και η απόδοση του ξηραντήρα εξαρτιόταν από τις μεταβολές της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας.

Οι συνθήκες ξήρανσης κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου ήταν σχεδόν σταθερές (δίνοντας συγκριτικά καλύτερη απόδοση), ενώ κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου οι συνθήκες ξήρανσης ήταν πιο απρόβλεπτες και οδήγησαν σε χειρότερη ξήρανση [138].

Ο ηλιακός ξηραντήρας φυσικής κυκλοφορίας ενιαίου τύπου προσομοιώθηκε από τον Onyegegbu, για να συμπεριλάβει τις επιπτώσεις της μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών της θερμοκρασίας αέρα και της υγρασίας και τις συνιστώσες της διάχυτης και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και αποδείχθηκε ότι η λειτουργία του ξηραντήρα σε συνθήκες ελάχιστης παραγωγής εντροπίας δίνει ένα χρήσιμο κριτήριο για την επιλογή των διαστάσεων του ξηραντήρα και είναι συμβατή με την επιθυμία για διατήρηση επιτρεπόμενων ορίων στη θερμοκρασία της καλλιέργειας [139].

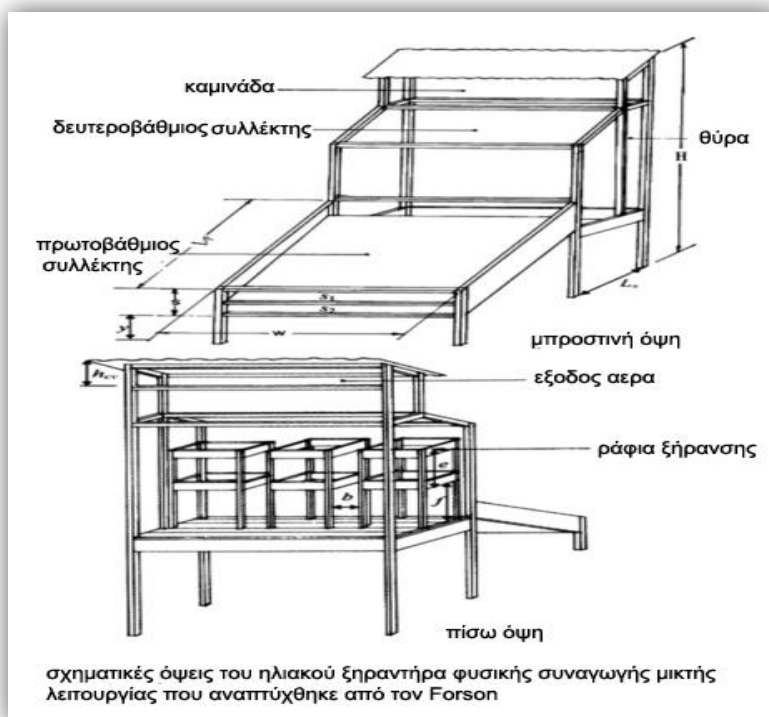
Ο Sharma παρείχε τις απαραίτητες πληροφορίες για το σωστό σχεδιασμό ενός συστήματος ηλιακής θέρμανσης αέρα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οικιακές ή γεωργικές εφαρμογές. Ένα φθινό σύστημα αποθήκευσης επαυξημένου ενσωματωμένου ηλιακού συλλέκτη με χρήση πετρών ως μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για να παρέχει χαμηλού βαθμού θερμότητα για την κάλυψη των αναγκών της θέρμανσης χώρων και των γεωργικών εφαρμογών και οι πειραματικές παρατηρήσεις της θερμοκρασίας του ρευστού, της αποθήκευσης ενέργειας και άλλα μέτρα απόδοσης του συστήματος παρουσιάστηκαν επίσης [140].

1.5.10 Ηλιακοί ξηραντήρες φυσικής συναγωγής μεικτής λειτουργίας

Ένα μαθηματικό μοντέλο, αποτελούμενο από το μοντέλο θέρμανσης αέρα, το μοντέλο ξήρανσης και το μοντέλο κριτηρίου τεχνικής απόδοσης, για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων σε έναν ηλιακό ξηραντήρα φυσικής συναγωγής μεικτής λειτουργίας που χρησιμοποιεί ηλιακό θερμαντήρα αέρα μονού περάσματος διπλού αγωγού παρουσιάστηκε από τον Forson. Οι εξισώσεις που διέπουν τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης και το λόγο υγρασίας, η θερμοκρασία του υλικού και η περιεκτικότητα του σε υγρασία καθώς και δείκτες κριτηρίων απόδοσης αντλήθηκαν.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη χρήση του μοντέλου παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα και αποδείχτηκε ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει την απόδοση του ξηραντήρα με αρκετή ακρίβεια και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα σχεδιαστικό εργαλείο για ανάπτυξη πρωτοτύπων [141]. Ένας ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής μεικτής λειτουργίας που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ξήρανση κασάβα και άλλων καλλιεργείων σε μία κλειστή κατασκευή παρουσιάστηκε από τον Forson.

Ένα πρωτότυπο του ξηραντήρα κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές και χρησιμοποιήθηκε σε πειραματικές δοκιμές ξήρανσης. Ο συστηματικός συνδυασμός της εφαρμογής βασικών σχεδιαστικών σεναρίων, και των κανόνων του αντίχειρα που προέκυψαν από πολλά χρόνια πειραματικών μελετών περιγράφηκαν και τα αποτελέσματα υπολογισμών των σχεδιαστικών παραμέτρων παρουσιάστηκαν [142].

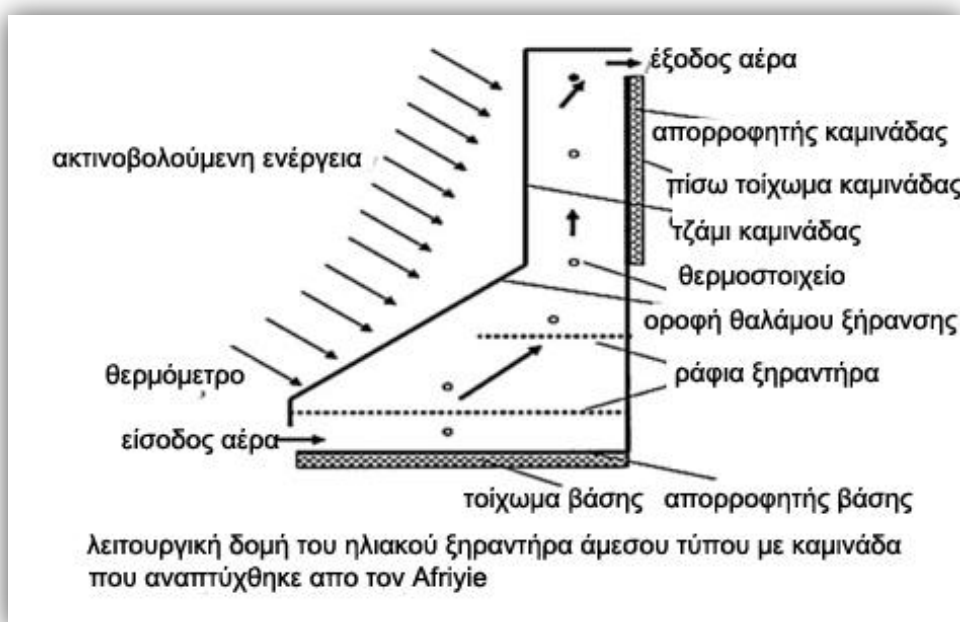


Σχ. 32 [142]σχηματικές όψεις του ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής μεικτής λειτουργίας που αναπτύχθηκε από τον Forson

1.5.11 Ηλιακοί ξηραντήρες καμινάδας

Ο Ferreira μελέτησε τη δυνατότητα μιας ηλιακής καμινάδας για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Για να εκτιμήσει την τεχνική δυνατότητα αυτής της συσκευής ξήρανσης, μία πρωτότυπη ηλιακή καμινάδα, στην οποία οι παράμετροι ταχύτητας του αέρα, θερμοκρασίας και υγρασίας παρακολουθούνταν σαν συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, χτίστηκε και οι δοκιμές ξήρανσης τροφίμων, βασισμένες σε θεωρητικές και πειραματικές μελέτες, διαβεβαίωσαν την τεχνική δυνατότητα χρήσης ηλιακών καμινάδων ως ηλιακούς ξηραντήρες για γεωργικά προϊόντα [143].

Μια πειραματική έρευνα της απόδοσης ηλιακού ξηραντήρα με ηλιακή καμινάδα χωρίς προθέρμανση αέρα περιγράφηκε από τον Afriyie. Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στον ξηραντήρα κιβωτίου, χρησιμοποιώντας μια απλή καμινάδα και στη συνέχεια μια ηλιακή καμινάδα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με την οροφή του θαλάμου ξήρανσης κεκλιμένη περαιτέρω ώστε να σχηματιστεί ένας ξηραντήρας σκηνής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ηλιακή καμινάδα μπορεί να αυξήσει το ρυθμό ροής αέρα ενός ξηραντήρα άμεσου τύπου ειδικά όταν είναι σχεδιασμένη με την κατάλληλη γωνία οροφής του θαλάμου ξήρανσης [144].



Σχ. 33 [144]λειτουργική δομή του ηλιακού ξηραντήρα άμεσου τύπου με καμινάδα που αναπτύχθηκε από τον Afriyie

Οι Das και Kumar περιέγραψαν το λεπτομερή σχεδιασμό και την απόδοση ενός πρωτότυπου, χαμηλού κόστους και απλού ηλιακού ξηραντήρα συνδυασμένου με μία καμινάδα κατακόρυφου συλλέκτη επίπεδης πλάκας για την ξήρανση 20 kg αναποφλοιώτου ρυζιού. Τα πειράματα κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών έδειξαν μία μέση αύξηση θερμοκρασιών αέρα κατά 21.8 °C και 27.1 °C για τον κεκλιμένο και τον κατακόρυφο συλλέκτη αντίστοιχα, με έναν μέσο ρυθμό ροής αέρα 0.6707 m³ / min (0.22 m/s) δια μέσου της καμινάδας και μία μείωση του ρυθμού ροής αέρα κατά 33% παρατηρήθηκε με βάθος σπόρων 7cm στον ξηραντήρα, όταν η μέση αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στον κεκλιμένο συλλέκτη αυξήθηκε στους 68.5 °C [145].

1.5.12 Ηλιακοί ξηραντήρες οπίσθιου περάσματος και πολλαπλού περάσματος

Ένα πρωτότυπο σύστημα ηλιακής ξήρανσης σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε από τον Othman στο πανεπιστήμιο Kebangsaan της Μαλαισίας και η μελέτη έδειξε ότι το σύστημα μπορεί να αναβαθμιστεί βελτιώνοντας τον ηλιακό συλλέκτη. Το προκαταρκτικό αποτέλεσμα στην απόδοση του ηλιακού συλλέκτη οπίσθιου περάσματος, αυλάκωσης V που τροποποιήθηκε από τον ηλιακό συλλέκτη

διπλής ροής, αυλάκωσης V που σχεδιάστηκε ωρύτερα έδειξε ότι ο συλλέκτης διατήρησε τη θερμοκρασία εξόδου παρόλο που υπήρχαν αλλαγές στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [146].

Ο ηλιακός συλλέκτης διπλού περάσματος με πορώδες μέσο στο κατώτερο κανάλι παρέχει μεγαλύτερη θερμοκρασία εξόδου σε σύγκριση με τον συμβατικό συλλέκτη μονού περάσματος. Επομένως, η θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη είναι μεγαλύτερη. Ένα θεωρητικό μοντέλο αναπτύχθηκε και μία πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τον ηλιακό συλλέκτη διπλού περάσματος από τον Sorjan. Συγκρίσεις μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων κατέληξαν στο ότι η παρουσία πορώδους μέσου στο δεύτερο κανάλι αυξάνει τη θερμοκρασία εξόδου, και κατά συνέπεια αυξάνει τη θερμική απόδοση του συστήματος [147].

Ο Jain παρουσίασε ένα μεταβατικό αναλυτικό μοντέλο για έναν κεκλιμένο ηλιακό θερμαντήρα αέρα πολλαπλού περάσματος με ενσωματωμένη αποθήκευση θερμότητας και

συνδεδεμένο με τον ξηραντήρα βαθιάς κλίσης και αξιολόγησε την απόδοση του για την ξήρανση καλλιέργειας αναποφλοιώτου ρυζιού σε βαθιά κλίση χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μοντέλο ξήρανσης βαθιάς κλίσης. Η επίπτωση της μεταβολής της γωνίας κλίσης, του μήκους και πλάτους ενός συλλέκτη και του ρυθμού ροής μάζας στη θερμοκρασία του σπόρου μελετήθηκαν, ο ρυθμός εξάτμισης υγρασίας και η υγρασία του αέρα ξήρανσης αναλύθηκαν με το χρόνο ξήρανσης για διάφορα βάθη της κλίσης. Παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία της κλίσης μειώνεται με την ώρα της μέρας και η υγρασία του αέρα και ο ρυθμός ξήρανσης αυξάνονται με την αύξηση του βάθους της κλίσης ξήρανσης [148].

Ο Jain παρουσίασε μία περιοδική ανάλυση ξήρανσης καλλιεργειών πολλαπλών δίσκων συνδεδεμένης με έναν κεκλιμένο ηλιακό θερμαντήρα αέρα πολλαπλού περάσματος με ενσωματωμένη αποθήκευση θερμότητας. Η απόδοση αυτής της ξήρανσης με ενσωματωμένο ηλιακό θερμαντήρα αέρα αξιολογήθηκε για την ξήρανση καλλιέργειας αναποφλοιώτου ρυζιού. Η εξίσωση ξήρανσης λεπτού στρώματος χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθεί ο ρυθμός ξήρανσης και η ωριαία μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία στους διαφορετικούς δίσκους και παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία της καλλιέργειας μειώνεται με το χρόνο ξήρανσης της μέρας.

Διαφορετικοί ρυθμοί ξήρανσης παρατηρήθηκαν σε διαφορετικούς δίσκους λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας της καλλιέργειας και παρατηρήθηκε ότι η θερμική απόδοση της ξήρανσης αυξάνεται με την αύξηση της μάζας της καλλιέργειας [149].

1.5.13 Οικιακοί και βιομηχανικοί ηλιακοί ξηραντήρες χαμηλού κόστους

Ένας ηλιακός θερμαντήρας αέρα χαμηλού κόστους, αποτελούμενος από ένα πλαίσιο σταθερό στο έδαφος, ένα διαφανές φύλλο κάλυψης και μαύρο πλαστικό ως απορροφητή, για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων στις τροπικές χώρες αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε από τον Esper. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η καταγεγραμμένη θερμοκρασιακή αύξηση έως 50 K είναι επαρκής για την ξήρανση διάφορων γεωργικών προϊόντων σε βέλτιστες συνθήκες. Σε σύγκριση με τους ηλιακούς θερμαντήρες αέρα που παράγονται σε βιομηχανοποιημένες χώρες, τα κόστη επένδυσης καθώς και η αντίσταση των συλλεκτών πλαστικής ταινίας στον αέρα ήταν σημαντικά χαμηλότερα. Αυτοί οι θερμαντήρες μπορούν να παραχθούν είτε από βιομηχανίες μικρής κλίμακας είτε από τους ίδιους τους αγρότες χρησιμοποιώντας απλά εργαλεία και τοπικά διαθέσιμα υλικά, κάνοντας ευνοϊκή τη χρήση τους στις τροπικές και υποτροπικές χώρες [150].

Ο Ahmad έφτιαξε έναν απλό ηλιακό θερμαντήρα αέρα από φτηνή πλαστική ταινία περιτυλίγματος με φυσαλίδες αέρα, για χρήση σε λειτουργίες ξήρανσης σε αγρόκτημα (σπόροι, φρούτα, ψάρια, κλπ.). Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας κυλινδρικός συλλέκτης μονού φύλλου και αφού θερμάνθηκε, άλλο ένα στρώμα πλαστικής ταινίας περιτυλίγματος με φυσαλίδες αέρα προστέθηκε σε επόμενο στάδιο για να μειώσει τις απώλειες θερμότητας συναγωγής. Παρόλο που η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν απλή, υπήρξε μια σημαντική αύξηση στη θερμοκρασία της ροής αέρα. Μία διαφορά περίπου 10 ° C μετρήθηκε [151].

Ένας οικιακός ηλιακός ξηραντήρας με διαφανείς εξωτερικές επιφάνειες σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε από τους Saleh και Badran. Ένας ηλιακός ξηραντήρας με ομοίμορφο θερμοκρασιακό προφίλ που καλύπτει τις απαιτήσεις του εκθετικού μοντέλου για μία πληθώρα περιπτώσεων, παρέχοντας έτσι ένα απλό και ακριβές σχεδιαστικό εργαλείο προτάθηκε. Αυτό χαρακτηριζόταν από τη συλλογή της μέγιστης δυνατής ηλιακής ενέργειας έχοντας μεγαλύτερη περίοδο ξήρανσης, και επέτρεπε στο σταθερό ξηραντήρα να προσεγγίσει την απόδοση του

εντοπισμένου ξηραντήρα με όλα τα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα του τελευταίου. Η απόδοση δοκιμάστηκε κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά ξήρανσης ερευνήθηκαν πειραματικά με τη διεξαγωγή πειραμάτων σε δύο τοπικά βότανα, Εβραϊκή μολόχα και φύλλα μέντας [152].

Ένας νέος ηλιακός ξηραντήρας, που αποτελούταν από έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα και ένα θάλαμο ξήρανσης, αναπτύχθηκε από τον Tiris για την ξήρανση τροφίμων και δοκιμάστηκε επιτυχώς χρησιμοποιώντας σουλτανίνα, φασολάκια, γλυκές πιπεριές και καυτερές πιπεριές.

Τα πειράματα παραδοσιακής φυσικής ηλιακής ξήρανσης διεξάχθηκαν και συγκρίθηκαν με τα πειράματα ηλιακής ξήρανσης και αποδείχτηκε ότι η χρήση αυτού του είδους ηλιακού ξηραντήρα μείωσε σημαντικά το χρόνο ξήρανσης και έδωσε καλύτερης ποιότητας προϊόν [153]. Η βιομηχανική ξήρανση μπορεί να αποδειχτεί ως οικονομική εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας όταν η διαδικασία χρησιμοποιεί αποθηκευμένη ενέργεια όταν η ηλιοφάνεια δεν είναι διαθέσιμη.

Ένα απλό σύστημα αναπτύχθηκε από τους Khanna και Singh, στο οποίο ενσωματώθηκαν μία δεξαμενή και ένας εναλλάκτης θερμότητας. Η συλλογή ηλιακής θερμότητας και η αποθήκευση επηρεάζονται από θερμοσιφωνική δράση με νερό και εξαρτώνται από τη λειτουργία μετάδοσης θερμότητας, φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για θέρμανση χώρου είτε για εσωτερική βιομηχανική ξήρανση με ηλιακή ενέργεια [154].

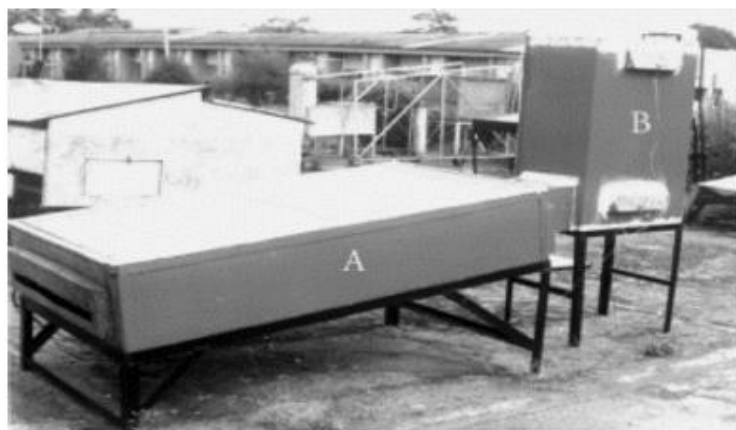
Ένας ηλιακός ξηραντήρας πολλαπλού σκοπού, αποτελούμενος από έναν μικρό ανεμιστήρα, έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα και έναν ξηραντήρα σήραγγας, αναπτύχθηκε από τον Lutz, για την ξήρανση διάφορων γεωργικών προϊόντων όπως φρούτων, λαχανικών, φαρμακευτικών φυτών, κλπ. Ο απλός σχεδιασμός αυτού του ξηραντήρα επιτρέπει την παραγωγή είτε απ' τους ίδιους τους αγρότες, χρησιμοποιώντας φτηνά και τοπικά διαθέσιμα υλικά, είτε από βιομηχανίες μικρής κλίμακας και λόγω της χαμηλής επένδυσης που απαιτείται, ο ηλιακός ξηραντήρας προορίζεται για εφαρμογή σε μικρά αγροκτήματα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Ο ηλιακός ξηραντήρας δοκιμάστηκε επιτυχώς στην Ελλάδα, τη Γιουγκοσλαβία, την Αίγυπτο, την Αιθιοπία, και τη Σαουδική Αραβία με την ξήρανση σταφυλιών, χουρμάδων, κρεμμυδιών, πιπεριών, και διάφορων φαρμακευτικών φυτών. Δοκιμές σε αγροκτήματα έδειξαν ότι ο ξηραντήρας μπορεί να χειριστεί εύκολα από τους αγρότες [155].

1.5.14 Ξήρανση σε ώρες μη ηλιοφάνειας

Ένα μεταβατικό αναλυτικό μοντέλο παρουσιάστηκε από τον Aboul-Enein, για έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα επίπεδης πλάκας με και χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία του αέρα μεταβάλλεται με τις συντεταγμένες χώρου και χρόνου, οι επιπτώσεις των σχεδιαστικών παραμέτρων του θερμαντήρα όπως το μήκος (L), το πλάτος (b), το κενό μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και του γυάλινου καλύμματος (df), ο ρυθμός ροής μάζας και το πάχος και ο τύπος του υλικού αποθήκευσης (άμμος, γρανίτης και νερό) στις μέσες θερμοκρασίες και στις θερμοκρασίες εξόδου του αέρα μελετήθηκαν.

Βελτιώσεις στην απόδοση του θερμαντήρα με αποθήκευση επιτεύχθηκαν στο βέλτιστο πάχος του υλικού αποθήκευσης (0.12m), το οποίο διευκολύνει τη χρήση του θερμαντήρα ως πηγή θερμότητας για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων και η διαδικασία ξήρανσης μπορεί να συνεχιστεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε να μην απορροφάται εκ νέου υγρασία από τον περιβάλλοντα αέρα [156].

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η αξιολόγηση απόδοσης ενός παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης αέρα, αποτελούμενου από ηλιακό συλλέκτη επίπεδης πλάκας μονού τζαμιού ενσωματωμένο σε ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με υλικό αλλαγής φάσης (PCM) το οποίο επιτρέπει λειτουργία κατά τη διάρκεια της νύχτας και το οποίο έχει πιθανές εφαρμογές στην ξήρανση καλλιεργειών και στην επώαση αυγών πουλερικών, παρουσιάστηκε από τον Enibe. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει επιτυχώς για εφαρμογές ξήρανσης καλλιεργειών και μη κατάλληλες βαλβίδες για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του θαλάμου, μπορεί να λειτουργήσει επίσης ως εκκολαπτήριο αυγών πουλερικών [157].



φωτογραφία του συστήματος θέρμανσης αέρα που αποτελείται από μία διάταξη συλλέκτη με αποθήκευση ενέργειας και υποσυστήματα θέρμανσης αέρα ανεπτυγμένα από τον Enibe

Σχ. 34 [157]φωτογραφία του συστήματος θέρμανσης αέρα που αποτελείται από μία διάταξη συλλέκτη με αποθήκευση ενέργειας και υποσυστήματα θέρμανσης αέρα ανεπτυγμένα από τον Enibe

Ένα νέο σχέδιο ενός θερμαντήρα νερού για ξήρανση κλίνης λεπτού στρώματος προτάθηκε και αναλύθηκε από τον Tiwari, για να κάνει το σύστημα να λειτουργήσει όλο το χρόνο.

Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ζεστό νερό όταν το σύστημα ξήρανσης δεν είναι σε λειτουργία και ο θερμαντήρας νερού κάτω από τα συστήματα θέρμανσης αέρα δρα ως υλικό αποθήκευσης για την ξήρανση της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια ωρών μη ηλιοφάνειας [158].

Ένας πρωτότυπος ηλιακός ξηραντήρας φρούτων και λαχανικών αναπτύχθηκε από τους Akçuyut και Selcuk, ο οποίος περιλαμβάνει έναν συλλέκτη επίπεδης πλάκας καλυμμένο με τζάμι που περιέχει μεταλλικά ρινίσματα, έναν ξηραντήρα με ημιδιαφανή τοιχώματα, και μία μονωμένη σήραγγα, που τους συνδέει. Πιπεριές και σουλτανίνα ξηράθηκαν σε εμπορικά αποδεκτά επίπεδα υγρασίας σε διάφορες καιρικές συνθήκες και σε διάφορες ταχύτητες αέρα. Μια οικονομική ανάλυση επιχειρήθηκε για να ερευνηθεί την πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν διάφορες πηγές ενέργειας για ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο όταν ενσωματωθεί στο πρωτότυπο, θα επιτρέπει λειτουργία παντός καιρού [159].

1.5.15 Συστήματα ξήρανσης βασισμένα σε αποξηραντικά για νυχτερινή λειτουργία

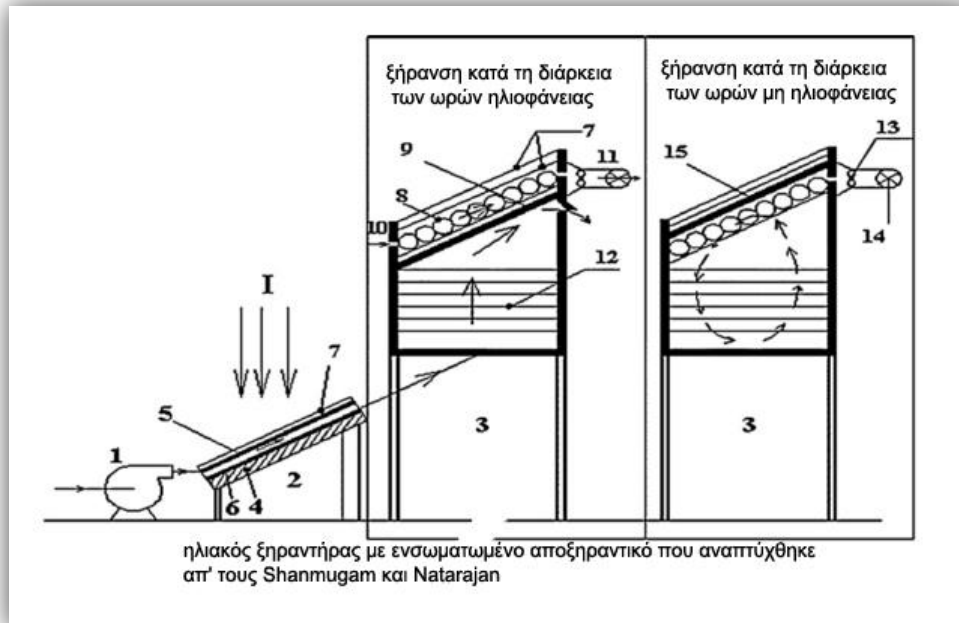
Η ξήρανση με αέρα θερμαινόμενο απ' τον ήλιο είναι ικανοποιητική όσο υπάρχει ηλιοφάνεια. Για να συνεχιστεί αυτή η διαδικασία τη νύχτα και σε περιόδους συννεφιάς, είναι απαραίτητο είτε να αποθηκευτεί μέρος της ενέργειας σε μια θερμική μάζα είτε να ενσωματωθούν αποξηραντικά στο σύστημα ξήρανσης.

Ο Thoruwa ανέφερε τα αποτελέσματα από μελέτες που έγιναν για να αναπτυχθούν τρία χαμηλού κόστους στερεά αποξηραντικά υλικά ηλιακά αναγεννητικά βασισμένα στον πηλό και το χλωριούχο ασβέστιο. Καθιέρωσε την ρόφηση υγρασίας τους και τα χαρακτηριστικά αναγέννησής τους, και αξιολόγησε την απόδοσή τους σε σύγκριση με εμπορικά αποξηραντικά και την ενσωμάτωσή τους σε ένα χαμηλού κόστους ηλιακό σύστημα ξήρανσης για ξήρανση καλλιεργειών μικρής κλίμακας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αποξηραντικό μπετονίτη-χλωριούχου ασβεστίου (τύπος 1) έδωσε μέγιστη ρόφηση υγρασίας της τάξεως του 45% σε ξηρή βάση ενώ τα αποξηραντικά μπετονίτη-χλωριούχου ασβεστίου (τύπος 2) και καολινίτη-χλωριούχου ασβεστίου (τύπος 3) έδωσαν ρόφηση υγρασίας της τάξεως του 30%. Από την ρόφηση υγρασίας και τα χαρακτηριστικά αναγέννησής βγήκε το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή τους στην ηλιακή ξήρανση και την αφύγρανση του αέρα είναι πολύ χρήσιμη λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών αναγέννησής τους (κάτω από 100 C) [160].

Ένας ηλιακός ξηραντήρας έμμεσου τύπου εξαναγκασμένης συναγωγής με ενσωματωμένα αποξηραντικά κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε από τους Shanmugam και Natarajan, με τέσσερα βασικά μέρη, έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα επίπεδης πλάκας, ένα θάλαμο ξήρανσης, αποξηραντική κλίνη και φυγοκεντρικό φυσητήρα. Το σύστημα λειτουργούσε σε δύο λειτουργίες, τις ώρες ηλιοφάνειας και τις ώρες μη ηλιοφάνειας, και πειράματα ξήρανσης διεξάχθηκαν με και χωρίς την ενσωμάτωση μονάδας αποξηραντικού.

Επίσης ερευνηθήκε η επίπτωση ενός ανακλαστικού κατόπτρου στη δυνατότητα ξήρανσης της αποξηραντικής μονάδας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εισαγωγή ανακλαστικού κατόπτρου στην αποξηραντική κλίνη προκαλεί γρηγορότερη αναγέννηση του αποξηραντικού υλικού [161].



Σχ. 35 [161]ηλιακός ξηραντήρας με ενσωματωμένο αποξηραντικό που αναπτύχθηκε από τους Shanmugam και Natarajan

Ένας έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας εξαναγκασμένης συναγωγής με ενσωματωμένο αποξηραντικό, αποτελούμενος από έναν ηλιακό συλλέκτη επίπεδης πλάκας, ένα θάλαμο ξήρανσης και μια μονάδα αποξηραντικού, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τους Shanmugam και Natarajan για να ερευνηθεί η απόδοση του κάτω από θερμές και υγρές κλιματικές συνθήκες στο Chennai της Ινδίας, με αρακά. Η ικανότητα απορρόφησης του συστήματος, ο ρυθμός εξαγωγής ειδικής υγρασίας, η αδιάστατη απώλεια μάζας, η αναλογία συρρίκνωσης μάζας και ο ρυθμός ξήρανσης συζητήθηκαν [162].

Το μαθηματικό μοντέλο για το Kathabar Spray-Cel System που αναπτύχθηκε από τους Mahmouda και Ball χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και του λόγου υγρασίας του αέρα στην είσοδο του δοχείου ξήρανσης. Το υπάρχον ασταθές μοντέλο ψύξης τροποποιήθηκε και συνδέθηκε με ένα μοντέλο συστήματος υγρού αποξηραντικού για τη μελέτη της δυνατότητας χρήσης του αφυδατωμένου αέρα του συστήματος σε εγκαταστάσεις ξήρανσης και το μοντέλο έδειξε ότι δεν είναι δυνατή η χρήση του αφυδατωμένου αέρα για την ξήρανση σπόρων. Το σύστημα υγρού αποξηραντικού τροποποιήθηκε για να προσομοιώσει την αδιαβατική λειτουργία και συνδέθηκε με το μοντέλο ξήρανσης κι έτσι το νέο σύστημα έδωσε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, αλλά η χρήση του για ξήρανση σπόρων προβλέφθηκε οικονομικά αδύνατη [163].

Μία μονάδα προσρόφησης γέλης πυριτίου σχεδιάστηκε από τους Hodali και Bougard και ενσωματώθηκε σε μια εφαρμογή ηλιακής ξήρανσης, αποτελούμενη από έναν άμεσο ηλιακό ξηραντήρα εξαναγκασμένης συναγωγής επίπεδης πλάκας συνδεδεμένο με έναν παρόμοιο ηλιακό συλλέκτη. Ο ημερήσιος κύκλος ρόφησης της μονάδας αποξηραντικού ερευνηθήκε και μία κατάλληλη σύζευξη του συλλέκτη, του ξηραντήρα και της μονάδας προσρόφησης επιλέχθηκε, προσομοιώθηκε αριθμητικά και εφαρμόστηκε για την ξήρανση βερίκοκων στο Μαρόκο κάτω από πραγματικές καιρικές συνθήκες. Η ενσωμάτωση της μονάδας προσρόφησης βελτίωσε την ποιότητα του προϊόντος και επέτρεψε κυκλική

λειτουργία ξήρανσης για πάνω από δύο μέρες μειώνοντας την περίοδο ξήρανσης από 52 ώρες σε 44 ώρες [164].

Ο Thoguwa περιέγραψε μερικές από τις πτυχές της απόδοσης ενός αυτόνομου ηλιακού ξηραντήρα αραβόσιτου με αποξηραντικό που αναπτύχθηκε για χρήση στην Κένυα. Καθώς τα περισσότερα εμπορικά αποξηραντικά ήταν ακριβά, ένα χαμηλού κόστους στερεό αποξηραντικό κατασκευάστηκε από άργιλο μπετονίτη και χλωριούχο ασβέστιο, το οποίο αναγεννιέται στους 45 ° C, έχει υψηλή ρόφηση υγρασίας της τάξης του 45%, επεκτείνει τη διαδικασία ξήρανσης τη νύχτα και μειώνει την μόλυνση των σπόρων από αφλατοξίνες.

Δοκιμές σε εργαστήριο και σε αγρόκτημα πραγματοποιήθηκαν για να καθοριστεί η απόδοση ξήρανσης και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο πρωτότυπος ξηραντήρας είχε την ικανότητα της ξήρανσης 90 kg φρέσκου αραβόσιτου από 38% υγρασία σε 15% υγρασία μέσα σε 24 ώρες [165].

Ο Punlek έφτιαξε ένα σχέδιο προσομοίωσης για ένα υβριδικό PV/T ενισχυόμενο HA-IR σύστημα ξήρανσης (HPIRD) με ενσωματωμένο αποξηραντικό το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες,

- φωτοβολταϊκό συλλέκτη αέρα (PVAC)
- αποξηραντική κλίνη γέλης πυριτίου (DB)

Τα δύο νέα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός νέου συστήματος ξήρανσης και συγκρίθηκαν με ένα συνηθισμένο σύστημα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης και η αποξηραντική κλίνη σχήματος V ήταν κατάλληλα, και έδειξαν επίσης ομοιόμορφα αποτελέσματα σε σύγκριση με το πείραμα. Ο χρόνος ξήρανσης, ο ρυθμός ξήρανσης και η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκαν σημαντικά με το υβριδικό σύστημα ξήρανσης [166].

1.6 Εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης στην Ελλάδα

1.6.1 Ξήρανση φρούτων (δαμάσκηνο)

Μεγάλες προοπτικές παρουσιάζουν τα αποξηραμένα δαμάσκηνα στη χώρα μας επειδή θεωρούνται άριστο αποξηραμένο φρούτο λόγω των εξαιρετικών οργανοληπτικών του ιδιοτήτων αλλά και λόγω του ότι μπορούν να δώσουν ικανοποιητικό εισόδημα στους παραγωγούς. Σταφίδες, δαμάσκηνα, βερίκοκα, σύκα και χουρμάδες τα πιο συνηθισμένα αποξηραμένα φρούτα που κυκλοφορούν στην ελληνική αγορά. Λαμπρό πεδίο επαγγελματικής δράσης προσφέρουν τα αποξηραμένα φρούτα, αφού λόγω της ελλειμματικής παραγωγής στην Ελλάδα, οι εγχώριες ανάγκες καλύπτονται με εισαγωγές από χώρες όπως η Τουρκία και οι ΗΠΑ. Παρόλο που η χώρα μας έχει πλούσια παραγωγή φρούτων, η πλειονότητα των αποξηραμένων φρούτων έρχεται από αγορές του εξωτερικού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τα εισαγόμενα δαμάσκηνα της Αμερικής και τα ξηρά σύκα της Τουρκίας.



Σχ. 36 [198]

Τα πιο συνηθισμένα αποξηραμένα φρούτα που κυκλοφορούν στην ελληνική αγορά είναι οι σταφίδες, και ακολουθούν τα δαμάσκηνα, τα βερίκοκα, τα σύκα και οι χουρμάδες. Τα ξηρά προϊόντα της γης είναι ανάρπαστα όχι μόνο στην ελληνική αγορά, αλλά και στο εξωτερικό,

λόγω του ότι στις χώρες αυτές δεν υπάρχουν λαχανικά και φρούτα όλες τις εποχές. Τα σουπερ μάρκετ, καταστήματα υγιεινής διατροφής και γενικά τα καταστήματα τροφίμων αναζητούν αυτά τα προϊόντα, καθώς διαπιστώνουν μια στροφή του καταναλωτικού κοινού προς αυτά. Μεγάλες προοπτικές παρουσιάζουν τα αποξηραμένα δαμάσκηνα στη χώρα μας επειδή θεωρούνται άριστο αποξηραμένο φρούτο λόγω των εξαιρετικών οργανοληπτικών του ιδιοτήτων αλλά και λόγω του ότι μπορούν να δώσουν ικανοποιητικό εισόδημα στους παραγωγούς.

Η καλλιέργεια της δαμασκηλιάς με σκοπό τα αποξηραμένα δαμάσκηνα είναι μία πολύ ενδιαφέρουσα καλλιέργεια που θα μπορούσε να αναπτυχθεί στη χώρα μας σε περιοχές κατάλληλες επειδή σήμερα ένα μεγάλο μέρος της κατανάλωσης καλύπτεται με εισαγωγές. Η νέα αυτή καλλιέργεια, πέρα από την εσωτερική αγορά, θα μπορούσε να αποτελέσει μία ενδιαφέρουσα εξαγωγική δραστηριότητα. Σήμερα η δαμασκηλιά για αποξήρανση καλλιεργείται κυρίως στη Σκόπελο η ποικιλία «Agen Σκοπέλου» που είναι κατάλληλη για παραγωγή αποξηραμένων δαμάσκηνων και σε μερικά άλλα σημεία της Βορείου Ελλάδος. Η συγκομιδή των καρπών που προορίζονται για αποξήρανση γίνεται με δονητές ή τα χέρια. Η μέση παραγωγή ενός στάρεμματος είναι 2,5-3 τόνοι όταν είναι τα φυτά σε πλήρη παραγωγή. Η παραγωγή αποξηραμένων φρούτων αποτελεί ένα σημαντικό τομέα εμπορίας των φρούτων που εφόσον αναπτυχθεί μπορεί να δώσει διέξοδο στις περιπτώσεις υπερπαραγωγής και εύρεσης αγορών για τα νωπά φρούτα.

Η δαμασκηλιά καλλιεργείται σε πολλές περιοχές του κόσμου. Στην Ελλάδα καλλιεργείται κυρίως στη Φθιώτιδα, την Εύβοια, τη Σκόπελο, Μαγνησία, Χαλκιδική, Φλώρινα, Λέσβο κ.ά. Στην Ελλάδα καλλιεργούνται περίπου 5.000 στρέμματα, εκ των οποίων το 90% καλλιεργείται για παραγωγή νωπών καρπών και το 10% περίπου για παραγωγή αποξηραμένων δαμάσκηνων.



Σχ. 37 [198]

1.6.1.1 Τεχνική

Η αποξήρανση των φρούτων αποτελεί μία μέθοδο συντηρήσεως των φρούτων που εφαρμόζεται από πολλούς αιώνες. Η αποξήρανση των φρούτων ήταν μία πρακτική που εφαρμόζαν οι αρχαίοι Αιγύπτιοι, από τους οποίους διαδόθηκε στην Ευρώπη. Τα φρούτα αυτά ήταν τα σταφύλια (σταφίδες), τα σύκα, τα βερίκοκα, οι χουρμάδες κ.ά.

Η μεγάλη θρεπτική τους αξία είναι γνωστή εμπειρικά αλλά και μέσα από επιστημονικές εργασίες. Περιέχουν αρκετές φυτικές ίνες, βιταμίνες Β, Α, κάλιο, σίδηρο και άλλα θρεπτικά συστατικά ανάλογα το είδος του φρούτου. Επίσης περιέχουν πολλές αντιοξειδωτικές ουσίες που ωφελούν την υγεία όπως και τα νωπά φρούτα. Από 10.000 ευρώ ξεκινά το κόστος.

1.6.1.2 Οι μέθοδοι αποξήρανσης

Οι κατάλληλες μέθοδοι αποξήρανσης για φρούτα όπως το δαμάσκηνο είναι αυτές που χρησιμοποιούμενης ενέργειας, τον έλεγχο των παραμέτρων αποξήρανσης, ενώ διασφαλίζουν τους χρησιμοποιούν κλειστά ξηραντήρια που επιτρέπουν την καλύτερη αξιοποίηση της όρους υγιεινής και ποιότητας των ξηρών δαμάσκηνων. Η ωριμότητα των δαμάσκηνων είναι μια καθοριστική παράμετρος για την παραγωγή των ξηρών δαμάσκηνων. Το χρώμα και η συνοχή της σάρκας του καρπού είναι τα γενικά εξωτερικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί η optimum ημερομηνία της συγκομιδής των καρπών.

Οι καρποί που προορίζονται για αφυδάτωση υπόκεινται σε μια προετοιμασία που περιλαμβάνει το καθάρισμα, τη διαλογή, την κατάταξη των καρπών ανάλογα με το μέγεθός τους κ.λπ. Η αποξηήρανση των δαμάσκηνων, γίνεται με φυσικό τρόπο στον ήλιο ή τεχνητά σε θαλάμους ή σε κλιβάνους αποξηήρανσης.

Στη Σκόπελο, η τεχνική που εφαρμόζεται είναι η εξής: τα δαμάσκηνα απλώνονται στον ήλιο για μερικές ημέρες ώστε να χάσουν ένα μέρος του νερού που περιέχουν. Στη συνέχεια τοποθετούνται σε συρτάρια σε κλιβάνους σε θερμοκρασία 40-45ο C για 4-6 ώρες, ενώ γίνεται μετατόπισή τους από επάνω προς τα κάτω.

Στη συνέχεια βγαίνουν από τους κλιβάνους, μαλάσσονται, αναστρέφονται και επανεισάγονται στους κλιβάνους για 4-5 ώρες στους 60-70ο C. Ξαναβγαίνουν πάλι από τους κλιβάνους δέχονται τις ίδιες επεμβάσεις και στην συνέχεια τοποθετούνται στους κλιβάνους για 1-2 ώρες στους 70-90ο C. Στη συνέχεια εξέρχονται από τους κλιβάνους, μαλάσσονται και τοποθετούνται σε αποθηκευτικούς χώρους για 3 εβδομάδες ώστε να σταθεροποιηθεί η υγρασία τους στους 18-22ο C.

Άλλη μέθοδος σύγχρονη είναι αυτή κατά την οποία χρησιμοποιείται η «αντίστροφη ώσμωση» πριν από την τελική αποξηήρανση, με σκοπό την απομάκρυνση μίας ποσότητας του νερού που περιέχεται στους καρπούς, εμπλουτίζοντας τους ταυτόχρονα με σάκχαρα. Αυτή η μέθοδος γίνεται με εμπάπτιση των καρπών σε σιρόπι από ζάχαρη και σε διάλυση χλωριούχου νατρίου. Η τεχνική αυτή συνίσταται στην τοποθέτηση των νωπών δαμάσκηνων σε ένα «υπερτονικό διάλυμα ζάχαρης» για μια διάρκεια 12-18 ωρών πριν από την αποξηήρανση. Η διαδικασία αυτή της εμπάπτισης στο σιρόπι συνδυάζεται πολύ καλά με την τελική αποξηήρανση των καρπών με τον θερμό αέρα.

1.6.2 Έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας για την ξήρανση κορινθιακής Σταφίδας στην περιοχή του Αιγίου

Η Κορινθιακή σταφίδα, ποικιλίας της αμπέλου και προϊόν μεγάλης διατροφικής αξίας, άρχισε να καλλιεργείται στη χώρα μας πριν από επτά αιώνες περίπου. Η καλλιέργειά της εντοπίζεται αρχικά στη Βόρεια, Βορειοδυτική και Δυτική πελοπόννησο, καθώς και σε νησιά του Ιονίου αργότερα, περιοχές στις οποίες καλλιεργείται μέχρι σήμερα. Η παραγωγή και το εμπόριο σταφίδας αποτελούσαν τον κορμό της οικονομίας της χώρας μας στο δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα.

Για την περιοχή της Αιγιαλείας, η Κορινθιακή σταφίδα αποτελεί ακόμη και σήμερα το βασικό αγροτικό προϊόν της, με αποτέλεσμα να καθορίζει την οικονομική ζωή της περιοχής, αλλά και να συμβάλλει στη διαμόρφωση των κοινωνικών και πολιτιστικών χαρακτηριστικών της.

Η ξήρανση της σταφίδας, δηλαδή η μετατροπή του σταφυλιού σε ξηρό καρπό, γίνεται σήμερα με άμεση ηλιακή ξήρανση, δηλαδή με άμεση έκθεση του προϊόντος στην ηλιακή ακτινοβολία. Διαδικασία επίσημη για τους παραγωγούς και χωρίδιαιτερο ποιοτικό αποτέλεσμα για το προϊόν.

Η έμμεση ηλιακή ξήρανση, που προτείνεται, διαφέρει από την άμεση ηλιακή ξήρανση, σε δύο βασικά σημεία:

Το προϊόν,

* δεν εκτίθεται άμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία και

* δεν απλώνεται απροστάτευτο σε μεγάλη επιφάνεια στο έδαφος.

Συγκεκριμένα:

Με τη βοήθεια ενός ηλιακού συλλέκτη αέρος, συλλέγεται η ηλιακή ενέργεια, μετατρέπεται σε θερμότητα και στη συνέχεια, με τη βοήθεια του φυσικού ηεξανασκασμένου ρεύματος αέρα που δημιουργείται, χρησιμοποιείται για την ξήρανση της σταφίδας, που βρίσκεται προστατευμένη σε κλειστό χώρο. Υπολογίστηκε το ποσό της απαιτούμενης για την ξήρανση ενέργειας, η δυνατότητα δέσμευσης αυτής από το συλλέκτη, καθώς και τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη και κατασκευάστηκε αρχικά ένα μικρό, πειραματικό μοντέλο ξηραντηρίου, με το οποίο έγιναν οι βασικές αρχικές διαπιστώσεις.

Στην συνέχεια κατασκευάστηκε ένα μεγαλύτερο σε παραγωγική ικανότητα ξηραντήριο, με στόχο να μελετηθεί η διαδικασία ξήρανσης σε πραγματική κλίμακα. Για πέντε συνεχόμενα χρόνια μετρήθηκαν οι αποδόσεις του συλλέκτη και η αποτελεσματικότητα της διάταξης στην διαδικασία ξήρανσης του προϊόντος, ενώ κάθε χρόνο με βάσει τις παρατηρήσεις της προηγούμενης χρονιάς, γίνονταν μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας του ξηραντηρίου, αλλά και στην γεωμετρία του. Μελετήθηκε η λειτουργία του

συλλέκτη και του χώρου ξήρανσης με εξαναγκασμένη κυκλοφορία καθώς και με φυσική κυκλοφορία και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση.

Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες (κατά 10°K), που ανεπύχθησαν στην περίπτωση της φυσικής κυκλοφορίας αέρα, χωρίς δηλαδή χρήση ανεμιστήρα, οδηγούν σε ταχύτερη ξήρανση, παρά την μικρότερη παροχή αέρα. Το αποτέλεσμα αναφορικά με την ποιότητα του αποξηραμένου προϊόντος, είναι άριστο, δεδομένου ότι είναι απαλλαγμένο από τα προβλήματα της έκθεσης του στο έδαφος (μικροβιακό και χημικό φορτίο, καταστροφές κ.τ.λ.), στο ήλιο (χρώμα, συστατικά) και η ξήρανση του γίνεται με λιγότερη εργασία. Το κόστος της εγκατάστασης είναι αρχικά μεγαλύτερο από αυτό της άμεσης ηλιακής ξήρανσης, αλλά ο χρόνος ζωής αυτής, σε συνδυασμό με το πολύ μικρότερο κόστος εργασίας ξήρανσης, καθιστούν την έμμεση ηλιακή ξήρανση σε έναν οριζόντια 10 ετών, πολύ φθηνότερη.

1.7 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα χαμηλής θερμοκρασίας για εφαρμογές ξήρανσης καλλιεργειών

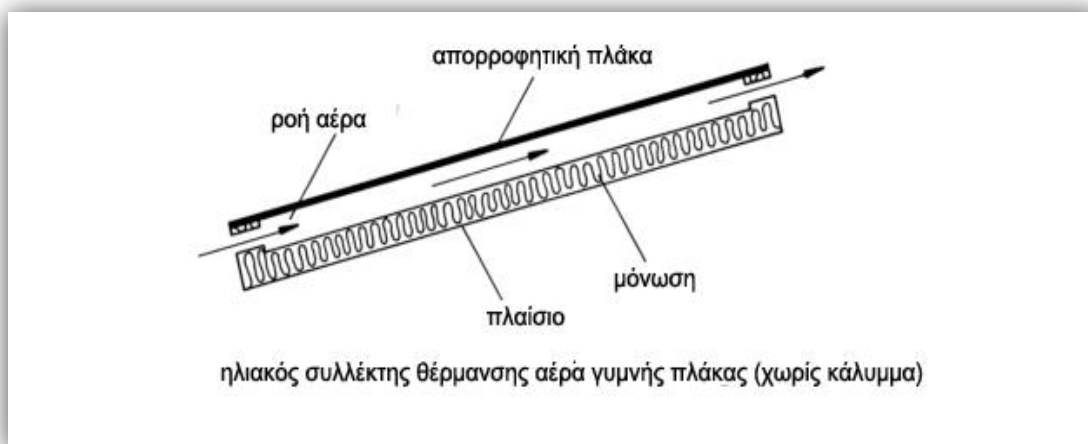
Οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για να αποκτηθεί χρήσιμη θερμική ενέργεια από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Μπορούν να είναι είτε συγκεντρωτικού τύπου είτε τύπου επίπεδης πλάκας. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες ηλιακής ενέργειας λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες απ' ό,τι οι επίπεδης πλάκας. Για εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης καλλιεργειών, οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας παρέχουν τις επιθυμητές ανόδους θερμοκρασίας και είναι πιο κατάλληλοι τεχνικο-οικονομικά σε σχέση με τους πιο περίπλοκους συγκεντρωτικούς συλλέκτες [173].

Ένας απλός συλλέκτης ηλιακής ενέργειας αποτελείται από μία απορροφητική επιφάνεια (συνήθως βαμμένη μαύρη) η οποία απορροφά την ακτινοβολία και την εκπέμπει (με τη μορφή θερμότητας) σε ένα εργαζόμενο ρευστό (συνήθως νερό ή αέρα). Για εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης, χρησιμοποιείται συνήθως ο αέρας ως εργαζόμενο ρευστό. Μία διάταξη δημιουργείται για την κυκλοφορία του αέρα διαμέσου ενός αγωγού, η μία πλευρά της οποίας είναι ο απορροφητής. Για παθητικές εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης, η ροή αέρα διαμέσου του θερμαντήρα αέρα γίνεται με φυσική συναγωγή.

1.7.1 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα

Οι ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: γυμνής πλάκας και καλυμμένης πλάκας [173,174].

1.7.2 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα γυμνής πλάκας



Σχ. 65 [188] ηλιακός συλλέκτης θέρμανσης αέρα γυμνής πλάκας (χωρίς κάλυμμα)

Αυτοί είναι οι πιο απλής μορφής ηλιακοί θερμαντήρες αέρα. Αποτελούνται από έναν αεραγωγό, η ανώτερη επιφάνεια του οποίου δρα ως απορροφητική πλάκα ηλιακής ενέργειας με την πίσω επιφάνεια μονωμένη. Οι ηλιακοί συλλέκτες γυμνής πλάκας χρησιμοποιούνται ευρέως σε λειτουργίες ξήρανσης καλλιεργειών (για συστήματα τόσο φυσικής όσο και εξαναγκασμένης συναγωγής). Οροφές κτιρίων κυματοειδούς λαμαρίνας υιοθετούνται συχνά ως συλλέκτες γυμνής πλάκας για θέρμανση του εναέριου χώρου μέσα στο κτίριο, όπως και σε μερικούς μεγάλους ηλιακούς αχυρώνες αποθήκευσης [175].

Γενικά, οι οπτικές απώλειες λόγω μείωσης εκπομπής της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα διάφανα καλύμματα στους ηλιακούς συλλέκτες είναι περίπου 10% [176]. Έτσι, η οπτική απόδοση (η μέγιστη εφικτή απόδοση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασιακές αυξήσεις του συλλέκτη, δηλαδή $\Delta T \rightarrow 0$) των ηλιακών συλλεκτών καλυμμένης πλάκας είναι 10% μικρότερη από αυτήν των συλλεκτών γυμνής πλάκας [176]. Αν και έχουν ελάχιστες οπτικές απώλειες, οι ηλιακοί συλλέκτες γυμνής πλάκας έχουν τεράστιες θερμικές απώλειες μέσω της εκτεθειμένης επιφάνειας. Συνεπώς, έχουν χαμηλές θερμικές αποδόσεις [174,177] σε μέτρια αυξημένες θερμοκρασίες αλλά λειτουργούν πιο αποτελεσματικά σε πολύ χαμηλές αυξήσεις θερμοκρασίας (< 10 C πάνω απ τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) [173]. Έτσι, είναι κατάλληλοι για εφαρμογές ηλιακής ξήρανσης πολύ χαμηλής θερμοκρασίας, όπως και σε μερικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης. Η κακή απόδοση των ηλιακών συλλεκτών γυμνής πλάκας, ωστόσο, αντισταθμίζεται από την απλότητα τους και το χαμηλό κόστος κατασκευής.

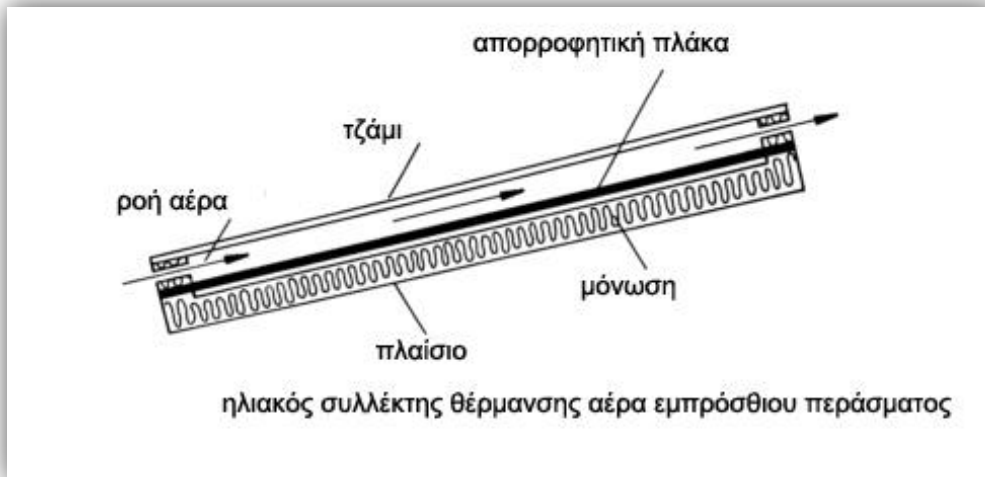
1.7.3 Ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα καλυμμένης πλάκας

Οι ανοδικές θερμικές απώλειες από τους ηλιακούς θερμαντήρες αέρα ελαχιστοποιούνται με τη χρήση ενός ή περισσότερων υλικών διαφανούς κάλυψης από πάνω και συνήθως παράλληλα με την απορροφητική πλάκα. Συνηθισμένα υλικά κάλυψης είναι το γυαλί, το πλεξιγκλάς και το καθαρό πλαστικό. Το υλικό κάλυψης αποτρέπει τις θερμικές απώλειες συναγωγής από την απορροφητική πλάκα, μειώνει τις θερμικές απώλειες ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και προστατεύει την απορροφητική πλάκα από την ψύξη λόγω βροχής. Τα κατάλληλα υλικά κάλυψης πρέπει να είναι εύλογα αδιαφανή στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.

Οι ηλιακοί θερμαντήρες αέρα καλυμμένης πλάκας, έτσι, λειτουργούν με υψηλότερες αποδόσεις απ' ό,τι οι γυμνής πλάκας σε μέτριες θερμοκρασιακές αυξήσεις. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής είναι αυξημένο, και καθώς τα υλικά κάλυψης είναι συνήθως ευάλωτα σε θραύση, τα κόστη συντήρησης είναι επίσης αυξημένα [174]. Οι ηλιακοί θερμαντήρες αέρα καλυμμένης πλάκας συνίστανται γενικά για θερμοκρασιακές αυξήσεις μεταξύ 10 και 35 ° C πάνω απ' τη θερμοκρασία περιβάλλοντος [173].

1.7.4 Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης πλάκας εμπρόσθιου περάσματος

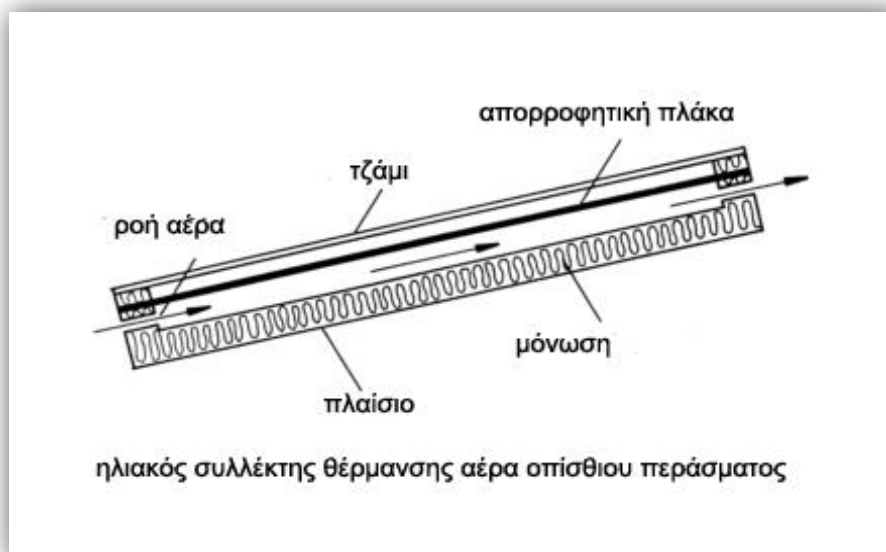
Εδώ, ο αέρας προς θέρμανση περνάει διαμέσου του αγωγού μεταξύ του υλικού κάλυψης και της απορροφητικής πλάκας (η πίσω πλευρά της οποίας είναι μονωμένη). Έτσι η μεταφορά θερμότητας στο ρεύμα αέρα γίνεται μέσω της μπροστινής πλευράς της απορροφητικής πλάκας.



Σχ. 66 [188] ηλιακός συλλέκτης θέρμανσης αέρα εμπρόσθιου περάσματος

1.7.5 Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης πλάκας οπίσθιου περάσματος

Εδώ η απορροφητική πλάκα είναι τοποθετημένη ακριβώς πίσω απ' το διαφανές κάλυμμα με ένα στρώμα στατικού αέρα να τη χωρίζει απ' το κάλυμμα. Ο αέρας προς θέρμανση ρέει μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας της απορροφητικής πλάκας και του στρώματος της μόνωσης, με μεταφορά θερμότητας μέσω της πίσω πλευράς της απορροφητικής πλάκας. Οι ηλιακοί θερμαντήρες αέρα οπίσθιου περάσματος είναι γενικά πιο αποδοτικοί από τους εμπρόσθιου περάσματος [178].

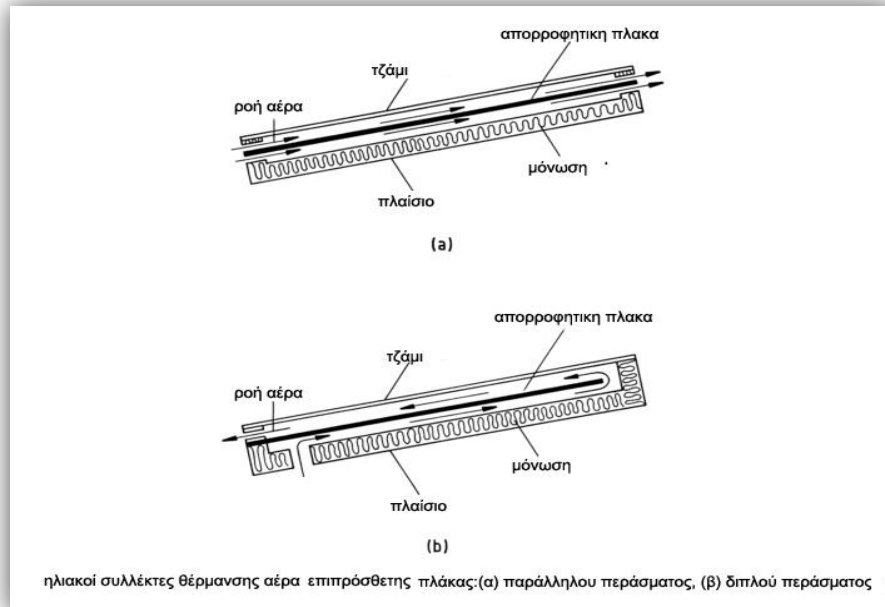


Σχ. 67 [188] ηλιακός συλλέκτης θέρμανσης αέρα οπίσθιου περάσματος

1.7.6 Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης επιπρόσθετης πλάκας

Η απορροφητική πλάκα εδώ είναι στερεωμένη μεταξύ του υλικού κάλυψης και του υποστηρικτικού στρώματος της μόνωσης. Ο αέρας προς θέρμανση ρέει σε μία απ' τις δύο πλευρές της απορροφητικής πλάκας, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας. Η απορροφητική πλάκα είναι, έτσι, σε χαμηλότερη θερμοκρασία και κατά συνέπεια, επανακτινοβολεί λιγότερη θερμότητα. Οι δύο γενικές διαμορφώσεις των ηλιακών θερμαντήρων αέρα επιπρόσθετης πλάκας είναι οι ηλιακοί θερμαντήρες αέρα παράλληλου περάσματος και οι ηλιακοί θερμαντήρες αέρα διπλού περάσματος. Ένα λιγότερο συνηθισμένο σχέδιο τριπλού περάσματος έχει επίσης αναφερθεί [179]. Οι

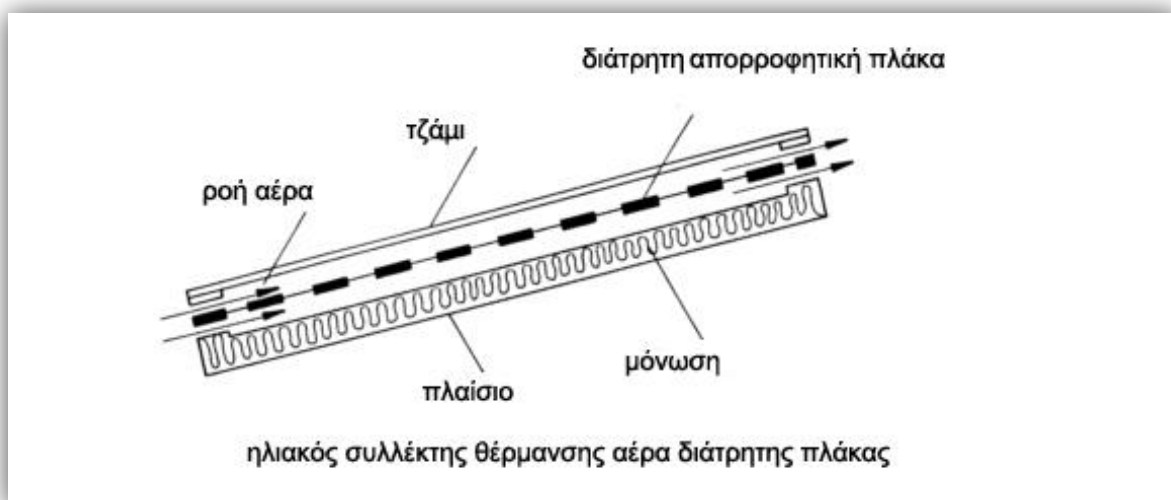
ηλιακοί θερμαντήρες αέρα επιπρόσθετης πλάκας, έτσι, λειτουργούν σε υψηλότερες αποδόσεις απ' ό τι οι γυμνής πλάκας, εμπρόσθιου ή οπίσθιου περάσματος [174]. Μια απόδοση της τάξεως του 65% έχει αναφερθεί για τους παράλληλης ροής [180], όμως οι λεπτομέρειες του συλλέκτη και των δοκιμών δεν έχουν διευκρινιστεί.



**Σχ. 68[188] ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης αέρα επιπρόσθετης πλάκας
α.παράλληλου περάσματος β.διπλού περάσματος**

1.7.7 Ηλιακοί συλλέκτες καλυμμένης διάτρητης πλάκας

Γνωστοί και ως ηλιακοί θερμαντήρες αέρα μήτρας, οι ηλιακοί συλλέκτες διάτρητης πλάκας είναι τροποποιημένες μορφές των συλλεκτών επιπρόσθετης πλάκας. Είναι φτιαγμένοι, συνήθως, από έναν πορώδη απορροφητή μεγάλου εμβαδού επιφάνειας [181], όπως ένα μαυρισμένο πλέγμα ή ροκανίδια. Έτσι, υπάρχει αυξημένη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του αέρα και της απορροφητικής πλάκας.



Σχ. 69 [188]ηλιακός συλλέκτης θέρμανσης αέρα διάτρητης πλάκας

1.7.8 Θεωρία αξιολόγησης απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών επίπεδης πλάκας

Το ωφέλιμο θερμικό κέρδος ενός συλλέκτη εκφράζεται ως [182]

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (46)$$

και το ακόλουθο θερμικό ισοζύγιο εκφράζει τη θερμική απόδοση ενός συλλέκτη σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης [182,183]

$$Q_u = AF_R[I(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)] \quad (47)$$

Ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας του συλλέκτη είναι η απόδοση συλλέκτη, ορισμένη ως ο λόγος του ωφέλιμου θερμικού κέρδους μιας χρονικής περιόδου προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία της ίδιας περιόδου [184].

$$n = \frac{Q_u}{IA} \quad (48)$$

Από τις εξισώσεις (46) και (48)

$$n = \dot{m}C_p \frac{(T_o - T_i)}{IA} \quad (49)$$

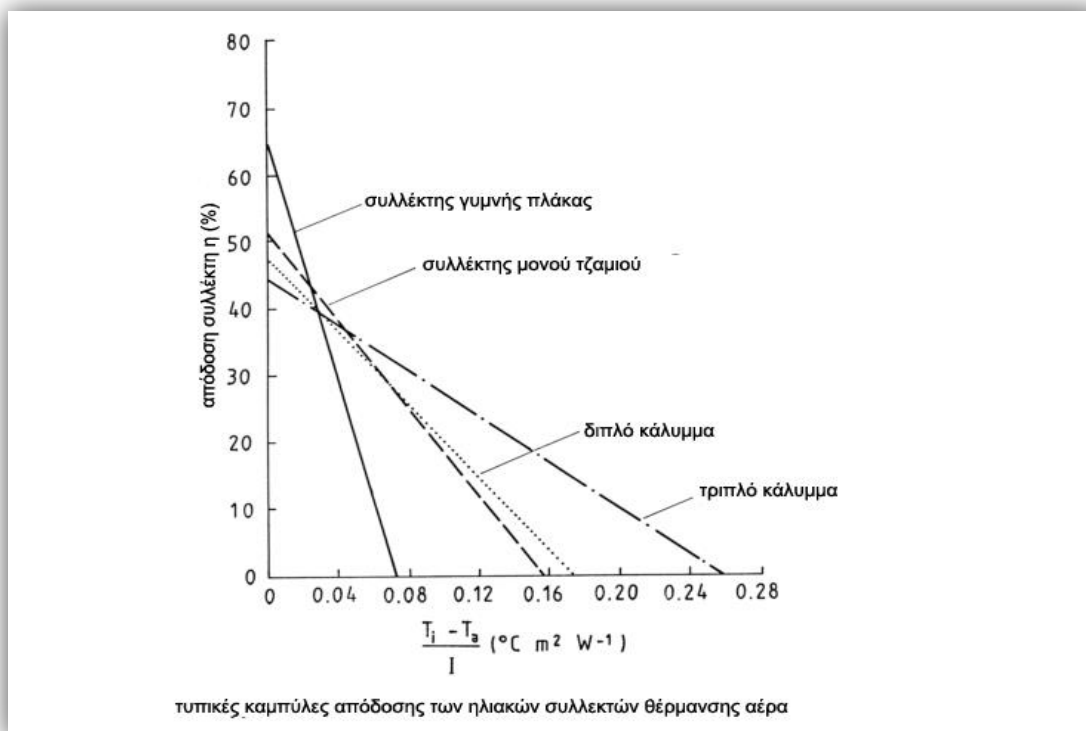
και από τις εξισώσεις (47) και (48)

$$n = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I} \quad (50)$$

Η γενική διαδικασία δοκιμών είναι να καθοριστεί το Q_u απ' την εξίσωση (46) και να μετρηθούν τα I , T_i και T_a (που χρησιμοποιούνται για ανάλυση βασισμένη στην εξίσωση (47) με λειτουργία του συλλέκτη σε συνθήκες σχεδόν μόνιμης κατάστασης σε εγκαταστάσεις δοκιμών, είτε εσωτερικές είτε εξωτερικές). Οι στιγμιαίες αποδόσεις που υπολογίζονται απ' την εξίσωση (48) παρίστανται γραφικά σε συνάρτηση με το $(T_i - T_a)/I$ και την τεταγμένη $(F_R(\tau\alpha)_e)$ και την κλίση $(-F_R U_L)$ που καθορίζονται (απ' την εξίσωση (50)). Αυτές οι παράμετροι δεν είναι σταθερές, η U_L εξαρτάται απ' τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου και η F_R είναι μία ασθενής συνάρτηση της U_L . Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη απόδοση πολλών ηλιακών συλλεκτών μπορεί να χαρακτηριστεί από τις καθορισμένες τεταγμένη και κλίση [182].

Παρόλο που οι ηλιακοί θερμαντήρες αέρα φυσικής συναγωγής χρησιμοποιούνται συχνά για εφαρμογές ξήρανσης καλλιεργειών, πολύ λίγες λεπτομερείς πληροφορίες είναι διαθέσιμες για τους ρυθμούς ροής τους, τις αποδόσεις και τη γενική αποτελεσματικότητα ακόμα και των πιο απλών από αυτούς [173]. Οι μετρήσεις της ροής αέρα γι' αυτούς τους θερμαντήρες (όπως και για τα περισσότερα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας) είναι πολύ δύσκολες. Η μέτρηση των αποδόσεων των ηλιακών συλλεκτών φυσικής κυκλοφορίας βασισμένη στην εξίσωση (49) δεν είναι απλή γι' αυτό το λόγο.

Μία προσέγγιση θα ήταν να καθοριστεί η απόδοση ενός τέτοιου συλλέκτη κάτω από εξαναγκασμένη συναγωγή σε έναν δεδομένο ρυθμό ροής αέρα, να χαρακτηριστεί ο συλλέκτης με τον καθορισμό των παραμέτρων $(F_R(\tau\alpha)_e)$ και $(-F_R U_L)$ από την εξίσωση (50) και τότε, να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (50) σαν μία βάση για μακροπρόθεσμη αξιολόγηση της απόδοσης του συλλέκτη κάτω από συνθήκες ελεύθερης ροής [185]. Οι τυπικές καμπύλες απόδοσης των γενικών τύπων ηλιακών συλλεκτών απεικονίζονται στο σχήμα [185].



Σχ. 70 [188] τυπικές καμπύλες απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών θέρμανσης αέρα

1.7.9 Σχεδιασμός ηλιακών συλλεκτών θέρμανσης αέρα

Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από έναν ηλιακό θερμαντήρα αέρα εξαρτάται

- το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας και τον προσανατολισμό του ηλιακού συλλέκτη
- την απορροφητικότητα της απορροφητικής επιφάνειας και
- την διαπερατότητα του υλικού κάλυψης (δεν ισχύει στους ηλιακούς συλλέκτες γυμνής πλάκας)

Είναι προφανές ότι όσο υψηλότερο το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο περισσότερη ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τον ηλιακό θερμαντήρα αέρα. Έτσι, η γνώση τυπικών τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτείται για τον κατάλληλο σχεδιασμό (διαστασιολόγηση) του ηλιακού θερμαντήρα αέρα. Ανεξαρτήτως από την κλίση του συλλέκτη και τον προσανατολισμό του, η παραγωγή θερμότητας ενός ηλιακού συλλέκτη ποικίλει ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία, και τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας ποικίλουν ανάλογα με την τοποθεσία και την περίοδο του χρόνου.

Υπάρχει, επομένως, η ανάγκη για αντιστοίχιση της παραγωγής θερμότητας του συλλέκτη με το φορτίο ξήρανσης. Μια λιγότερο αυστηρή προσέγγιση είναι να σχεδιαστεί ο συλλέκτης έτσι ώστε η απορροφητική επιφάνεια να είναι κάθετη στην ηλιακή ακτινοβολία κατά το ηλιακό μεσημέρι σε μια αντιπροσωπευτική μέρα του χρόνου και για το συγκεκριμένο μέρος που η ξήρανση λαμβάνει χώρα.

Ο συλλέκτης ιδανικά πρέπει να είναι προσανατολισμένος να βλέπει προς Βορά ή προς Νότο, ανάλογα το μέρος, και με την κλίση του (με το οριζόντιο επίπεδο) να εξαρτάται από την περίοδο που επιλέγεται. Η ιδανική κλίση του συλλέκτη κατά το ηλιακό μεσημέρι μιας συγκεκριμένης μέρας για ένα συγκεκριμένο μέρος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [173]

$$\beta = (\varphi - \delta) \quad (51)$$

όπου η γωνία κλίσης δ δίνεται από τη σχέση [182]

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (52)$$

Ένας άλλος βασικός παράγοντας που καθορίζει την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από το συλλέκτη είναι η απορροφητικότητα της απορροφητικής επιφάνειας (που είναι το μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται απ' την επιφάνεια). Το υλικό του απορροφητή, εκτός του ότι πρέπει να έχει υψηλή απορροφητικότητα της προσπίπτουσας

ακτινοβολίας, πρέπει να έχει επίσης χαμηλή εκπομπή, καλή θερμική αγωγιμότητα και πρέπει να είναι θερμικά σταθερό υπό τις θερμοκρασίες που συναντώνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας και στασιμότητας. Επίσης πρέπει να είναι ανθεκτικό, να έχει χαμηλό βάρος ανά μονάδα επιφάνειας, και κυρίως, να είναι φτηνό. Μεταλλικά φύλλα μαύρης επίστρωσης (για παράδειγμα, κυματοειδής γαλβανισμένη λαμαρίνα) χρησιμοποιούνται συχνά ως απορροφητές λόγω της ευκολίας χρήσης τους, της διαθεσιμότητας και του σχετικά χαμηλού κόστους.

Άλλα υλικά απορροφητή που χρησιμοποιούνται είναι μαύρα πλαστικά φύλλα, βαμμένες μαύρες πέτρες, ξυλάνθρακας και τέφρα. Η χρήση επιλεκτικών επιφανειών απορρόφησης μπορεί να μη δικαιολογείται οικονομικά για λειτουργίες ξήρανσης χαμηλού κόστους. Ένας βασικός παράγοντας στην επιλογή των υλικών για την κατασκευή ηλιακών θερμαντήρων αέρα για λειτουργίες ξήρανσης καλλιεργείων είναι το κόστος τους και η τοπική τους προσβασιμότητα. Οι ιδιότητες συνήθων απορροφητικών υλικών φαίνονται στον πίνακα [173].

ιδιότητες των υλικών απορροφητή						
επένδυση	υπόστρωμα	απορροφητικότητα εκπομπές		μέγιστη θερμοκρασία	αντοχή	
μαύρο νικέλιο	σίδηρος, χαλκός, ψευδάργυρος/αλουμίνιο	0.85–0.96	0.05–0.15	288°C	μέτρια	
μαύρο χρώμιο	νικέλιο/αλουμίνιο, χαλκός, σίδηρος	0.82–0.96	0.04–0.15	427°C	πολύ καλή	
μαύρος χαλκός	χαλκός	0.85–0.95	0.10–0.15	316°C	—	
οξειδιο του χαλκού	χαλκός, σίδηρος, αλουμίνιο	0.87–0.90	0.08–0.16	—	—	
ανοδικό αλουμίνιο	αλουμίνιο	0.90–0.96	0.10–0.23	—	—	
μεταλλικό καρβίδιο	χαλκός, γυαλί	0.82–0.93	0.02–0.05	—	—	
χρώμα PbS	οποιοδήποτε	0.90	0.30	—	—	
επιλεκτικό χρώμα coralur	τα περισσότερα	0.93	0.30	—	—	
μαύρο χρώμα	οποιοδήποτε	0.95–0.97	0.95–0.97	—	—	

Π. 9 [188]ιδιότητες των υλικών απορροφητή

Η διαπερατότητα του υλικού κάλυψης είναι επίσης μία σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από το συλλέκτη. Ένα καλό υλικό κάλυψης πρέπει να έχει υψηλή διαπερατότητα σε ένα ορατό εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και χαμηλή διαπερατότητα στην υπέρυθη ακτινοβολία ώστε να παγιδεύει αποτελεσματικά την επανεκπεμπόμενη από την απορροφητική πλάκα θερμότητα. Άλλες ιδιότητες ενός καλού υλικού κάλυψης είναι η χαμηλή απορροφητικότητα θερμότητας, η σταθερότητα στις θερμοκρασίες λειτουργίας και στασιμότητας, η αντοχή σε θραύση, η ανθεκτικότητα σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες και το χαμηλό κόστος.

Το γυαλί χρησιμοποιείται ευρέως ως υλικό κάλυψης λόγω της υψηλής διαπερατότητας του στο ορατό φως, της χαμηλής διαπερατότητας του στην υπέρυθη ακτινοβολία και της ευστάθειας του σε υψηλές θερμοκρασίες. Το υψηλό κόστος του, η χαμηλή αντίσταση σε θραύση και το σχετικά μεγάλο βάρος ανά μονάδα επιφάνειας (που αυξάνει το κόστος των κατασκευών υποστήριξης) έχουν καταστήσει αναγκαία τη χρήση εναλλακτικών υλικών κάλυψης. Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, με τους βασικούς τους περιορισμούς να είναι η σχετικά χαμηλή τους ευστάθεια σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και η χαμηλή τους ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες, και συγκεκριμένα η υποβάθμιση τους κάτω από υπεριώδη ακτινοβολία. Ωστόσο, μερικά πλαστικά έχουν επεξεργαστεί ώστε να ξεπερνούν τουλάχιστον κάποιες από αυτές τις αδυναμίες. Μερικά πλαστικά καλύμματα δείχνουν υψηλή διαπερατότητα στο ορατό φως και εξίσου χαμηλή διαπερατότητα στην υπέρυθη ακτινοβολία. Τα πλαστικά ζυγίζουν περίπου 10% λιγότερο για την ίδια επιφάνεια γυαλιού. Οι ιδιότητες μερικών υλικών κάλυψης δίνονται στον πίνακα [186,187].

ιδιότητες των πλαστικών μεμβρανών και άλλων υλικών κάλυψης

υλικό	διαθέσιμο πάχος (mm)	διαπερατότητα ορατού φωτός	διαπερατότητα υπέρυθρης ακτινοβολίας	αντοχή στις καιρικές συνθήκες**	αντοχή στον εφελκυσμό (N mm ⁻²)	αντοχή στο σκίσιμο (N mm ⁻¹)	μέγιστο πλάτος (mm)
ευρέως διαθέσιμες πλαστικές μεμβράνες							
πολυαιθυλένιο (PE) un - inhibited	0.01 και ανώ	0.86	0.77	μέτρια	10-30	20-115	12.2
πολυπροπυλένιο (PP)	0.01-0.25	0.92	No data	ικανοποιητική	30-275	1-230	3.0
πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	0.015-0.75	0.90	0.12	μέτρια	10-70	2-380	2.1
τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (πολυεστ) (PET) π.χ. (mylar)	0.002-0.35	0.88	0.24	πολύ καλή	140-275	19-115	3.0
φθοριοξο πολυβινύλιο (PVF) (tedlar)	0.01-0.1	0.86-0.92	0.33	πολύ καλή	50-125	45-390	3.5
αιθυλένιο/τετραφθοροαιθυλένιο συμπολυμερές (ETFE) π.χ. τεφλόν	0.05-0.2	0.95	0.20	πολύ καλή	50-55	230-350	1.2
λιγότερο κοινές μεμβράνες							
οξική κυτταρίνη	0.02-0.75	0.93	0.03	ικανοποιητική	50-110	1.5-3.9	1.5
τριοξική κυτταρίνη	0.05-0.5	0.93	0.11	καλή	62-110	1.5-11	1.2
οξική βουτυρική κυτταρίνη	0.28-0.75	0.93	—	καλή	35-60	1.9-3.9	2.5
αιθυλένιο/βινυλικό οξικό συμπολυμερές (EVA)	0.02 και ανώ	—	—	μέτρια	6-24	20-115	12.2
αιθυλένιο/χλωροτριφθοροαιθυλένιο (ECTFE)	0.01-2.2	—	—	πολύ καλή	55-70	350-500	1.4
φθοροαιθυλένιο προπυλενίου (FEP)	0.01-0.75	0.93	—	πολύ καλή	17-20	50	1.2
περφθοροαλκόξυ (PFA)	0.01-0.75	—	—	πολύ καλή	27-50	15-27	1.2
πολυχλωροτριφθοροαιθυλένιο (PCTFE)	0.02-0.25	—	—	πολύ καλή	34-70	1-15	1.2
πολυανθρακικό (PC)	0.006-0.35	0.87-0.92	—	καλή	55-80	7.5-10	1.4
πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (ακρυλικό) (PMMA) π.χ. πλεξγκλάς	0.05-0.25	0.87	0.01	καλή	55-60	No data	2.7
πολυστερένιο (PS)	0.006-0.5	0.87-0.92	0.35	ικάνοποιητική	55-80	2	1.9
χλωριοξο βινύλιο/οξικό συμπολυμερή	0.02-0.75	—	—	ικάνοποιητική	17-55	4-540	2.1
άλλα υλικά							
κηπευτικό γυαλί	3.0	0.90	0.01	πολύ καλή	—	—	—
πανί πολυεστέρα με επικάλυψη PVC	—	0.10	—	πολύ καλή	150	—	—

*Όπου δε δίνονται δεδομένα για διαπερατότητα ορατού φωτός, το υλικό θεωρείται διαφανές.
 **Η γήρανση των υλικών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, και δεν υπάρχει κάποιο γενικώς αποδεκτό κριτήριο αποδοχής για την αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Σε εύκρατα κλίματα, το πολυαιθυλένιο σπάνια κρατάει για πάνω από 2 χρόνια, ενώ μερικά φθοροπλαστικά μπορούν να κρατήσουν για πάνω από 15 χρόνια.

Π. 10 [188] ιδιότητες των πλαστικών μεμβρανών και άλλων υλικών κάλυψης

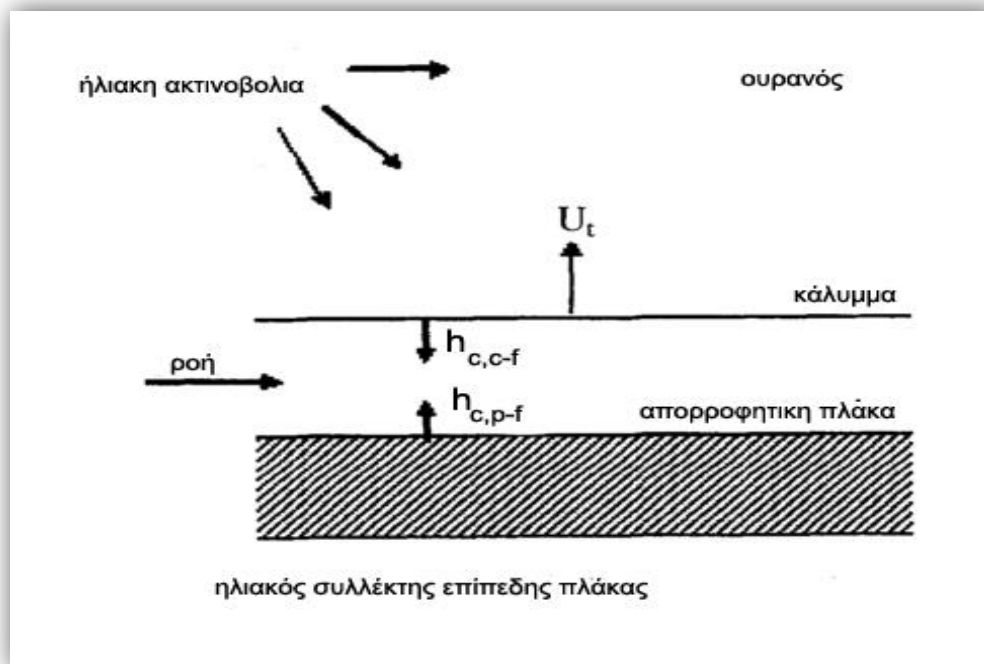
Πρέπει να δοθεί έμφαση στο ότι ο κυρίαρχος παράγοντας στην επιλογή των υλικών για το σχεδιασμό φτηνών και απλών ηλιακών ξηραντήρων είναι το κόστος, έτσι μερικές επιθυμητές ιδιότητες των υλικών μπορεί να τεθούν σε κίνδυνο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής ηλιακών θερμαντήρων αέρα.

1.8 Μοντέλο προσομοίωσης για μια διαδικασία ηλιακής ξήρανσης

Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας της λειτουργίας ξήρανσης και η σημασία της προστασίας του περιβάλλοντος έχουν οδηγήσει το ενδιαφέρον προς την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στις γεωργικές και βιομηχανικές διαδικασίες. Επιπρόσθετα, η ποιότητα των τελικών προϊόντων έχει γίνει τελευταία ολοένα και σημαντικότερη για την επεξεργασία των γεωργικών προϊόντων. Αυτά είναι τα κίνητρα για ένα πολλαπλού σκοπού πρόβλημα οπτικοποίησης της ξήρανσης καθώς και ο περιορισμός του χρόνου επεξεργασίας.

Η ηλιακή ξήρανση είναι μία απ' τις παλιές μεθόδους συντήρησης όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αέρα. Το γεγονός αυτό, καθώς και οι πρόσφατα τονισμένες περιβαλλοντικές ερωτήσεις, συνεπάγονται την επανεξέταση της εφαρμογής ηλιακής ενέργειας στην ξήρανση. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για όλα τα είδη των διαδικασιών ξήρανσης που χρησιμοποιούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, όπως η ξήρανση γεωργικών και άλλων προϊόντων ή σπόρων. Ο σκοπός είναι είτε να συντηρηθούν για μετέπειτα χρήση, όπως στην περίπτωση των τροφίμων, είτε ως αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας παραγωγής, όπως στην περίπτωση της ξυλείας. Οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο αποτελεσματικοί από την ξήρανση στον ήλιο. Η αποδοτικότητα ενός ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από τον τύπο και το μοντέλο του καθώς και από το ρυθμό απώλειας θερμότητας κατά τη λειτουργία.

1.8.1 Μοντέλο ηλιακού θερμαντήρα αέρα



Σχ. 71 [197] ηλιακός συλλέκτης επίπεδης πλάκας

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και των τοιχωμάτων του αγωγού (ρευστό-πλάκα και ρευστό-κάλυμμα) είναι:

$$h_c = h_{c,f-p} = h_{c,f-c} = \frac{N_u \lambda}{2l} \quad (53)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή λόγω του ανέμου από το κάλυμμα στον περιβάλλοντα αέρα δίνεται από τον Watmuff [189]:

$$h_w = 2.8 + 3.0V_w \quad (54)$$

για $0 \leq V_w \leq 7 \text{ m/s}$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία από το κάλυμμα στον αέρα είναι:

$$h_{r,c-sky} = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_{sky}^2)(T_c + T_{sky}) \quad (55)$$

Ο Swinbank [190] συσχετίζει τη θερμοκρασία του ουρανού με την τοπική θερμοκρασία αέρα

$$T_{sky} = 0.0552T_a \quad (56)$$

Ως εκ τούτου, ο συντελεστής ολικών απωλειών από το κάλυμμα στο περιβάλλον είναι:

$$U_t = h_w + h_{r,c-sky} \quad (57)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ της πλάκας και του καλύμματος είναι:

$$h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (58)$$

Ενεργειακά ισοζύγια στο κάλυμμα, την πλάκα, και το ρευστό δίνουν τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$U_t(T_{amb} - T_c) + h_{r,p-c}(T_p - T_c) + h_c(T_f - T_c) = 0 \quad (59)$$

$$S + h_c(T_f - T_p) = h_{r,p-c}(T_c - T_p) = 0 \quad (60)$$

$$h_c(T_c + T_p - 2T_f) = q_u \quad (61)$$

Με επίλυση προκύπτει:

$$T_c - T_f = \frac{S(U_t h_{r,p-c} + h_c) - h_r U_t (T_f - T_{amb})}{h_c U_t + h_{r,p-c} U_t + 2h_{r,p-c} h_c + h_c^2} \quad (62)$$

$$T_c - T_f = \frac{S h_{r,p-c} - (h_c + h_{r,p-c}) U_t - (T_f - T_{amb})}{h_c U_t + h_{r,p-c} U_t + 2h_{r,p-c} h_c + h_c^2} \quad (63)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (61):

$$q_u = F' [S - U_L (T_f - T_{amb})] \quad (64)$$

όπου

$$F' = \left(1 + \frac{h_{r,p-c} U_t}{h_c U_t + 2h_c h_{r,p-c} + h_c^2}\right)^{-1} \quad (65)$$

$$U_L = \frac{U_t}{1 + \frac{U_t h_c}{2h_c h_{r,p-c} + h_c^2}} \quad (66)$$

Ο παράγοντας απαγωγής θερμότητας του συλλέκτη καθορίζεται ως:

$$F_r = \frac{GC_{p,a}}{U_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{U_L F'}{GC_{p,a}}\right)} \right] \quad (67)$$

Όπου G είναι ο ρυθμός ροής ανά μονάδα επιφάνειας συλλέκτη, και $G = \dot{m} / A_{coll}$. Στη συνέχεια, το q_u υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού:

$$q_u = F_R [S - U_L (T_{f,i} - T_{amb})] \quad (68)$$

Η μέση θερμοκρασία ρευστού βρέθηκε από τον Klein [191] ως:

$$T_{f,m} = T_{f,i} + \frac{q_u}{U_L F_R} \left(1 - \frac{F_r}{F'}\right) \quad (69)$$

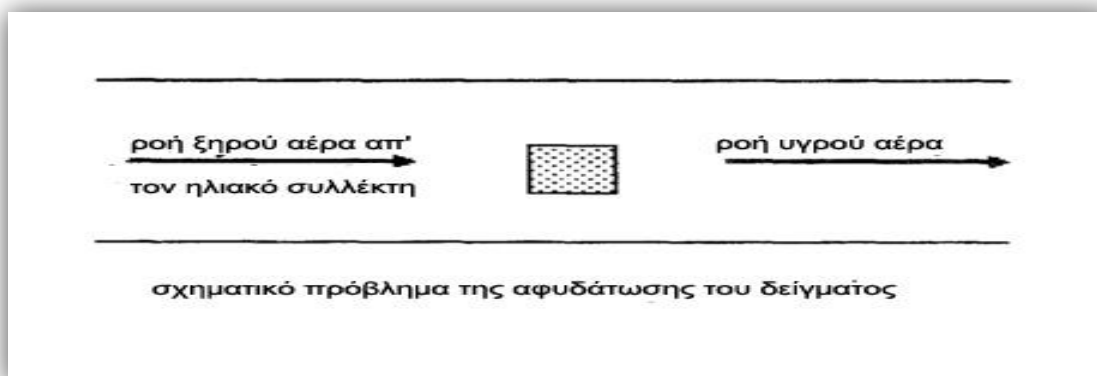
Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού είναι:

$$T_{f,o} = T_{f,i} = T_{f,i} + \frac{q_u A_{coll}}{\dot{m}_a} \quad (70)$$

Η απόδοση του συλλέκτη μπορεί να βρεθεί από:

$$\eta = \frac{q_u}{H_p} \quad (71)$$

1.8.2 Το μοντέλο ξήρανσης



Σχ. 72 [197]σχηματικό πρόβλημα της αφυδάτωσης του δείγματος

Καθώς τα μήλα ξηραίνονται συνήθως σε φέτες, η μεταφορά μάζας και θερμότητας θεωρήθηκαν μονής κατεύθυνσης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης, οι φέτες μήλων υφίστανται ταυτόχρονα μεταφορά μάζας και θερμότητας. Η θερμότητα που μεταφέρεται απ' τον αέρα στο προϊόν προκαλεί την εξάτμιση του νερού, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα. Όλη η θερμότητα που χάνεται από τον αέρα θεωρείται ότι χρησιμοποιείται για την εξάτμιση της υγρασίας ως λανθάνουσα θερμότητα υδατμών.

1.8.2.1 Ισοζύγιο μάζας

Η εξίσωση συνέχειας που εφαρμόζεται στις δύο φάσεις δίνει:

$$\text{-Στερεή φάση: } \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \vec{v}) = 0 \quad (72)$$

$$\text{-Υγρή φάση: } \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \text{div}(\rho_1 \vec{v}_1) = 0 \quad (73)$$

Μετά από συνδυασμό των δύο εξισώσεων, και εισάγοντας την περιεκτικότητα σε νερό επί ξηρού, w , η μία παίρνει την ακόλουθη κεντρική έκφραση:

$$\rho_s \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{v}_s \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(w) \right] = \text{div} \left[\frac{\rho}{1+w} D \overrightarrow{\text{grad}}(w) \right] \quad (74)$$

1.8.2.2 Ενεργειακό ισοζύγιο

Ακολουθώντας την υπόθεση ότι η εξάτμιση λαμβάνει χώρα μόνο στο επίπεδο της επιφάνειας, η εσωτερική μεταφορά θερμότητας υπακούει στο νόμο του Fourier με μεταβλητή λειτουργία του φαινομένου συντελεστή αγωγιμότητας της περιεκτικότητας σε νερό.

$$\rho_h C_{p_h} \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (75)$$

1.8.2.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες

-Για μηδενικό χρόνο, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι ομοιόμορφες:

$$T(x, 0) = T_0, w(x, 0) = w_0$$

- ($x = e$): στην επιφάνεια του, το προϊόν ανταλλάσει θερμότητα και με συναγωγή και με ακτινοβολία.
 Η συνέχεια της ροής ενέργειας επομένως μπορεί να γραφτεί ως:

$$h_c (T_a - T_{surf}) + Q_{wall} = \lambda_h \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{m}L_{f, surf} \quad (76)$$

όπου $h_c (T_a - T_{surf})$ είναι η πυκνότητα ροής που ανταλλάσσεται με συναγωγή, Q_{wall} η πυκνότητα ροής ακτινοβολίας που ανταλλάσσεται με τα περιβάλλοντα τοιχώματα, $\dot{m}L_v$ η πυκνότητα ροής της θερμότητας που αντιστοιχεί στη θερμότητα ατμοποίησης και $\lambda_h \cdot (\partial T) / (\partial x)$ είναι η πυκνότητα ροής που μεταδίδεται με συναγωγή προς τον πυρήνα του δείγματος.

- Η κάτω επιφάνεια του δείγματος ($x = 0$) θεωρείται συμμετρική:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (77)$$

1.8.2.4 Αριθμητική επίλυση

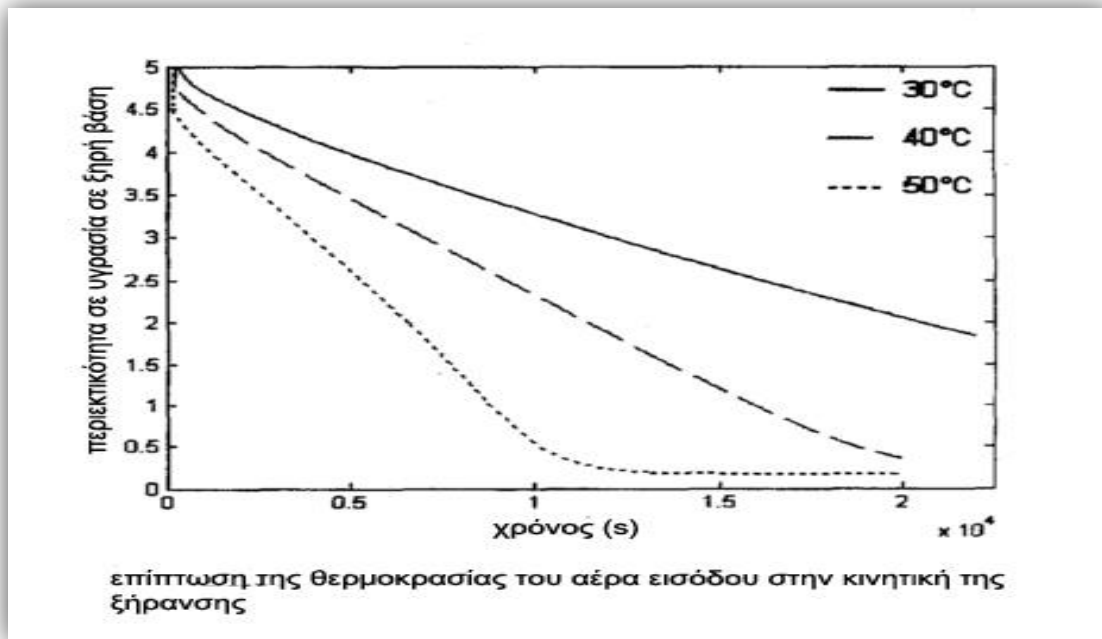
Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι υπερβολικά περίπλοκες για να βρεθεί αναλυτική λύση, έτσι επιλύθηκαν αριθμητικά με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η υγρασία του αέρα εξόδου του ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση της διαδικασίας ξήρανσης.

1.8.3 Προσομοίωση της διαδικασίας ηλιακής ξήρανσης

Η ροή του θερμού αέρα προκάλεσε την εξάτμιση του νερού, οδηγώντας σε μείωση της υγρασίας του προϊόντος, μέχρι που έφτασε σε ισορροπία. Η επίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα στη διαδικασία ξήρανσης φετών μήλου απεικονίζεται στο σχήμα 73. Η επίπτωση της ταχύτητας του αέρα στη διαδικασία ξήρανσης φετών μήλου απεικονίζεται στο σχήμα 74. Η επίπτωση της υγρασίας του αέρα στη διαδικασία ξήρανσης φετών μήλου απεικονίζεται στο σχήμα 75.

1.8.3.1 Επίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα

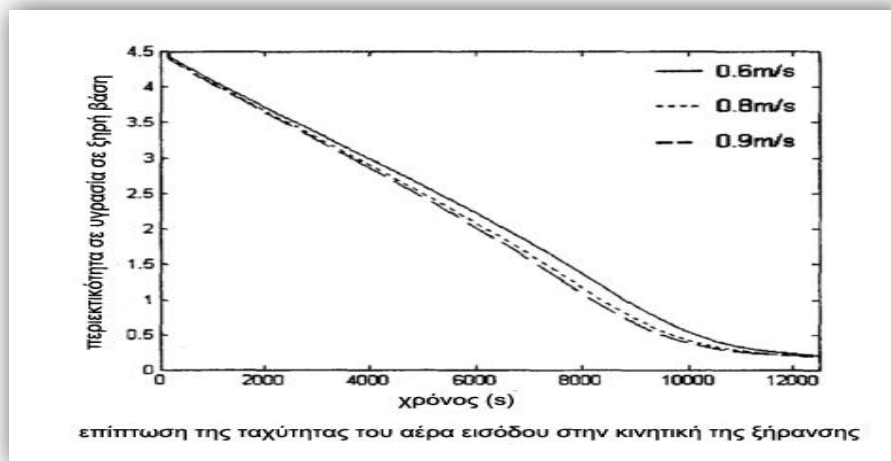
Όπως σημειώθηκε σε άλλες μελέτες [192-194], ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την κινητική της ξήρανσης είναι η θερμοκρασία. Έτσι, η κινητική της ξήρανσης και, επομένως η απώλεια νερού, εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία του αέρα. Ο συνολικός χρόνος ξήρανσης μειώθηκε ουσιαστικά με μία αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα από τους 30 ° C στους 50 ° C, και ο ρυθμός ξήρανσης ήταν ανάλογος με τη θερμοκρασία του αέρα.



Σχ. 73 [197] επίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα εισόδου στην κινητική της ξήρανσης

1.8.3.2 Επίπτωση της ταχύτητας του αέρα

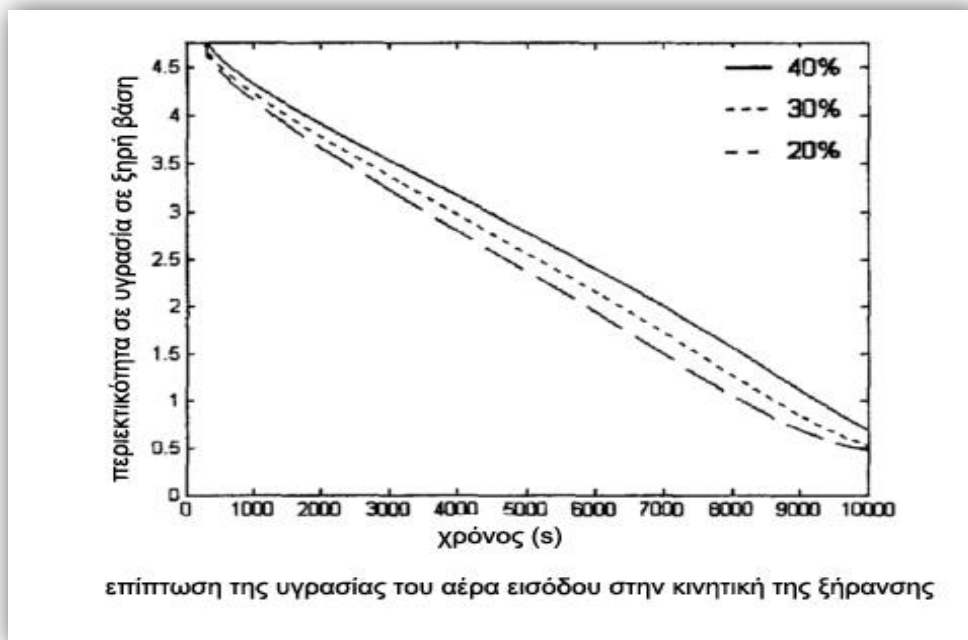
Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει επιτάχυνση στη διαδικασία ξήρανσης λόγω αύξησης της ταχύτητας του αέρα. Αυτή η περίπτωση θεωρείται γενικά , μικρότερη από την επίπτωση της θερμοκρασίας.



Σχ. 74 [197] επίπτωση της ταχύτητας του αέρα εισόδου στην κινητική της ξήρανσης

1.8.3.3 Επίπτωση της υγρασίας του αέρα

Η επίπτωση της υγρασίας του αέρα στην επιτάχυνση της διαδικασίας ξήρανσης θεωρείται, γενικά, μικρότερη από αυτήν της θερμοκρασίας. Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει επιτάχυνση στη διαδικασία ξήρανσης λόγω της μείωσης της υγρασίας του αέρα ξήρανσης από το 40% στο 20%. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία για παρόμοια προϊόντα [195-196].



Σχ. 75 [197] επίπτωση της υγρασίας του αέρα εισόδου στην κινητική της ξήρανσης

1.8.4 Συμπεράσματα

Το μοντέλο προσομοίωσης ξήρανσης παρέχει πληροφορίες για την επίπτωση διάφορων σημαντικών παραμέτρων στο φαινόμενο της ξήρανσης. Ωστόσο, η ακρίβεια της προτεινόμενης διαδικασίας πρέπει να επικυρωθεί συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα θεωρητικά. Όπως γνωρίζουμε, τα συστήματα ξήρανσης δεν έχουν απόδοση 100%. Υπάρχουν θερμικές απώλειες μέσω των τοιχωμάτων.

Η θερμοκρασία βρέθηκε να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας του ρυθμού ξήρανσης για τις φέτες μήλου ενώ η επίπτωση της ταχύτητας του αέρα και της υγρασίας του αέρα θεωρούνται μικρότερες από αυτήν της θερμοκρασίας του αέρα.

2

ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Εφαρμογές ξήρανσης με βιομάζα

2.1 Ξηραντήρας βιομάζας για ξήρανση κόπρας

Η Ινδία είναι η τρίτη πιο παραγωγική σε καρύδα χώρα του κόσμου. Τα νησιά Andaman και Nicobar, στην Ινδία που βρίσκονται σε 11°40' N και 92°46' E έχουν φυτική ποικιλία και οι καρύδες εκεί αναπτύσσονται άφθονα στο τυπικό ευχάριστο κλίμα. Αυτά τα ευάλωτα νησιά βρίσκονται στην 11^η θέση με ετήσια παραγωγή 95 εκατομμύρια καρπούς και αυτό θεωρείται ως η βασική πηγή βιοποριστικής ασφάλειας για τις κατώτερες και μεσαίες αγροτικές κοινότητες υπό τη μορφή της κόπρας. Η κόπρα, το αποξηραμένο βρώσιμο κομμάτι της καρύδας παράγεται μετά την ξήρανση της καρύδας.

2.1.1 Υλικά και μέθοδοι

Πεντακόσιες φρέσκες ώριμες καρύδες αγοράστηκαν από το αγρόκτημα του κεντρικού γεωργικού ινστιτούτου έρευνας (CARI). Οι καρποί καλής ποιότητας χωρίστηκαν σε δύο μισά σταυρωτά για να αφαιρεθεί το νερό.

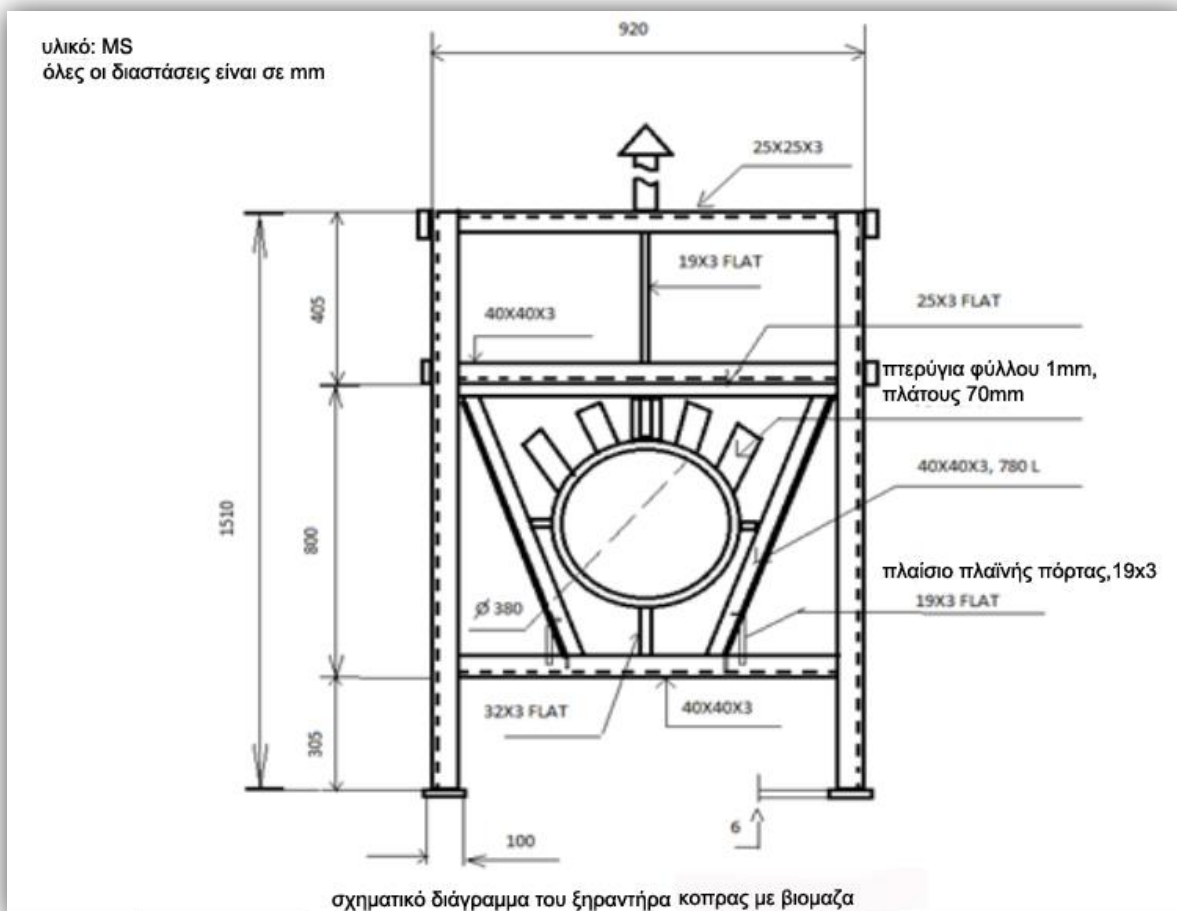
2.1.2 Καθορισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία

Μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AOAC [200]. Πέντε ώριμες καρύδες επιλέχθηκαν στην τύχη και χωρίστηκαν σε δύο μισά. Έπειτα, αυτά κόπηκαν σε μικρά κυλινδρικά κομμάτια και 20-30 g κομματιών καρύδας τοποθετήθηκαν στην εστία στους 105 °C μέχρι να φτάσουν ένα σταθερό βάρος.

2.1.3 Πειραματική διάταξη

2.1.4 Ξηραντήρας βιομάζας

Ένας μηχανικός ξηραντήρας (σχήμα 76) με χωρητικότητα 500 καρύδες ανα παρτίδα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας πλαίσιο MS (2.4m x 1.2m x 1.6m).



Σχ. 76 [202] Σχηματικό διάγραμμα του ξηραντήρα κόπρας με βιομάζα

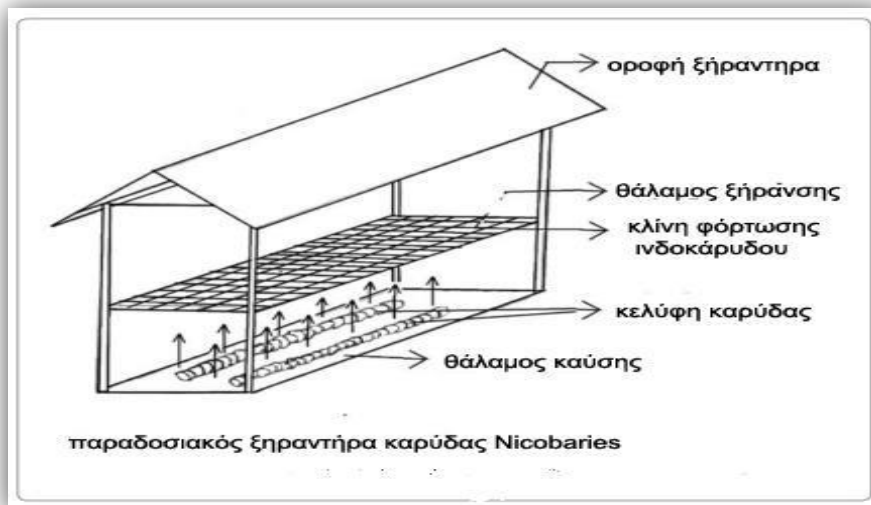
Η κλίνη ξήρανσης φτιαγμένη από σχάρα MS βρίσκεται σε ύψος 1.20m πάνω απ' το επίπεδο του εδάφους. Ένας εναλλάκτης θερμότητας κυλινδρικού σχήματος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας φύλλο μεταλλικού πλέγματος. Ο θάλαμος καύσης (διαμέτρου 2.5m) είναι φτιαγμένος από φύλλο MS πάχους 2mm. Δύο γαλβανισμένοι σωλήνες συνδέονται στην πάνω και στην κάτω πλευρά με το θάλαμο καύσης και το θάλαμο ξήρανσης. Ο σωλήνας εξάτμισης είναι συνδεδεμένος στο άλλο άκρο της εισόδου καυσίμου. Ένα κενό 50cm υπάρχει μεταξύ του θαλάμου καύσης και της κλίνης ξήρανσης που χωρίζονται σε δύο θαλάμους για τη διατήρηση χωρισμένης καρύδας.

Μία θύρα παρέχεται για φόρτωση και εκφόρτωση καυσίμου. Αυτές οι δοκιμές έγιναν για να συγκριθεί η απόδοση της κόπρας και η ποιότητα της. Σε πέντε διαφορετικές θέσεις του θαλάμου ξήρανσης μετρήθηκε η θερμοκρασία σε κάθε στρώμα χρησιμοποιώντας ψηφιακό θερμόμετρο. Τα χωρισμένα μισά της καρύδας φορτώθηκαν μέσα στο θάλαμο ξήρανσης. Έπειτα, ο θάλαμος καυσίμου πυροδοτήθηκε από κέλυφος καρύδας και ξύλινες ράβδους. Κάθε δύο ώρες, μετριόταν η θερμοκρασία του θαλάμου ξήρανσης με ψηφιακό θερμόμετρο. Τα χωρισμένα μισά της καρύδας διατηρήθηκαν προς τα πάνω για το 60% του συνολικού χρόνου ξήρανσης και μετά προς τα κάτω για την υπόλοιπη ξήρανση για να διατηρούνται ομοιογενείς συνθήκες ξήρανσης.

Ήταν απαραίτητο να μειωθεί η περιεκτικότητα σε υγρασία της καρύδας από 57% (σε υγρή βάση) σε 6% (σε υγρή βάση) για να μειωθεί το βάρος, να αποφευχθεί μικροβιολογική αλλοίωση και να συγκεντρωθεί το λάδι. Δύο άντρες χρησιμοποιήθηκαν για να παρέχουν το καύσιμο και να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία στο θάλαμο ξήρανσης μειώνοντας/αυξάνοντας το ρυθμό καυσίμου στο θάλαμο καύσης.

2.1.5 Παραδοσιακός Ξηραντήρας machan

Αποτελείται από υπερυψωμένη πλατφόρμα (σχήμα 77) όπου τα χωρισμένα μισά της καρύδας απλώνονται σε μία πλατφόρμα από μπαμπού. Το κέλυφος καρύδας που χρησιμοποιείται ως καύσιμο τοποθετείται οριζόντια κάτω (κενό 70-80cm) απ' την πλατφόρμα. Μία θύρα παρέχεται για τη φόρτωση και εκφόρτωση κελύφους καρύδας. Αυτά τα κελύφη καίγονται στο κάτω μέρος όπου ο καπνός και τα καυσαέρια έρχονται απευθείας σε επαφή με τα κομμάτια καρύδας που ξηραίνονται και τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω απ' την υπερυψωμένη πλατφόρμα.



Σχ. 77 [202] Παραδοσιακός Ξηραντήρας καρύδας Nicobar

Οι αγρότες τροφοδότησαν το κέλυφος το πρωί και έκλεισαν τη θύρα για 24 ώρες. Την επόμενη μέρα, η τέφρα απομακρύνθηκε χειροκίνητα και έγινε τροφοδότηση με νέα κελύφη. Ταυτόχρονα, οι καρύδες απομακρύνθηκαν απ' το κέλυφος χειροκίνητα και κρατήθηκαν ξανά στην πλατφόρμα και ξεκίνησε η πυροδότηση. Την επόμενη μέρα, η αποξηραμένη κόπρα απομακρύνθηκε και αποθηκεύτηκε σε τσάντες από γιούτα για πώληση στην αγορά.

2.1.6 Ηλιακή Ξήρανση

Τα κομμάτια καρύδας (χωρισμένα στη μέση καρύδα) απλώθηκαν σε ένα μαύρο φύλλο πολυαιθυλενίου σε μονό στρώμα βλέποντας απευθείας στον ήλιο. Το πείραμα έγινε στο αγρόκτημα Garacharma, στο συγκρότημα CARI, στο Port Blair. Αισθητήρες θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια των κομματιών προς ξήρανση για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, τα κομμάτια καλύφθηκαν εξ ολοκλήρου από πολυαιθυλένιο.

Στο τέλος της τρίτης/τέταρτης συνεχόμενης μέρας ηλιακής ξήρανσης, τα κελύφη αφαιρέθηκαν από τα κομμάτια χειροκίνητα και ξηράθηκαν για τρεις μέρες ακόμα. Τα δείγματα λαμβάνονταν από 7 κομμάτια τη φορά για τον καθορισμό της υγρασίας σε τακτά χρονικά διαστήματα. Για να διασφαλιστεί η ποιότητα, έγιναν τρεις επαναλήψεις. Στο τέλος της 7^{ης} μέρας, με βάση την παρατήρηση βρέθηκε ότι η κόπρα ξηράθηκε σε επαρκή περιεκτικότητα σε υγρασία και η ταξινόμηση έγινε. Η περιεκτικότητα σε υγρασία καθοριζόταν κάθε δύο ώρες.

2.1.7 Εκτίμηση της θερμικής απόδοσης

Η θερμική απόδοση του ξηραντήρα βιομάζας εκτιμάται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του πυρήνα καθορίστηκε παίρνοντας ένα σύνθετο δείγμα από επτά τυχαία επιλεγμένα κομμάτια και λαμβάνοντας ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα από αυτό

$$\text{Thermal efficiency} = \frac{\varphi\gamma(M_o - M_f)}{WC(100 - M_o)} \times 100$$

όπου M_o είναι η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία της καρύδας (% σε υγρή βάση), M_f είναι η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία της καρύδας (% σε υγρή βάση), φ είναι η ποσότητα του τελικού αποξηραμένου προϊόντος σε περιεκτικότητα σε υγρασία M_f (kg), γ είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού 2.26MJ/kg, W είναι η ποσότητα του καυσίμου που χρησιμοποιείται (kg) και C είναι η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου κελύφους καρύδας (15.9MJ/kg), επι ξηρώ και χωρίς τέφρα.

2.1.8 Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση της κόπρας έγινε μετά την ξήρανση σύμφωνα με το BIS:6220-1971 (πίνακας 11) επιλέγοντας 100 τυχαία κομμάτια.

S. No.	Characteristics	προδιαγραφές		
		MC κατηγορία 1	MC κατηγορία 2	MC κατηγορία 3
1	προσμίξεις, %κατά βάρος, max	0.5	1	2
2	μουχλιασμένα κελύφη, %στη μέτρηση, max	4	8	10
3	μαύρα κελύφη, %στη μέτρηση, max	5	10	15
4	ζαρωμένα κελύφη, %στη μέτρηση	5	10	15
5	τσιπς % ανα βάρος	5	10	15
6	περιεκτικότητα σε υγρασία ανα βάρος	6	6	6
7	περιεκτικότητα σε λάδι (σε ξηρή βάση) % ανα βάρος min	70	68	66
8	βαθμός οξύτητας του εκχυλισμένου λαδιού	2	4	10
9	τάξεις κόπρας			
	ξηραντήρας machan	75	17	8
	ξηρανση στον ήλιο	70	21	9
	ξηραντήρας με βιομάζα	82	13	5

ταξινόμηση κόπρας

Π. 11 [202]ταξινόμηση κόπρας

Τα κομμάτια στο μαζικό δείγμα χωρίστηκαν και ζυγίστηκαν (% κατά βάρος). Τα ζαρωμένα κομμάτια χωρίστηκαν και υπολογίστηκε ο αριθμός τους ως ποσοστό των κομματιών που αποτελούσαν το μαζικό δείγμα. Ο αριθμός των μουχλιασμένων και μαύρων κομματιών μετρήθηκε και αναφέρθηκε ως ποσοστό. Παράμετροι ποιότητας περιλαμβάνουν την περιεκτικότητα σε υγρασία. Η περιεκτικότητα σε λιπαρά οξέα μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AOAC [200]. Μαζ με αυτή την ταξινόμηση, η

συνολική απόδοση και αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας κόπρας σε κάθε διαδικασία υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν.

2.1.9 Ανάλυση κόστους οφέλους

Εκτιμά και αθροίζει την ισοδύναμη χρηματική αξία του οφέλους και του κόστους του συστήματος ξήρανσης για να καθιερώσει την κερδοφορία του. Η ανάλυση κόστους οφέλους έγινε για κάθε τεχνική ξήρανσης λαμβάνοντας υπόψη τα σταθερά και τα μεταβλητά κόστη που εμπλέκονται στη διαδικασία και τα έσοδα από την πώληση της κόπρας.

Οι παρούσες τιμές αγοράς διάφορων ποιοτήτων κόπρας χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Σύμφωνα με αυτές τις συγκρίσεις, καθορίστηκε η εφικτότητα του συστήματος ξήρανσης.

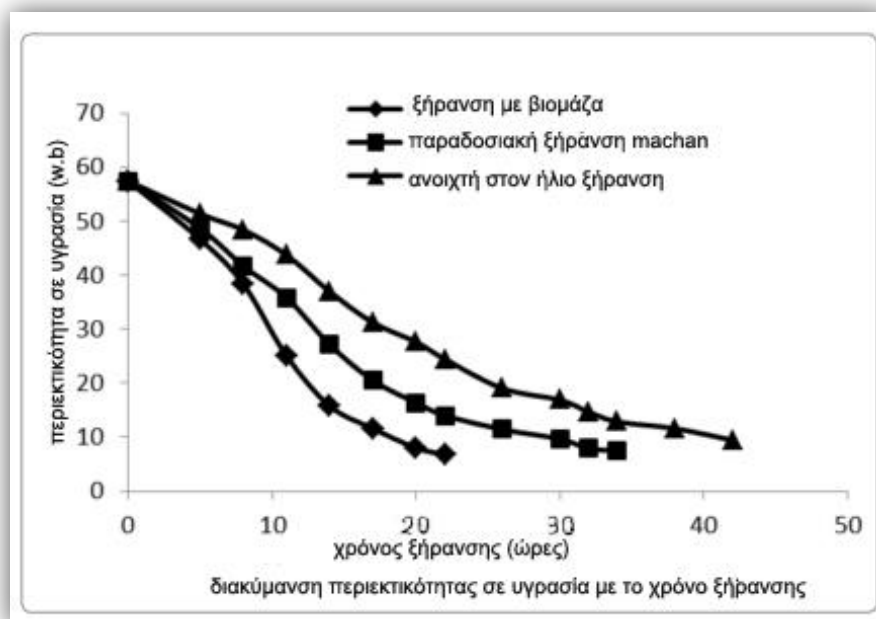
Λόγος κόστους οφέλους = ακαθάριστα έσοδα/ ολικό κόστος

Η περίοδος αποπληρωμής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ανακτηθεί η επένδυση κεφαλαίου και υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

Περίοδος αποπληρωμής = επένδυση κεφαλαίου/ καθαρά έσοδα

2.1.10 Αποτελέσματα

Η διακύμανση της περιεκτικότητας σε υγρασία με το χρόνο ξήρανσης φαίνεται στο σχήμα 78.

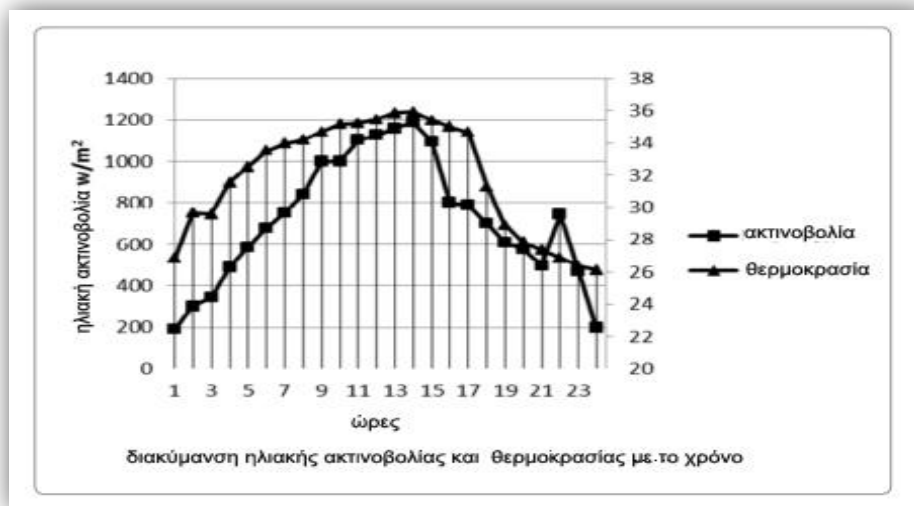


Σχ. 78 [202] διακύμανση περιεκτικότητας σε υγρασία με το χρόνο ξήρανσης

Η μέση θερμοκρασία που καταγράφηκε στο θάλαμο ξήρανσης ήταν 52-55 °C. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του χαμηλότερου θαλάμου ήταν 2-3 °C υψηλότερη από του από πάνω. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία της καρύδας μειώθηκε από περίπου 57.4% σε 6.8% και 8.2% στο κάτω και το πάνω στρώμα αντίστοιχα, μετά από 22 ώρες.

Ο ξηραντήρας βιομάζας έκανε 22 ώρες να μειώσει την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία από 57.4% (σε υγρή βάση) σε 6.8% (σε υγρή βάση) ενώ η παραδοσιακή machan και ηλιακή ξήρανση έκαναν 34 ώρες και 42 ώρες αντίστοιχα το οποίο σημαίνει ότι ο ξηραντήρας βιομάζας εξοικονόμησε 40% και 47% του συνολικού χρόνου ξήρανσης σε σύγκριση με τις δύο παραδοσιακές μεθόδους.

Στην περίπτωση της ηλιακής ξήρανσης, η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του πειράματος φαίνονται στο σχήμα 79.



Σχ. 79 [202] διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας με το χρόνο

Παρατηρείται μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία $1180 \text{ w} / \text{m}^2$. Η μέγιστη θερμοκρασία αέρα ξήρανσης που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια των ωρών μέγιστης ηλιοφάνειας ήταν $35.9 \text{ }^{\circ}C$. Η μέση θερμοκρασία μειώθηκε στους $26.1 \text{ }^{\circ}C$ κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η κόπρα που λήφθηκε από τις παραπάνω μεθόδους φαίνεται στο σχήμα 80.



Σχ. 80 [202] σύγκριση ποιότητας κόπρας

Περίπου 80-85 kg καυσίμου (κέλυφος καρύδας) χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη. Παρατηρήθηκε ότι όταν ο κλίβανος αξιολογήθηκε σε ρυθμό 6.0 kg/h τότε η μέση θερμοκρασία στο θάλαμο ξήρανσης ήταν $65-69 \text{ }^{\circ}C$. Αν ο ρυθμός τροφοδοσίας ήταν πάνω από 6.0 kg/h, η ποιότητα των αποξηραμένων προϊόντων ήταν μέτρια. Έτσι, ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου στον ξηραντήρα είναι

επιτακτική ανάγκη για προϊόντα καλής ποιότητας. Επομένως, δύο άντρες χρειάζονται για συνεχή επίβλεψη του ρυθμού του καυσίμου και της θερμοκρασίας.

2.1.11 Θερμική απόδοση της ξήρανσης

Περίπου 187 kg υγρασίας αφαιρέθηκαν από 500 καρπούς για να ληφθούν περίπου 135 kg κόπρας. Το αρχικό βάρος των 500 καρπών με κελύφη μετρήθηκε στα 350 kg. Η θερμική απόδοση του ξηραντήρα βιομάζας και του ξηραντήρα machan εκτιμήθηκε στο 26% και το 16% αντίστοιχα χρησιμοποιώντας την εξίσωση. Ο Lozada ανέφερε ότι για να μπορούν οι αγρότες να φτιάξουν κόπρα πιο γρήγορα, πρέπει να καταφύγουν στη χρήση κλίβανων ξήρανσης.

Επίσης η ηλιακή ξήρανση μπορεί να επηρεαστεί από κλιματικούς παράγοντες, μόλυνση από σκόνη και άλλα σωματίδια, ανάπτυξη μούχλας, και δραστηριότητες πουλιών και τρωκτικών. Επομένως, γι αυτό το λόγο, η ξήρανση σε CRI κλίβανο θεωρείται ως ανώτερη από την ηλιακή ξήρανση. Σ' αυτή τη μελέτη, βρέθηκε ότι ο ξηραντήρας βιομάζας είναι ανώτερος της ηλιακής ξήρανσης, της ξήρανσης machan και της ξήρανσης σε κλίβανο CRI εξαιτίας λιγότερο υγρού περιβάλλοντος καθώς και απουσίας μικροβιακής δραστηριότητας.

Αν και, η συνολική απόδοση της κόπρας είναι σχεδόν ίδια και στις δύο τεχνικές ξήρανσης, το κόστος και το σύστημα τιμολόγησης για διάφορες ποιότητες κόπρας έχουν σημαντικές διακυμάνσεις στην ανάλυση κόστους οφέλους. Ωστόσο, τα έσοδα από την ηλιακή ξήρανση εξαρτώνται από τις συνθήκες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης. Όπως συμβαίνει στα υπο-τροπικά κλίματα, η ηλιακή ξήρανση είναι ανεπαρκής για την ξήρανση καρύδας. Έχει υποστηριχθεί ότι η σύνδεση των αγροτών με τις αγορές μέσω αποτελεσματικών εξοπλισμών επεξεργασίας θα ενδυναμώσει τις δραστηριότητες προστιθέμενης αξίας με καλύτερη τεχνολογία και καλύτερες εισροές, αναβαθμισμένη υποδομή και επεξεργασία και εξαγωγές [201].

2.1.12 Ταξινόμηση της κόπρας

Η κόπρα που λήφθηκε ταξινομήθηκε ως 82% MCG1, 13% MCG2 και 5% MCG3 (πίνακας 12).

S. No.	Characteristics	προδιαγραφές		
		MC κατηγορία 1	MC κατηγορία 2	MC κατηγορία 3
1	προσμίξεις, %κατά βάρος, max	0.5	1	2
2	μουχλιασμένα κελύφη, %στη μέτρηση, max	4	8	10
3	μαύρα κελύφη, %στη μέτρηση, max	5	10	15
4	ζαρωμένα κελύφη, %στη μέτρηση	5	10	15
5	τσιπς % ανα βάρος	5	10	15
6	περιεκτικότητα σε υγρασία ανα βάρος	6	6	6
7	περιεκτικότητα σε λάδι (σε ξηρή βάση) % ανα βάρος min	70	68	66
8	βαθμός οξύτητας του εκχυλισμένου λαδιού	2	4	10
9	τάξεις κόπρας			
	ξηραντήρας machan	75	17	8
	ξηρανση στον ήλιο	70	21	9
	ξηραντήρας με βιομάζα	82	13	5

ταξινόμηση κόπρας

Π. 12 [202] ταξινόμηση της κόπρας

Με βάση την ταξινόμηση της κόπρας, το συμπέρασμα είναι ότι περισσότερο απ' το 80% υψηλής ποιότητας MCG1 μπορεί να παραχθεί στον ξηραντήρα βιομάζας. Η λευκή κόπρα έχει υψηλή αγοραστική ζήτηση και υψηλή οικονομική αξία. Η καλής ποιότητας λευκή κόπρα παρέχει καλύτερης ποιότητας λάδι και

επίσης δεν υπάρχει μόλυνση από καπνό για να παραχθούν πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Επομένως, σ' αυτό το σημείο η τεχνική της ηλιακής ξήρανσης θεωρείται ως ανώτερη από αυτήν της ξήρανσης machan.

2.1.13 Ανάλυση κόστους οφέλους

Κάνοντας οικονομική ανάλυση, περίπου 135 kg και 95 kg κόπρας υψηλής ποιότητας λαμβάνονται από τον ξηραντήρα βιομάζας και τον παραδοσιακό ξηραντήρα machan, από 500 καρπούς αν τα χαρακτηριστικά ποιότητας διατηρούνται καταλλήλως. Ο πίνακας 13 δίνει την εικόνα του λόγου κόστους οφέλους των δύο ξηραντήρων.

	ξηραντήρας με βιομάζα	ξηραντήρας machan
I. κόστος εξοπλισμού	€ 594	€ 79 *
A. σταθερό κόστος		
II. κόστος ακατέργαστης καρύδας/παρτίδα € 0,1 ανα καρπό	€ 93	€ 53
E μεταβλητό κόστος		
III. κόστος εργασίας /παρτίδα	€ 8 (2 days)	-
IV. κόστος καυσίμου/	€ 11	€ 4
V. μηνιαία παραγωγή κόπρας	2025 kg (Taking 135 kg in 2 days. So, it is 135*15=2025 kg/ month)	950 kg (Taking 95 kg in 3 days. So, it is 95*10= 950 kg/month)
VI. κόστος συντήρησης/μήνα	€ 7	€ 3
VII. κόστος απόσβεσης /10%/ μήνα στον εξοπλισμό	€ 5	€ 1
VIII. φόρος (@11%)	€452.5	-
IX. έσοδα/μήνα	€ 364 (@ € 1/kg)	€ 640 (@ € 1/kg)
X. συνολικό κόστος (II+III+IV+V+VI+VII+VIII)	**€ 968	**€ 536
XI. κέρδος/μήνα (IX-X)	€ 396	€ 104
B/Cλόγος κ/ο (IX/X)	1.40	1.19
περίοδος αποπληρωμής	1.5 month	-

* Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος της πλατφόρμας μπαμπού, της οροφής του ξηραντήρα, της υπερυψωμένης πλατφόρμας που είναι φτιαγμένη από ξύλινες πλάκες/ράβδους αν και φτιάχνονται εγχώρια από τους γεωργούς)

** υπολογισμός σε μηνιαία βάση

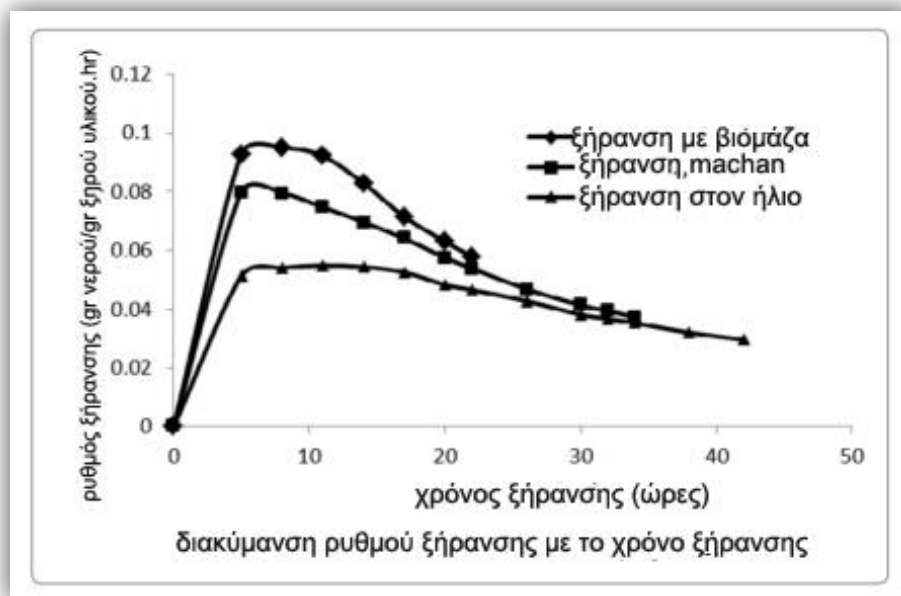
υπολογισμός του λόγου κόστους-οφέλους

Π. 13 [202] υπολογισμός του λόγου κόστους-οφέλους

Ο λόγος για τον ξηραντήρα βιομάζας βρέθηκε να είναι 1.4 ενώ για τον ξηραντήρα machan βρέθηκε 1.19. Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε μόλις στον 1.5 μήνα. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας μηνιαίους υπολογισμούς κόστους για την παραγωγή υψηλής ποιότητας κόπρας και κέρδους από την πώληση αυτών των προϊόντων, το συμπέρασμα είναι ότι ο ξηραντήρας βιομάζας είναι ανώτερος του παραδοσιακού συστήματος ξήρανσης με βάση την ποιότητα και την κερδοφορία.

2.1.14 Παρατηρήσεις

Η θερμοκρασία μέσα στον ξηραντήρα βιομάζας ήταν υψηλότερη και η σχετική υγρασία χαμηλότερη σε σχέση με το περιβάλλον το οποίο είχε ως αποτέλεσμα ο ρυθμός ξήρανσης να είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με τη φυσική ηλιακή ξήρανση και την ξήρανση machan. Στην αρχή της διαδικασίας ξήρανσης, η υγρασία της επιφάνειας εξατμίστηκε και ο ρυθμός ξήρανσης ήταν υψηλός. Μείωση παρατηρήθηκε λόγω εξάτμισης της ελεύθερης υγρασίας από το εξωτερικό στρώμα και μειώθηκε στη συνέχεια λόγω μεταφοράς της εσωτερικής υγρασίας από το εσωτερικό στρώμα προς την επιφάνεια. Ο ρυθμός ξήρανσης μειώθηκε με την αύξηση του χρόνου ξήρανσης. Η ξήρανση έλαβε χώρα στην περίοδο φθίνοντος ρυθμού με μία απότομη πτώση στην περιεκτικότητα σε υγρασία στα αρχικά στάδια της ξήρανσης η οποία έγινε πολύ αργή σε μεταγενέστερα στάδια (σχήμα 81).



Σχ. 81 [202]διακύμανση ρυθμού ξήρανσης με το χρόνο ξήρανσης

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της παραδοσιακής ξήρανσης, ο καπνός ήταν σε άμεση επαφή με τα κομμάτια καρύδας και ως εκ τούτου, καλής ποιότητας κόπρα δε μπορούσε να παραχθεί.

Ο λόγος είναι ο σχηματισμός υψηλής περιεκτικότητας σε οξύ και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων στην κόπρα [199]. Ο Nathanael υποστήριξε αυτό το αποτέλεσμα καθώς με τη διασφάλιση του θερμού αέρα σκλήρυνσης με διακοπτόμενη ψύξη, καθιερώνεται μία βαθμίδα υγρασίας μέσα στον πυρήνα, όπου η υγρασία μεταβαίνει σταδιακά από τα βαθύτερα στρώματα στην επιφάνεια, οδηγώντας σε μία διαδικασία ομοιόμορφης αφύγρανσης του πυρήνα.

Στην ξήρανση machan, οι θερμοί καπνοί και τα καυσαέρια ήταν σε επαφή με την κλίνη ξήρανσης και, λόγω εναπόθεσης σκόνης και σωματιδίων αιθάλης στον υγρό πυρήνα, η ποιότητα ήταν επίσης κακή. Βρέθηκε επίσης ότι όταν ο θάλαμος καύσης αξιολογήθηκε σε ρυθμό τροφοδοσίας 4kg/h, η μέση θερμοκρασία που καταγράφηκε στο θάλαμο ξήρανσης ήταν 45 °C. Αυτή η θερμοκρασία δεν ήταν αρκετή για να διατηρήσει τη θερμοκρασία ξήρανσης στους 50-55 °C. Ένας υψηλός ρυθμός ξήρανσης σε ρυθμό 0.094 g νερού/g ξηρού υλικού/ώρα παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου της ξήρανσης. Ο ρυθμός ξήρανσης της κόπρα στον ξηραντήρα βιομάζας ήταν υψηλός σε σύγκριση με την ηλιακή ξήρανση και την ξήρανση machan λόγω των υψηλών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Από τον ξηραντήρα βιομάζας παράχθηκε καλύτερης ποιότητας κόπρα. Με βάση οικονομικούς υπολογισμούς, το μηνιαίο κέρδος υπολογίστηκε περίπου στις 396€ και 106€ αντίστοιχα για τους δύο ξηραντήρες.

2.1.15 Συμπεράσματα

Ένας ξηραντήρας βιομάζας σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε για την ξήρανση κόπρας σε υποτροπικά κλίματα. Μειώνει την περιεκτικότητα σε υγρασία από 57% σε 6% (σε υγρή βάση). Η κόπρα που παράχθηκε (82% υψηλής ποιότητας) δεν περιείχε σκόνη, μαύρες/καφέ δεσμίδες, πουλιά κλπ. Κακής ποιότητας κόπρα λήφθηκε με παραδοσιακούς τρόπους κυρίως λόγω έκθεσης της στο τροπικό κλίμα, πράγμα που προκαλεί το σχηματισμό καρκινογόνων ουσιών στην κόπρα. Ο ξηραντήρας βιομάζας είναι πιο κατάλληλος στα νησιά Andaman και Nicobar για λήψη υψηλής ποιότητας κόπρας που θα μπορούσε να ανταγωνιστεί με αυτήν που παράγεται στην ενδοχώρα. Η κόπρα που λήφθηκε ταξινομήθηκε ως 82% MCG1, 13% MCG2 και 5% MCG3 με μέση θερμική απόδοση περίπου 26%. Ο λόγος κόστους οφέλους υπολογίστηκε στα 1.4 και 1.19 για δύο δοκιμές ξήρανσης για παραγωγή υψηλής ποιότητας κόπρας. Το μηνιαίο κέρδος (396€) από τον ξηραντήρα βιομάζας θα μπορούσε να είναι καλύτερη πηγή για παραγωγή εσόδων. Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε μόλις στον 1.5 μήνα. Καθώς τα αποτελέσματα αντικατοπτρίζουν την αποτελεσματικότητα όσον αφορά την ομοιογένεια της ξήρανσης, τις απαιτήσεις εργασίας και την ποιότητα του προϊόντος, βρέθηκε ότι είναι πολύ σημαντικό να αναπτυχθεί ο ξηραντήρας βιομάζας για να καλύψει τις ανάγκες των ανθρώπων στα νησιά αυτά.

2.2 Ξηραντήρας με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας – βιομάζας για ξήρανση μήλων

Τα φρούτα και τα λαχανικά είναι γεωργικά προϊόντα που είναι γνωστά για τις πλούσιες βιταμίνες τους, την υψηλή συγκέντρωση υγρασίας και τα χαμηλά λιπαρά. Είναι ιδιαίτερα ευπαθή λόγω υπερβολικής υγρασίας που υπάρχει σ' αυτά ιδιαίτερα στη συγκομιδή. Τα φρούτα και τα λαχανικά είναι εποχιακές καλλιέργειες και είναι διαθέσιμα κυρίως κατά τη διάρκεια της εποχής παραγωγής.

Εξετάστηκε η κατασκευή κινητού ξηραντήρα με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας-βιομάζας για την ξήρανση λαχανικών και φρούτων με χωρητικότητα που είναι κατάλληλη για χρήση σε μικρό αγρόκτημα και μικρούς συνεταιρισμούς.

2.2.1 Σχεδιασμός υβριδικού ξηραντήρα

Αυτός ο ξηραντήρας κιβωτίου έχει τρεις βασικές συνιστώσες. Το θάλαμο ξήρανσης, τον ηλιακό συλλέκτη και την εστία αεριοποίησης βιομάζας. Ο θάλαμος ξήρανσης έχει 30 αλουμινένιους δίσκους συρμάτινου πλέγματος που κρατάνε τα προϊόντα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Ένα πλαστικό πλέγμα πολυαιθυλενίου, που είναι πολύ φθηνότερο, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική στο αλουμίνιο. Η χωρητικότητα του ξηραντήρα εξαρτάται από τον τύπο του φρούτου προς ξήρανση. Για τον ανανά, ο ξηραντήρας έχει μέγιστη χωρητικότητα 50kg κομμένο σε φέτες φρούτο ανά παρτίδα. Υπάρχουν δύο πηγές θερμότητας διαθέσιμες για τον ξηραντήρα. Ηλιακός συλλέκτης και εστία αεριοποίησης βιομάζας.

2.2.2 Ηλιακός συλλέκτης

Ο συλλέκτης, που είναι τύπου επίπεδης πλάκας, έχει κενό συλλογής αέρα 5cm και μόνωση πάχους περίπου 8cm. Η απορροφητική επιφάνεια, η οποία λαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία, είναι ένα μαύρο ματ μεταλλικό φύλλο. Ένα μονό κάλυμμα πλεξιγκλάς πάχους 1/8" τοποθετείται πάνω απ' τον απορροφητή. Αυτό είναι συνδεδεμένο στο πίσω μέρος του θαλάμου ξήρανσης υπό γωνία 15°. Ο ανεμιστήρας μέσα στο θάλαμο αναγκάζει τον αέρα περιβάλλοντος να περάσει μέσα από το συλλέκτη και να φτάσει μέχρι τα φρούτα προς ξήρανση.

2.2.3 Εστία αεριοποίησης βιομάζας

Η εστία αεριοποίησης βιομάζας παρέχεται για να βοηθάει στη λειτουργία ξήρανσης όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπαρκής και μη διαθέσιμη. Αυτή αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες. Τη χοάνη αποθήκευσης καυσίμου, το θάλαμο αντίδρασης, την πρωτοβάθμια είσοδο αέρα και το θάλαμο καύσης. Η χοάνη είναι τοποθετημένη κάθετα στην κορυφή του αντιδραστήρα όπου παράγεται το αέριο. Ένας συλλέκτης τέφρας παρέχεται στο κάτω μέρος του θαλάμου αντίδρασης. Μία πρωτοβάθμια είσοδος αέρα συνδέεται στη μία πλευρά του αντιδραστήρα, η οποία παρέχει αέρα στο θάλαμο. Στην αντίθετη πλευρά βρίσκεται ο θάλαμος καύσης όπου το αέριο που παράγεται στον αντιδραστήρα καίγεται και παράγεται καυσαέριο. Μία συρόμενη πλάκα παρέχεται στο κάτω μέρος του θαλάμου καύσης για την παροχή δευτερεύοντος αέρα που χρειάζεται για την καύση.

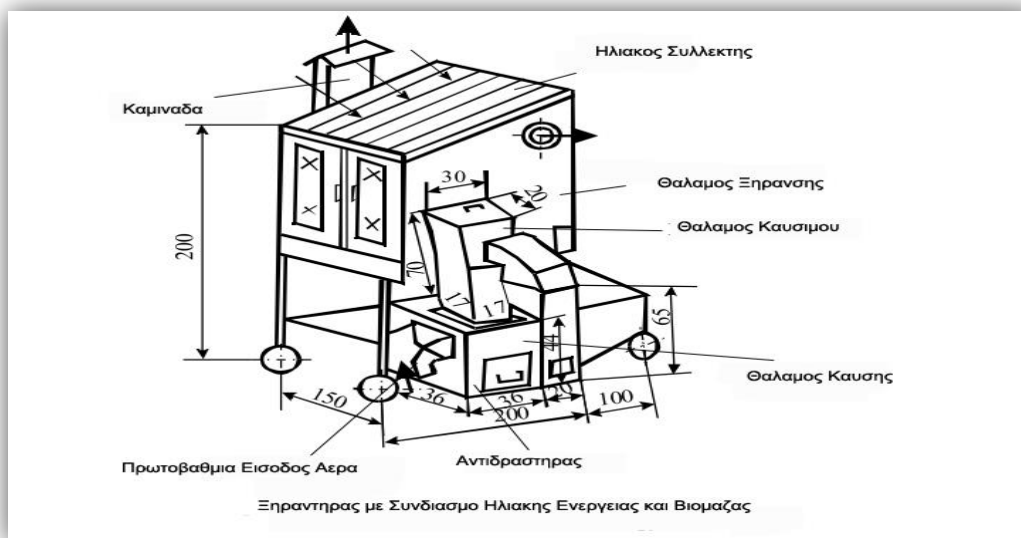
Η εστία αεριοποίησης καταναλώνει περίπου 2.0 kg ξύλου ανά ώρα ή 4.0 kg ανά μπρικέτα ξύλου, και μπορεί να παρέχει θερμοκρασία αέρα ξήρανσης μέχρι και 60 °C . Η θερμοκρασία μπορεί να ελεγχθεί μέσω μιας συρόμενης πλάκας που παρέχεται στο σωλήνα που ενώνει το θάλαμο και την εστία. Άλλες προδιαγραφές του ξηραντήρα φρούτων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ο καυστήρας βιομάζας χρησιμοποιήθηκε μόνο τη νύχτα, ενώ η ηλιακή ενέργεια, ή συνδυασμός με αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκαν τη μέρα.

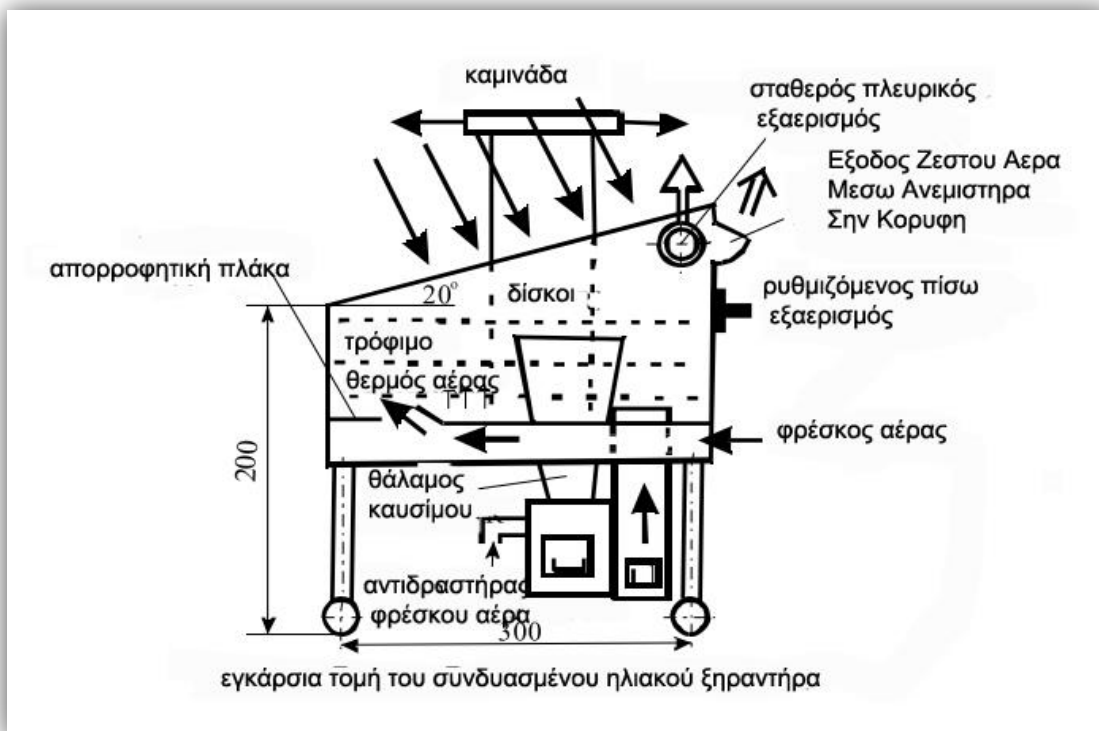
Ο σχεδιασμός του συστήματος βιομάζας βασίστηκε στις ακόλουθες εκτιμήσεις:

- Η θέρμανση θα ήταν έμμεση, δηλαδή το καυσαέριο από την εστία βιομάζας και ο αέρας ξήρανσης δε θα αναμειγνύονταν. Αυτό προστατεύει το προϊόν από μόλυνση από τον καπνό, την αιθάλη και την τέφρα του καυσαερίου
- Η θερμοκρασία της εισόδου αέρα θα ήταν στο εύρος 60-70 °C . Αυτό βασίστηκε στη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία ξήρανσης για τα περισσότερα φρούτα και λαχανικά.
- Ο θερμοκρασιακός έλεγχος του αέρα ξήρανσης θα γινόταν, με τον έλεγχο της καύσης στην εστία, ανοίγοντας ή κλείνοντας την πρωτοβάθμια παροχή αέρα στην εστία.
- Η λειτουργία βιομάζας θα γινόταν για εκτεταμένες χρονικές περιόδους, χωρίς επιτήρηση. Η εστία σχεδιάστηκε να λειτουργεί συνεχόμενα για περίπου δύο ώρες με μία φόρτωση καυσίμου με ξύλα ή μπρικέτες ξύλου.

Ο όλος σχεδιασμός και η κατασκευή του συνδυασμένου ξηραντήρα με ηλιακή ενέργεια και ενέργεια βιομάζας καθώς και η εγκάρσια τομή του ξηραντήρα δίνονται στα σχήματα 82 και 83.



Σχ. 82 [203] Ξηραντήρας με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας και βιομάζας



Σχ. 83 [203] εγκάρσια τομή του συνδυασμένου ηλιακού ξηραντήρα

2.2.4 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Το μήλο είναι ένα σημαντικό γεωργικό τρόφιμο που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων. Στην Π.Γ.Δ.Μ. το μήλο χρησιμοποιείται τοπικά και επίσης εξαγεται. Τα μήλα ξηράνθηκαν σε θερμοκρασία 60-70 °C, μέχρι μία τελική περιεκτικότητα σε υγρασία 20%.

Η ποσότητα της υγρασίας που αφαιρέθηκε είναι

$$m_w = m_1 \frac{(d_2 - d_1)}{(100 - d_2)} = 20 \frac{(88 - 20)}{(100 - 88)} = 17 \text{ kgH}_2\text{O}$$

όπου $m_1 = 20$ kg αρχικής μάζας αποξηραμένου υλικού, $d_1 = 85\%$ και $d_2 = 20\%$ είναι η αρχική και τελική περιεκτικότητα σε υγρασία των αποξηραμένων μήλων.

Ο μέσος ρυθμός ξήρανσης για 8 ώρες ηλιοφάνειας (από τον Απρίλιο μέχρι τον Αύγουστο) είναι

$$m_{dr} = \frac{m_w}{\tau} = \frac{17}{8} = 2.125 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{h}}$$

Ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα υπολογίστηκε από

$$m_a = \frac{m_{dr}}{(x_f - x_i)} = \frac{2.125}{(0.0272 - 0.0216)} = 379.46 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Χρησιμοποιώντας τις αρχές της ψυχρομετρίας, ο αέρας περιβάλλοντος θερμάνθηκε από (θερμοκρασία $t_a = 30^\circ\text{C}$, σχετική υγρασία $\phi_a = 80\%$) έως ($t_p = 40^\circ\text{C}$, $\phi = 47\%$ σε σταθερό λόγο υγρασίας. Ο θερμαινόμενος αέρας πέρασε μέσα από την κλίνη ξήρανσης και παρέλαβε υγρασία από τα φρέσκα μήλα σε σταθερή ενθαλπία, αυξάνοντας τον αρχικό λόγο υγρασίας $x_i = 0.0216 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg}$

ξηρού αέρα έως $x_f = 0.0272 \text{ kg } H_2O / \text{kg}$ ξηρού αέρα, όπου θεωρείται κορεσμένος σε $t_a = 32^\circ\text{C}$ και $\varphi_a = 90\%$ πάνω από την κλίση ξήρανσης.

Η αρχική και τελική ενθαλπία του υγρού αέρα είναι

$$h_i = 1.006t_a + x_i(2500 + 1.86t_a) = 85.38 \text{ kJ / kg ξηρού αέρα}$$

$$h_f = 1.006t_f + x_f(2500 + 1.86t_f) = 101.81 \text{ kJ / kg ξηρού αέρα}$$

Η συνολική θερμική ενέργεια που απαιτήθηκε για την εξάτμιση του νερού είναι

$$E = m_a(i_f - i_i)\tau = 379.46(101.81 - 85.38)8 = 43.51 \text{ MJ}$$

Το εμβαδό της επιφάνειας συλλέκτη για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην Π.Γ.Δ.Μ.

$I = 15 \text{ MJ / m}^2 \text{ day}$ και την αποδοτικότητα του συλλέκτη $\eta = 0.3(0.3 \div 0.5)$ είναι

$$A = \frac{E}{I\eta} = \frac{43.51}{15 \cdot 0.3} = 5.802 \text{ m}^2 = 6 \text{ m}^2$$

Ο ογκομετρικός ρυθμός ροής αέρα είναι

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a} = \frac{379.46}{1.28} = 296.46 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

όπου $\rho_a = 1.28 \text{ kg / m}^3$ είναι η πυκνότητα του ξηρού αέρα.

Σε περίπτωση χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέρας, η διαδικασία ξήρανσης μπορεί να υποστηριχθεί από το θερμοκήπιο βιομάζας.

2.2.5 Συμπεράσματα

Με την ανάπτυξη του ξηραντήρα φρούτων, οι αγρότες της Π.Γ.Δ.Μ. είναι πλέον σε θέση να χρησιμοποιούν τα μήλα τους. Γι αυτούς, απ' την άλλη, η ξήρανση όχι μόνο επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των μήλων και άλλων καλλιεργειών φρούτων αλλά και αυξάνει την αξία τους.

Ο ξηραντήρας σχεδιάστηκε με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- (1) Η περιοχή να έχει σημαντική παραγωγή καλλιεργειών φρούτων,
- (2) Να υπάρχει διαθεσιμότητα πηγών βιομάζας στην περιοχή και στις γειτονικές περιοχές, και
- (3) Οι ανάγκες ξήρανσης των πελατών.

Ένας συνδυασμένος ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας – βιομάζας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με βάση προκαταρκτικές έρευνες ξήρανσης φρούτων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες (ξηραντήρας εργαστηρίου).

2.3 Ξηραντήρας με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας και βιομάζας για ξήρανση γλυκοπατάτας

Ο σκοπός αυτής της μελέτης ήταν ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ενός ηλιακού ξηραντήρα συνδυασμένου με βιομάζα για χρήση στις αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτή η προκαταρκτική μελέτη χρησιμοποίησε φρέσκα κομμάτια γλυκοπατάτας ως δείγματα δοκιμής σε μία δοκιμαστική περίοδο τεσσάρων ημερών.

2.3.1 Θεωρία

2.3.2 Καθορισμός της συνεισφοράς θερμότητας στην ξήρανση

Η ποσότητα θερμότητας Q_w που απαιτείται, για την εξάτμιση υγρασίας μάζας m_w εκτιμάται χρησιμοποιώντας τη βασική εξίσωση θερμότητας.

$$Q_w = m_w L_{vap}$$

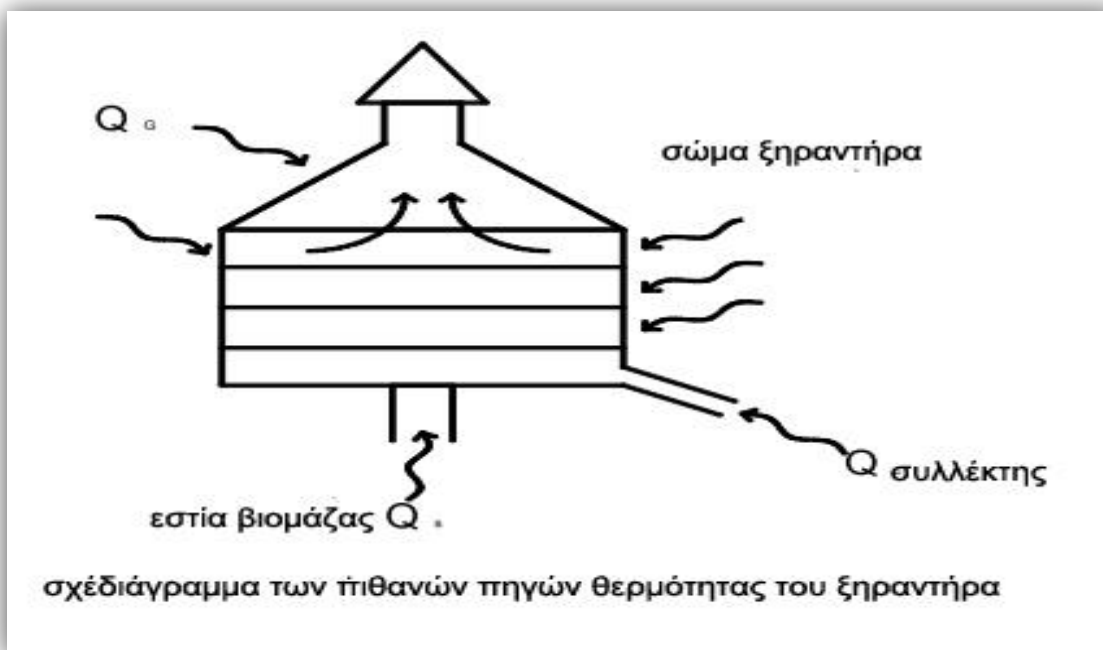
όπου L_{vap} [kJ/kg] είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού, που μπορεί να υπολογιστεί από τη μέθοδο του Youcef-Ali ως:

$$L_{vap} = 4.186(597 - 0.56T_{pr}) kJ/kg$$

όπου T_{pr} [$^{\circ}C$] είναι η θερμοκρασία του προϊόντος, που μπορεί να θεωρηθεί ως η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην πιο ψυχρή καιρική συνθήκη.

$$Q_w = 4.186 m_w (597 - 0.56T_{pr}) kJ$$

Αυτό αντιπροσωπεύει τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για την ξήρανση των αντικειμένων στον ξηραντήρα σε μία υπολογίσιμη κατάσταση περιεκτικότητας σε υγρασία. Το σχήμα παρακάτω αντιπροσωπεύει τις διάφορες πηγές θερμότητας των θαλάμων ξήρανσης του συστήματος



Σχ. 84 [204]σχέδιάγραμμα των πιθανών πηγών θερμότητας του ξηραντήρα

Η συνολική θερμότητα που απαιτείται, Q_w είναι το άθροισμα της θερμότητας που μπαίνει στο σύστημα από το συλλέκτη, Q_c , την εστία βιομάζας, Q_s και το σώμα του θαλάμου ξήρανσης, Q_g .

$$Q_w = Q_c + Q_s + Q_g$$

όπου η ποσότητα θερμότητας από την εστία, Q_s είναι το γινόμενο της μάζας του βιοκαυσίμου που χρησιμοποιείται, m_c και της θερμογόνου δύναμης της βιομάζας, H_v .

$$Q_s = \eta m_c H_v \quad kJ$$

Σύμφωνα με τους Duffie και Beckman (1991), η ωφέλιμη παραγόμενη ενέργεια ενός συλλέκτη επίπεδης πλάκας εμβαδού A_c είναι η διαφορά μεταξύ της απορροφημένης ηλιακής ακτινοβολίας και των θερμικών απωλειών. Αν I_T είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη, U_L ο συντελεστής συνολικής μεταφοράς θερμότητας του συλλέκτη και Q_u η παραγωγή θερμότητας του συλλέκτη, τότε,

$$Q_u = A_c [I_T - U_L \Delta T]$$

όπου $\Delta T = T - T_a$ η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της απορροφητικής πλάκας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Λόγω δυσκολίας εκτίμησης της θερμοκρασίας του απορροφητή επειδή αυτός εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής του ρευστού, προτείνεται η παραγωγή θερμότητας του συλλέκτη να βασίζεται στον παράγοντα απαγωγής θερμότητας F_R του συλλέκτη. Όμως

$$F_R = \frac{mC_p (T_o - T_i)}{A_c [I_T - U_L (T_i - T_a)]}$$

Ο παράγοντας απαγωγής θερμότητας είναι μία συνάρτηση του παράγοντα απόδοσης του συλλέκτη F' που μπορεί να τροποποιήσει τον παράγοντα απαγωγής θερμότητας ως

$$F_R = \frac{mC_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{mC_p} \right) \right]$$

Μια γραφική αναπαράσταση του λόγου αυτών των παραγόντων παρέχεται από τους Duffie και Beckman (1991) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του παράγοντα απαγωγής θερμότητας. Για να μειωθούν οι θερμικές απώλειες για μέγιστη παραγωγή θερμότητας, γίνεται η υπόθεση ότι και η πλάκα του συλλέκτη και το εργαζόμενο ρευστό (ρεύμα αέρα) μπορούν να είναι στην ίδια θερμοκρασία. Ως εκ τούτου η μέγιστη παραγωγή ενέργειας της απορροφητικής πλάκας είναι

$$Q_u = A_c F_R [I_T - U_L (T_i - T_a)]$$

Αυτό ισοδυναμεί με το ποσοστό της συνολικής θερμότητας που αναμένεται από τον ηλιακό συλλέκτη για να αφαιρέσει m_w υγρασίας για την ξήρανση του προϊόντος. Η συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας της εξίσωσης μπορεί να εκτιμηθεί από τα μοντέλα που έχουν προταθεί από τους Hottel και Wortz (1942) τα οποία βελτιώθηκαν από τους Liu και Jordan (1963) ως:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Αυτή είναι η συνολική ηλιακή ακτινοβολία της κεκλιμένης επιφάνειας για 1 ώρα. Σύμφωνα με τον Ulgen (2006) η μέγιστη ετήσια διαθεσιμότητα ενέργειας λαμβάνεται όταν η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με τη γωνία του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής για χώρες με χαμηλό γεωγραφικό πλάτος ($\varphi \leq 40^\circ$). Ως εκ τούτου, στην Nsukka, οι ηλιακοί συλλέκτες είναι κεκλιμένοι κατά τη γωνία γεωγραφικού πλάτους 7° . Η θερμότητα που αναπτύσσεται από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία διαμέσου του διαφανούς σώματος του ξηραντήρα μπορεί να εκτιμηθεί από τη μέθοδο των Harkness και Mehta (1978) και Okonkwo και Nwoke (2008). Αυτή η μέθοδος προτείνει ότι η θερμότητα που αναπτύσσεται μέσω του διαφανούς γυάλινου υλικού μπορεί να εκτιμηθεί από

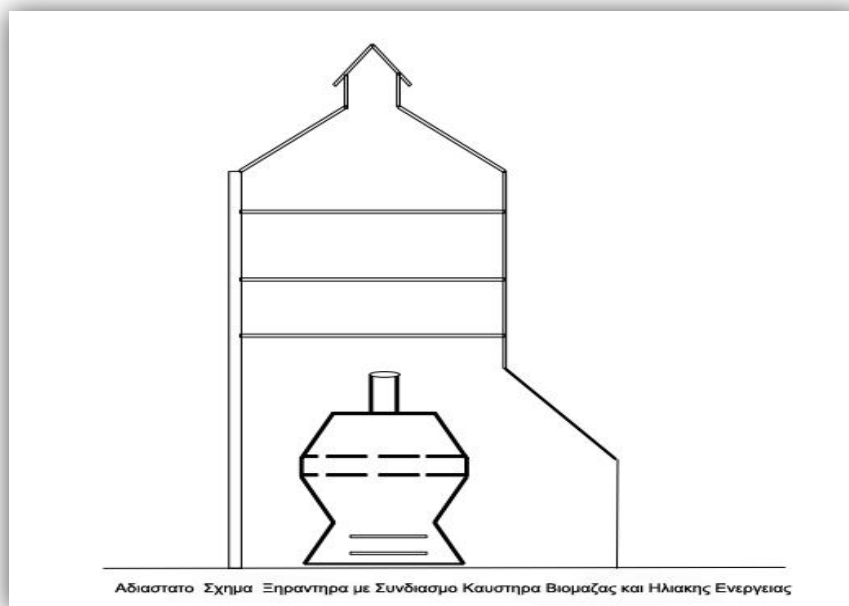
$$q_c = UA(T_o - T_i)$$

και

$$q_t = (I_D A_s \tau_1 + I_d A \tau_2)$$

όπου q_c και q_t είναι η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και ηλιακή ακτινοβολία μέσω του γυαλινού υλικού αντίστοιχα. Το άθροισμα αυτών των συνιστωσών δίνει την εκτιμώμενη συνολική θερμότητα μέσω του γυαλιού. Από αυτό, το συνολικό εμβαδόν του γυαλιού (A_s) μπορεί να υπολογιστεί.

2.3.3 Υλικά και μέθοδοι



Σχ. 85 [204]αδιάστατο σχήμα ξηραντήρα με συνδυασμό καυστήρα βιομάζας και ηλιακής ενέργειας

Ο υβριδικός ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας και βιομάζας (σχήμα 85) αποτελείται από ένα τμήμα ηλιακής ξήρανσης και ένα τμήμα εστίας βιομάζας. Ο ξηραντήρας έχει το σχήμα ενός οικιακού κιβωτίου με κεκλιμένη διάφανη οροφή, αποτελούμενο από ένα θάλαμο ξήρανσης, εστία βιομάζας, και ηλιακό συλλέκτη.

Ο ξηραντήρας έχει δύο ανοίγματα για το θερμαινόμενο αέρα, ένα στην κορυφή του ηλιακού συλλέκτη για την έξοδο του θερμαινόμενου αέρα από τον συλλέκτη, και το άλλο στη βάση του θαλάμου ξήρανσης για την έξοδο του θερμαινόμενου αέρα από την εστία βιομάζας. Η καμινάδα έχει ύψος 180cm από το έδαφος και βρίσκεται στην κορυφή του θαλάμου ξήρανσης δρώντας ως έξοδος αέρα.

Ο θάλαμος ξήρανσης είναι διατομής 59.6cm x 59.6cm και έχει ύψος περίπου 104cm. Έχει τρία επίπεδα δίσκων, και είναι εφοδιασμένος με ένα σύστημα σωληνών που τροφοδοτεί τη θερμότητα που βγαίνει από την εστία βιομάζας στους διάφορους δίσκους.

Η εστία βιομάζας αποτελείται από 3 βασικές συνιστώσες. Το θάλαμο καυσίμου που είναι και θάλαμος καύσης, τη βασική είσοδο αέρα και το καπάκι σχήματος κόλουρου κώνου με μια μικρή προεξοχή σωλήνα. Η εστία έχει ύψος περίπου 43cm. Ο επίπεδης πλάκας ηλιακός συλλέκτης διαστάσεων 0.61m x 0.64m, αποτελείται από έναν απορροφητή, μόνωση και πλάκα κάλυψης.

Η κίνηση του αέρα από τις εισόδους στις εξόδους, όταν ο ξηραντήρας είναι τοποθετημένος στη διαδρομή της ροής αέρα, προκαλεί ένα θερμοσυφωνικό αποτέλεσμα το οποίο δημιουργεί ένα ανοδικό

ρεύμα ηλιακά θερμαινόμενου αέρα, που απομακρύνει την υγρασία από το θάλαμο ξήρανσης. Ο αέρας περιβάλλοντος χρησιμοποιείται ως πηγή αέρα.

Η δοκιμή αποτελεσματικότητας του ξηραντήρα έγινε σε μια περίοδο τεσσάρων ημερών. Η πρώτη μέρα περιλάμβανε τη μέτρηση της κατανομής της θερμοκρασίας στους δίσκους του ξηραντήρα χωρίς φορτίο.

Η δεύτερη μέρα περιλάμβανε τη μέτρηση της απώλειας υγρασίας των κομματιών γλυκοπατάτας στους δίσκους του ξηραντήρα μόνο με ηλιακή θέρμανση κατά τη διάρκεια της μέρας, και έπειτα μόνο με θέρμανση με βιομάζα κατά τη διάρκεια της νύχτας.

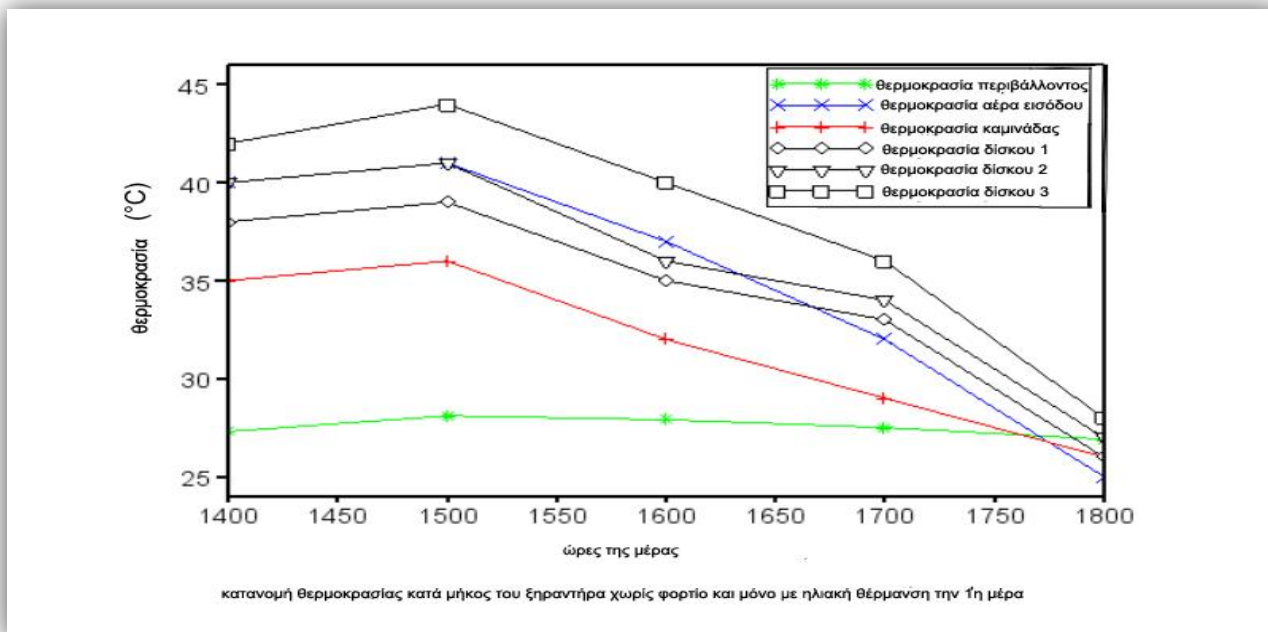
Η υπόλοιπη περίοδος δοκιμής περιλάμβανε τη μέτρηση της απώλειας υγρασίας των κομματιών γλυκοπατάτας στους δίσκους ξήρανσης με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας και βιομάζας. Σε όλες τις δοκιμές τα κομμάτια γλυκοπατάτας τοποθετήθηκαν στην ύπαιθρο για να ξηρανθούν υπό το άμεσο ηλιακό φως για έλεγχο.

Τα κομμάτια γλυκοπατάτας παρασκευάστηκαν από φρέσκες γλυκοπατάτες που αγοράστηκαν από την τοπική αγορά της Nsukka στη Νιγηρία. Τα κομμάτια πλύθηκαν για να διασφαλιστεί ότι δεν υπήρχαν προσμείξεις στο πείραμα. Ίσες μερίδες κομματιών γλυκοπατάτας 120g ζυγίστηκαν χρησιμοποιώντας ζυγό ακριβείας και απλώθηκαν στους δίσκους και στην ύπαιθρο για έλεγχο. Οι θερμοκρασιακές αλλαγές παρακολουθούνταν χρησιμοποιώντας θερμομότρα με υδράργυρο στερεοποιημένα στους δίσκους ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος παρακολουθούνταν με θερμοστοιχεία τύπου k.

2.3.4 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

2.3.5 Κατανομή θερμοκρασίας

Η πρώτη δοκιμή έγινε σε μια περίοδο τεσσάρων ημερών από τις 14:00 μέχρι τις 18:00. Το σχήμα 86 συγκρίνει τις θερμοκρασιακές κατανομές στους δίσκους του ξηραντήρα με το χρόνο χωρίς φορτίο και μόνο με άμεση ηλιακή ακτινοβολία ως πηγή θέρμανσης.



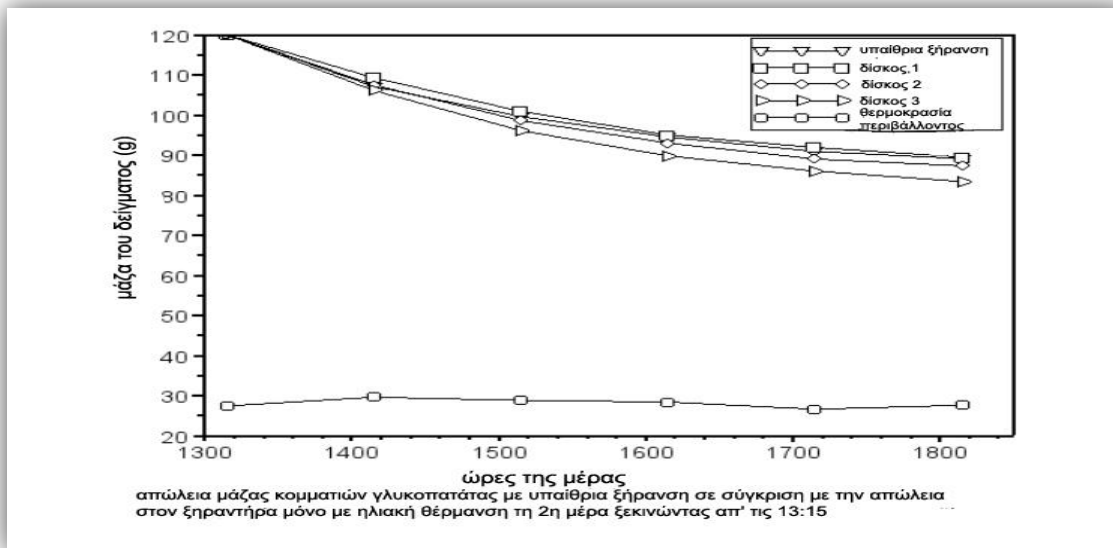
Σχ. 86 [204]κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του ξηραντήρα χωρίς φορτίο και μόνο με ηλιακή θέρμανση την 1^η μέρα

Μέσα στην πρώτη ώρα η θερμοκρασία των τριών δίσκων αυξήθηκε σταθερά από τους 38 °C

(δίσκος 1) στη μέγιστη των 44°C στο δίσκο 3. Ο συλλέκτης και το διάφανο γυάλινο σώμα είχαν καλή αποτελεσματικότητα καθώς αυτό αντικατοπτρίστηκε στην ευρεία θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας των δίσκων.

2.3.6 Απώλεια υγρασίας με ηλιακή ξήρανση

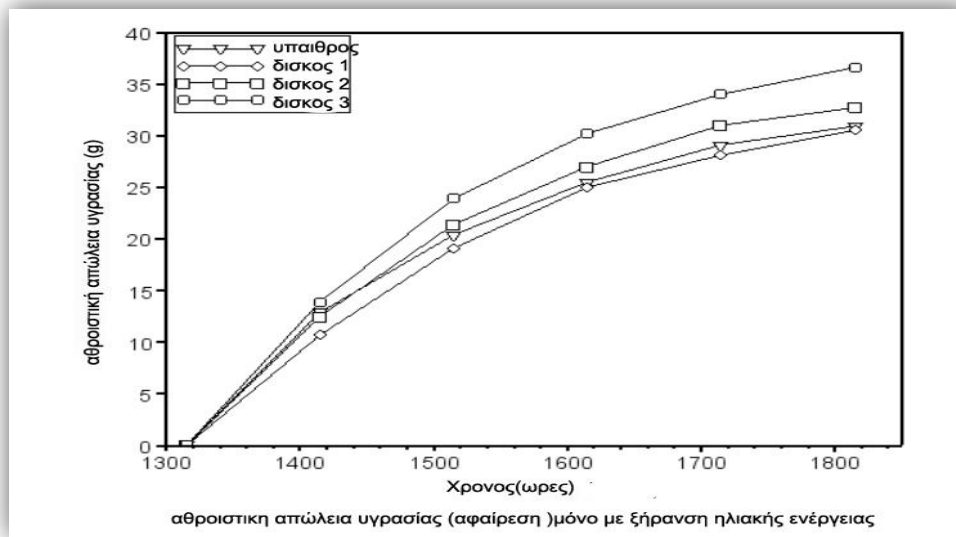
Τη δεύτερη μέρα το σύστημα αξιολογήθηκε με φρέσκα κομμάτια γλυκοπατάτας των οποίων ο μηχανισμός ξήρανσης (απώλεια μάζας) φαίνεται στο σχήμα 87.



Σχ. 87 [204] απώλεια μάζας κομματιών γλυκοπατάτας με υπαίθρια ξήρανση σε σύγκριση με την απώλεια στον ξηραντήρα μόνο με ηλιακή θέρμανση την 2^η μέρα ξεκινώντας από τις 13:15

Μια απώλεια υγρασίας μεγάλου βαθμού επιτεύχθηκε μέσα στην πρώτη ώρα. Η απώλεια μάζας στην υπαίθρο ήταν μεγαλύτερη απ' ό,τι στο δίσκο 1. Αυτός ο υψηλότερος ρυθμός ξήρανσης μπορεί να προκλήθηκε από τον άνεμο. Η επιφανειακή υγρασία από τα κομμάτια γλυκοπατάτας απομακρύνθηκε με γρηγορότερο ρυθμό από την εσωτερική υγρασία, επειδή χρειαζόταν λιγότερη ενέργεια για να εξατμιστεί. Ο ρυθμός της συνολικής απώλειας υγρασίας σιγά σιγά μειώθηκε αφού η επιφανειακή υγρασία απομακρύνθηκε και χρειάστηκε περισσότερος χρόνος για να εξατμιστεί η εσωτερική υγρασία των κομματιών γλυκοπατάτας.

Το αποτέλεσμα της ξήρανσης στον ξηραντήρα μπορεί να παρατηρηθεί από τον πολύ πιο αργό ρυθμό ξήρανσης των κομματιών γλυκοπατάτας στην υπαίθρο σε σύγκριση με το ρυθμό ξήρανσης των κομματιών γλυκοπατάτας στους δίσκους ξήρανσης, μέχρι το σούρουπο, όταν οι θερμοκρασίες των δίσκων έπεσαν και επανήλθαν στις συνθήκες περιβάλλοντος. Ο ρυθμός ξήρανσης 0.00732kg/hr που λήφθηκε είναι συγκρίσιμος με το ρυθμό 0.009kg/hr που λήφθηκε από τους Ajao και Adedeji (2008) χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό ξηραντήρα τύπου κουτιού για την ξήρανση γλυκοπατάτας. Η συνολική (αθροιστική) απώλεια υγρασίας των κομματιών γλυκοπατάτας με την ξήρανση στην υπαίθρο σε σύγκριση με αυτή με την ξήρανση σε ηλιακό ξηραντήρα φαίνεται στο σχήμα 88.

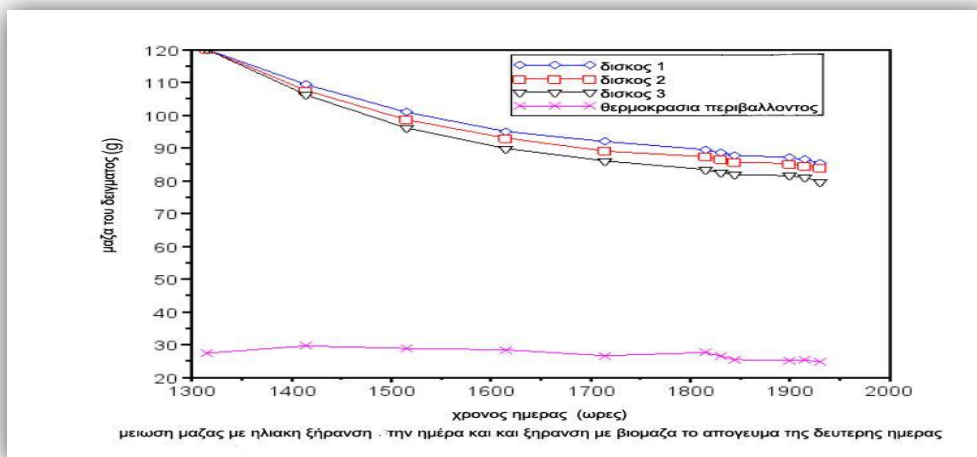


Σχ. 88 [204]αθροιστική απώλεια υγρασίας (αφαίρεση) μόνο με ξήρανση ηλιακής ενέργειας

Η αθροιστική απώλεια υγρασίας στην ύπαιθρο ήταν συγκρίσιμη με τον πρώτο δίσκο. Αυτό συνέβη λόγω του γεγονότος ότι ο πρώτος δίσκος δεν έλαβε περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία από αυτούς που ξηράνθηκαν στην ύπαιθρο, επειδή σκιαζόταν απ' τους δύο από πάνω δίσκους.

2.3.7 Απώλεια υγρασίας με ξήρανση με βιομάζα

Το σχήμα 89 δείχνει τις επιπτώσεις της προσθήκης μίας επιπρόσθετης πηγής θερμότητας βιομάζας στην ξήρανση κομματιών γλυκοπατάτας όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη.



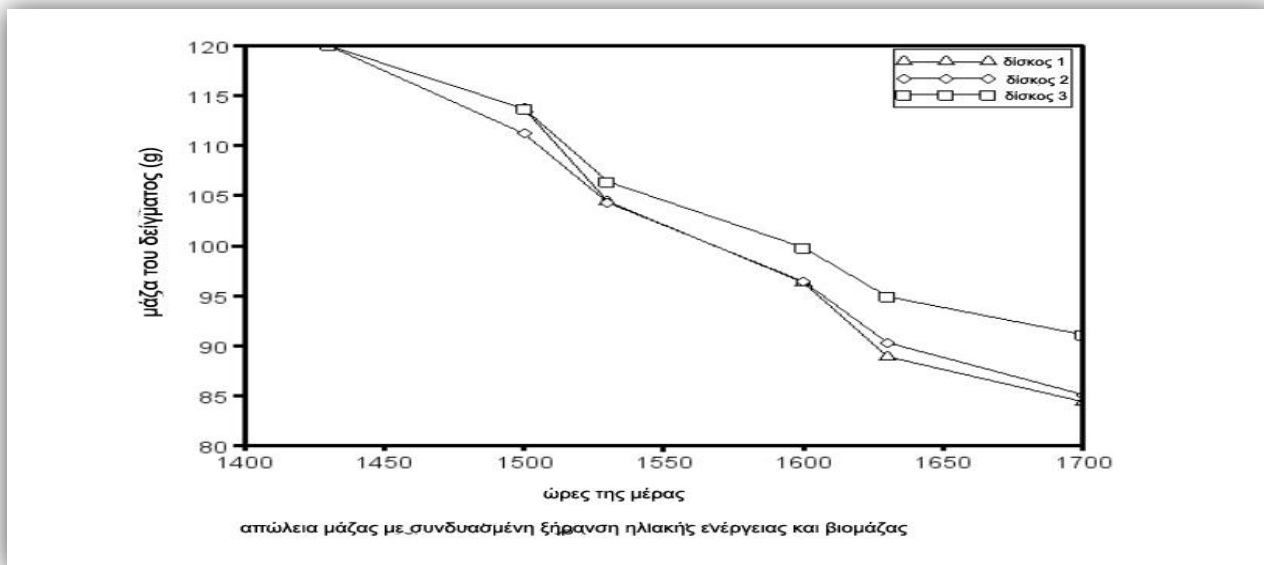
Σχ. 89 [204]μείωση μάζας με ηλιακή ξήρανση την ημέρα και ξήρανση με βιομάζα το απόγευμα της δεύτερης ημέρας

Η απώλεια υγρασίας που σημειώθηκε μεταξύ 18:00 και 18:30 ήταν αναμενόμενη λόγω της επιπρόσθετης πηγής θερμότητας το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλάμου ξήρανσης. Μέσα σ' αυτήν την περίοδο, η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώθηκε και δεν υπήρχε

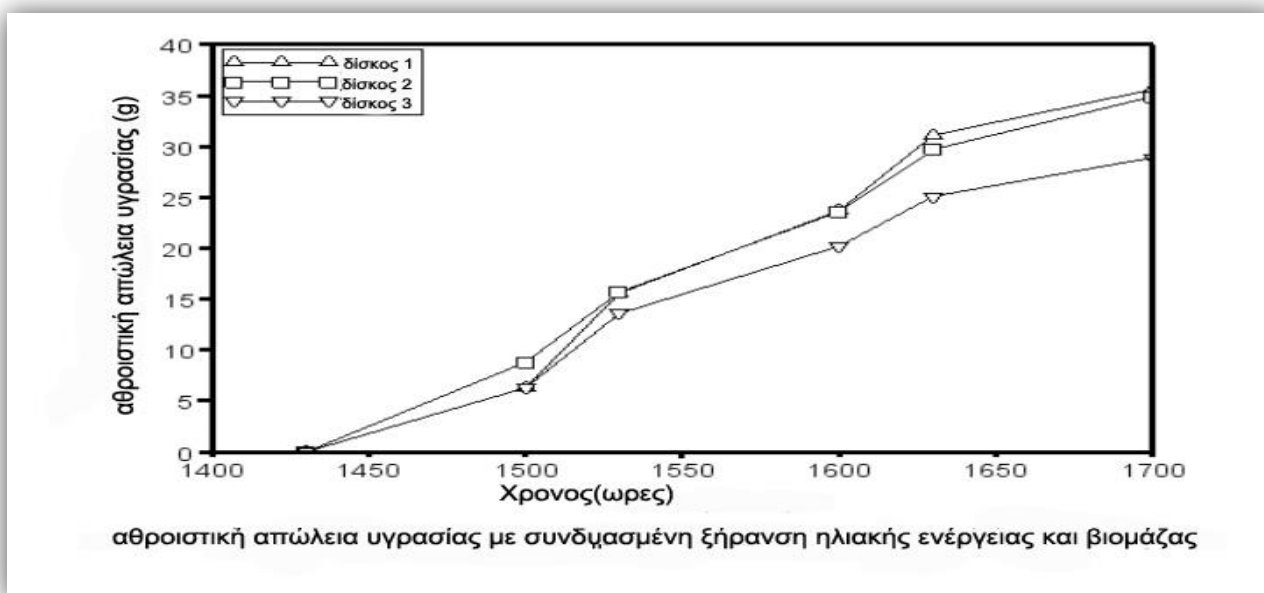
καθόλου ηλιοφάνεια. Αυτό υποδηλώνει ότι επιτεύχθηκε επιπρόσθετη αφαίρεση υγρασίας μέσω της θερμότητας βιομάζας που προστέθηκε στο σύστημα.

2.3.8 Απώλεια υγρασίας με συνδυασμένη ξήρανση ηλιακής ενέργειας και βιομάζας

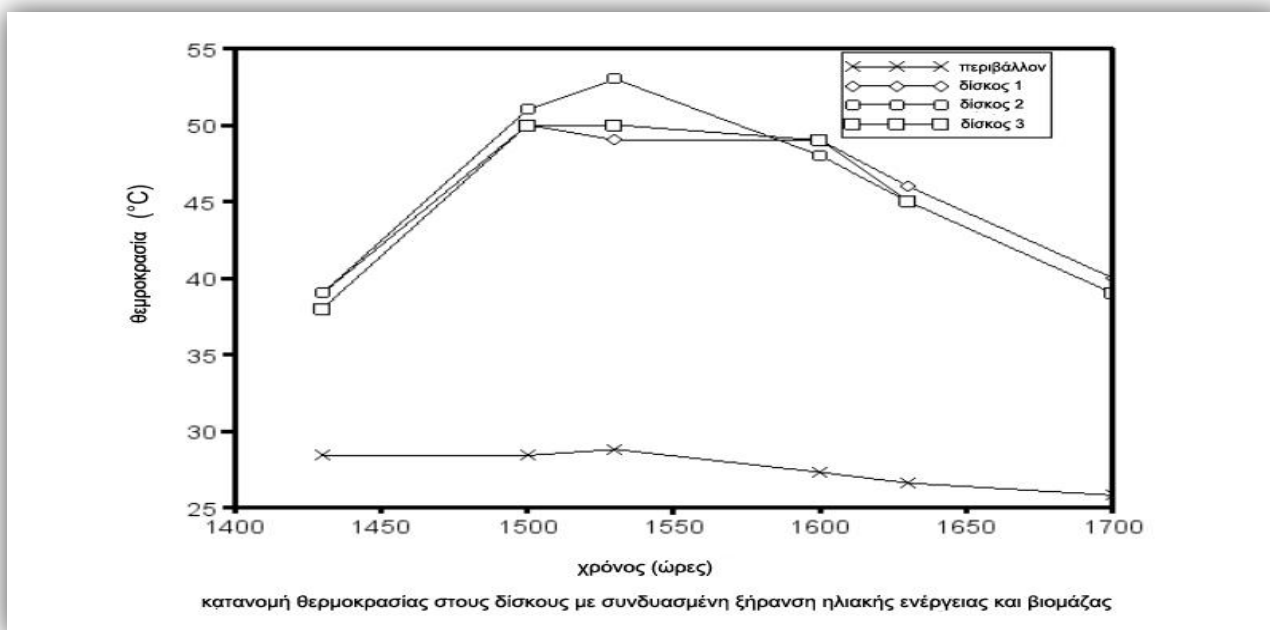
Τα σχήματα 90,91,92 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν όταν η βιομάζα συνδυάστηκε με την ηλιακή ξήρανση κατά τη διάρκεια της μέρας.



Σχ. 90 [204] Απώλεια μάζας με συνδυασμένη ξήρανση ηλιακής ενέργειας και βιομάζας



Σχ. 91 [204] Αθροιστική απώλεια υγρασίας με συνδυασμένη ξήρανση ηλιακής ενέργειας και βιομάζας



Σχ. 92 [204] Καταννομή θερμοκρασίας στους δίσκους με συνδυασμένη ξήρανση ηλιακής ενέργειας και βιομάζας

Το πρώτο σχήμα δείχνει τη ραγδαία απώλεια μάζας στα πρώτα 30 λεπτά ενώ η μέγιστη απώλεια μάζας των 9.3g σημειώθηκε μετά από μία ώρα στο δίσκο 1. Συνδυάζοντας την ηλιακή θέρμανση με επιπρόσθετη θέρμανση βιομάζας βελτιώθηκε η απόδοση του ξηραντήρα σε σύγκριση με τις λειτουργίες ξήρανσης όπου χρησιμοποιούνταν μόνο ηλιακή θέρμανση ή μόνο θέρμανση με βιομάζα.

Συνδυάζοντας ηλιακή ξήρανση και ξήρανση με βιομάζα μειώθηκε η περιεκτικότητα σε υγρασία των κομματιών γλυκοπατάτας στο 70.83% σε 2μιση ώρες, σε σύγκριση με το 75% σε 5 ώρες με ηλιακή ξήρανση και το 94.44% σε 1.25 ώρες με ξήρανση με βιομάζα.

Συγκρίνοντας αυτά σε σχέση με το ρυθμό ξήρανσης, χρησιμοποιώντας το δίσκο με τη μεγαλύτερη αθροιστική αφαίρεση υγρασίας, παίρνουμε 0.0142, 0.0032 και 0.00732 kg/h αντίστοιχα για συνδυασμό ηλιακής με βιομάζα, μόνο βιομάζα και μόνο ηλιακή. Το τρίτο σχήμα δείχνει επίσης ότι η συνδυασμένη θέρμανση ηλιακής ενέργειας και βιομάζας αύξησε τη μέγιστη θερμοκρασία δίσκου στους 53°C, σε σύγκριση με τους 44°C με θέρμανση βιομάζας και τους 32°C με ηλιακή θέρμανση.

2.3.9 Συμπεράσματα

Αυτή η μελέτη απέδειξε ότι η απόδοση των γεωργικών ξηραντήρων θα μπορούσε να αυξηθεί με τη χρήση συνδυασμού ηλιακής ενέργειας και βιομάζας, σε σύγκριση με τους συμβατικούς ξηραντήρες που χρησιμοποιούν μόνο ηλιακή ενέργεια ή μόνο βιομάζα. Η χρήση συνδυασμένων ξηραντήρων ηλιακής ενέργειας και βιομάζας έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την παραγωγικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα επιχειρήσεων μικρής και μεσαίας κλίμακας που παράγουν και επεξεργάζονται γεωργικά προϊόντα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Χώρες όπως η Νιγηρία, με μεγάλες ποσότητες φυσικών πόρων, όπως δάση και ηλιακή ακτινοβολία, θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν στο έπακρο αυτούς τους ξηραντήρες. Υπάρχει η πεποίθηση ότι βελτιώσεις στην κατασκευή των διάφορων συνιστωσών του συστήματος θα βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα του ξηραντήρα για χρήση σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις.

2.4 Ξηραντήρας βιομάζας για ξήρανση αραβοσίτου

Ο αραβόσιτος είναι η πιο σημαντική καλλιέργεια δημητριακών που αναπτύσσεται στην Ουγκάντα. Το έτος 2007, η Ουγκάντα παρήγαγε πάνω από 1.262.000 μετρικούς τόνους αραβοσίτου (FAO,2009)[214].

Ως μία απ' τις λύσεις των προβλημάτων ξήρανσης που αντιμετωπίζουν οι αγρότες στη χώρα, τα εθνικά εργαστήρια γεωργικής έρευνας (NARL) στην Kawanda της Ουγκάντας, σχεδίασαν έναν ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής. Αυτός ο ξηραντήρας είναι απλός και εύκολος στην κατασκευή (Mutyaba,2000)[222] με χρήση τούβλων, άμμου, χώματος και τσιμέντου.

Η πλατφόρμα ξήρανσης είναι φτιαγμένη από δίσκο συρματοπλέγματος ενώ η μονάδα πυροδότησης αποτελείται από ένα θερμαντικό σώμα φτιαγμένο από τύμπανα κασσίτερου. Μία οροφή είναι χτισμένη από πάνω για να εμποδίζει τις βροχές να υγραίνουν τα προϊόντα προς ξήρανση. Είναι ξηραντήρας φυσικής συναγωγής δηλαδή, η βιομάζα συνεχίζει να καίγεται με φυσική ελεύθερη ροή του αέρα.

Χρησιμοποιεί ξυλάνθρακα ή πριονίδι ως πηγή θερμικής ενέργειας και μπορεί να ξηραίνει δημητριακά, όσπρια και καλλιέργειες ριζών και κονδύλων. Είναι αποτελεσματικός για την ξήρανση καλλιεργειών όπως αραβόσιτος, καφές, φασόλια, κασάβα και τσιπς πατάτας και ζαχαρόχορτο μεταξύ άλλων (Mutyaba,2000)[222].

Αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι να καθιερώσει τις επιπτώσεις του ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής στη ζημιά από έντομα, τη μόλυνση από μούχλα και αφλατοξίνη και τη δυνατότητα βλάστησης του σπόρου αραβοσίτου ώστε αυτή η μέθοδος να μπορεί να προταθεί στους αγρότες ως επιλογή διαχείρισης μετά τη συγκομιδή για τον έλεγχο των παραγόντων απώλειας σπόρων.

2.4.1 Υλικά και μέθοδοι

2.4.2 Προετοιμασία των δειγμάτων αραβοσίτου για ξήρανση

Οι νιφάδες αραβοσίτου που ξηράθηκαν μερικώς στον αγρό για 3 βδομάδες μετά από φυσιολογική ωρίμανση, συγκομίστηκαν τον Ιούλιο του 2004 από το εθνικό ινστιτούτο έρευνας πόρων καλλιεργειών (NaCRRRI) στο Namulonge της Ουγκάντας. Η πλειοψηφία των αγροτών αφήνουν τον αραβόσιτο να ξηρανθεί στον αγρό για μέχρι και τρεις βδομάδες μετά τη φυσιολογική ωρίμανση (Kaaya,2005)[218]. Ο αραβόσιτος χωρίστηκε σε δύο παρτίδες.

Η μία παρτίδα ξηράθηκε χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας των εθνικών εργαστηρίων γεωργικής έρευνας (NARL) στην Kawanda της Ουγκάντας ενώ η άλλη παρτίδα ξηράθηκε με φυσική ηλιακή ξήρανση στο γυμνό έδαφος, στο ινστιτούτο γεωργικής έρευνας Kabanyolo του πανεπιστημίου Makerere (MUARIK), προσομοιώνοντας την παραδοσιακή μέθοδο ξήρανσης των αγροτών (Odogola και Henriksson,1991)[224]. Πριν από την ξήρανση χρησιμοποιώντας και τις δύο μεθόδους, οι νιφάδες αραβοσίτου αποφλοιώθηκαν και η μεσαία διάμετρος τους μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα παχύμετρο για να ληφθούν νιφάδες σχεδόν ίδιου μεγέθους έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις του μεγέθους της καλλιέργειας στην απόδοση της ξήρανσης. Επιπρόσθετα, πέντε νιφάδες επιλέχθηκαν τυχαία από την παρτίδα και χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστεί η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία των πυρήνων.

2.4.3 Ξήρανση αραβοσίτου χρησιμοποιώντας ξηραντήρα βιομάζας

Οι νιφάδες (διαμέτρου 4.5-5.0cm) κατανεμήθηκαν ομοιόμορφα σε ένα στρώμα στο συρματοπλέγμα του ξηραντήρα (ξήρανση μονού στρώματος) που προτάθηκε από τον (Mutyaba,2000)[222] για τη χωρητικότητα του ξηραντήρα. Η μέση αρχική θερμοκρασία του ξηραντήρα (28 °C) καθορίστηκε χρησιμοποιώντας πέντε θερμόμετρα τοποθετημένα στις τέσσερις γωνίες και στο κέντρο του ξηραντήρα.

Αυτά τα θερμόμετρα χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την καταγραφή των μέσων θερμοκρασιακών αλλαγών κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης με βιομάζα. Μία εστία ξυλάνθρακα άναψε ακολουθώντας τις μεθόδους που προτάθηκαν από τον (Mutyaba,2000)[222] και τοποθετήθηκε στη μέση

του θερμαντικού σώματος πυροδότησης το οποίο είναι φτιαγμένο από τύμπανο μεταλλικών απορριμμάτων, για να ξεκινήσει η διαδικασία ξήρανσης.

Η διαδικασία ξήρανσης ξεκίνησε στις 12.15 πμ και τελείωσε στις 6.15 μμ, μία περίοδος έξι ωρών. Οι θερμοκρασίες καταγράφονταν κάθε μία ώρα και δείγματα λήφθηκαν σ' αυτό το διάστημα για να καθοριστούν αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Επίσης καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ξήρανσης.

2.4.4 Ξήρανση του αραβοσίτου σε γυμνό έδαφος

Οι νιφάδες αραβοσίτου (επίσης διαμέτρου 4.5-5.0cm) απλώθηκαν ομοιόμορφα στο γυμνό έδαφος και ξηράνθηκαν με φυσική ηλιακή ξήρανση μέχρι η περιεκτικότητα σε υγρασία να φτάσει το 14%, σχεδόν όση και η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία του αποξηραμένου με βιομάζα αραβοσίτου. Η περιεκτικότητα σε υγρασία των πυρήνων καθορίστηκε κάθε μέρα για να καθιερωθεί ο ρυθμός ξήρανσης. Επιπρόσθετα, καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Αυτό το πείραμα θεωρείται ως έλεγχος καθώς η ξήρανση αραβοσίτου σε γυμνό έδαφος είναι η πιο συνήθης πρακτική που χρησιμοποιούν οι αγρότες στην Ουγκάντα (Kaaya 2006)[217], Atukwase 2009[208]).

2.4.5 Αποθήκευση των αποξηραμένων δειγμάτων

Τα αποξηραμένα με βιομάζα και στο γυμνό έδαφος δείγματα αραβοσίτου αποθηκεύτηκαν σε δύο μορφές, αποφλοιωμένα και μη αποφλοιωμένα για μια περίοδο 6 μηνών. Αυτή είναι η μέγιστη περίοδος που αποθηκεύεται συνήθως ο αραβοσίτος από τους αγρότες στην Ουγκάντα (Kaaya και Kyamuhangire,2006)[219]. Η αποφλοίωση των δειγμάτων αραβοσίτου έγινε με το χέρι. Κάθε ένα από τα αποφλοιωμένα και μη αποφλοιωμένα δείγματα χωρίστηκε σε τρεις παρτίδες και κάθε παρτίδα σφραγίστηκε κατάλληλα σε έναν νέο σάκο πεπλεγμένου προπυλενίου που χρησιμοποιείται συνήθως από τους αγρότες για την αποθήκευση αραβοσίτου στην Ουγκάντα. Αυτοί οι σάκοι αντικατέστησαν τους σάκους λινάτσας σιζάλ. Τα δείγματα στους σάκους αποθηκεύτηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σε ένα καλά προστατευμένο δωμάτιο στο τμήμα επιστήμης καλλιεργειών του πανεπιστημίου Makerere, στην Kampala της Ουγκάντας. Η συνολική διάρκεια του έργου ήταν έξι μήνες.

2.4.6 Καθορισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ξήρανσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία των σπόρων καθορίστηκε χρησιμοποιώντας έναν μετρητή υγρασίας (Fermex Moisture Master) ο οποίος διαβάζει απευθείας για τον αραβοσίτο ενώ κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αποθήκευσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία καθορίστηκε χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη μέθοδο αέρα κλίβανου (AOAC,1999) [207]. Τα δείγματα ξηράνθηκαν στους 100 °C σε σταθερό βάρος και η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία υπολογίστηκε σε υγρή βάση.

2.4.7 Καθορισμός της ζημιάς από έντομα

Η ζημιά από έντομα των σπόρων σε κάθε δείγμα αξιολογήθηκε οπτικά χρησιμοποιώντας μία ποιοτική κλίμακα από το 0 ως το 4, όπου 0=καθόλου ζημιά, 1=μικρή ζημιά (από 1 έως 10 σπόροι), 2=μέτρια ζημιά (11 έως 20 σπόροι),3=μεγάλη ζημιά (21 έως 30 σπόροι) και 4=πολύ μεγάλη ζημιά(>30 σπόροι). Τα δείγματα παρατηρήθηκαν επίσης για την παρουσία ζωντανών επιβλαβών εντόμων τα οποία αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.

2.4.8 Καθορισμός εμφάνισης μούχλας

Τριάντα πυρήνες αραβοσίτου επιλέχθηκαν στην τύχη ως δείγματα από κάθε παρτίδα και αναλύθηκαν με άμεση τεχνική επιμετάλλωσης για εσωτερική μόλυνση από μούχλα (Munimbazi και Bullerman 1996[221], Pitt και Hocking 1997[225]). Οι πυρήνες αποστειρώθηκαν επιφανειακά για 1 λεπτό με υποχλωριώδες νάτριο, πλύθηκαν τρεις φορές με αποστειρωμένο αποσταγμένο νερό και τοποθετήθηκαν απευθείας στην επιφάνεια άγαρ βύνης αλατιού η οποία προετοιμάστηκε αναμειγνύοντας 68g χλωριούχου νατρίου, 10g εκχυλίσματος βύνης, 20g άγαρ και ένα λίτρο αποσταγμένου νερού (Hanlin και Uiloa, 1979)[216].

Αυτό το μέσο χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ειδών μούχλας και απαιτεί υψηλή ωσμωτική συγκέντρωση. Οι μη οσμοφιλικές μούχλες αναγνωρίστηκαν στο άγαρ εκχυλίσματος βύνης το οποίο προετοιμάστηκε αναμειγνύοντας 33.6g σε ένα λίτρο αποσταγμένου νερού όπως προτάθηκε από τους κατασκευαστές. Δέκα πυρήνες τοποθετήθηκαν απευθείας σε κάθε πλάκα άγαρ. Οι πλάκες επώστηκαν προς τα πάνω στους 30 °C για 42-72 ώρες. Μετά από επαρκή ανάπτυξη, μερικές από τις καλλιέργειες που δε μπόρεσαν να αναγνωριστούν μεταφέρθηκαν σε άγαρ οξινομένης δεξτρόζης πατάτας για καθαρισμό και αναγνωρίστηκαν χρησιμοποιώντας τις λύσεις που προτάθηκαν από τον Tuite (1982)[227].

2.4.9 Καθορισμός της μόλυνσης από αφλατοξίνη

Οι αφλατοξίνες εξάχθηκαν από τα δείγματα αραβοσίτου χρησιμοποιώντας διάλυμα μεθανόλης νερού (80:20) και ποσοτικοποιήθηκαν σε μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb) χρησιμοποιώντας το φθοριόμετρο Aflatest ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η κύρια περιεκτικότητα σε αφλατοξίνες (ppb) των δειγμάτων υπολογίστηκε.

2.4.10 Καθορισμός ποσοστού βλαστικής ικανότητας

Το ποσοστό βλαστικής ικανότητας είναι ένα πολύ σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό των σπόρων επειδή υποδεικνύει τη δυνατότητα βιωσιμότητάς τους. Σε αυτή τη μελέτη, οι δοκιμές του ποσοστού βλαστικής ικανότητας διεξάχθηκαν στα αποξηραμένα με βιομάζα δείγματα αραβοσίτου σύμφωνα με τους Agona και Nadhy (1998)[205]. Δύο όμοια δείγματα, από τρεις νιφάδες το καθένα, επιλέχθηκαν στην τύχη από τον ξηραντήρα πριν την ξήρανση (έλεγχος) και σε διάστημα μίας ώρας έως το τέλος της περιόδου ξήρανσης. Πενήντα σπόροι ανά επανάληψη μεταφέρθηκαν σε πλάκες βλάστησης που περιείχαν βρεγμένη άμμο και οι σπόροι αφέθηκαν να βλαστήσουν για 10 μέρες. Ο αριθμός των σπόρων που βλάστησαν μετρήθηκε και εκφράστηκε ως ποσοστό και το μέσο ποσοστό υπολογίστηκε.

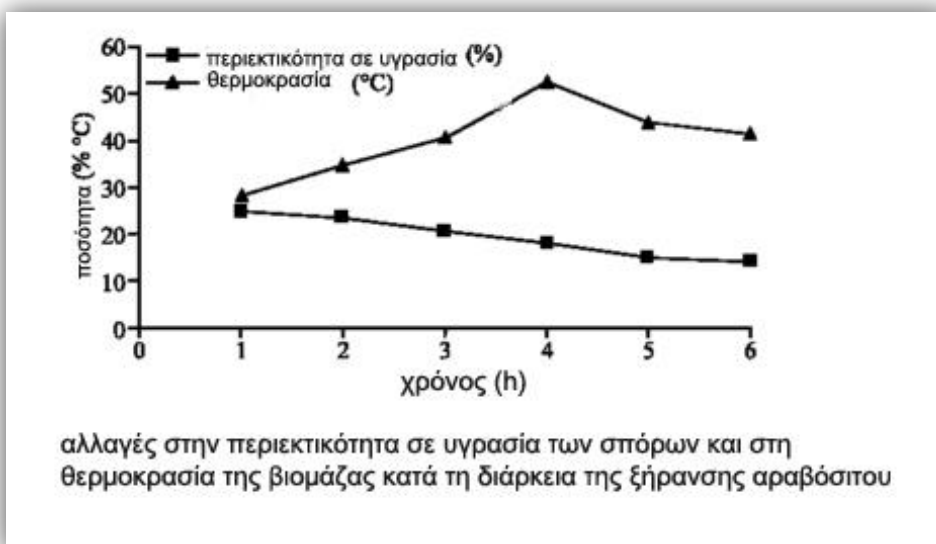
2.4.11 Ανάλυση δεδομένων

Δεδομένα της περιεκτικότητας σε υγρασία, της ζημιάς από έντομα, της μόλυνσης από αφλατοξίνες και του ποσοστού βλαστικής ικανότητας υποβλήθηκαν στην ANOVA χρησιμοποιώντας Genstat 5, Release 3.2, PC/Windows NT, Lawes Agricultural Trust, Rothamsted Experimental Station (1995) και οι μέσες τιμές διαχωρίστηκαν χρησιμοποιώντας LSD ($p=0.05$)⁷.

2.4.12 Αποτελέσματα

2.4.13 Αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία του αραβοσίτου και στη θερμοκρασία της βιομάζας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης

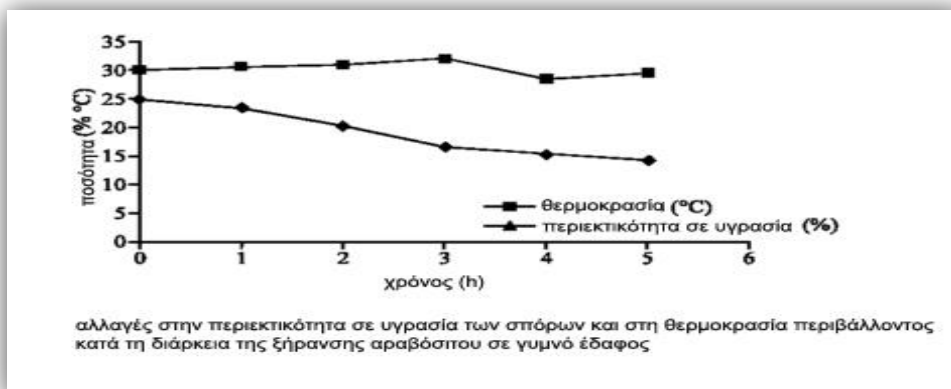
Η μέση θερμοκρασία ξήρανσης αυξήθηκε κατά τη διάρκεια των πρώτων τεσσάρων ωρών, από 28.1 °C φτάνοντας τη μέγιστη των 52.4 °C μετά από 4 ώρες και μειώθηκε στους 39.2 °C στο τέλος της περιόδου ξήρανσης. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία μέσα στον ξηραντήρα σχετίζονται με την απόδοση της καύσης της εστίας ξυλάνθρακα που χρησιμοποιήθηκε για να θερμάνει τον ξηραντήρα. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των σπόρων μειώθηκε σταθερά κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης, από 24.8% σε 13.2% υποδεικνύοντας ότι οι σπόροι ξηράνθηκαν σταθερά.



Σχ. 93 [229]αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία των σπόρων και στη θερμοκρασία της βιομάζας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης αραβοσίτου

2.4.14 Αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία του αραβοσίτου και στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σε γυμνό έδαφος

Καθώς οι θερμοκρασίες ξήρανσης αυξήθηκαν, η περιεκτικότητα σε υγρασία των σπόρων μειώθηκε. Οι τιμές της μέσης περιεκτικότητας σε υγρασία μειώθηκαν από 24.8% την πρώτη μέρα σε 14.2% την πέμπτη μέρα της ξήρανσης. Οι μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος παρέμειναν υψηλές, γενικά πάνω από 28 °C και αυτό θα μπορούσε να διευκολύνει γρηγορότερη ξήρανση των σπόρων στην παρατηρούμενη περιεκτικότητα σε υγρασία.



Σχ. 94 [229] αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία των σπόρων και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ξήρανσης αραβόσιτου σε γυμνό έδαφος

2.4.15 Αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου σε γυμνό έδαφος αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν στο τέλος κάθε μήνα κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης των έξι μηνών. Όλες οι παράμετροι ποιότητας των αποφλοιωμένων και μη αποφλοιωμένων σπόρων αραβοσίτου επηρεάστηκαν δυσμενώς καθώς ο χρόνος αποθήκευσης πλησίασε τους έξι μήνες. Μέχρι το τέλος των τριών πρώτων μηνών, η ζημιά από έντομα, η περιεκτικότητα σε αφλατοξίνες και η μόλυνση από ασπέργιλλο αυξήθηκαν περισσότερο από τρεις φορές ενώ στο τέλος της περιόδου αποθήκευσης όλες οι παράμετροι αυξήθηκαν ακόμα περισσότερο. Ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξήθηκε σημαντικά κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, αυτή η τάση δεν παρατηρήθηκε πολύ στη ζημιά από έντομα, τη μόλυνση από αφλατοξίνες και τη μόλυνση από μούχλα των σπόρων αραβοσίτου. Η ζημιά από έντομα στους αποφλοιωμένους σπόρους παρατηρήθηκε στο τέλος του δεύτερου μήνα ενώ στην περίπτωση των μη αποφλοιωμένων αποθηκευμένων σπόρων, η ζημιά από έντομα παρατηρήθηκε στο τέλος του πρώτου μήνα της αποθήκευσης.

αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου σε γυμνό έδαφος αραβόσιτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης για έξι μήνες σε διαφορετικές μορφές (αποφλοιωμένους και αναποφλοιωτός)

χρόνος αποθήκευσης (μήνες)	παραμέτρους ποιότητας													
	MC (%)		ID ^a		αφλατοξίνη(η)β		ασπέργιλλος . (%)		φουζάριο - sp. (%)		πενικαλλίνη sp. (%)		άλλες μούχλες: (%)	
	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U
0	14.20	14.20	0.00	0.00	1.67	1.30	6.31	6.56	4.03	4.21	3.31	3.74	4.43	4.72
1	14.30	14.33	0.00	0.67	2.27	4.20	10.03	15.31	5.01	7.24	3.34	4.22	6.21	7.35
2	14.50	14.50	0.33	1.35	5.00	14.20	16.28	22.47	6.36	8.26	4.07	5.16	9.63	11.33
3	14.63	14.77	1.33	2.33	9.00	19.70	19.61	27.35	6.34	9.33	5.04	6.31	10.89	12.38
4	14.77	15.23	1.67	2.69	17.47	29.50	25.27	33.14	13.19	14.28	5.07	6.57	11.51	15.05
5	14.90	15.33	2.33	2.90	25.67	33.60	31.85	35.96	11.50	17.89	7.19	8.35	15.87	17.50
6	14.93	15.60	2.67	3.00	32.50	55.30	36.82	43.09	19.14	20.30	7.32	9.49	21.65	24.05
LSD (p≤0.05)	0.14	0.15	0.24	0.25	6.63	10.61	9.98	10.12	1.28	1.88	1.74	1.58	4.04	4.85

η ζημιά από έντομα κατατάσσεται από 0 έως 4 (0=καθόλου ζημιά, 1=μικρή, 2=μέτρια, 3=μεγάλη, 4=πολύ μεγάλη); S:αποφλοιωμένος, U:αναποφλοιωτός

Π. 14 [229] αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου σε γυμνό έδαφος αραβόσιτου κατά την διάρκεια της αποθήκευσης για έξι μήνες σε διαφορετικές μορφές (αποφλοιωμένους και αναποφλοιωτός)

2.4.16 Αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου με βιομάζα αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν στο τέλος κάθε μήνα κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης των έξι μηνών. Οι παράμετροι ποιότητας των αποφλοιωμένων και μη αποφλοιωμένων σπόρων αραβοσίτου επηρεάστηκαν σημαντικά καθώς ο χρόνος αποθήκευσης πλησίασε τους έξι μήνες. Μέχρι το τέλος του έκτου μήνα αποθήκευσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία των αποφλοιωμένων σπόρων αυξήθηκε κατά περίπου 1% ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία των μη αποφλοιωμένων σπόρων αυξήθηκε κατά περίπου 2%.

Η ζημιά από έντομα στους αποφλοιωμένους και μη αποφλοιωμένους σπόρους παρατηρήθηκε για πρώτη φορά μετά από τρεις μήνες αποθήκευσης και, μέχρι το τέλος του έκτου μήνα αποθήκευσης αυτή η παράμετρος αυξήθηκε περισσότερο από τέσσερις φορές σε όλους τους σπόρους. Τα επίπεδα αφλατοξίνης στους αποφλοιωμένους και μη αποφλοιωμένους σπόρους αυξήθηκαν σταθερά με το χρόνο αποθήκευσης και, μέχρι το τέλος του έκτου μήνα τα επίπεδα αυξήθηκαν περισσότερο από 20 φορές.

Η εμφάνιση μούχλας στους αποφλοιωμένους και μη αποφλοιωμένους σπόρους αραβοσίτου αυξήθηκε σημαντικά κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης αλλά η αύξηση ήταν μεγαλύτερη για τον ασπέργιλλο ακολουθούμενη από άλλες καλλιέργειες μούχλας ενώ η μικρότερη αύξηση ήταν του φουζάριου. Επιπρόσθετα, η εμφάνιση του ασπέργιλλου παρέμεινε σταθερά πάνω από αυτήν των άλλων καλλιεργείων μούχλας κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης.

αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου με βιομάζα αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης για έξι μήνες σε διαφορετικές μορφές (αποφλοιωμένος και αναποφλοιώτος)

χρόνος αποθήκευσης (μήνες)	παραμέτροι ποιότητας													
	MC (%)		ID*		αφλατοξίνη (ppb)		ασπέργιλλος (%)		φουζάριο (%)		πενικαλλίνη (%)		άλλες μούχλες (%)	
	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U
0	13.20	13.20	0.00	0.00	0.50	0.93	3.20	4.25	2.54	3.11	1.22	1.72	2.24	2.73
1	13.30	13.43	0.00	0.00	0.83	1.00	5.01	6.14	2.51	3.65	1.75	2.14	3.16	3.95
2	13.40	13.73	0.00	0.00	0.87	1.97	8.35	9.76	3.03	4.53	2.03	2.52	4.85	5.88
3	13.60	13.93	0.00	0.00	1.33	2.33	9.86	12.17	3.28	4.97	2.56	3.65	5.59	7.56
4	13.73	14.40	0.33	0.66	2.23	4.67	12.64	15.19	6.65	7.16	2.88	3.98	5.84	6.61
5	13.90	14.57	1.00	1.68	7.67	11.50	15.98	16.58	6.73	8.98	3.50	4.20	7.91	9.84
6	14.00	14.73	1.38	2.67	11.83	22.67	18.45	25.04	6.54	10.05	3.75	4.75	9.85	11.88
LSD (p<0.05)	0.15	0.19	0.24	0.67	2.47	4.38	4.87	4.43	1.41	1.25	1.22	1.30	3.02	3.61*

η ζημιά από έντομα κατατάσσεται από 0 έως 4 (0=καθόλου ζημιά, 1=μικρή, 2=μέτρια, 3=μεγάλη, 4=πολύ μεγάλη), S:αποφλοιωμένος, U:αναποφλοιώτος

Π. 15 [229] αλλαγές στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου με βιομάζα αραβοσίτου κατά την διάρκεια της αποθήκευσης για έξι μήνες σε διαφορετικές μορφές (αποφλοιωμένος και αναποφλοιώτος)

2.4.17 Σύγκριση μεταξύ της ποιότητας των σπόρων αραβοσίτου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο βιομάζας και τη μέθοδο του γυμνού εδάφους

Οι τιμές που παρουσιάζονται σε κάθε παράμετρο ποιότητας για τους αποφλοιωμένους και μη αποφλοιωμένους σπόρους αραβοσίτου είναι μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για όλους τους έξι μήνες της αποθήκευσης. Η μέθοδος ξήρανσης επηρέασε σημαντικά την περιεκτικότητα σε υγρασία ($p < 0.05$), τη ζημιά από έντομα και τα επίπεδα αφλατοξίνης αλλά όχι τη μόλυνση από μούχλα του αραβοσίτου.

επίπτωση της μεθόδου ξήρανσης στις παραμέτρους ποιότητας του αραβοσίτου που αποθηκεύεται για έξι μήνες σε διαφορετικές μορφές (αποφλοιωμένος αναποφλοιωτός)

μέθοδος ξήρανσης	παραμέτρους ποιότητας													
	MC (%)		ID ^a		αφλατοξίνη (ppb)		ασπέργιλλος (%)		φουζάριο (%)		πενικιλίνη (%)		άλλες μούχλες (%)	
	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U
γυμνό έδαφος	14.61	14.85	1.19	1.85	13.37	22.54	20.88	28.27	9.37	11.64	5.05	6.26	11.46	13.20
βιομάζα	13.59	14.00	0.39	0.72	3.61	6.44	10.50	12.73	4.52	6.06	2.53	3.28	5.63	6.92
LSD (p<0.05)	0.97	0.12	0.07	1.26	9.08	12.54	10.39	15.58	4.86	6.58	2.62	3.01	5.98	6.35

η ζημιά από έντομα κατατάσσεται από 0 έως 4 (0=καθόλου ζημιά, 1=μικρή, 2=μέτρια, 3=μεγάλη, 4=πολύ μεγάλη), S:αποφλοιωμένος, U:αναποφλοιωτός

Π. 16 [229] επίπτωση της μεθόδου ξήρανσης στις παραμέτρους ποιότητας του αραβοσίτου που αποθηκεύεται για έξι μήνες σε διαφορετικές μορφές (αποφλοιωμένος αναποφλοιωτός)

Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, οι πυρήνες αραβοσίτου που ξηράνθηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο γυμνού εδάφους είχαν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και βρέθηκε ότι μολύνθηκαν τρεις φορές περισσότερο από έντομα και αφλατοξίνες σε σύγκριση με τους σπόρους που ξηράνθηκαν χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας.

2.4.18 Επίπτωση της μορφής αποθήκευσης στις παραμέτρους ποιότητας του αραβοσίτου που ξηράνθηκε χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας και αυτού που ξηράνθηκε σε γυμνό έδαφος

Οι τιμές που παρουσιάζονται σε κάθε παράμετρο είναι μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για όλους τους έξι μήνες της αποθήκευσης. Η μορφή αποθήκευσης είχε σημαντικές επιπτώσεις σε όλες τις παραμέτρους ποιότητας του αραβοσίτου. Και για τον αποξηραμένο με βιομάζα αραβόσιτο και για τον αποξηραμένο σε γυμνό έδαφος αραβόσιτο, βρέθηκε ότι οι σπόροι που αποθηκεύτηκαν μη αποφλοιωμένοι, είχαν σημαντικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία (p<0.05), ζημιά από έντομα και αφλατοξίνες καθώς και μόλυνση από μούχλα.

Στις μούχλες, ωστόσο, η εμφάνιση καλλιεργείων φουζάριου δε διέφερε σημαντικά μεταξύ των αποφλοιωμένων και μη αποφλοιωμένων σπόρων αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.

επίπτωση της μορφής αποθήκευσης στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου με βιομάζα και σε γυμνό έδαφος αραβοσίτου που αποθηκεύεται

μορφή αποθήκευσης	παραμέτρους ποιότητας													
	MC (%)		ID ^a		αφλατοξίνη (ppb)		ασπέργιλλος (%)		φουζάριο (%)		πενικιλίνη (%)		άλλες μούχλες (%)	
	BG	BM	BG	BM	BG	BM	BG	BM	BG	BM	BG	BM	BG	BM
αποφλοιωμένα	14.85	14.00	1.85	0.72	22.54	6.44	28.27	12.73	11.64	6.06	6.26	3.28	13.20	6.92
αναποφλοιωτά	14.61	13.59	1.19	0.39	13.37	3.61	20.88	10.50	9.37	4.52	5.05	2.53	11.46	5.63
LSD (p<0.05)	0.21	0.38	0.52	0.15	8.11	1.83	7.40	2.10	2.85	1.45	1.18	0.64	1.08	0.98

η ζημιά από έντομα κατατάσσεται από 0 έως 4 (0=καθόλου ζημιά, 1=μικρή, 2=μέτρια, 3=μεγάλη, 4=πολύ μεγάλη) MC=περιεκτικότητα σε υγρασία BG: γυμνό έδαφος BM: βιομάζα

Π. 17 [229] επίπτωση της μορφής αποθήκευσης στις παραμέτρους ποιότητας του αποξηραμένου με βιομάζα και σε γυμνό έδαφος αραβοσίτου που αποθηκεύεται

2.4.19 Επιπτώσεις της ξήρανσης του αραβοσίτου με βιομάζα στη βιωσιμότητα των πυρήνων

Η ξήρανση αραβοσίτου χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής δε μείωσε σημαντικά τη βιωσιμότητα των πυρήνων ενώ υπήρξε μία μείωση κατά 10% στην ικανότητα βλαστικότητας.

επίπτωση της ξήρανσης με βιομάζα στο ποσοστό βλαστικής ικανότητας του σπόρου αραβοσίτου	
χρόνος ξήρανσης (h)	βλαστική ικανότητα (%)
0	91.4
1	90.8
2	88.2
3	85.6
4	85.1
5	83.8
6	81.5
LSD (p<0.05)	10.55

Π. 18 [229] επίπτωση της ξήρανσης με βιομάζα στο ποσοστό βλαστικής ικανότητας του σπόρου αραβοσίτου

2.4.20 Παρατηρήσεις

Η μέγιστη θερμοκρασία που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια της ξήρανσης στον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής ήταν 52.4 °C την τέταρτη ώρα πράγμα που είναι σύμφωνο με τα ευρήματα του (Mutyaba,2000)[222]. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία μέσα στον ξηραντήρα σχετίζονται με την απόδοση καύσης της εστίας ξυλάνθρακα που χρησιμοποιήθηκε για να θερμάνει τον ξηραντήρα. Η εστία θέλει κάποιο χρόνο για να πραγματοποιήσει μέγιστη καύση μετά την πυροδότηση και η απόδοση καύσης της μειώνεται μετά από τέσσερις ώρες όταν ο ξυλάνθρακας καίγεται σε στάχτες. Αυτό εξηγεί γιατί η θερμοκρασία του ξηραντήρα μειώθηκε στους 39 °C στο τέλος της περιόδου ξήρανσης. Ωστόσο, αμέσως μετά την εισαγωγή της εστίας καύσης στον ξηραντήρα, οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν πάνω απ' του περιβάλλοντος μέχρι το τέλος του πειράματος διευκολύνοντας έτσι γρηγορότερη ξήρανση απ' ότι με τη φυσική ηλιακή ξήρανση.

Στον ξηραντήρα βιομάζας, η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία μειώθηκε σταθερά κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης των έξι ωρών, από 24.8% σε 13.2% συμφωνώντας με τον Agona (1999)[206], ο οποίος ανέφερε ότι η ξήρανση νιφάδων αραβοσίτου στον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής παίρνει περίπου 5 με 6 ώρες για να μειώσει την περιεκτικότητα σε υγρασία στο 14% (Cassel,2001)[211].

Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα της τελικής περιεκτικότητας σε υγρασία που επιτεύχθηκε (13.2%) υποδηλώνουν ότι ο αραβόσιτος δεν απαιτεί περαιτέρω ξήρανση για βραχυπρόθεσμη ασφαλή αποθήκευση. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία του αραβοσίτου για ασφαλή αποθήκευση είναι 14% (Cassel 2001)[211]. Ωστόσο, η περιεκτικότητα σε υγρασία στο 12% ή κάτω από αυτό είναι ιδανική για την αποθήκευση αραβοσίτου, επειδή η ανάπτυξη και παραγωγή τοξίνης από τον ασπέργιλλο δε μπορεί να συμβεί (Grybauskas,2000)[215].

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης νιφάδων αραβοσίτου σε γυμνό έδαφος, υπήρξε σταθερή ξήρανση όπως υποδηλώνεται από τις τιμές της μέσης περιεκτικότητας σε υγρασία που μειώθηκαν από το 24.8% την πρώτη μέρα στο 14.2% την πέμπτη μέρα της ξήρανσης. Οι υψηλές μέσες θερμοκρασίες τη μέρα όπως φαίνονται στο σχήμα 94 θα μπορούσαν να διευκολύνουν γρηγορότερη ξήρανση. Επιπρόσθετα, δεν υπήρξε βροχή κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης όπως συναντάται συχνά από τους αγρότες στην Ουγκάντα.

Σύμφωνα με τον Odogola και τον Henriksson (1991)[224], η πιο συνηθισμένη παραδοσιακή μέθοδος ξήρανσης αραβοσίτου στην Ουγκάντα περιλαμβάνει το άπλωμα της καλλιέργειας σε γυμνό

έδαφος και παίρνει έως μία βδομάδα για την ξήρανση όψιμα συγκομισμένων νιφάδων, ανάλογα με την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία και τις καιρικές συνθήκες. Ο αραβόσιτος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης συγκομίστηκε όψιμα κατά τρεις βδομάδες εξ' ου και ο λόγος για ξήρανση μέσα σε μία βδομάδα.

Η συγκομιδή αραβοσίτου όταν έχει περιεκτικότητα σε υγρασία πάνω από 20% και η ξήρανση του μέσα σε 24 με 48 ώρες σε περιεκτικότητα σε υγρασία τουλάχιστον 14% μειώνει σημαντικά την ανάπτυξη και την παραγωγή αφλατοξίνης από τον ασπέργιλλο (Grybauskas 2000[215], Cassel 2001[211]). Σύμφωνα με το FAO (2000)[213] η έγκαιρη και κατάλληλη ξήρανση είναι τα καλύτερα μέσα για την αποφυγή ανάπτυξης μυκήτων και παραγωγής μυκοτοξινών στους σπόρους μετά τη συγκομιδή.

Πράγματι, στην παρούσα μελέτη, τα μέσα επίπεδα αφλατοξίνης στον αποξηραμένο σε γυμνό έδαφος αραβόσιτο ήταν 22.54 ppb το οποίο είναι υψηλότερο από τα ρυθμιστικά επίπεδα του 20 ppb που προτάθηκαν από το FDA/WHO (Mphande 2004, Duangpatra 2005[212]) ενώ τα επίπεδα αφλατοξίνης του αποξηραμένου με βιομάζα αραβοσίτου ήταν χαμηλότερα από 20 ppb.

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης υποστηρίζουν παλαιότερες μελέτες. Το FAO (2000)[213] πρόσθεσε ότι κατά καιρούς, όταν η ξήρανση στον ήλιο δεν είναι δυνατή ή είναι αναξιόπιστη, κάποια μορφή μηχανικής ξήρανσης μπορεί να είναι απαραίτητη. Ο Nagler (1986)[223] ανέφερε επίσης ότι η μηχανική ξήρανση αραβοσίτου σε μία περιεκτικότητα σε υγρασία 14% που αρχίζει μέσα σε 2.5 μέρες από τη συγκομιδή, έχει δείξει ότι ελέγχει αποτελεσματικά το επίπεδο αφλατοξίνης στον αραβόσιτο που παράγεται στην Ταϊλάνδη κατά τη διάρκεια της περιόδου βροχοπτώσεων.

Οι μηχανικοί ξηραντήρες είτε άμεσοι είτε έμμεσοι, σύμφωνα με το FAO χρειάζονται λιγότερο χρόνο ξήρανσης και δίνουν καθαρότερο προϊόν σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Στην παρούσα μελέτη, σημειώθηκε ότι ο αποξηραμένος σε γυμνό έδαφος αραβόσιτος μολύνθηκε περισσότερο από το έδαφος απ' ότι ο αποξηραμένος στον ξηραντήρα φυσικής συναγωγής.

Επιπρόσθετα, ο Kaaya (2006)[217] ανέφερε ότι η μόλυνση του αραβοσίτου από αφλατοξίνη σχετίζεται με την ξήρανση αραβοσίτου σε γυμνό έδαφος το οποίο επιβεβαιώνει γιατί τα επίπεδα αφλατοξίνης στους σπόρους αραβοσίτου που ξηράνθηκαν σε γυμνό έδαφος ήταν σημαντικά υψηλότερα από αυτά στους σπόρους που ξηράνθηκαν χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής.

Η φυσική ηλιακή ξήρανση προϊόντων μπορεί να είναι ένα δύσκολο έργο λόγω μεγάλων βροχοπτώσεων την περίοδο της συγκομιδής. Έτσι, έχει γίνει πολύ δουλειά στο σχεδιασμό ηλιακών και μηχανικών ξηραντήρων για χρήση από τους αγρότες στις τροπικές περιοχές (Axtell και Bush 1991[209], Carruthers και Rodriguez 1992[210]). Ωστόσο, μερικοί απ' αυτούς τους ξηραντήρες δε χρησιμοποιούνται από τους αγρότες λόγω της μεγάλης επένδυσης κεφαλαίων που εμπλέκεται. Σύμφωνα με το FAO (2000)[213], οι μηχανικοί ξηραντήρες πρέπει να είναι ακριβοί.

Ο Nagler (1998)[223] τόνισε ότι για να γίνει η μηχανική ξήρανση πιο πρακτική και λιγότερο δαπανηρή, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν νιφάδες αραβοσίτου οι οποίες έχουν μερικώς ξηρανθεί σε μία περιεκτικότητα σε υγρασία μικρότερη από 22% με φυσική ξήρανση στον αγρό, μία διαδικασία όπου ο αραβόσιτος παραμένει στον αγρό χωρίς να συγκομιστεί για μια περίοδο μετά την ωρίμανση. Στην παρούσα μελέτη, οι νιφάδες αραβοσίτου που χρησιμοποιήθηκαν ξηράνθηκαν στον αγρό όπως παραπάνω αλλά η μέση περιεκτικότητα τους σε υγρασία ήταν 24.8%.

Επιπρόσθετα, ο ξηραντήρας βιομάζας φυσικής συναγωγής που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη είναι εύκολος στην κατασκευή και οικονομικά προσιτός από την πλειοψηφία των ανθρώπων της Ουγκάντας (Mutyaba,2000)[222] και κατά συνέπεια προτείνεται για χρήση από τους αγρότες. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο τέλος κάθε μήνα κατά τη διάρκεια της μελέτης έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία, η ζημιά από έντομα, τα επίπεδα αφλατοξίνης και η μόλυνση από μούχλα των αποξηραμένων σε γυμνό έδαφος ή στον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής σπόρων αυξήθηκαν σημαντικά κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης των έξι μηνών, ανεξάρτητα από τη μορφή αποθήκευσης.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον έλεγχο της μόλυνσης των σπόρων από έντομα, μούχλα και μυκοτοξίνες στην αποθήκευση είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία (Sauer και Burroughs,1980)[226]. Οι μύκητες δε μπορούν να αναπτυχθούν (ή να παράγουν μυκοτοξίνες) σε αποξηραμένα καταλλήλως προϊόντα, κι έτσι η αποτελεσματική ξήρανση προϊόντων που γίνεται χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας και η συντήρηση της ξηρής κατάστασης είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο ελέγχου ενάντια στην ανάπτυξη μυκήτων και την παραγωγή μυκοτοξινών.

Σύμφωνα με το FAO (2000)[213] ενώ είναι πιθανό να ελεγχθεί η ανάπτυξη μυκήτων σε αποθηκευμένα προϊόντα ελέγχοντας την ατμόσφαιρα ή χρησιμοποιώντας συντηρητικά ή φυσικούς αναστολείς, τέτοιες τεχνικές είναι σχεδόν πάντα πιο ακριβές απ' ό τι αποδοτικές για την ξήρανση που σπάνια είναι εφικτές στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Η περιεκτικότητα σε υγρασία στο 12% ή κάτω από αυτό είναι ιδανική για αποθήκευση αραβοσίτου, επειδή η ανάπτυξη και η παραγωγή τοξινών από τον ασπέργιλλο δε συμβαίνει (Cassel,2001)[211]. Ωστόσο, μειώνοντας την περιεκτικότητα σε υγρασία στο 12% (Grybauskas,2000)[215] δε σκοτώνονται οι μύκητες και δε μειώνονται τα επίπεδα των τοξινών που έχουν ήδη παραχθεί. Αν τα επίπεδα υγρασίας ανέβουν ξανά πάνω από 12% οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές, τότε η ανάπτυξη μούχλας και η παραγωγή τοξινών συνεχίζονται. Στην παρούσα μελέτη η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία των σπόρων που αποθηκεύτηκαν σε αποφλοιωμένη ή μη αποφλοιωμένη μορφή θα μπορούσε να έχει οδηγήσει σε αυξημένη ζημιά από έντομα, μόλυνση από μούχλα και μόλυνση από αφλατοξίνες στους σπόρους αραβοσίτου που ξηράνθηκαν σε γυμνό έδαφος και στον ξηραντήρα βιομάζας.

Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του αραβοσίτου, παρατηρήθηκε ότι οι σπόροι που ξηράνθηκαν σε γυμνό έδαφος μολύνθηκαν από μαμούνια (*sitophilus zeamais*) και από σκόρο Angoumois το οποίο υποδηλώνει ότι ο ξηραντήρας κατέστειλε τα πιο σημαντικά επιβλαβή έντομα αποθηκευμένου αραβοσίτου στην Ουγκάντα. Σύμφωνα με τον Kyamanya (1994)[220] ο Angoumois είναι πιο ανεξέλεγκτος σε κατάλληλα αποξηραμένο αραβόσιτο απ' ό τι ο *sitophilus zeamais*. Επιπρόσθετα, αποδείχτηκε ότι η ζημιά από έντομα στους σπόρους που ξηράνθηκαν χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας δεν παρατηρήθηκε μέχρι τον τέταρτο μήνα αποθήκευσης πράγμα που είναι σύμφωνο με τα ευρήματα της Muyinza (2000) η οποία στα αδημοσίευτα δεδομένα της, απέδειξε ότι η βιολογία του σκόρου angoumois κάνει 2-3 μήνες να φανεί σε κατάλληλα αποξηραμένο αραβόσιτο. Οι σπόροι που ξηράνθηκαν σε γυμνό έδαφος ωστόσο, έδειξαν σημάδια μόλυνσης από έντομα μετά από ένα μήνα αποθήκευσης το οποίο υποδηλώνει ότι τα μέτρα ελέγχου εντόμων αυτών των σπόρων πρέπει να εφαρμόζονται πολύ νωρίτερα απ' ό τι στους σπόρους που ξηραίνονται χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας.

Όσον αφορά τα επίπεδα αφλατοξινών, παρατηρήθηκε ότι μέχρι τους τέσσερις μήνες αποθήκευσης, οι σπόροι που ξηράνθηκαν σε γυμνό έδαφος και αποθηκεύτηκαν μη αποφλοιωμένοι είχαν αυξημένα επίπεδα αφλατοξινών παραπάνω από 20 ppb. Μια παρόμοια παρατήρηση υπήρξε στους σπόρους που αποθηκεύτηκαν σε αποφλοιωμένη μορφή μέχρι το τέλος του πέμπτου μήνα αποθήκευσης.

Ωστόσο, για τους σπόρους που ξηράνθηκαν χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας, τα επίπεδα αφλατοξινών ήταν μεγαλύτερα από 20 ppb στους σπόρους που αποθηκεύτηκαν μόνο στο τέλος της περιόδου αποθήκευσης. Καθώς η πλειοψηφία των αγροτών στην Ουγκάντα αποθηκεύει τον αραβόσιτο σε μη αποφλοιωμένη μορφή τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ο ξηραντήρας βιομάζας θα μπορούσε να είναι πολύ αποτελεσματικός στην προστασία του ενάντια στον κίνδυνο μόλυνσης από αφλατοξίνες. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, αυτό εξαρτάται από τα αρχικά επίπεδα αφλατοξινών, τη μόλυνση από μούχλα καθώς και από το περιβάλλον αποθήκευσης των σπόρων.

Η ξήρανση αραβοσίτου χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής δε μείωσε σημαντικά την ικανότητα βλαστικότητας των σπόρων πράγμα που συμφωνεί με τον Agona (1999)[206] ο οποίος ανέφερε ότι οι σπόροι που ξηραίνονται χρησιμοποιώντας τον ξηραντήρα φυσικής συναγωγής είναι καλοί για σπορά. Ωστόσο, το ποσοστό βλαστικότητας των σπόρων που ξηράνθηκαν από δύο έως έξι ώρες ήταν μικρότερο από το ελάχιστο επίπεδο του 90% που προτείνεται στην Ουγκάντα (USP,1973)[228].

2.4.21 Συμπεράσματα

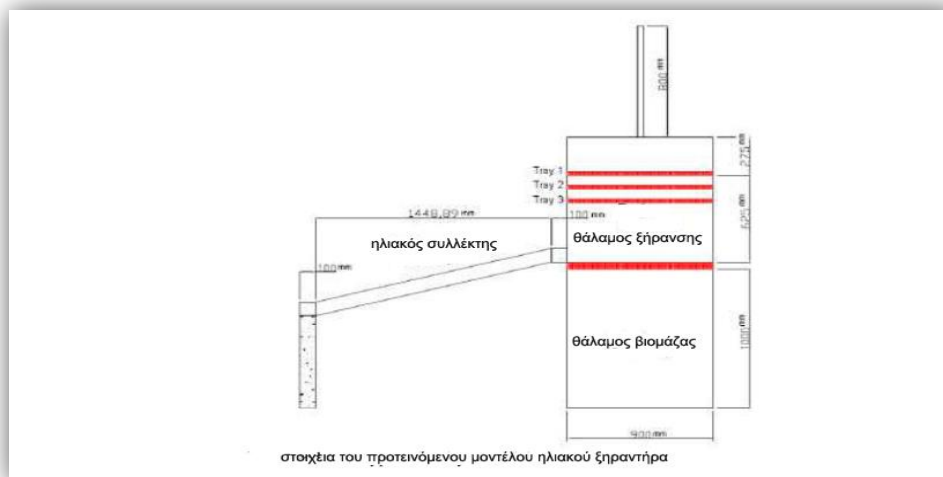
Αυτή η μελέτη καθιέρωσε ότι η ξήρανση σπόρων αραβοσίτου με τον ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής μειώνει το χρόνο ξήρανσης και βελτιώνει κατά πολύ την ποιότητα των σπόρων όσον αφορά την περιεκτικότητα σε υγρασία, τη ζημιά από έντομα και τη μόλυνση από μούχλα και αφλατοξίνες σε σύγκριση με την ξήρανση σε γυμνό έδαφος. Ωστόσο, η μετέπειτα ποιότητα αποθήκευσης των σπόρων εξαρτάται από τη μορφή αποθήκευσης, το χρόνο και το περιβάλλον. Οι σπόροι που αποθηκεύονται σε αποφλοιωμένη μορφή είναι πιθανό να έχουν καλύτερη ποιότητα από αυτούς που είναι αποθηκευμένοι σε αναποφλοιώτη μορφή όσο η περιεκτικότητα σε υγρασία παραμένει στα επίπεδα ασφαλούς αποθήκευσης.

Από τη μελέτη επομένως, συνίσταται ότι η χρήση του ξηραντήρα βιομάζας φυσικής συναγωγής πρέπει να διαδοθεί στους αγρότες ενώ η ξήρανση αραβοσίτου σε γυμνό έδαφος δεν προτείνεται. Αυτό θα οδηγήσει σε βελτιωμένη ποιότητα των σπόρων αραβοσίτου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης στην Ουγκάντα και έτσι θα βοηθήσει στην επέκταση της εμπορευσιμότητας της καλλιέργειας.

2.5 Έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας με εφεδρικό καυστήρα βιομάζας για ξήρανση καρπών πιπεριού

2.5.1 Μεθοδολογία

Ένας ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής αναπτύχθηκε, ο οποίος παίρνει περίπου 2kg καρπών πιπεριού σε ένα δίσκο σε οποιαδήποτε στιγμή στη βέλτιστη θερμοκρασία των 70 °C υπό πραγματικές καιρικές συνθήκες. Το πολύ 3 δίσκοι μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στο θάλαμο ξήρανσης σε μία χρονική περίοδο. Ο ξηραντήρας αποτελείται από 3 βασικά μέρη, το θάλαμο ξήρανσης, το θάλαμο βιομάζας και τον ηλιακό συλλέκτη όπως φαίνεται στο σχήμα 95.



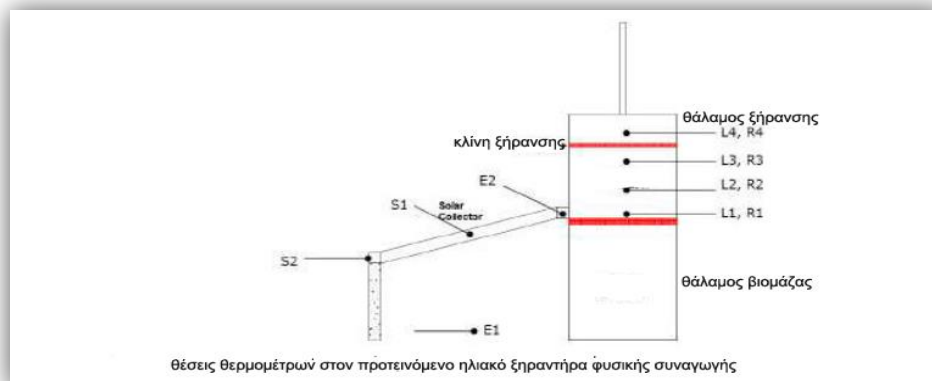
Σχ. 95 [234]Στοιχεία του προτεινόμενου μοντέλου ηλιακού ξηραντήρα

Κάθε μέρος του ηλιακού ξηραντήρα σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να αποσυναρμολογείται και να συναρμολογείται χωρίς δυσκολία για μετακίνηση από ένα μέρος σε ένα άλλο. Ο θάλαμος ξήρανσης θα μπορούσε επίσης να τοποθετηθεί εύκολα στην κορυφή του θαλάμου βιομάζας. Δε χρησιμοποιήθηκε φυσικός μηχανισμός στερέωσης.

Ωστόσο, ο ηλιακός συλλέκτης τοποθετήθηκε στον ξηραντήρα χρησιμοποιώντας 4 βίδες και παξιμάδια. Συνολικά, η βασική κατασκευή του ξηραντήρα φτιάχτηκε από 12 mm x 12 mm σιδηρογωνία χαλυβδοσίδηρου. Σχεδιάστηκαν δύο μοντέλα ξήρανσης για τους καρπούς πιπεριού, ηλιακή ακτινοβολία τη μέρα και βιομάζα τη νύχτα. Η λειτουργία ηλιακής ξήρανσης είναι κατάλληλη όταν το ηλιακό φως είναι επαρκές κατά τη διάρκεια της μέρας. Η εφεδρική λειτουργία (ξήρανση με βιομάζα) είναι κατάλληλη κατά τη διάρκεια της εποχής βροχών ή συνεφιασμένων ημερών και τις νύχτες.

Μια σειρά συλλογής θερμοκρασιών έγινε από το Φεβρουάριο μέχρι τον Ιούλιο κατά τη διάρκεια της μέρας για την ηλιακή ξήρανση και για την ξήρανση με βιομάζα τα βράδια και τις νύχτες. Ο ξηραντήρας τοποθετήθηκε κάτω απ' τον ήλιο χωρίς σκιά για μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας. 10 θερμομόμετρα με υδράργυρο και δύο ψηφιακά θερμομόμετρα εισήχθησαν οριζόντια στην ανατολική (αριστερή) και δυτική (δεξιά) πλευρά του θαλάμου ξήρανσης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα

όπως φαίνεται στο σχήμα 96.



Σχ. 96 [234]θέσεις θερμομέτρων στον προτεινόμενο ηλιακό ξηραντήρα φυσικής συναγωγής

Τα θερμοόμετρα L2, L3 μέτρησαν στην αριστερή πλευρά ενώ τα R2, R3 στη δεξιά πλευρά κάτω από την κλίση ξήρανσης. Δύο θερμοόμετρα δηλαδή L4 και R4 μέτρησαν τη θερμοκρασία του αέρα πάνω από την κλίση ξήρανσης στην αριστερή και δεξιά πλευρά του θαλάμου ξήρανσης αντίστοιχα. Για τον ηλιακό συλλέκτη, ένα θερμοόμετρο χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στην είσοδο (S2), στη μέση (S1) και στην έξοδο (E2). Η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος παρακολουθήθηκε χρησιμοποιώντας ένα θερμοόμετρο (E1) τοποθετημένο υπό σκιά στην ανοιχτή στοά για να επιτρέπει ελεύθερη κυκλοφορία αέρα.

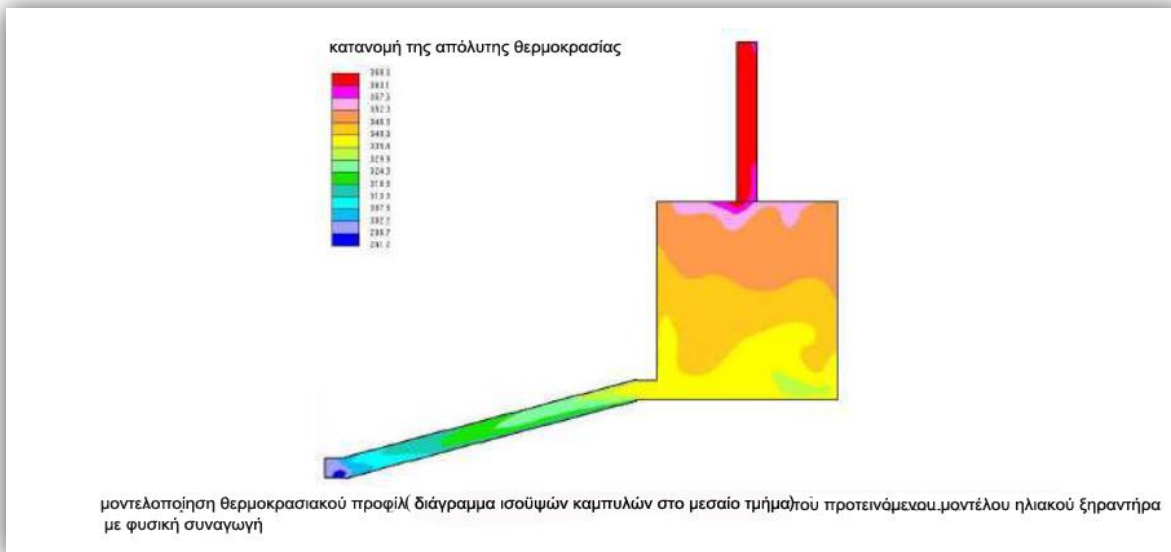
Οι κανονικοποιημένες ως προς το χρόνο (ώρες της μέρας) συνολική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στον ηλιακό συλλέκτη, θερμοκρασίες περιβάλλοντος, θαλάμου ξήρανσης και ηλιακού συλλέκτη, και σχετική υγρασία καταγράφηκαν. Τα δεδομένα της μέρας πάρθηκαν από τις 07:00 μέχρι τις 18:00 κατά τη διάρκεια της περιόδου ηλιακής ξήρανσης. Από τις 18:00 μέχρι τις 00:00, ο καυστήρας βιομάζας χρησιμοποιήθηκε για να συνεχίσει τη διαδικασία ξήρανσης. Συνολικά 3kg ξυλάνθρακα προστέθηκαν για τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας των 10-35 °C πάνω απ' τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τις 00:00 όταν λήφθηκε η τελευταία μέτρηση. Μία ολοκληρωμένη διαδικασία ξήρανσης διήρκεσε από τις 07:00 μέχρι τις 00:00. Η υπόλοιπη θερμότητα ξήρανε τους καρπούς έως περίπου 12% (σε υγρή βάση) μέχρι το επόμενο πρωί (06:00).

Οι αποξηραμένοι καρποί πιπεριού στάλθηκαν στο εργαστήριο χημικής ανάλυσης για ανάλυση. Έγιναν συνολικά 6 χημικά τεστ, περιεκτικότητα σε υγρασία με τολουένιο, πτητικό έλαιο, πιπερίνη, εκχύλισμα μη πτητικού αιθέρα, ολική τέφρα και τέφρα αδιάλυτη σε οξέα σύμφωνα με την Αμερικάνικη ένωση εμπορίου μπαχαρικών [230].

2.5.2 Μοντελοποίηση του ηλιακού ξηραντήρα

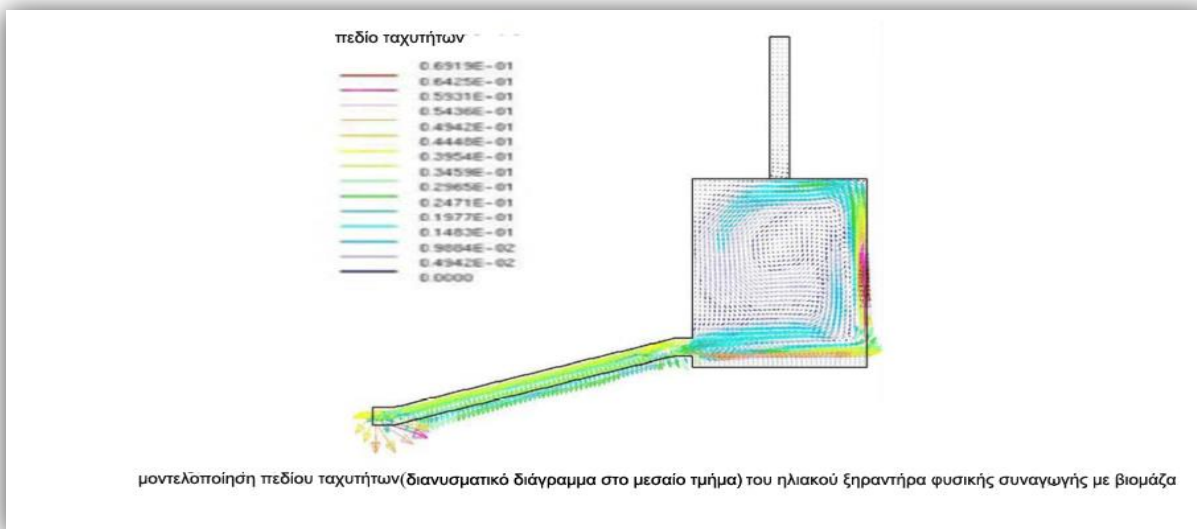
Η διαδικασία ηλιακής ξήρανσης φυσικής συναγωγής είναι πιο ευνοϊκή από την ηλιακή ξήρανση εξαναγκασμένης συναγωγής, καθώς απαιτεί χαμηλή επένδυση κεφαλαίου και χαμηλά λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης. Παρόλο που δεν είναι ευέλικτη στην αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας ξήρανσης όπως η εξαναγκασμένης συναγωγής, μπορεί να ενισχυθεί για νυχτερινή ξήρανση. Η αποθήκευση θερμότητας μέσα στον ξηραντήρα μπορεί να ερευνηθεί και ο αέρας ξήρανσης μπορεί να αυξηθεί. Η απώλεια ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να αποφευχθεί μέσω των τοιχωμάτων του θαλάμου ξήρανσης και μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διατηρηθεί μέσα στο θάλαμο ξήρανσης. Επιπλέον, ένας ξεχωριστός ηλιακός συλλέκτης και ένας θάλαμος ξήρανσης θα μπορούσαν να διαμορφωθούν στο σύστημα ηλιακής ξήρανσης. Η ηλιακή ακτινοβολία συλλέγεται μέσω του ειδικού ηλιακού συλλέκτη για να θερμάνει τον αέρα. Ο θερμαινόμενος αέρας στέλνεται στη συνέχεια στο θάλαμο ξήρανσης. Η μόνωση του θαλάμου ξήρανσης μεγιστοποιεί τη θερμότητα μέσα στο θάλαμο χωρίς να τη χάνει στο περιβάλλον. Το

σχήμα 97 δείχνει την κατανομή της θερμοκρασίας στον ηλιακό ξηραντήρα χρησιμοποιώντας διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών στο μεσαίο τμήμα.



Σχ. 97 [234]μοντελοποίηση θερμοκρασιακού προφίλ (διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών στο μεσαίο τμήμα) του προτεινόμενου μοντέλου ηλιακού ξηραντήρα με φυσική συναγωγή

Η θερμοκρασία του ρευστού ήταν μεταξύ 335.4K και 352.0K στο θάλαμο ξήρανσης, όπου η μεγαλύτερη θερμότητα συγκεντρώθηκε στην κορυφή του θαλάμου κοντά στη σύνδεση με την καμινάδα. Το προφίλ της ταχύτητας ροής αέρα στο μοντέλο του ξηραντήρα φαίνεται στο σχήμα 98.



Σχ. 98 [234]Μοντελοποίηση πεδίου ταχυτήτων (διανυσματικό διάγραμμα στο μεσαίο τμήμα) του ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής με βιομάζα

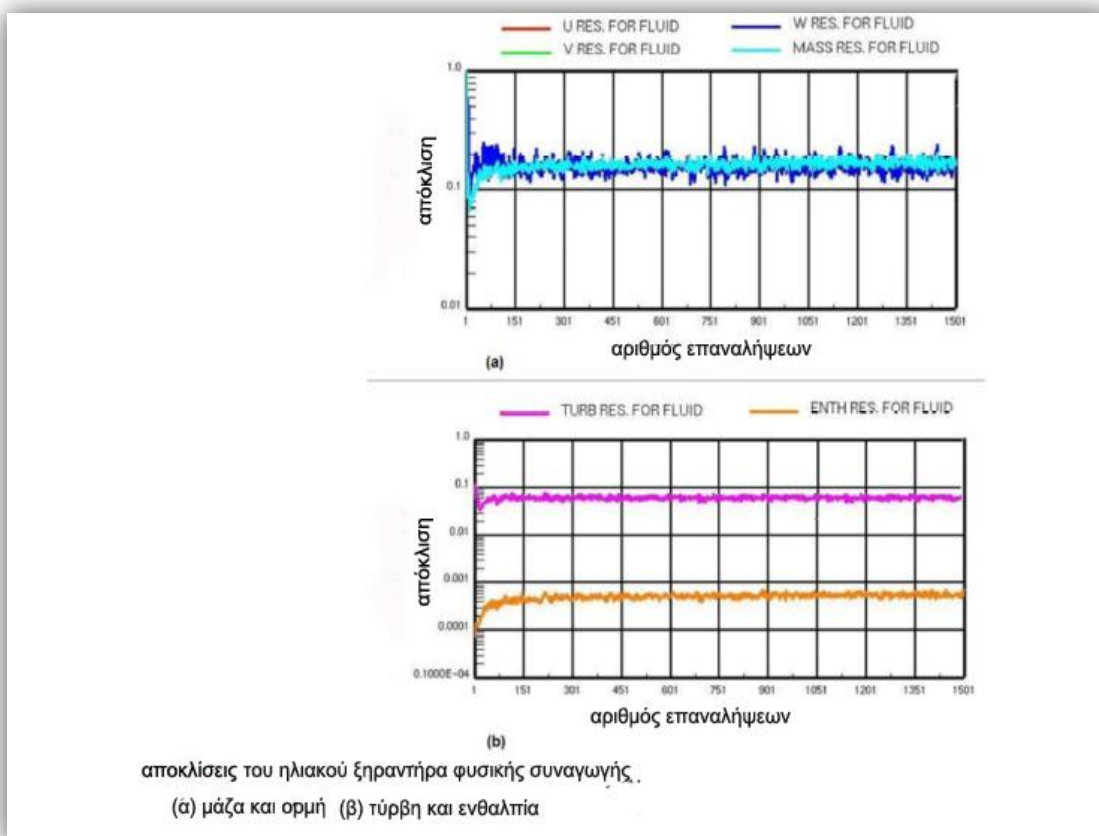
Η μέγιστη ταχύτητα αέρα που μπόρεσε να επιτευχθεί μέσα στο θάλαμο ξήρανσης ήταν 0.2004m/s. Ο αέρας ρέει από την είσοδο του ηλιακού συλλέκτη στο θάλαμο ξήρανσης ενώ μέρος του αέρα γυρνάει πίσω στο συλλέκτη λόγω κυκλικής ροής. Η υψηλότερη ταχύτητα ροής αέρα βρίσκεται στην περιοχή κοντά

στην έξοδο της καμινάδας. Ως εκ τούτου, οι τυρβώδεις ροές υπό τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή συμβαίνουν στην καμινάδα καθώς είναι η περιοχή υψηλής ροής αέρα. Ωστόσο, η ταχύτητα ροής αέρα στο κέντρο του θαλάμου ξήρανσης ήταν χαμηλή, κάτω από 0.1002m/s. Η υψηλή ταχύτητα ροής αέρα κάνει το χρόνο πιο σύντομο στην ξήρανση καρπών πιπεριού.

Ο αέρας ρέει μέσω της θερμαινόμενης επιφάνειας αλουμινίου και απορροφά τη θερμότητα μέσα στον ηλιακό συλλέκτη. Η πυκνότητα του θερμαινόμενου αέρα μειώνεται καθώς αυτός ρέει πάνω στο συλλέκτη. Ο θερμαινόμενος αέρας αντικαθίσταται από τον πιο κρύο αέρα που ρέει από το περιβάλλον μέσω της εισόδου του ηλιακού συλλέκτη. Ο θερμαινόμενος αέρας κινείται προς τα πάνω και μπαίνει στο θάλαμο ξήρανσης. Η διαδικασία συναγωγής συνεχίζεται με τη δύναμη άνωσης η οποία προκαλεί τη μείωση της πυκνότητας ρευστού. Ως εκ τούτου, ο θάλαμος ξήρανσης παίρνει τη θερμότητα του μέσω του θερμαινόμενου αέρα που ρέει από τον ηλιακό συλλέκτη.

Δεν υπάρχει αιχμηρή είσοδος που να συνδέει το θάλαμο ξήρανσης με την καμινάδα, έτσι το ρευστό ρέει ομαλά προς την καμινάδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη σχηματίζεται διατομή μέγιστης συστολής. Δεν υπάρχει γωνία στροφής στην καμινάδα, έτσι ο αέρας ρέει ομαλά προς τα έξω.

Τα δεδομένα απόκλισης δείχνουν την πρόοδο των υπολογισμών των καθορισμένων μεταβλητών ροής. Οι αποκλίσεις παρίστανται γραφικά έναντι των αριθμών επανάληψης. Παρουσιάζονται σε δύο μορφές, κανονικοποιημένα αθροίσματα αποκλίσεων για τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας και κανονικοποιημένα αθροίσματα αποκλίσεων για τις εξισώσεις των μοντέλων ενέργειας και τύρβης [231]. Το σχήμα 99 δείχνει τα διαγράμματα αποκλίσεων για την ορμή U, τη μάζα, την τύρβη και την ενθαλπία.

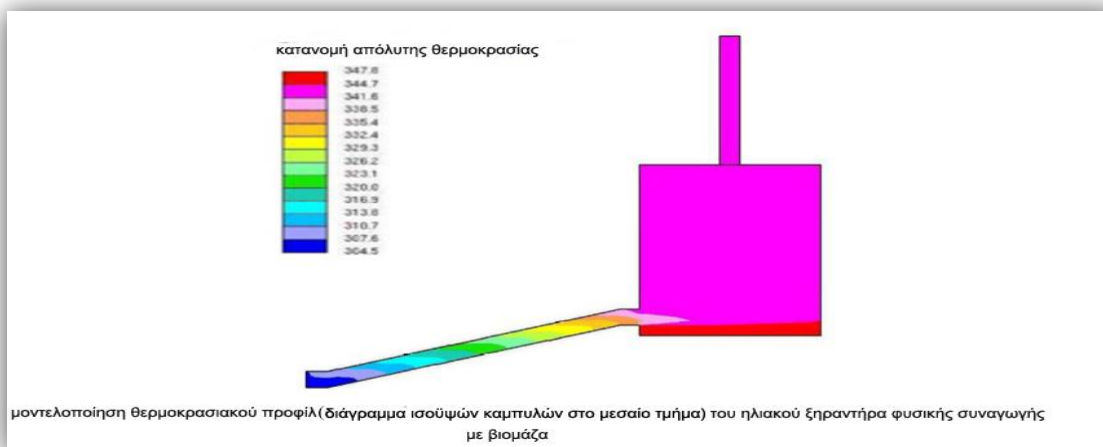


Σχ. 99 [234]αποκλίσεις του ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής (α) μάζα και ορμή (β) τύρβη και ενθαλπία

Οι αποκλίσεις σταθεροποιήθηκαν σε ομοιόμορφη ταλάντωση καθ' όλη τη διάρκεια των επαναλήψεων.

Η ορμή W δε λαμβάνεται υπόψη επειδή η ροή ρευστού δεν περιλαμβάνει την κίνηση W και επίσης δε θα μπορούσε να επιλυθεί με επαναλήψεις. Το σχήμα έχει μια αξιοσημείωτη διακύμανση για την ορμή U καθ' όλη τη διάρκεια των επαναλήψεων. Η ταλάντωση της ορμής U διατήρησε μία μέση τιμή απόκλισης 0.13 μετά τις 150 επαναλήψεις. Όσο για τη μάζα, η τιμή της απόκλισης σταθεροποιήθηκε μετά τις 1500 επαναλήψεις και διατηρήθηκε στη μέση τιμή 0.13.

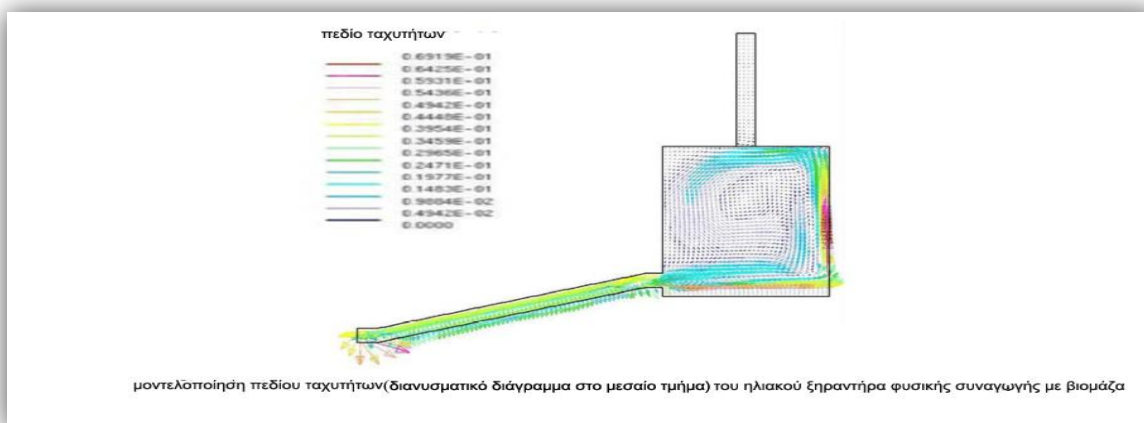
Η ίδια κατάσταση εμφανίζεται στο σχήμα 99 (β) όπου το διάγραμμα απόκλισης τυρβώδους ροής έδειξε διακυμάνσεις ενώ το διάγραμμα ενθαλπίας εμφανίστηκε σταθερό όταν οι επαναλήψεις έφτασαν τις 150. Το σχήμα 100 δείχνει ότι η υψηλότερη θερμοκρασία στο μοντέλο ηλιακού ξηραντήρα ήταν 347.6 K και η χαμηλότερη θερμοκρασία ήταν 304.5 K.



Σχ. 100 [234] μοντελοποίηση θερμοκρασιακού προφίλ (διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών στο μεσαίο τμήμα) του ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής

Η θερμοκρασία στο όριο των τοιχωμάτων βρέθηκε στο κάτω μέρος του τούβλου που έχει άμεση θερμική επαφή με τον καυστήρα βιομάζας. Η θερμότητα από τον καυστήρα βιομάζας μεταφέρεται με αγωγή μέσω του τούβλου στην πλάκα αλουμινίου και μεταφέρεται στο πεδίο του ρευστού στο θάλαμο ξήρανσης.

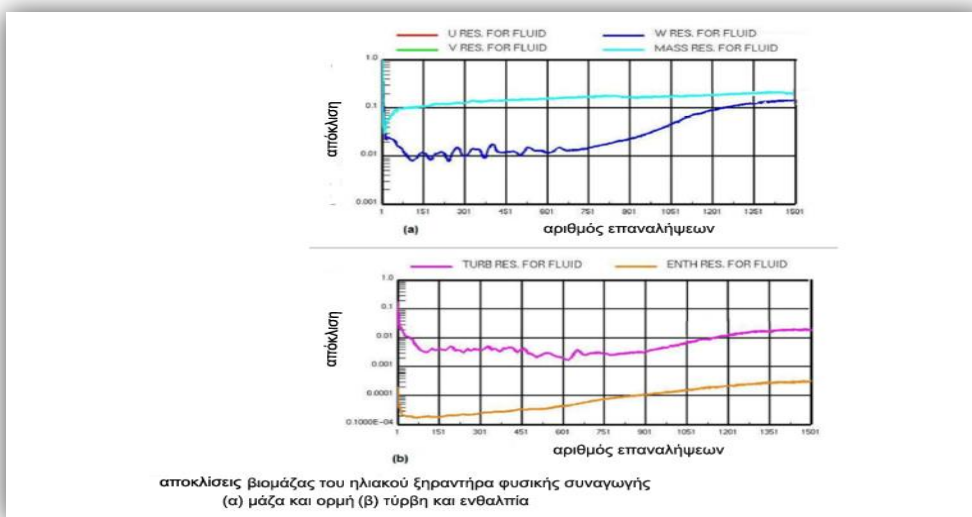
Η υψηλότερη ταχύτητα ροής αέρα στην περιοχή του ρευστού ήταν 0.0692 m/s. Όπως φαίνεται στο σχήμα 101, η ροή αέρα στο θάλαμο ξήρανσης γίνεται σε κυκλική τροχιά.



Σχ. 101 [234] μοντελοποίηση του πεδίου ταχυτήτων (διανυσματικό διάγραμμα στο μεσαίο τμήμα) του ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής με βιομάζα

Με την όψη του μεσαίου τμήματος, υπήρξε μια συγκεντρωμένη κυκλική ροή στη μία πλευρά του θαλάμου ξήρανσης. Ο κυκλικός αέρας ρέει οριζόντια στο θάλαμο ξήρανσης και έπειτα κινείται προς τα πάνω κατά μήκος του πλευρικού τοιχώματος στην κορυφή του θαλάμου και κινείται ξανά σε οριζόντια κατεύθυνση. Τότε, παίρνει μια στροφή προς τα κάτω, προς τη χαμηλότερη περιοχή. Υπήρχε μια ανταλλαγή ροής αέρα μεταξύ του θαλάμου ξήρανσης και του ηλιακού συλλέκτη με μία ταχύτητα κάτω από 0.0318 m/s.

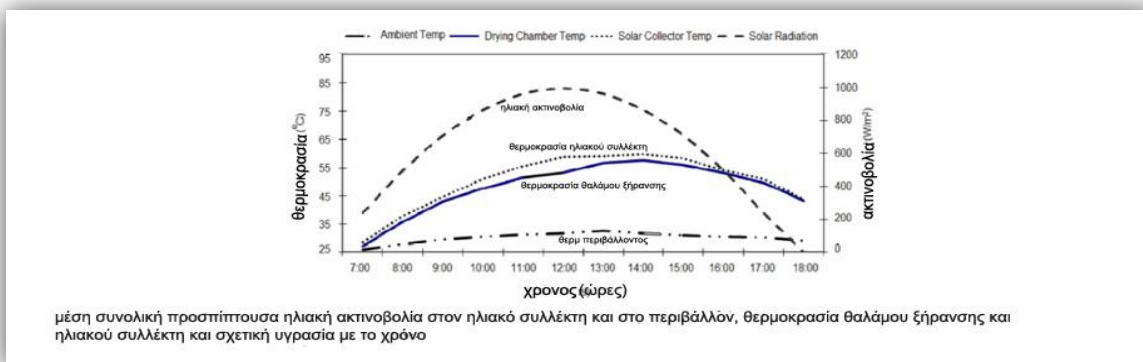
Για το μοντέλο φυσικής συναγωγής, ο περιβάλλοντας αέρας μπαίνει στην είσοδο του ηλιακού συλλέκτη, και τότε ο αέρας μέσα στον ξηραντήρα απελευθερώνεται στο περιβάλλον από την έξοδο της καμινάδας. Η κίνηση του ρευστού στο μοντέλο ακολουθεί τις δυνάμεις άνωσης. Οι αποκλίσεις της ορμής U παρουσίασαν μία προφανή διακύμανση για την ορμή U καθ' όλη τη διάρκεια των επαναλήψεων. Ωστόσο, οι αποκλίσεις της μάζας σταθεροποιήθηκαν μετά την 600^η επανάληψη στο 0.3. Το σχήμα 102 δείχνει ότι οι αποκλίσεις τυρβώδους ροής και ενθαλπίας εμφανίστηκαν σταθερές μετά την 1350^η επανάληψη.



Σχ. 102 [234]αποκλίσεις βιομάζας του ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής (α) μάζα και ορμή (β) τύρβη και ενθαλπία

2.5.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Το σχήμα 103 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, θαλάμου ξήρανσης και ηλιακού συλλέκτη, τη σχετική υγρασία με το χρόνο (ώρες τις μέρας) από τις 07:00 μέχρι τις 18:00 κατά τη διάρκεια της περιόδου συλλογής δεδομένων ηλιακής ξήρανσης.

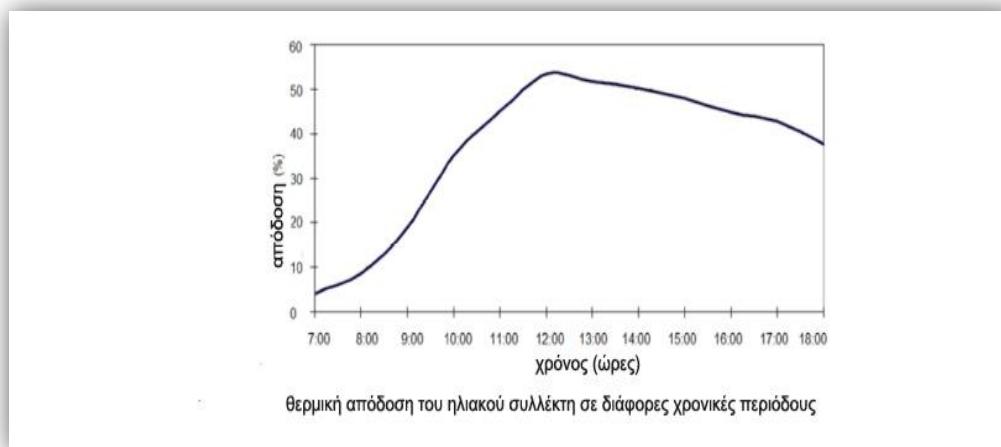


Σχ. 103 [234] μέση συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη και στο περιβάλλον, θερμοκρασία θαλάμου ξήρανσης και ηλιακού συλλέκτη και σχετική υγρασία με το χρόνο

Η υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος καταγράφηκε στους 34.7°C ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 26.8°C κατά τη διάρκεια της μέρας λόγω βροχής.

Γενικά, η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη αυξήθηκε με αύξηση των επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας αλλά μειώθηκε με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας. Ωστόσο, ο ηλιακός συλλέκτης μονού τζαμιού αύξησε την απόδοση του συλλέκτη σε υψηλή θερμοκρασία μειώνοντας τις απώλειες συναγωγής.

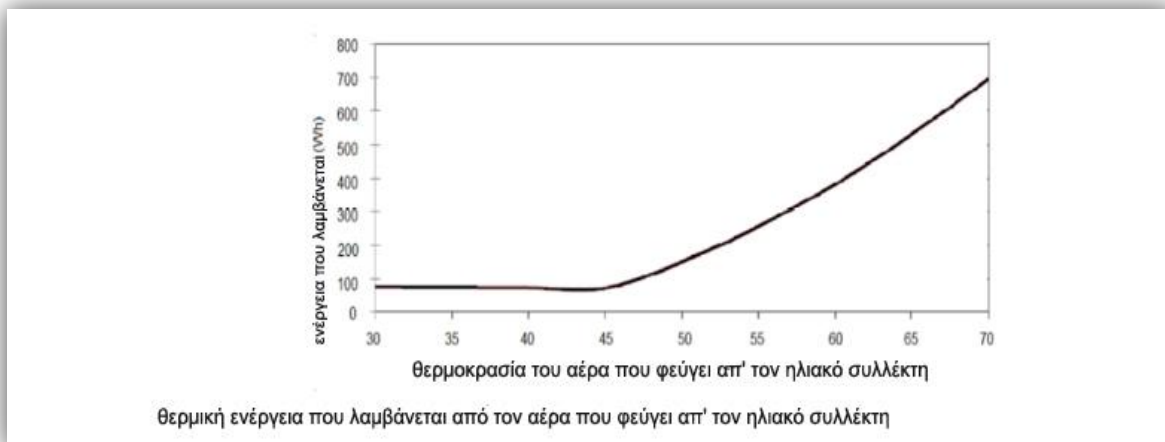
Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη φαίνεται στο σχήμα 104, όπου η υψηλότερη απόδοση που επιτεύχθηκε ήταν 53.5%.



Σχ. 104 [234] θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη σε διάφορες χρονικές περιόδους

Αυτό είναι συγκρίσιμο με άλλους μικρής κλίμακας γεωργικούς ηλιακούς ξηραντήρες που έχουν αναπτυχθεί, οι οποίοι παρουσίασαν απόδοση 57.5% [232,233]. Ο παράγοντας απαγωγής θερμότητας που επιτεύχθηκε ήταν 0.78 όταν η θερμοκρασία του θερμαινόμενου αέρα που φεύγει απ' τον ηλιακό συλλέκτη ήταν 70°C .

Με βάση τη θερμοκρασία, ο θερμαινόμενος αέρας που φεύγει απ' τον ηλιακό συλλέκτη βρέθηκε να έχει τη θερμοκρασία του ηλιακού συλλέκτη. Η θερμότητα που λήφθηκε από τον αέρα ανά μονάδα χρόνου παρίσταται γραφικά στο σχήμα 105.



Σχ. 105 [234] Θερμική ενέργεια που λαμβάνεται από τον αέρα που φεύγει από τον ηλιακό συλλέκτη

Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας του αέρα που φεύγει δείχνουν ότι η ενέργεια που αποκτάται από τον ηλιακό συλλέκτη αυξάνεται. Όταν η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας του αέρα που φεύγει απ' τον ηλιακό συλλέκτη μειώνεται, η ενέργεια που λαμβάνεται από τον αέρα που ρέει μετά τον ηλιακό συλλέκτη μειώνεται.

Ο καυστήρας βιομάζας χρησιμοποιήθηκε από τις 18:00 μέχρι τις 00:00 για να συνεχίσει τη διαδικασία ξήρανσης. Προστέθηκαν 3 kg ξυλάνθρακα συνολικά. Ο ξυλάνθρακας παρήγαγε μια μέση θερμοκρασία 10-35 °C πάνω απ' τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τις 00:00 όταν λήφθηκε η τελευταία μέτρηση. Μία ολοκληρωμένη διαδικασία ξήρανσης διήρκησε απ' τις 07:00 μέχρι τις 00:00. Η εναπομείνουσα θερμότητα ξήρανε τους καρπούς μέχρι περίπου 12% (σε υγρή βάση) μέχρι το επόμενο πρωί (06:00).

Η μέση αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία των καρπών πιπεριού βρέθηκε 76.6% (σε υγρή βάση). Η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία ήταν 12% (σε υγρή βάση) στο τέλος της διαδικασίας ξήρανσης για να πληρεί τις προδιαγραφές της Αμερικάνικης ένωσης εμπορίου μπαχαρικών.

Οι αποξηραμένοι καρποί πιπεριού πήγαν στο εργαστήριο χημικής ανάλυσης. Διεξάχθηκαν συνολικά 6 χημικά τεστ στο μαύρο πιπέρι όπως περιεκτικότητα σε υγρασία με τουλουένιο, πτητικό έλαιο, πιπερίνη, εκχύλισμα μη πτητικού αιθέρα, ολική τέφρα και τέφρα αδιάλυτη σε οξέα. Τα αποτελέσματα των αποξηραμένων καρπών πιπεριού συγκρίθηκαν με τις προδιαγραφές της Αμερικάνικης ένωσης εμπορίου μπαχαρικών όπως φαίνεται στον πίνακα 19.

προδιαγραφές ASTA για τις χημικές ιδιότητες του μαύρου πιπεριού						
δοκιμή	υγρασία	πτητικό έλαιο	πιπερίνη	NVEE	ολική τέφρα	ΑΙΑ
μέθοδος	ASTA 2.0 (Toluene)	ASTA 5.0	ASTA 12.1 (ISO 5564-1982(E))	ASTA 11 (MS80 Part 3 1993)	ASTA 3.0 (MS81 Part 2 1993)	ASTA 4.0 (MS81 Part 3 1993)
αποδοχή βάρους	<=12.0%	>=1%	>=4%	>=6%	<=5.0%	<=0.5%

Π. 19 [234]προδιαγραφές ASTA για τις χημικές ιδιότητες του μαύρου πιπεριού

Ο αποδεκτός όγκος υγρασίας στους καρπούς πιπεριού δεν πρέπει να είναι πάνω από 12% κατά βάρος, το πτητικό έλαιο όχι λιγότερο από 1% κατά βάρος. Ο αποδεκτός όγκος για την πιπερίνη δεν πρέπει να είναι λιγότερο από 4.0% κατά βάρος, ενώ το εκχύλισμα μη πτητικού αιθέρα όχι λιγότερο από 6% κατά

βάρος. Η ολική τέφρα δεν πρέπει να είναι περισσότερο από 5% κατά βάρος και η αδιάλυτη σε οξέα τέφρα όχι περισσότερο από 0.5% κατά βάρος σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Ο πίνακας 20 δείχνει τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης για τα δείγματα υπό συνεχή ξήρανση με ηλιακή ακτινοβολία και εφεδρικό καυστήρα βιομάζας χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο ηλιακό ξηραντήρα.

αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των τελικών αποξηραμένων προϊόντων από τον προτεινόμενο ηλιακό ξηραντήρα					
υγρασία %	πτητικό έλαιο %	πιπερίνη %	NVEE %	ολική τέφρα %	AIA %
9.76	2.44	5.61	6.56	4.95	0.11
13.00	2.56	5.55	5.88	4.81	0.08
13.00	3.27	5.85	6.37	4.58	0.05
9.60	3.32	5.83	7.28	4.68	0.04
13.00	3.49	5.14	6.6	4.89	0.07
9.60	3.98	5.09	6.76	5.14	0.06
10.80	3.59	4.87	6.15	5.54	0.04
12.20	3.64	4.45	5.91	5.19	0.06
11.00	3.91	4.2	6.92	4.59	0.05
10.00	3.91	4.13	7.66	4.31	0.05
12.00	3.86	5	6.62	3.96	0.07
12.00	3.96	5.01	7.54	3.66	0.06

Π. 20 [234] αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των τελικών αποξηραμένων προϊόντων από τον προτεινόμενο ηλιακό ξηραντήρα

Οι περιεκτικότητες σε υγρασία βελτιώθηκαν καθώς τα πειράματα προχώρησαν. Για δείγματα που δεν είχαν περιεκτικότητες σε υγρασία πάνω από 12% (σε υγρή βάση), όλα τα απαραίτητα χημικά πληρούσαν τις προδιαγραφές όπως δοκιμάστηκαν στο χημικό εργαστήριο όπως φαίνεται στον πίνακα. Οι χημικές περιεκτικότητες των αποξηραμένων καρπών πιπεριού πληρούσαν τις προδιαγραφές για όλες τις φάσεις. Η φάση 1 ήταν ένα δοκιμαστικό στάδιο χρήσης του πρωτότυπου. Ωστόσο, ελαφρώς υψηλότερες περιεκτικότητες σε υγρασία και χαμηλότερες περιεκτικότητες εκχυλίσματος μη πτητικού αιθέρα υπήρξαν λόγω προβλημάτων χειροκίνητου χειρισμού που προέκυψαν στην πορεία. Οι δοκιμές ξήρανσης στις φάσεις 2 και 3 (για τελικά προϊόντα ξήρανσης) έδειξαν ότι όλοι οι καρποί πιπεριού περιείχαν υγρασία, πτητικό έλαιο, πιπερίνη, εκχύλισμα μη πτητικού αιθέρα, ολική τέφρα και μη διαλυμένη σε οξέα τέφρα μέσα στις προδιαγραφές.

2.5.4 Συμπεράσματα

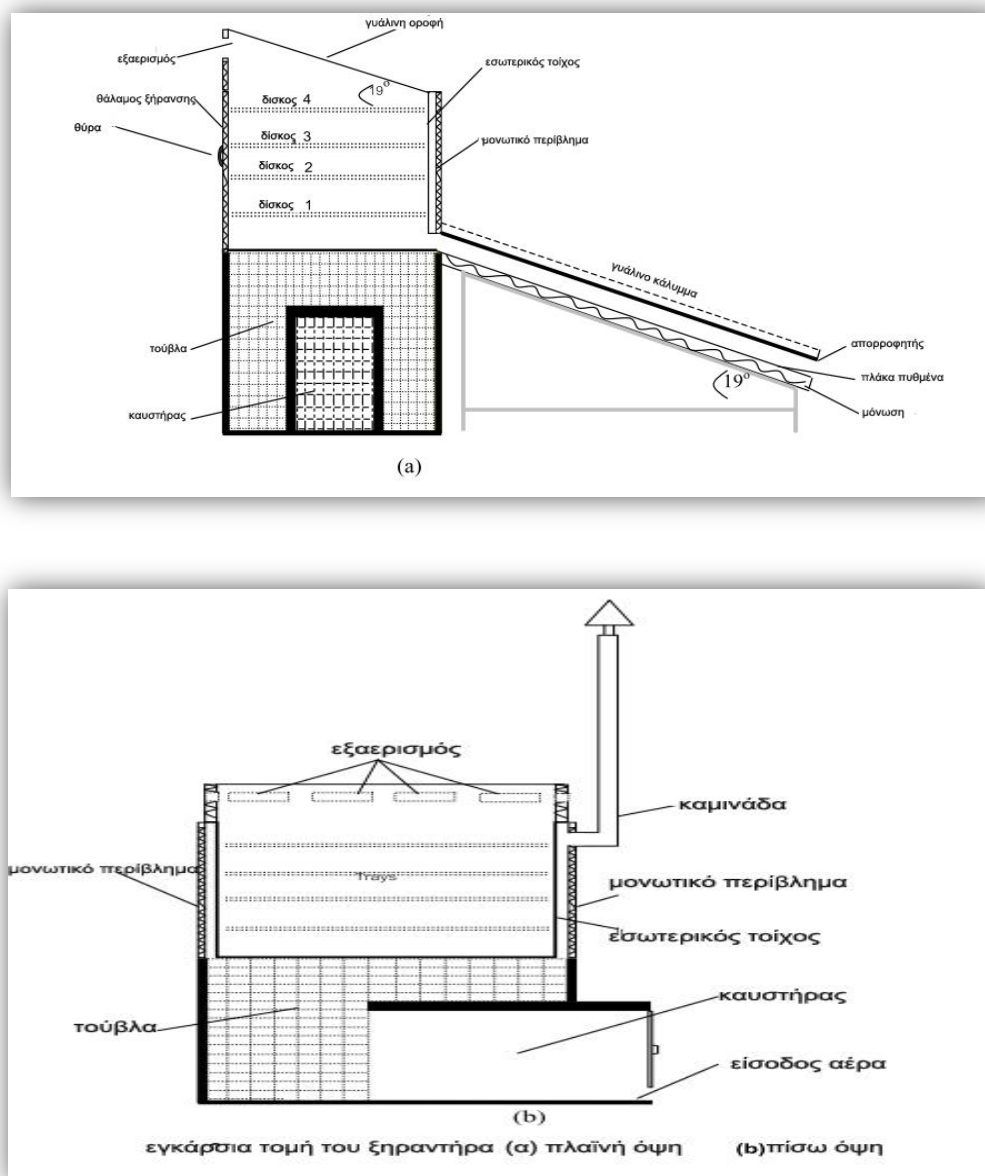
Ένας έμμεσος ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής με εφεδρικό καυστήρα για αγρότες καρπών πιπεριού μικρής κλίμακας σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε. Ο προτεινόμενος ηλιακός ξηραντήρας θα συντηρούσε και θα προστάτευε τους καρπούς πιπεριού από τη βροχή, τη σκόνη, τα έντομα, και τα ζώα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης. Ήταν επίσης φορητός και φτηνός. Επομένως, μπορεί να μετακινηθεί εύκολα από μέρος σε μέρος για την ξήρανση των καρπών πιπεριού στην επιθυμητή περιοχή.

Ο προτεινόμενος ηλιακός ξηραντήρας φυσικής συναγωγής βρέθηκε να είναι πιο κατάλληλος για αγρότες μικρής κλίμακας που ζουν μακριά από το εθνικό δίκτυο. Ο επιπρόσθετος εφεδρικός καυστήρας βιομάζας επέτρεψε συνεχόμενη διαδικασία ξήρανσης τις νύχτες και τις υγρές εποχές. Μείωσε τη διάρκεια ξήρανσης των καρπών πιπεριού από 5-7 μέρες σε μόλις μία μέρα με συνεχόμενη ξήρανση. Αύξησε την παραγωγικότητα των αγροτών καρπών πιπεριού μικρής κλίμακας σε μικρότερη χρονική περίοδο. Επιπλέον, οι χημικές προδιαγραφές των αποξηραμένων καρπών πιπεριού χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο ξηραντήρα πληρούσαν τις προδιαγραφές της Αμερικάνικης ένωσης εμπορίου μπαχαρικών.

2.6 Ηλιακός Ξηραντήρας μεικτής λειτουργίας με καυστήρα βιομάζας για Ξήρανση αράπικων φιστικιών

2.6.1 Σχεδιασμός Ξηραντήρα

Ο ηλιακός Ξηραντήρας κατασκευάστηκε και λειτούργησε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, στην πολυτεχνική σχολή, στο πανεπιστήμιο Prince of Songkla, στην Ταϊλάνδη. Τα κύρια μέρη του Ξηραντήρα είναι το σύστημα ηλιακού συλλέκτη, ο καυστήρας βιομάζας, και ο θάλαμος Ξήρανσης. Το σχήμα 106 δείχνει τη διατομή καθενός απ' τα μέρη του Ξηραντήρα.



Σχ. 106 [238] εγκάρσια τομή του Ξηραντήρα (α) πλαϊνή όψη (β) πίσω όψη

Το σύστημα ηλιακού συλλέκτη, με μήκος 2.75m και πλάτος 1.75m, αποτελείται από απορροφητή, κάλυμμα μονού τζαμιού, μαύρη πλάκα, και μόνωση. Το σύστημα πλαισιώνεται από κορμούς αλουμινίου. Ο απορροφητής είναι φτιαγμένος από μαύρη μεταλλική πλάκα πάχους 0.05cm. Το μονό στρώμα ενός τυπικού γυάλινου καλύμματος με πάχος 0.5cm τοποθετείται στην πάνω επιφάνεια του συλλέκτη.

Η πίσω πλευρά και οι ακμές του συλλέκτη είναι μονωμένες με 3cm πετροβάμβακα. Αυτό γίνεται για ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας. Σε λειτουργία, ο αέρας ρέει μέσω του κενού μεταξύ του απορροφητή και της μαύρης πλάκας που είναι τοποθετημένα ακριβώς πάνω από την κάτω/πίσω μόνωση. Ο θερμαινόμενος αέρας έπειτα πηγαινει στο θάλαμο ξήρανσης. Η απόσταση μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου καλύμματος είναι 5cm, και μεταξύ του απορροφητή και της μαύρης πλάκας είναι 8cm. Το σύστημα ηλιακού συλλέκτη βλέπει προς νότο και έχει κλίση 19° από το οριζόντιο επίπεδο.

Για εφεδρικό σύστημα θέρμανσης για τον ηλιακό συλλέκτη, ένας καυστήρας βιομάζας με συνολικές διαστάσεις 1.75m x 0.9m x 1.5m κατασκευάστηκε από σκυρόδεμα, και γέμισε με τούβλα ως αποθήκευση θερμότητας. Στον καυστήρα βιομάζας, ένας ελεύθερος χώρος 0.75m x 0.5m x 1m καταλαμβάνεται, συμπεριλαμβανομένων 0.25cm εξωθιμένου τοιχώματος στην έξω πλευρά του καυστήρα, ως χώρος για την καύση. Μια θύρα 0.75m x 0.5m τοποθετείται στην μπροστινή πλευρά του εξωθιμένου τοιχώματος για την τροφοδοσία του καυσίμου.

Μια τρύπα 0.1m x 0.4m ανοίγεται στην κάτω ακμή της πόρτας για την είσοδο φρέσκου αέρα στον καυστήρα κατά τη διάρκεια της καύσης.

Τα τούβλα, για αποθήκευση θερμότητας, τοποθετούνται έτσι στον καυστήρα ώστε τα καυσαέρια και ο καπνός από την καύση να μπορούν να περάσουν μέσα από αυτά. Αυτό γίνεται για μεγιστοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας από την καύση.

Ο θάλαμος ξήρανσης, όπου το προϊόν ξηραίνεται, εγκαθίσταται πάνω απ' τον καυστήρα βιομάζας. Ο θάλαμος ξήρανσης αποτελείται από μονό γυάλινο κάλυμμα κλίσης 19° , δίσκους, κάτω πλάκα, θύρες, εξαερισμό, εσωτερικά τοιχώματα και εξωτερικά τοιχώματα. Οι δίσκοι αποτελούνται από 4 επίπεδα με 2 δίσκους σε κάθε επίπεδο. Η ενεργός διάσταση των δίσκων είναι 1.45m x 0.82m. Η κάτω πλάκα του θαλάμου ξήρανσης είναι σε επαφή με την πάνω επιφάνεια του καυστήρα βιομάζας/αποθήκευσης θερμότητας, και τα καυσαέρια και ο καπνός δεν περνούν μέσα απ' το προϊόν προς ξήρανση.

Τα εξωτερικά τοιχώματα αποτελούνται από 5cm μόνωσης (πετροβάμβακας) και είναι καλυμμένα με φύλλο ψευδάργυρου. Τα εξωτερικά τοιχώματα είναι εφαρμοσμένα στην αριστερή, τη δεξιά και τη μπροστινή πλευρά του θαλάμου. Ένα κενό 5cm μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων και των εξωτερικών τοιχωμάτων εφαρμόζεται για την έξοδο αερίων και καπνού από την καύση, πριν αυτά απελευθερωθούν στο περιβάλλον μέσω της καμινάδας.

Η καμινάδα είναι προσαρτημένη στην πάνω ακμή, στη δεξιά πλευρά των εξωτερικών τοιχωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, αναμένεται ότι θα λαμβάνεται περισσότερη θερμότητα από τα καυσαέρια και τον καπνό η οποία θα θερμαίνει περαιτέρω τα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου ξήρανσης, και έτσι τα εσωτερικά τοιχώματα θα τροφοδοτούν περαιτέρω τους δίσκους με θερμότητα. Επιπλέον, αυτό είναι χρήσιμο για την ομοιογένεια της ξήρανσης στους δίσκους, κυρίως κατά την καύση.

2.6.2 Υλικά και όργανα για την αξιολόγηση του ξηραντήρα

Ο ξηραντήρας δοκιμάστηκε κατά τη διάρκεια των μηνών Ιουνίου και Ιουλίου 2005. Τέσσερις ξεχωριστές δοκιμές του ξηραντήρα διεξάχθηκαν σε 10 μέρες με και χωρίς φορτίο. Στα πειράματα ξήρανσης, χρησιμοποιήθηκαν φρέσκα αναποφλοιώτα αράπικα φιστίκια ως δείγματα στον ξηραντήρα. Ο καυστήρας βιομάζας χρησιμοποιήθηκε μόνο τη νύχτα, ενώ η ηλιακή ενέργεια, ή συνδυασμός με αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκαν τη μέρα. Αυτό έγινε για την απλοποίηση της αξιολόγησης.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών οι παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν οι θερμοκρασίες, τα επίπεδα περιεκτικότητας σε υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η μάζα των αποξηραμένων φιστικιών και τα ξύλα που καίγονταν, οι σχετικές υγρασίες, η ταχύτητα του ανέμου, και η ροή αέρα μέσα στον ξηραντήρα. Χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός οργάνων χειρός και αισθητήρων συνδεδεμένων σε έναν καταγραφέα δεδομένων για να γίνουν και να καταγραφούν οι μετρήσεις.

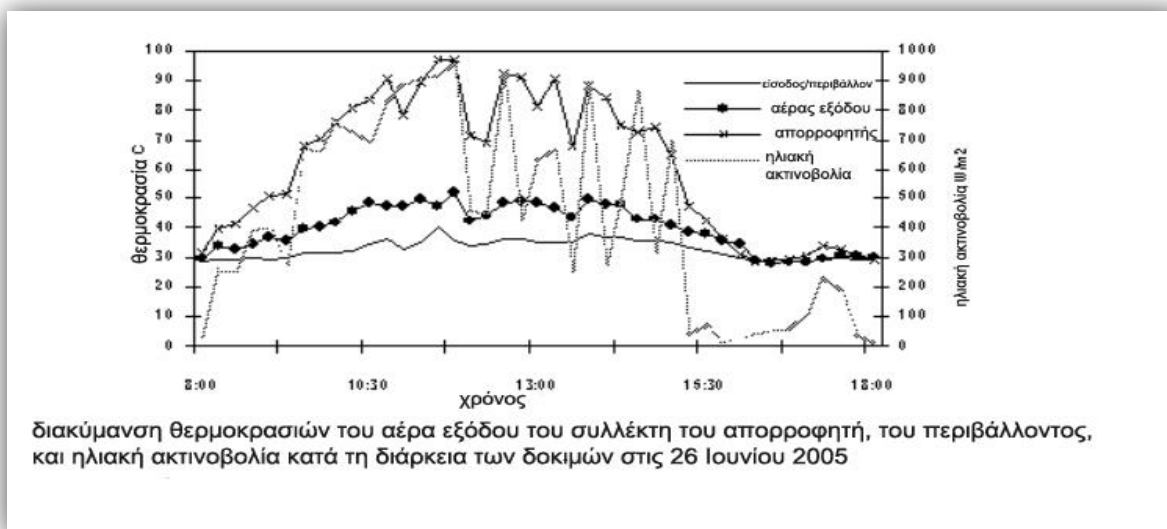
Η σχετική υγρασία υπολογίστηκε από τη θερμοκρασία υγρού και ξηρού βολβού χρησιμοποιώντας έναν ψυχομετρικό χάρτη. Η ηλιακή ακτινοβολία μετρήθηκε με ένα πυρανόμετρο με ευαισθησία

$16.51 \times 10^{-6} \text{ W / m}^2$ και ακρίβεια $\pm 5\%$. Οι ταχύτητες του αέρα μετρήθηκαν με ένα ανεμόμετρο θερμού σύρματος με ακρίβεια $\pm 2.5\%$. Η μάζα των φιστικιών μετρήθηκε με μία ηλεκτρονική ζυγαριά με ακρίβεια 0.01g, ενώ η βιομάζα των καυσόξυλων μετρήθηκε με αναλογική ζυγαριά με ακρίβεια 0.1g. Η ξηρή μάζα των αποξηραμένων δειγμάτων καθορίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αέρα-κλίβανου (Hall, 1980) [236].

2.6.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

2.6.4 Αποτελεσματικότητα ηλιακού συλλέκτη

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, η ημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών του αέρα εξόδου του ηλιακού συλλέκτη, του περιβάλλοντος, και η ηλιακή ακτινοβολία παραστάθηκαν γραφικά. Μια τυπική μέρα του Ιουνίου φαίνεται στο σχήμα 107.



Σχ. 107 [238] διακύμανση θερμοκρασιών του αέρα εξόδου του συλλέκτη του απορροφητή, του περιβάλλοντος, και ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια των δοκιμών στις 26 Ιουνίου 2005

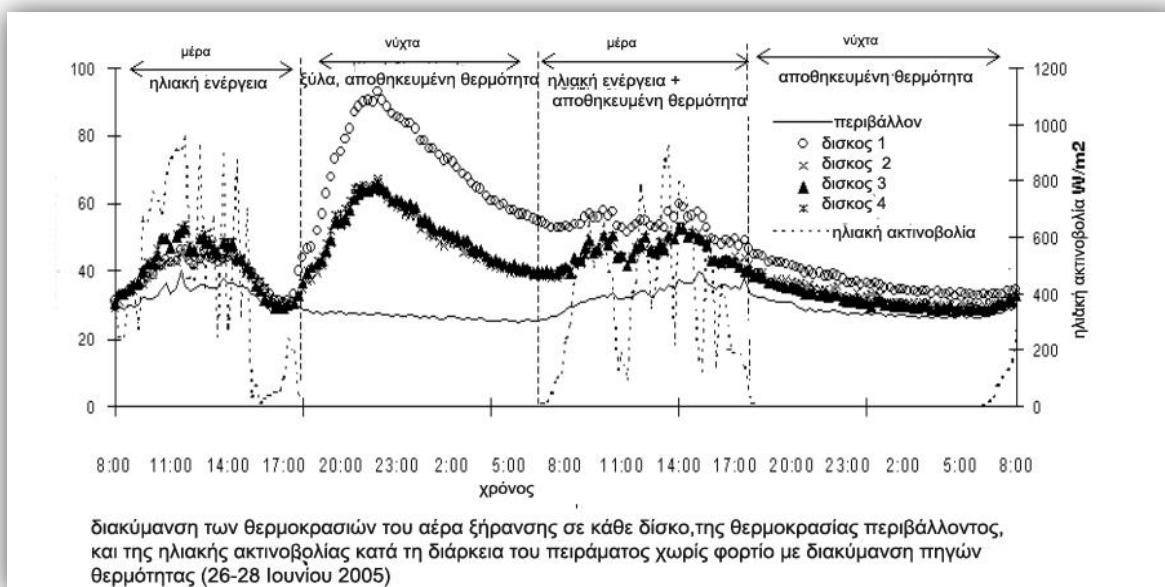
Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση στη θερμοκρασία του αέρα λόγω του παραγόμενου ρυθμού ροής αέρα στο συλλέκτη είναι επαρκής για την ξήρανση των περισσότερων γεωργικών προϊόντων, και η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ήταν σχετικά χαμηλή με μία μέση τιμή $350 \text{ W / m}^2 / \text{day}$. Κατά τη διάρκεια των 10 ημερών, η ηλιακή ακτινοβολία κυμάνθηκε από 200 έως 900 W / m^2 . Για τη θερμοκρασία αέρα εισόδου των 40°C , η μέγιστη θερμοκρασία αέρα στην είσοδο του ξηραντήρα σε συνθήκες χωρίς φορτίο καταγράφηκε στους 59°C στο επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας των 960 W / m^2 . Ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα ξήρανσης στη θερμοσιφωνική λειτουργία του συλλέκτη εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου, τη θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος, την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και το σχέδιο του συλλέκτη (Rangavhane, 2002). Παρατηρήθηκε ότι, όταν η ταχύτητα του ανέμου ήταν πάνω κάτω ομοιογενής κατά τη διάρκεια της μέρας, η ταχύτητα του αέρα στο συλλέκτη έδειξε σαφή εξάρτηση από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αέρα περιβάλλοντος και του αέρα εξόδου του συλλέκτη.

2.6.5 Αποτελεσματικότητα του ξηραντήρα χωρίς φορτίο

Για δοκιμές χωρίς φορτίο του ξηραντήρα, έγινε μία συνεχής 48ωρη μέτρηση (μεταξύ 26-28 Ιουνίου 2005) με διάφορες πηγές θερμότητας. Για τις πρώτες 12 ώρες, δηλαδή κατά τη διάρκεια της μέρας στις 26 Ιουνίου, η πηγή θερμότητας ήταν μόνο η ηλιακή ενέργεια. Το απόγευμα, ξεκινώντας από τις 17:30 μμ, περίπου 50kg ξύλου κάηκαν για να παρέχουν θερμότητα για τις νυχτερινές ώρες.

Η εναπομείνουσα αποθηκευμένη θερμότητα στα τούβλα, με συνδυασμό ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε τότε ως πηγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας στις 27 Ιουνίου. Ενώ, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η εναπομείνουσα αποθηκευμένη θερμότητα στα τούβλα ήταν μοναδική πηγή ενέργειας για τον ξηραντήρα.

Η ημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών του αέρα ξήρανσης σε κάθε δίσκο, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, και η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του πειράματος φαίνονται στο σχήμα 108.



Σχ. 108 [238] διακύμανση των θερμοκρασιών του αέρα ξήρανσης σε κάθε δίσκο, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, και της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του πειράματος χωρίς φορτίο με διακύμανση πηγών θερμότητας (26-28 Ιουνίου 2005)

Όταν χρησιμοποιήθηκε μόνο ηλιακή ακτινοβολία, παρατηρήθηκε ότι ο δίσκος 4 είχε την υψηλότερη θερμοκρασία με μέγιστη 54°C , δηλαδή, όταν η ηλιακή ακτινοβολία ήταν $916\text{ W}/\text{m}^2$. Ενώ για τους άλλους 3 δίσκους, οι θερμοκρασίες αέρα ήταν σχετικά παρόμοιες.

Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα πάνω απ' το δίσκο 4 και των άλλων 3 δίσκων ήταν σημαντική, ειδικά κατά τη διάρκεια του χρόνου υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Για ηλιακή ακτινοβολία μεγαλύτερη από $550\text{ W}/\text{m}^2$, η θερμοκρασιακή διαφορά ήταν περίπου $5-10^{\circ}\text{C}$.

Όταν ο καυστήρας ήταν σε λειτουργία τη νύχτα, από την αρχή της καύσης οι θερμοκρασίες στους δίσκους αυξήθηκαν και έφτασαν το μέγιστο μετά από 6 ώρες.

Αυτές οι αργές θερμοκρασιακές αυξήσεις δείχνουν ότι μέρος της θερμότητας αποθηκεύτηκε στα τούβλα όταν καυσάεριο και θερμός καπνός πέρασαν μέσα απ' αυτά. Με την καύση περίπου 60kg ξύλων, η καύση μπόρεσε να διατηρηθεί περίπου για 3 ώρες χωρίς προσθήκη περισσότερου καυσίμου.

Ωστόσο, η χρήση μεγάλων κομματιών αργά καιόμενου σκληρού ξύλου επέτρεψε στη φωτιά να καίει πιο αργά και για περισσότερο χρόνο. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που μπόρεσαν να επιτευχθούν στους

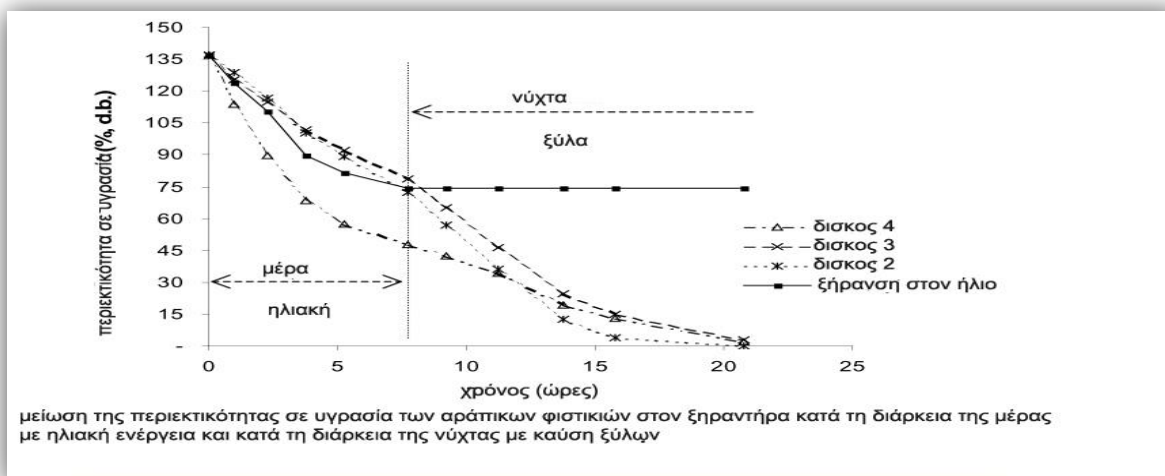
δίσκους 2, 3 και 4 ήταν περίπου 65°C , το οποίο είναι κατάλληλο για την ξήρανση των περισσότερων γεωργικών προϊόντων. Αντίθετα, στο δίσκο 1 η μέγιστη θερμοκρασία έφτασε τους 93°C , η οποία είναι υπερβολικά υψηλή για ξήρανση. Αυτή η υπερβολική θερμοκρασία οφείλεται στη θέση του δίσκου, ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά στην κάτω πλάκα που είναι τοποθετημένη από πάνω και σε επαφή με την πάνω επιφάνεια των τούβλων. Αυτό το πρόβλημα πρέπει να λυθεί, διαφορετικά ο δίσκος 1 δε θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ειδικά κατά τη διάρκεια των πρώτων ωρών καύσης.

Καθώς τα καύσιμα και η καύση στον καυστήρα τελείωσαν, η αποθηκευμένη θερμότητα στα τούβλα άρχισε να συνεισφέρει στον αέρα ξήρανσης, ωστόσο οι θερμοκρασίες τότε άρχισαν να μειώνονται. Το πρωί της επόμενης μέρας οι θερμοκρασίες στο δίσκο 4 και στους άλλους 3 δίσκους ήταν περίπου 55 και 37°C , με θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C . Κατά τη διάρκεια αυτής της μέρας οι πηγές θερμότητας ήταν η ηλιακή ενέργεια και η αποθηκευμένη στα τούβλα θερμότητα. Τα τούβλα συνέχισαν να παρέχουν θερμότητα μέχρι τη δεύτερη συνεχόμενη νύχτα, και μπόρεσαν να διατηρούν τις θερμοκρασίες μέχρι 8°C πάνω απ' τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Από αυτή τη μέτρηση, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι ο καυστήρας βιομάζας και η αποθήκευση θερμότητας μπορούν να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα του ηλιακού ξηραντήρα.

2.6.6 Χωρητικότητα και χρόνοι ξήρανσης

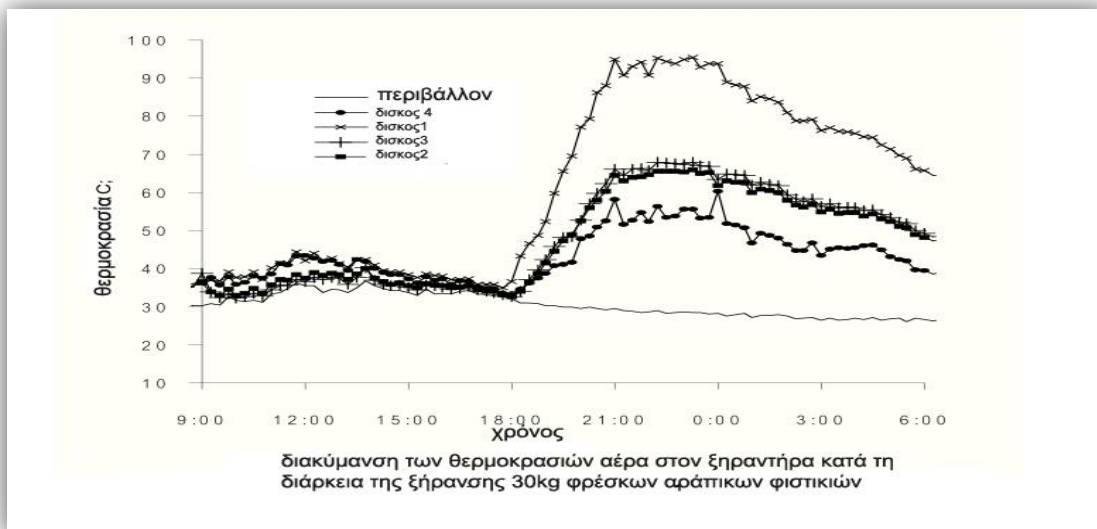
Έγιναν δύο ξεχωριστές δοκιμές με φορτίο, δηλαδή, το πρώτο και το δεύτερο πείραμα με φορτίο 35kg και 64kg φρέσκων αναποφλοιωτών φιστικιών, αντίστοιχα. Με το στρώμα φρέσκων αναποφλοιωτών φιστικιών σε κάθε δίσκο να είναι πάχους περίπου 0.03cm , βρέθηκε ότι η χωρητικότητα του ξηραντήρα ήταν περίπου $60-65\text{kg}$. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, τα δείγματα φιστικιών που ήταν τοποθετημένα στο κέντρο και στις ακμές κάθε δίσκου χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστεί το επίπεδο περιεκτικότητας σε υγρασία της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης.

Για το πρώτο πείραμα τα φρέσκα φιστικά ξηράθηκαν ξεκινώντας στις $9:00$ πμ, χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ακτινοβολία μέχρι τις $17:00$ μμ, έπειτα η ξήρανση συνεχίστηκε με καύση περίπου 40kg ξύλων. Σ' αυτό το πρώτο πείραμα ο χαμηλότερος δίσκος (δίσκος 1) δε χρησιμοποιήθηκε για να αποφευχθεί η υπέρ-ξηρανση του προϊόντος, ειδικά κατά τη διάρκεια της ξήρανσης με καύση. Η μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία των φιστικιών κατά τη διάρκεια της μέρας με ηλιακή ενέργεια και της νύχτας με καύση ξύλων φαίνονται στο σχήμα 109.



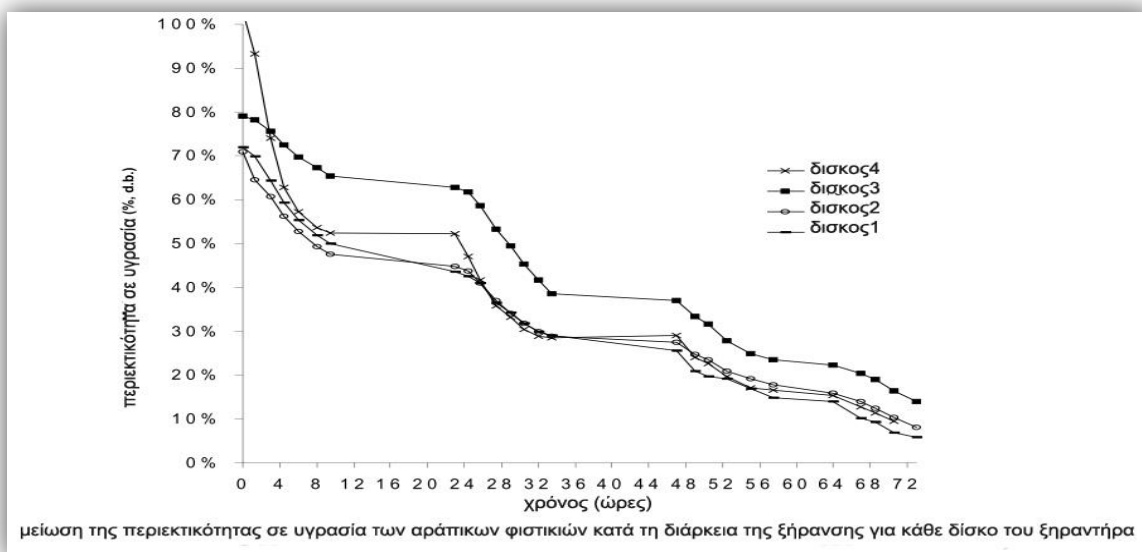
Σχ. 109 [238] μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία των αράπικων φιστικιών στον ξηραντήρα κατά την διάρκεια της μέρας με ηλιακή ενέργεια και κατά την διάρκεια της νύχτας με καύση ξύλων

Πήρε περίπου 16 ώρες για να γίνει ξήρανση από την περιεκτικότητα σε υγρασία 135% στο 13% κατά τη διάρκεια του πειράματος. Για τα προϊόντα του ανώτερου δίσκου (δίσκος 4) περίπου 70% της υγρασίας στα φιστίκια αφαιρέθηκε με ηλιακή ενέργεια και το υπόλοιπο από τον καυστήρα βιομάζας. Ενώ για το προϊόν στους άλλους δίσκους η υγρασία που αφαιρέθηκε με ηλιακή ενέργεια ήταν περίπου 44%. Το σχήμα δείχνει επίσης τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία, στον ίδιο χρόνο, με φυσική ηλιακή ξήρανση. Οι θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης σε κάθε δίσκο και η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του πειράματος, μέρα και νύχτα, φαίνονται στο σχήμα 110.



Σχ. 110 [238] διακύμανση των θερμοκρασιών αέρα στον ξηραντήρα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης 30 Kgr φρέσκων αράπικων φιστικιών

Για το δεύτερο πείραμα, η ηλιακή ενέργεια ήταν η μοναδική πηγή θερμότητας για την ξήρανση περίπου 60kg φιστικιών (πλήρες φορτίο). Τα φιστίκια λήφθηκαν από τους αγρότες σε τρία διαφορετικά πακέτα. Οι διαφορετικές αρχικές περιεκτικότητες σε υγρασία των φιστικιών σε κάθε ένα απ' τα πακέτα βρέθηκαν 100%, 80% και 70%. Αυτό οφείλεται μάλλον στη διαφορά των συνθηκών συγκομιδής. Στη μέτρηση ξήρανσης, τα φιστίκια με αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία 100% και 80% ξηράνθηκαν στο δίσκο 4 και στο δίσκο 3 αντίστοιχα. Ενώ τα φιστίκια με αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία 70% ξηράνθηκαν στους δίσκους 2 και 1. Η μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία των φιστικιών για κάθε δίσκο φαίνεται στο σχήμα 111.



Σχ. 111 [238]μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία των αράπικων φιστικιών κατά την διάρκεια της ξήρανσης για κάθε δίσκο του ξηραντήρα

Πήρε περίπου 3 μέρες για να επιτευχθεί η περιεκτικότητα σε υγρασία 13% για τα φιστίκια σε κάθε δίσκο του ξηραντήρα. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η ηλιακή ακτινοβολία είχε διακυμάνσεις και ήταν σχετικά χαμηλή με μέση ημερήσια ακτινοβολία $350 \text{ W} / \text{m}^2 / \text{day}$. Κατά τη διάρκεια της νύχτας τα φιστίκια διατηρήθηκαν στον ξηραντήρα, που σημαίνει ότι ο ξηραντήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αποθήκευση.

2.6.7 Ομοιογένεια ξήρανσης και θερμοκρασίες αέρα ξήρανσης

Περίπου 200g δειγμάτων που τοποθετήθηκαν στο κέντρο κάθε δίσκου χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστούν οι μεταβολές των ρυθμών ξήρανσης στα διαφορετικά επίπεδα δίσκων. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι υπήρξαν σημαντικές μεταβολές στην αφαίρεση υγρασίας στα διαφορετικά επίπεδα δίσκων κατά τη διάρκεια της μέρας όπου οι καλλιέργειες στον ανώτερο δίσκο (δίσκος 4) ξηράνθηκαν πιο γρήγορα απ' όλες, ενώ οι καλλιέργειες στο δίσκο 1 ξηράνθηκαν πιο αργά απ' όλες.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης μέρας των δοκιμών με πλήρες φορτίο, οι καλλιέργειες στο δίσκο 4 έχασαν περίπου 42% της ολικής υγρασίας που εξατμίστηκε σε 12 ώρες ξήρανσης σε σύγκριση με το 33% και το 30% για το δίσκο 3 και τους δύο κατώτερους δίσκους, αντίστοιχα.

Η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα που μετρήθηκε ακριβώς πάνω απ' τον ανώτερο δίσκο ήταν 43°C την πρώτη μέρα και οι μέσες θερμοκρασίες αέρα ακριβώς πάνω από τον μεσαίο και τους κατώτερους δίσκους ήταν, αντίστοιχα, 7°C και 10.8°C κάτω απ' αυτές του ανώτερου επιπέδου δίσκων. Αυτή η τάση ξήρανσης συνεχίστηκε τις επόμενες μέρες αλλά η διαφορά στην αφαίρεση υγρασίας μεταξύ των δίσκων μειώθηκε καθώς η υγρασία από τις μερικώς αποξηραμένες φέτες ήταν πιο δύσκολο να αφαιρεθεί. Παρόμοιο φαινόμενο αναφέρθηκε από τους Bena και Fuller (2002) [235] ως αποτέλεσμα δοκιμής ενός ηλιακού ξηραντήρα φυσικής συναγωγής.

Όταν ο καυστήρας ήταν σε λειτουργία, οι καλλιέργειες στο δίσκο 2 ξηράνθηκαν πιο γρήγορα σε σύγκριση με αυτές στο δίσκο 3 και στο δίσκο 4. (Όταν ο καυστήρας ήταν σε λειτουργία, ο δίσκος 1 δε χρησιμοποιήθηκε). Στις πρώτες 6 ώρες της καύσης, οι καλλιέργειες στο δίσκο 2 έχασαν 83% της υγρασίας σε σύγκριση με 68% και 59% γι' αυτές στους δίσκους 3 και 4, αντίστοιχα. Η μέγιστη θερμοκρασία του

αέρα που μετρήθηκε ακριβώς πάνω από το δίσκο 2 κατά τη διάρκεια της καύσης ήταν περίπου 65°C , η οποία ήταν περίπου 3°C και 7°C πάνω απ' αυτήν στους δίσκους 3 και 4, αντίστοιχα.

Για τον καθορισμό της ομοιογένειας της ξήρανσης κατά μήκος των δίσκων, περίπου 200g δειγμάτων φιστικιών τοποθετήθηκαν στις 4 γωνίες και στο κέντρο κάθε δίσκου. Τα αποτελέσματα της μέτρησης έδειξαν ότι όταν ο ξηραντήρας ήταν σε λειτουργία, με ηλιακή ενέργεια και καύση βιομάζας, τα περισσότερα δείγματα ξηράθηκαν στον ίδιο βαθμό. Αυτό συμφωνεί με την κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του δίσκου, το οποίο έδειξε ότι η μέγιστη διαφορά ήταν μόνο 5°C περίπου.

2.6.8 Ρυθμοί ροής αέρα

Η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης κατά μήκος της καλλιέργειας και η ροή αέρα μέσω του κιβωτίου εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα θερμο-ανεμόμετρο χειρός σε διάφορα σημεία μέσα στον ξηραντήρα. Οι μετρήσεις λήφθηκαν πάνω απ' το δίσκο 2 όταν η ταχύτητα του εξωτερικού ανέμου κυμαινόταν μεταξύ 0.2-0.3m/s. Τα αποτελέσματα της μέτρησης έδειξαν ότι, κατά τη διάρκεια της δοκιμής με φορτίο με λειτουργία καύσης ξύλου, η ροή αέρα δια μέσου του ξηραντήρα κυμαινόταν κατά μήκος του δίσκου από 0.05 έως 0.31m/s.

Από αυτές τις μετρήσεις εκτιμήθηκε ότι η ροή αέρα διαμέσου του ξηραντήρα σ' αυτή τη λειτουργία ήταν περίπου 0.04m/s. Όταν η ηλιακή ενέργεια ήταν η μοναδική πηγή θερμότητας, βρέθηκε ότι οι ταχύτητες στις ίδιες θέσεις ήταν περίπου οι μισές απ' ότι με λειτουργία καύσης ξύλου. Ελάχιστη ή καθόλου ροή εντοπίστηκε κοντά στις ακμές του δίσκου, ενώ κοντά στο κέντρο η ταχύτητα ήταν μεταξύ 0.04 και 0.16m/s. Αυτές οι μετρήσεις λήφθηκαν όταν δεν υπήρχε άνεμος, και βρέθηκαν σημαντικά υψηλότερες όταν υπήρχε μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου.

2.6.9 Αποδόσεις

2.6.10 Ηλιακός ξηραντήρας

Η ολική θερμική απόδοση του συστήματος ξήρανσης, συμπεριλαμβανομένου του συλλέκτη και του θαλάμου, υποδηλώνεται από την απόδοση του συστήματος ξήρανσης. Μετράει την αποτελεσματικότητα της χρήσης ηλιακής ακτινοβολίας για την ξήρανση προϊόντος στο σύστημα του ξηραντήρα. Όταν η ηλιακή ενέργεια είναι η μοναδική πηγή θερμότητας της ξήρανσης, η απόδοση του συστήματος μπορεί να γραφτεί ως (Leon, 2002) [237]

$$\eta_{sys} = \frac{W \times L}{I \times A_p}$$

όπου W είναι το βάρος του νερού που εξατμίζεται από το προϊόν (kg), I είναι η ηλιακή

ακτινοβολία (J / m^2), A_p είναι το εμβαδόν του ηλιακού συλλέκτη (m^2), L είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού (J/kg). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση, οι αποδόσεις του συστήματος του ξηραντήρα για την πρώτη μέρα της πρώτης και της δεύτερης μέτρησης βρέθηκαν 21.3% και 23%, αντίστοιχα.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ο τύπος της καλλιέργειας και το επίπεδο της τελικής περιεκτικότητας σε υγρασία επηρεάζουν τη θερμική απόδοση. Η τελική υγρασία σε ένα προϊόν γενικά απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να αφαιρεθεί απ' ότι η αρχική υγρασία και η προετοιμασία των καλλιεργειών πριν την ξήρανση επηρεάζει τη θερμική απόδοση. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν δύσκολη τη σύγκριση με τις θερμικές αποδόσεις άλλων ηλιακών ξηραντήρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Bena και Fuller, 2002) [235].

2.6.11 Εφεδρικός Θερμαντήρας

Η ολική θερμική απόδοση του θερμαντήρα μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της ωφέλιμης θερμότητας που μεταφέρεται στον αέρα ξήρανσης προς τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου (Bena και Fuller, 2002) [235]. Αυτή η απόδοση είναι ένα προϊόν της απόδοσης καύσης και της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας στον αέρα. Σ' αυτό το έργο η ολική απόδοση του εφεδρικού θερμαντήρα, καυστήρας και τούβλα αποθήκευσης θερμότητας, υπολογίζεται ως:

$$\text{ολική απόδοση} = \frac{\text{θερμότητα που μεταφέρεται στον αέρα που μπαίνει στο κιβώτιο ξήρανσης}}{\text{θερμογόνος δύναμη του ξύλου που χρησιμοποιείται}}$$

Χρησιμοποιώντας θερμοκρασιακά δεδομένα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια 36 ωρών λειτουργίας του εφεδρικού θερμαντήρα, με θερμογόνο δύναμη του ξύλου περίπου 13.1 MJ/kg, η ολική απόδοση του εφεδρικού θερμαντήρα βρέθηκε 40%.

2.6.12 Συμπεράσματα

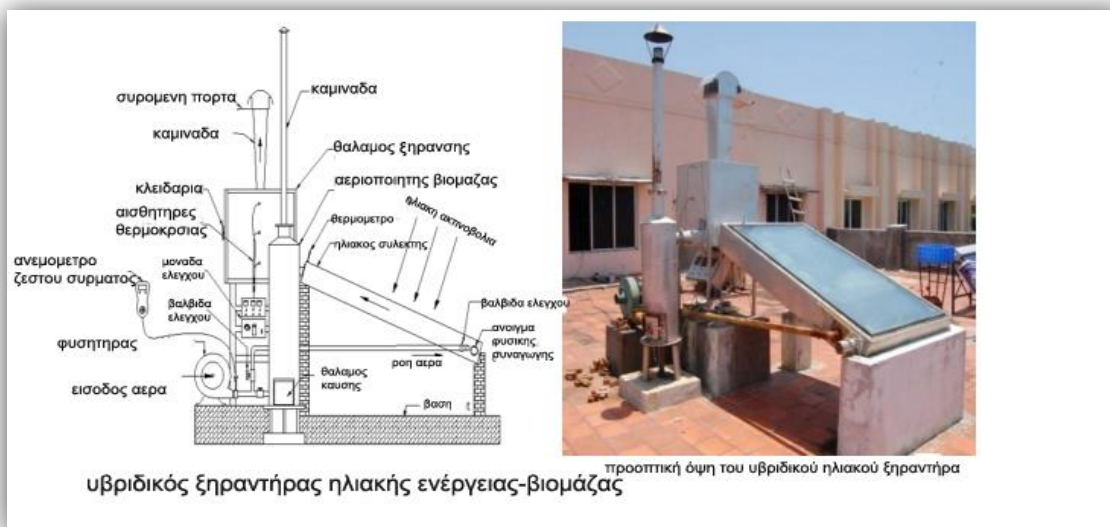
Ένας ηλιακός ξηραντήρας μικτής λειτουργίας φυσικής συναγωγής, που σχεδιάστηκε για παραγωγούς γεωργικών προϊόντων μικρής κλίμακας σε μη ηλεκτροδοτούμενες περιοχές, παρουσιάστηκε ο οποίος ήταν συνδυασμένος με έναν απλό καυστήρα βιομάζας και με τούβλα θερμικής αποθήκευσης ως εφεδρικό σύστημα θέρμανσης. Το εφεδρικό σύστημα θέρμανσης που μπορεί να κατασκευαστεί με εύκολα διαθέσιμα υλικά, εργαλεία και δεξιότητες, μπορεί να βελτιώσει τη βιωσιμότητα του ξηραντήρα. Συγκεκριμένα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του ξηραντήρα έπαιξαν ρόλο στην παραγωγή αποδεκτής θερμικής απόδοσης και ομοιογένειας της θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσης κατά μήκος των δίσκων. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τα εξωτερικά τοιχώματα και το κενό που περιβάλλουν το θάλαμο ξήρανσης και τη διάταξη τούβλων για αποθήκευση θερμότητας. Ωστόσο, βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα του ξηραντήρα θα μπορούσαν να επιτευχθούν μέσω περαιτέρω τροποποιήσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Αύξηση της απόστασης μεταξύ του δίσκου 1 και της πλάκας πυθμένα του θαλάμου ξήρανσης για μείωση των υπερβολικών θερμοκρασιών στο δίσκο, ειδικά κατά τη διάρκεια της καύσης
- Χρήση διπλών τζαμιών για μείωση των θερμικών απωλειών από το κιβώτιο.
- Επιπρόσθετα, δοκιμές αποτελεσματικότητας πρέπει να γίνονται με διαφορετικά είδη γεωργικών προϊόντων και με διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

2.7 Ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας – βιομάζας για ξήρανση ξηρών καρπών

2.7.1 Πειράματα

Ο Ξηραντήρας αποτελείται από έναν θερμαντήρα βιομάζας, έναν ηλιακό συλλέκτη θέρμανσης αέρα, ένα φυγοκεντρικό φυσητήρα και ένα θάλαμο ξήρανσης με καμινάδα. Η σχηματική απεικόνιση και μια φωτογραφία του φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχ. 112 [239]υβριδικός ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας-βιομάζας

2.7.2 Ηλιακός συλλέκτης

Το σύστημα ηλιακού συλλέκτη θέρμανσης αέρα αποτελείται από έναν απορροφητή, ένα διπλό γυάλινο κάλυμμα, μια οπίσθια πλάκα και μόνωση. Ο ηλιακός συλλέκτης έχει διαστάσεις 2m x 1.1m x 0.2m. Το όλο σύστημα είναι έγκλειστο σε ένα ορθογώνιο κουτί φτιαγμένο από γαλβανισμένη λαμαρίνα πάχους 0.99mm. Ο απορροφητής είναι φτιαγμένος από αλουμινένια πλάκα πάχους 2mm επικαλυμμένη με μαύρη μπογιά για την απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Δύο σκληρυμένες γυάλινες πλάκες είναι τοποθετημένες στην κορυφή του συλλέκτη σε μια απόσταση 0.04m πάνω απ' την απορροφητική πλάκα έτσι ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες από την πάνω πλευρά του συλλέκτη. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ο αέρας ρέει δια μέσου του κενού μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και της οπίσθιας πλάκας. Τα κενά μέσα στο συλλέκτη έχουν διαχωριστικά για να αλλάζουν την κατεύθυνση ροής αέρα ενώ δύο συνδέσεις εισόδου παρέχονται στο μπροστινό άκρο του συλλέκτη. Η μία είναι συνδεδεμένη στο φυσητήρα για να λειτουργεί το σύστημα με εξαναγκασμένη συναγωγή και η άλλη είναι ανοιχτή στην ατμόσφαιρα για να λειτουργεί το σύστημα με ελεύθερη συναγωγή.

2.7.3 Θερμαντήρας βιομάζας

Ο θερμαντήρας βιομάζας αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη, το εσωτερικό και εξωτερικό κέλυφος, ένα σταυρωτό σωλήνα, μια καμινάδα και ανοίγματα. Η βάση του θερμαντήρα βιομάζας δρα ως θάλαμος καύσης. Ο κυλινδρικός MS σταυρωτός σωλήνας είναι τοποθετημένος στη μέση του εσωτερικού κελύφους για να εκτρέπει τη φλόγα προς την περιφέρεια του εσωτερικού κυλινδρικού κελύφους. Μόνωση

υαλοβάμβακα πάχους 0.08m με επένδυση αλουμινίου παρέχεται στο εξωτερικό κέλυφος του θερμαντήρα βιομάζας.

2.7.4 Μονάδα ξήρανσης

Η μονάδα ξήρανσης αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη, ένα πλαίσιο βάσης, ένα θάλαμο ξήρανσης, δίσκους ξήρανσης και μια θύρα φόρτωσης. Αυτός ο θάλαμος είναι φτιαγμένος από ένα πλαίσιο χαλυβδοσίδηρου και είναι καλυμμένος με γαλβανισμένη λαμαρίνα πάχους 1mm. Ο θάλαμος ξήρανσης αποτελείται από δέκα διάτρητους αλουμινένιους δίσκους που είναι διατεταγμένοι από το κάτω μέρος μέχρι την κορυφή του θαλάμου ξήρανσης. Είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα σε μια απόσταση 0.015m. Μια θύρα παρέχεται με διάταξη ασφάλισης για φόρτωση και εκφόρτωση του προϊόντος.

2.7.5 Φυσητήρας

Ο φυσητήρας είναι προσαρτημένος στον ηλιακό συλλέκτη για να επάγει και να ελέγχει τη ροή αέρα μέσα στο συλλέκτη. Ο φυσητήρας είναι συνδεδεμένος με τον ηλιακό συλλέκτη και το θερμαντήρα βιομάζας με αγωγούς. Η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του φυσητήρα είναι 2800rpm.

2.7.6 Καμινάδα

Μια καμινάδα με ποικίλες διατομές (πυθμένας 0.16m, κορυφή 0.2m, ύψος 0.6m) παρέχεται στην κορυφή του θαλάμου ξήρανσης για να απομακρύνει τον υγρό αέρα. Μια συρόμενη θύρα παρέχεται στην κορυφή της καμινάδας για τον έλεγχο της ροής του εξαγόμενου αέρα. Οι σχεδιαστικές παράμετροι του υβριδικού ηλιακού ξηραντήρα δίνονται στον πίνακα 21.

σχεδιαστικές παράμετροι του υβριδικού ηλιακού ξηραντήρα	
στοιχείο	προδιαγραφές
ηλιακός συλλέκτης	
τύπος	επίπεδης πλάκα
επιφάνεια	2.2m ²
γυάλινο κάλυμμα	4mm
αριθμός τζαμιών	2
πλάκα απορροφητή	φύλλο αλουμινίου, πάχους 2mm
γωνία κλίσης	15°
μόνωση	υαλοβάμβακας
θάλαμος ξήρανσης	
μέγεθος/αριθμός δίσκων	0.64×0.6×0.73 m / 10
επιφάνεια δίσκων	0.54×0.51 m
καμινάδα	πυθμένας 0.16 × 0.16κορυφή0.2×0.2
πάχος δίσκων	0.003 m
φυσητήρας	
χωρητικότητα, ταχύτητα και τάση	0.37 KW,0-2800 Rpm & 440 V(A.C)
θερμαντήρας βιομάζας	
διάμετρος εσωτερικού κελύφους	0.34 m
διάμετρος εξωτερικού κελύφους	0.42 m
ύψος	0.94 m
πάχος κελύφους	0.003
χωρητικότητα ξήρανσης	40kg

Π. 21 [239]σχεδιαστικές παράμετροι του υβριδικού ηλιακού ξηραντήρα

2.7.7 Σύστημα λειτουργίας

Δύο διαφορετικές λειτουργίες διεξάχθηκαν έτσι ώστε να μελετηθούν η θερμική απόδοση και τα χαρακτηριστικά ξήρανσης του συστήματος. Το σύστημα ξήρανσης λειτούργησε σε υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία με χρήση του φουσητήρα στις 1400rpm. Ένας βέλτιστος ρυθμός ροής αέρα 0.0402 kg/s διατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της διαδρομής. Ο αέρας ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένος στον ηλιακό συλλέκτη και στο θερμαντήρα βιομάζας. Επιπρόσθετη είσοδος θερμότητας υπήρξε με την καύση 0.5kg καυσόξυλων στο θερμαντήρα βιομάζας. Το πείραμα επαναλήφθηκε με υβριδική φυσική λειτουργία χωρίς τη χρήση του φουσητήρα. Ταυτόχρονα έγινε λειτουργία ξήρανσης στον ήλιο για να ληφθεί ο χρόνος ξήρανσης

2.7.8 Προϊόν ξήρανσης

Βραστά κελύφη κάσιους που ζύγιζαν 80kg παράχθηκαν από έναν τοπικό αγρότη στην περιοχή Cuddalore, στο Tamilnadu, στην Ινδία. Ένας χειροκίνητος κόφτης χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεση του κελύφους. Ο πυρήνας του κάσιους λαμβάνεται μετά το κόψιμο και έχει καφέ δέρμα που λέγεται κέλυφος. Για να αφαιρεθεί το κέλυφος από τον πυρήνα, πραγματοποιείται λειτουργία ξήρανσης. Η ομοιογενώς ελεγχόμενη θέρμανση των 60–70°C για μια περίοδο 6-8 ωρών απαιτείται για τη μείωση της υγρασίας από το 9% στο 3%.

2.7.9 Πειραματική διαδικασία

Τα δεδομένα πειράματα διεξάχθηκαν στον υβριδικό ξηραντήρα ηλιακής ενέργειας και βιομάζας εξαναγκασμένης συναγωγής σε συνθήκες χωρίς φορτίο. Σε κάθε ώρα ξήρανσης η θερμοκρασία του θαλάμου ξήρανσης μετρήθηκε στους δίσκους του πυθμένα, της μέσης και της κορυφής χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο που εισήχθηκε μέσα στο θάλαμο ξήρανσης. Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη, η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου ξήρανσης μετρήθηκαν όλες με RTDs. Άλλα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν ήταν η ηλιακή ακτινοβολία με μετρητή ηλιακής ενέργειας, η σχετική υγρασία στο περιβάλλον και το θάλαμο ξήρανσης με θερμο-υγρόμετρο.

Τα αρχικά και τελικά βάρη του προϊόντος μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ψηφιακή ζυγαριά. Ο ρυθμός ροής αέρα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας ένα ανεμόμετρο θερμού σύρματος συνδεδεμένο μεταξύ του φουσητήρα και του συλλέκτη και της εισόδου του αεριοποιητή. Η κατανάλωση ενέργειας του φουσητήρα υπολογίστηκε με μετρητή ενέργειας. Το πείραμα επαναλήφθηκε σε διαφορετικές μέρες με διακύμανση της ταχύτητας του φουσητήρα στο εύρος των 1000rpm με ελάχιστη ταχύτητα 300rpm και μέγιστη ταχύτητα 2500rpm για 23 μέρες. Τρεις βέλτιστοι ρυθμοί ροής αναγνωρίστηκαν (0.0289kg/s, 0.035kg/s, 0.042kg/s) ως κατάλληλοι γι' αυτό το προϊόν. Οι τρεις βέλτιστοι ρυθμοί ροής χρησιμοποιήθηκαν για την ξήρανση 40kg κάσιους ανά παρτίδα και τα αποτελέσματα κοινοποιήθηκαν.

Παρόμοια πειράματα επαναλήφθηκαν σε έναν ηλιακό ξηραντήρα φυσικής συναγωγής και σε έναν ξηραντήρα βιομάζας με λειτουργία εξαναγκασμένης συναγωγής και συγκρίθηκαν με τη φυσική ηλιακή ξήρανση. Η σύγκριση έγινε με τη φυσική ηλιακή ξήρανση την ίδια μέρα και την ίδια ώρα (από τις 8:00 πμ μέχρι τις 5:00 μμ).

2.7.10 Όργανα

Η ηλιακή ακτινοβολία μετρήθηκε με μετρητή ηλιακής ενέργειας. Τρία βαθμονομημένα θερμοστοιχεία με ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ήταν τοποθετημένα στην κορυφή, στον πυθμένα και στη μέση του θαλάμου ξήρανσης για να μετράνε τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης. Η κατανάλωση ενέργειας του φουσητήρα μετρήθηκε με ένα μετρητή ενέργειας με ακρίβεια ± 0.5 . Η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο του συλλέκτη καθώς και στο θερμαντήρα βιομάζας μετρήθηκαν με ένα ανεμόμετρο θερμού σύρματος (με

ακρίβεια $\pm 0.01 \text{ m/s}$). Η σχετική υγρασία του αέρα περιβάλλοντος και του θαλάμου ξήρανσης μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα θερμο-υγρόμετρο. Η μάζα του πυρήνα του κάσιους και το βιοκαύσιμο μετρήθηκαν με ηλεκτρονική ζυγαριά ακρίβειας 0.01g. Η λίστα των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα φαίνεται στον πίνακα 22.

όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα			
S.No	παράμετρος	όργανα	ακρίβεια
1	θερμοκρασία	θερμοστοιχείο και RTDs	0.05°C
2	μάζα	ηλεκτρονική ζυγαριά	0.01g
3	ηλιακή ακτινοβολία	ηλιακός μετρητής ισχύος	$\pm 1 \text{ W/m}^2$
4	ταχύτητα αέρα	ανεμόμετρο θερμού σύρματος	$\pm 2.5\%$
5	κατανάλωση ενέργειας του φουσητήρα	μετρητής ενέργειας	$\pm 0.1 \text{ Kwh}$
6	σχετική υγρασία	θερμο-υγρόμετρο	$\pm 2.5\%$

Π. 22 [239] όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

2.7.11 Υπολογισμός απόδοσης

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος και των χαρακτηριστικών ξήρανσης υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση. Η περιεκτικότητα σε υγρασία (M_c) εκφράζεται ως το ποσοστό της υγρασίας που υπάρχει στο προϊόν. Η στιγμιαία περιεκτικότητα σε υγρασία σε οποιαδήποτε στιγμή σε υγρή βάση και ξηρή βάση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εκφράσεις.

$$M_c (\text{Wet Basis}) = \frac{M_i - M_d}{M_i} \times 100$$

$$M_c (\text{Dry Basis}) = \frac{M_i - M_d}{M_d} \times 100$$

όπου M_i είναι η αρχική μάζα του δείγματος σε kg, M_d είναι η τελική μάζα του δείγματος σε kg.

Ο ρυθμός ξήρανσης (R_d) υπολογίζεται από τη διαφορά της συγκέντρωσης του νερού κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μεταξύ δύο συνεχόμενων μετρήσεων διαιρεμένη με αυτό το χρονικό διάστημα:

$$R_d = \frac{M_i - M_d}{t}$$

όπου t είναι ο χρόνος ξήρανσης σε sec.

Η απόδοση του συλλέκτη (η_c) καθορίζεται ως ο λόγος του ωφέλιμου θερμικού κέρδους (Q_u) σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία την ίδια χρονική περίοδο, με I να δηλώνει την ηλιακή ένταση σε W/m^2 και A το εμβαδόν του συλλέκτη σε m^2 :

$$\eta_c = \frac{Q_u}{I \cdot A}$$

$$\eta_c = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{I \cdot A}$$

όπου m είναι ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα σε kg/sec, C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα σε kJ/kg K, T_o είναι η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη σε °C και T_i είναι η θερμοκρασία εισόδου του συλλέκτη σε °C.

Η απόδοση του ξηραντήρα (η_d) του συστήματος καθορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την εξάτμιση της υγρασίας από το προϊόν προς την ενέργεια που παρέχεται στον ξηραντήρα. Στην περίπτωση εξαναγκασμένης συναγωγής η κατανάλωση ενέργειας του φυσητήρα λαμβάνεται υπόψη. Η απόδοση του υβριδικού ξηραντήρα ηλιακής ενέργειας και βιομάζας εξαναγκασμένης και φυσικής συναγωγής υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$\eta_d = \frac{m_w h_{fg}}{IAt + E + m_f C_v} \times 100$$

$$\eta_d = \frac{m_w h_{fg}}{IAt + m_f C_v} \times 100$$

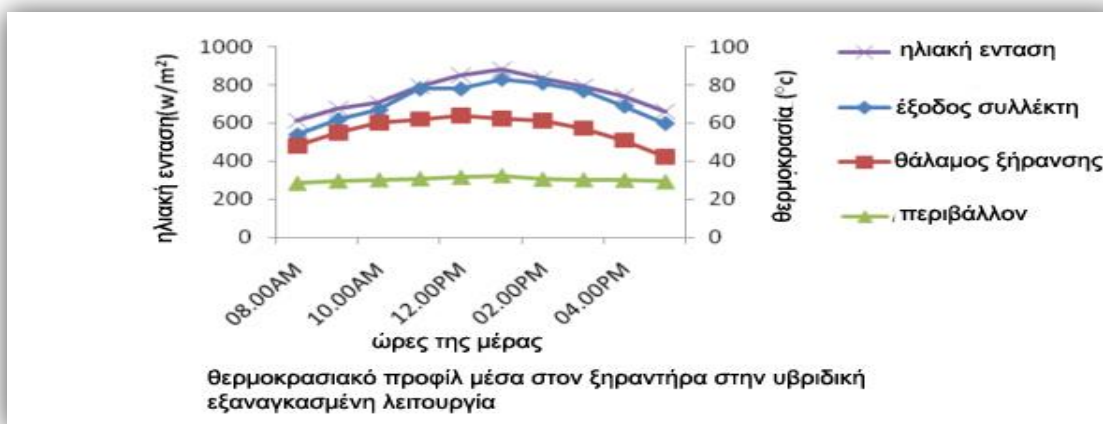
όπου m_w είναι η μάζα της υγρασίας που εξατμίζεται σε kg, h_{fg} είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού για το θάλαμο ξήρανσης σε kJ/kg, E είναι η ενεργειακή κατανάλωση του φυσητήρα σε kWh, m_f είναι η μάζα του καυσίμου που χρησιμοποιείται σε kg/hr, C_v είναι η θερμογόνος δύναμη των ροκανιδιών σε kJ/kg.

Ο συντελεστής αποτελεσματικότητας μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του ρυθμού ξήρανσης στον έμμεσο ηλιακό ξηραντήρα προς αυτόν της φυσικής ηλιακής ξήρανσης:

$$\text{συντελεστής αποτελεσματικότητας} = \frac{\text{ρυθμός ξήρανσης σε υβριδική λειτουργία}}{\text{ρυθμός ξήρανσης στη φυσική ηλιακή ξήρανση}}$$

2.7.12 Ανάλυση θερμοκρασιακού προφίλ μέσα στον ξηραντήρα

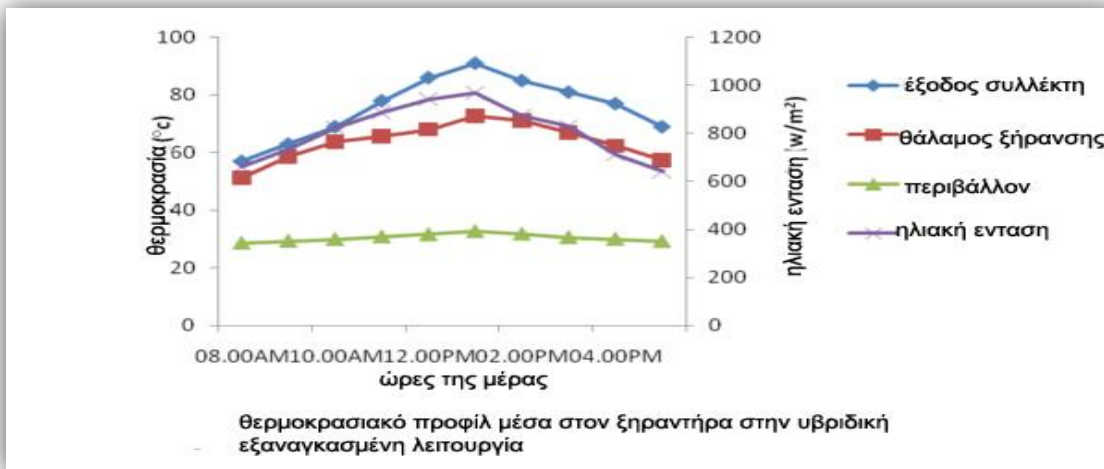
Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τη λειτουργία του ξηραντήρα από τις 8 πμ μέχρι τις 5 μμ σε υβριδική λειτουργία φυσικής συναγωγής φαίνονται στο σχήμα 113.



Σχ. 113 [239]θερμοκρασιακό προφίλ μέσα στον ξηραντήρα στην υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία

Η θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος στην είσοδο του ξηραντήρα κυμάνθηκε από 28°C έως 32°C και η ηλιακή ακτινοβολία κυμάνθηκε από $600\text{ W} / \text{m}^2$ έως $880\text{ W} / \text{m}^2$ την ημέρα δοκιμής.

Η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη κυμάνθηκε από 50°C έως 80°C και η θερμοκρασία του θαλάμου ξήρανσης κυμάνθηκε από 50°C έως 65°C . Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας στο συλλέκτη ήταν περίπου 41°C στην υβριδική φυσική λειτουργία. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου οι θερμοκρασίες των δίσκων πυθμένα, μέσης και κορυφής ήταν σχεδόν ίδιες. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τη λειτουργία του ξηραντήρα από τις 8 πμ μέχρι τις 5 μμ στην υβριδική λειτουργία εξαναγκασμένης συναγωγής φαίνονται στο σχήμα 114.



Σχ. 114 [239]θερμοκρασιακό προφίλ μέσα στον ξηραντήρα στην υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία

Η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος στην είσοδο του ξηραντήρα κυμάνθηκε από 28°C έως 33°C και η ηλιακή ακτινοβολία κυμάνθηκε από $600\text{ W} / \text{m}^2$ έως $960\text{ W} / \text{m}^2$. Ένας βέλτιστος ρυθμός ροής αέρα 0.042 kg s^{-1} διατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της εξαναγκασμένης λειτουργίας. Η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη κυμάνθηκε από 60°C έως 90°C . Η θερμοκρασία του θαλάμου ξήρανσης παρέμεινε μεταξύ 55°C - 70°C το οποίο είναι ιδανικό για την ξήρανση κάσιους. Η μέση αύξηση θερμοκρασίας στο συλλέκτη ήταν περίπου 45°C στην υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία, αντίστοιχα.

Η μέγιστη μέση θερμοκρασία των 62.5°C μετρήθηκε στο δίσκο κορυφής και οι θερμοκρασίες των 63.7°C και των 62.5°C παρατηρήθηκαν στο μεσαίο δίσκο και στο δίσκο πυθμένα, αντίστοιχα.

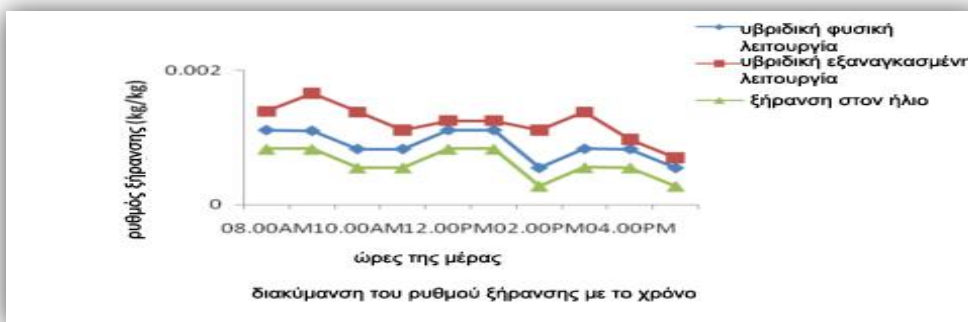
απόδοση συλλέκτη και ξηραντήρα σε διαφορετικές λειτουργίες ξήρανσης (%)				
λειτουργία ξήρανσης	μέση θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη	πυθμένας θαλάμου ξήρανσης	μέσον θαλάμου ξήρανσης	κορυφή θαλάμου ξήρανσης
υβριδική φυσική λειτουργία	71.4	57.5	56.4	55.1
υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία	75.6	65	63.7	62.5

Π. 23 [239]απόδοση συλλέκτη και ξηραντήρα σε διαφορετικές λειτουργίες ξήρανσης (%)

Η θερμοκρασία που καταγράφηκε μέσα στο θάλαμο ξήρανσης στην υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία ήταν ελαφρώς υψηλότερη από αυτήν στην υβριδική φυσική λειτουργία. Ένα ελαφρώς φθίνον θερμοκρασιακό προφίλ παρατηρήθηκε από το δίσκο πυθμένα έως το δίσκο κορυφής του ξηραντήρα. Δεν υπήρξαν σημαντικές διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες των δίσκων. Αυτό εξασφαλίζει ομοιογένεια στην ξήρανση για τη διατήρηση της εμπορικής αξίας του προϊόντος. Η ομοιογενής θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο ξήρανσης είναι επίσης απαραίτητη για την αποφυγή καψαλισματος και υπό-ξήρανσης.

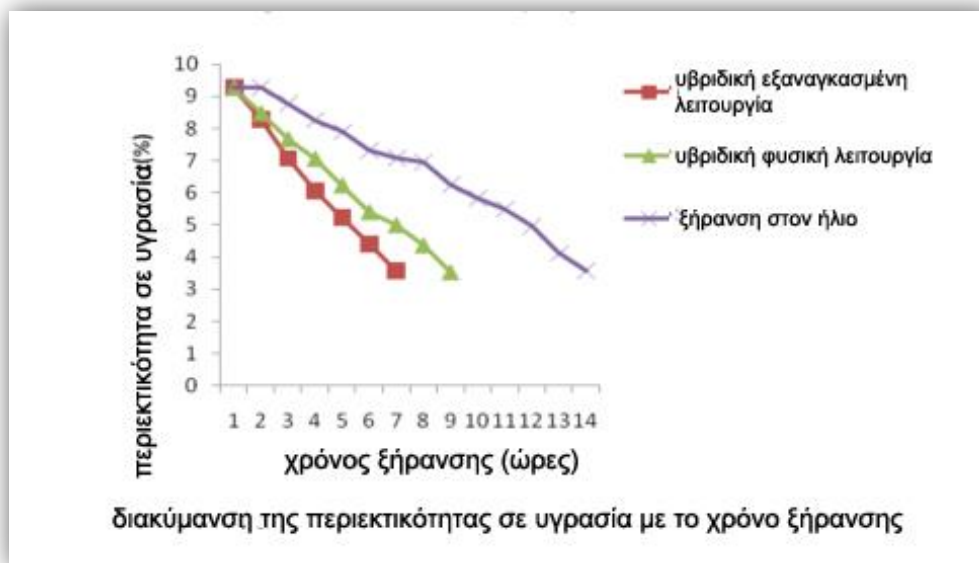
2.7.13 Απώλεια υγρασίας και ρυθμός ξήρανσης

Η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του κελύφους του κάσιους ήταν 9.29%. Η επιθυμητή τελική περιεκτικότητα σε υγρασία βρισκόταν στο εύρος 3.5%-4.6%. Το σχήμα 115 δείχνει τη διακύμανση του ρυθμού ξήρανσης στη φυσική ηλιακή ξήρανση, την υβριδική φυσική λειτουργία και την υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία με το χρόνο.



Σχ. 115 [239]διακύμανση του ρυθμού ξήρανσης με το χρόνο

Ο μέσος ρυθμός ξήρανσης με υβριδική εξαναγκασμένη και υβριδική φυσική ξήρανση ήταν 0.0012 και 0.00088 kg/hr, αντίστοιχα. Η διακύμανση της περιεκτικότητας σε υγρασία με το χρόνο ξήρανσης φαίνεται στο σχήμα 116.



Σχ. 116 [239]διακύμανση της περιεκτικότητας σε υγρασία με το χρόνο ξήρανσης

Η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία του 3.5% λήφθηκε μέσα σε 7 ώρες ξήρανσης στη λειτουργία εξαναγκασμένης συναγωγής, ενώ πήρε 9 ώρες ξήρανσης στη λειτουργία φυσικής συναγωγής.

Ωστόσο, πήρε περισσότερες από 14 ώρες στη φυσική ηλιακή ξήρανση. Η αποτελεσματικότητα της ξήρανσης στον ήλιο επηρεάζεται από τις κλιματολογικές συνθήκες όπως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη σχετική υγρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει διακυμάνσεις και δεν είναι επαρκής για να ξηράνει τα κάσιους μέσα σε επιτρεπτό χρόνο. Αυτός ο παρατεταμένος χρόνος ξήρανσης οδηγεί σε κακή ποιότητα προϊόντος η οποία δεν είναι αποδεκτή για καλλιέργειες όπως κάσιους. Και στις τρεις περιπτώσεις, ο ρυθμός ροής μειώνεται με τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία.

2.7.14 Θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη και του ξηραντήρα

Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από το ρυθμό ροής του αέρα εισόδου και από τη θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη και την ηλιακή ακτινοβολία. Το σχήμα 117 δείχνει τη διακύμανση της απόδοσης του συλλέκτη με το χρόνο στην υβριδική φυσική και εξαναγκασμένη λειτουργία.

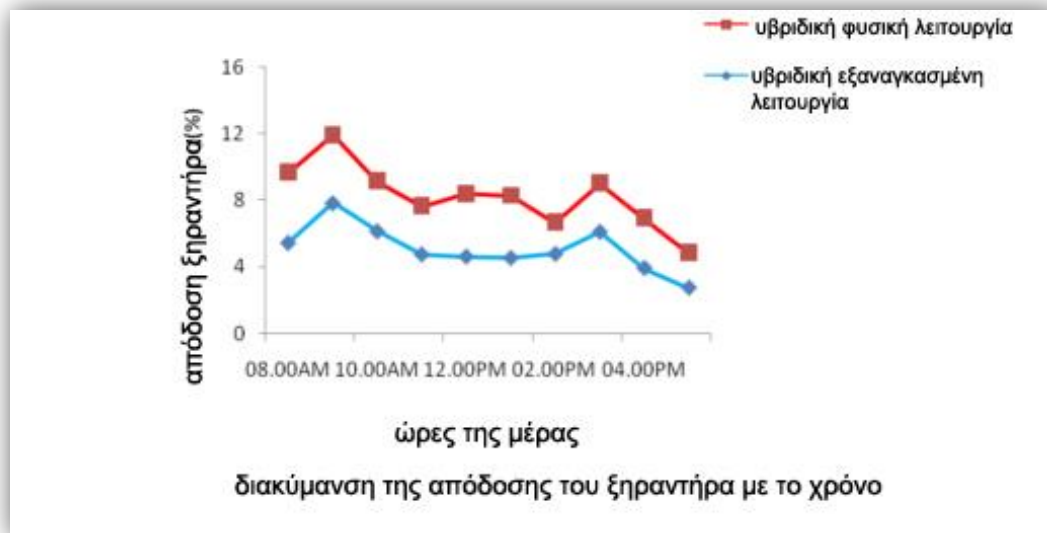


Σχ. 117 [239] διακύμανση της απόδοσης του συλλέκτη με το χρόνο

Η μέγιστη απόδοση του 40%-55% λήφθηκε στην υβριδική φυσική λειτουργία. Η απόδοση του συλλέκτη που κυμάνθηκε από 58% έως 90% λήφθηκε στην υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία.

Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη θέρμανσης αέρα ακολούθησε μια παρόμοια μορφή με αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ολική απόδοση της ξήρανσης εκτιμήθηκε για το σύστημα με βάση την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την εξάτμιση της υγρασίας από το προϊόν προς την ολική εισροή ενέργειας (ηλιακή ακτινοβολία + καύσιμο βιομάζας) που μπήκε στον ξηραντήρα.

Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης υπολογίστηκε μέσω της μέσης θερμοκρασίας του θαλάμου ξήρανσης από τυποποιημένους πίνακες ατμού. Καυσόξυλα 0.5 kg/hr κάηκαν κατά τη διάρκεια της φυσικής λειτουργίας. Η ωριαία απόδοση του ξηραντήρα που λειτουργήσε σε λειτουργία φυσικής συναγωγής κυμάνθηκε από 2% έως 4%. Καυσόξυλα 0.75 kg/hr κάηκαν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας εξαναγκασμένης συναγωγής. Η ωριαία απόδοση του ξηραντήρα σε λειτουργία εξαναγκασμένης συναγωγής κυμάνθηκε από 3% έως 8% όπως φαίνεται στο σχήμα 118.



Σχ. 118 [239] διακύμανση της απόδοσης του ξηραντήρα με το χρόνο

Επίσης η μέση απόδοση του ξηραντήρα και η απόδοση του συλλέκτη και στις δύο λειτουργίες απεικονίζονται στον πίνακα 24.

λειτουργία ξήρανσης	απόδοση συλλέκτη (%)	συνολική απόδοση του συστήματος ξήρανσης (%)
υβριδική φυσική λειτουργία	46.6	3.17
υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία	75.64	5.08

Π. 24 [239] απόδοση του συλλέκτη και του ξηραντήρα σε διαφορετικές λειτουργίες ξήρανσης (%)

2.7.15 Αποτελεσματικότητα της ξήρανσης

Η διακύμανση του χρόνου ξήρανσης έναντι του συντελεστή αποτελεσματικότητας φαίνεται στο σχήμα 119.



Σχ. 119 [239]διακύμανση του συντελεστή αποτελεσματικότητας με το χρόνο

Παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας ήταν πάντα μεγαλύτερος του 1 εκτός από την τελευταία φάση του χρόνου ξήρανσης. Ένας υψηλός συντελεστής αποτελεσματικότητας 13.25 δείχνει τη χρησιμότητα του υβριδικού ξηραντήρα σε σύγκριση με την ξήρανση στον ήλιο.

2.7.16 Αξιολόγηση ποιότητας και οφέλη εξοικονόμησης ενέργειας

Οι αποξηραμένοι πυρήνες κάσιους και στις δύο συνθήκες δοκιμών αναλύθηκαν για την ποιότητα τους. Οι πυρήνες ταξινομήθηκαν χειροκίνητα χρησιμοποιώντας χέρι/κόσκινο. Η ταξινόμηση διεξάχθηκε σύμφωνα με τα κριτήρια εξαγωγών που έχουν τεθεί από την κυβέρνηση της Ινδίας. Ο πυρήνας που ξηράνθηκε και στις δύο λειτουργίες είχε μέγεθος σύμφωνο με την W 240 (μεταξύ 485-530 πυρήνες ανά kg) ανώτερη ποιοτική βαθμίδα. Δεν υπήρξαν πολλά καψαλίσματα και πολλές ρωγμές στους πυρήνες στα αποξηραμένα δείγματα στην υβριδική εξαναγκασμένη και φυσική λειτουργία.

Η συμβατική ξήρανση των καρπών κάσιους χρησιμοποιώντας ατμό για τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία από το 10% σε κάτω από 3.5% είναι μία απ' τις ενεργοβόρες λειτουργίες στη βιομηχανία επεξεργασίας καρπών κάσιους. Ο υβριδικός ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας και βιομάζας μειώνει το χρόνο ξήρανσης και το κόστος της ενέργειας σε σχέση με τη συμβατική λειτουργία ξήρανσης. Το σύστημα θα μπορούσε να είναι μία απ' τις βιώσιμες επιλογές για τους αγρότες καρπών κάσιους.

2.7.17 Συμπεράσματα

Ο υβριδικός ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας – βιομάζας κατασκευάστηκε για την ξήρανση 40kg κάσιους ανά παρτίδα. Η μέση απόδοση του συλλέκτη του συστήματος στην υβριδική εξαναγκασμένη λειτουργία είναι 75.6%. Θερμοκρασίες μεταξύ 55 και 75 °C μπορούν να ληφθούν ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Αυτή είναι μια πρακτική τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση κάσιους καθώς και άλλων γεωργικών προϊόντων. Αυτό το σύστημα θα μπορούσε να μειώσει το χρόνο ξήρανσης στο μισό σε σύγκριση με τη φυσική ηλιακή ξήρανση και παράγει υψηλής ποιότητας κάσιους (W240). Βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα του ξηραντήρα θα μπορούσαν να επιτευχθούν μέσω περαιτέρω τροποποίησης η οποία περιλαμβάνει:

- (1) Την παροχή παραβολικού ανακλαστήρα και στις δύο πλευρές του συλλέκτη,
- (2) Αύξηση της απορροφητικότητας της απορροφητικής πλάκας με αντικατάσταση της πλάκας χαλκού με πλάκα αλουμινίου,
- (3) Αύξηση των ρυθμών ροής αέρα, και
- (4) Παροχή ηλεκτρικού πηνίου θέρμανσης PVT.

Ο ανεπτυγμένος ξηραντήρας είναι πιο κατάλληλος για τους αγρότες κάσιους σε αγροτικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών.

2.8 Ξηραντήρας ηλιακής ενέργειας – βιομάζας χωρίς φορτίο

2.8.1 Ρυθμίσεις παραμέτρων υβριδικού συστήματος ηλιακής ενέργειας και βιομάζας

2.8.2 Ηλιακός συλλέκτης

Ο ηλιακός συλλέκτης διπλού περάσματος κατασκευάστηκε από γαλβανισμένη πλάκα και γωνίες αλουμινίου. Το κενό μεταξύ του καλύμματος και του απορροφητή είναι 0.06m, και το κενό μεταξύ του απορροφητή και του πίσω μέρους είναι 0.03m. Η εξωτερική διάσταση του συλλέκτη είναι 1.75m x 1.1m x 0.14m. Ο ηλιακός συλλέκτης μονώνεται στις πίσω, αριστερές και δεξιές ακμές με υαλοβάμβακα πάχους 0.05m. Η γωνία κλίσης του ηλιακού συλλέκτη είναι 40 μοίρες απ' το οριζόντιο επίπεδο.

2.8.3 Θάλαμος ξήρανσης

Ο θάλαμος ξήρανσης κατασκευάστηκε από αλουμινένιες γωνίες για να αποφευχθεί το μεγάλο βάρος. Οι εξωτερικές διαστάσεις του θαλάμου είναι 1.1m x 0.42m x 0.9m. Υπάρχουν τρεις δίσκοι ξήρανσης, κάθε ένας με μια βάση συρματοπλέγματος, και με συνολική ωφέλιμη επιφάνεια ξήρανσης $0.9m^2$

2.8.4 Θερμική εφεδρική μονάδα

Η μονάδα αποτελείται από δύο τμήματα. Το χαμηλότερο τμήμα είναι ο καυστήρας που είναι κυλινδρικού σχήματος, καίει το καύσιμο και παράγει τα καυσαέρια, και το ανώτερο τμήμα είναι ένας εναλλάκτης για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του αέρα και των καυσαερίων. Οι διαστάσεις του καυστήρα είναι 0.4m x 0.35m. Ο εναλλάκτης θερμότητας έχει μήκος 0.45m.

Το καυσαέριο από τη θερμική εφεδρική μονάδα είναι συνδεδεμένο στην καμινάδα του ξηραντήρα για την παραγωγή οδηγούσας δύναμης για την ενίσχυση του ρυθμού ροής μέσα στον ξηραντήρα. Η εσωτερική διάμετρος του καυσαερίου προς την καμινάδα είναι 0.05m.

2.8.5 Πειραματική διάταξη και όργανα

Βαθμονομημένα θερμοστοιχεία τύπου K (νικελιοχρωμιούχου κράματος-νικελιοαργιλίουχου κράματος) που μετρούν θερμοκρασία στο εύρος -50 έως 1000 °C με ακρίβεια $\pm 0.1^\circ C$ χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των θερμοκρασιών σε 26 σημεία μέσα στο σύστημα. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε κάθε δίσκο του ξηραντήρα, στην έξοδο του ξηραντήρα, στην έξοδο του συλλέκτη προς την είσοδο του ξηραντήρα, στην έξοδο της θερμικής εφεδρικής μονάδας προς την είσοδο του ξηραντήρα, και πάνω απ' την είσοδο του καυσαερίου προς την καμινάδα.

Θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του απορροφητή σε τρία σημεία για τη λήψη της μέσης θερμοκρασίας, στο κάλυμμα του συλλέκτη από μέσα και απ' έξω, και στα τοιχώματα του ξηραντήρα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό. Όλα τα θερμοστοιχεία συνδέθηκαν στον καταγραφέα

δεδομένων τύπου GL820-UM-851. Ένας ηλιακός μετρητής τύπου SL200 με ακρίβεια $\pm 5\%$ χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ακτινοβολίας. Η ταχύτητα του θερμού αέρα μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ανεμοδείκτη και ανεμόμετρο τύπου VT200 με ακρίβεια $\pm 3\%$. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα.

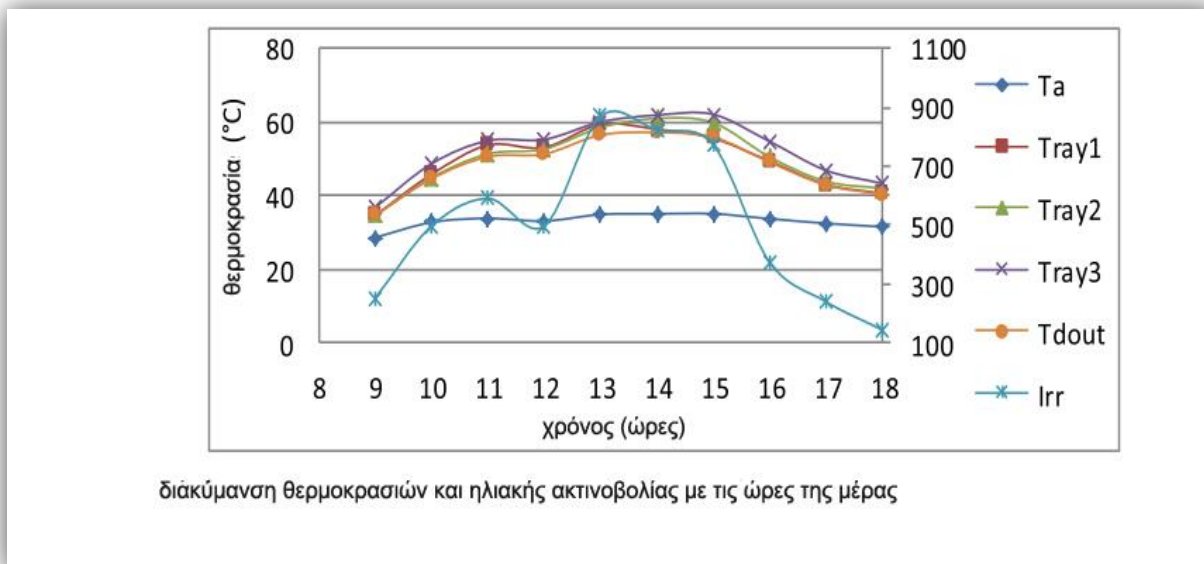


Σχ. 120 [240]Ο πειραματικός υβριδικός ηλιακός ξηραντήρας με βιομάζα

2.8.6 Αποτελέσματα και συζήτηση για τον υβριδικό ξηραντήρα χωρίς φορτίο

Το πείραμα του υβριδικού ξηραντήρα ηλιακής ενέργειας και βιομάζας έγινε στην περιοχή ηλιακής έρευνας (SRS) στο τεχνολογικό πανεπιστήμιο Petronas με 5 επαναλήψεις για τη λήψη των μέσων δεδομένων με αποδεκτή αβεβαιότητα.

Το σχήμα 121 δείχνει τα αποτελέσματα της αποτελεσματικότητας του ξηραντήρα και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους με τις ώρες της μέρας.

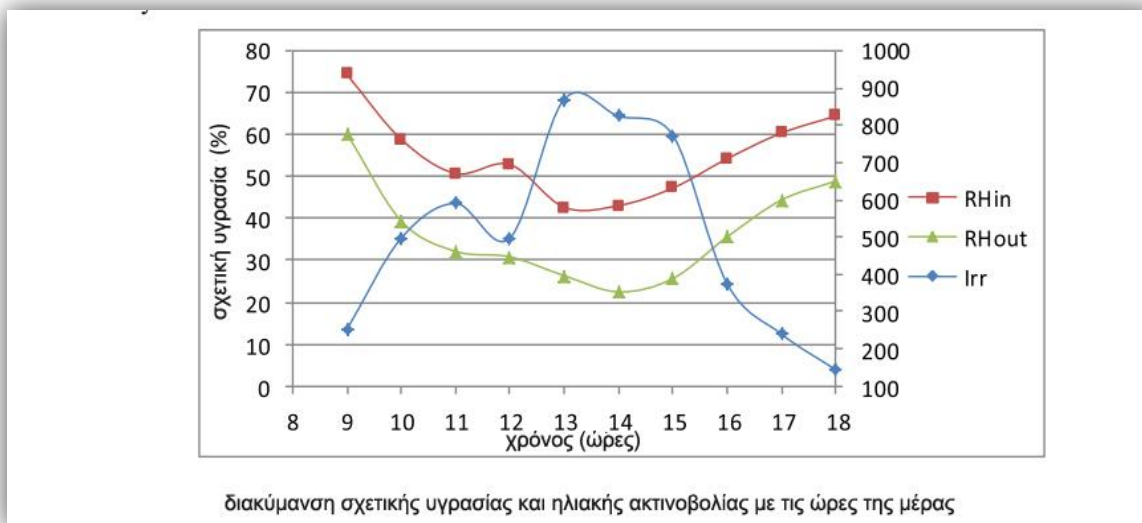


Σχ. 121 [240] διακύμανση θερμοκρασιών και ηλιακής ακτινοβολίας με τις ώρες της ημέρας

Η μέγιστη ακτινοβολία ήταν μεταξύ 12:00 και 15:00. Είναι εμφανές ότι όταν η ηλιακή ακτινοβολία μειώθηκε απότομα μετά τις 15:00, η θερμοκρασία των δίσκων παρέμεινε πάνω απ’ τους 45°C για πολύ ώρα επειδή τα τοιχώματα του θαλάμου ξήρανσης (μπροστά, αριστερά και δεξιά) είναι κατασκευασμένα με διπλό στρώμα και κενό αέρα 5mm.

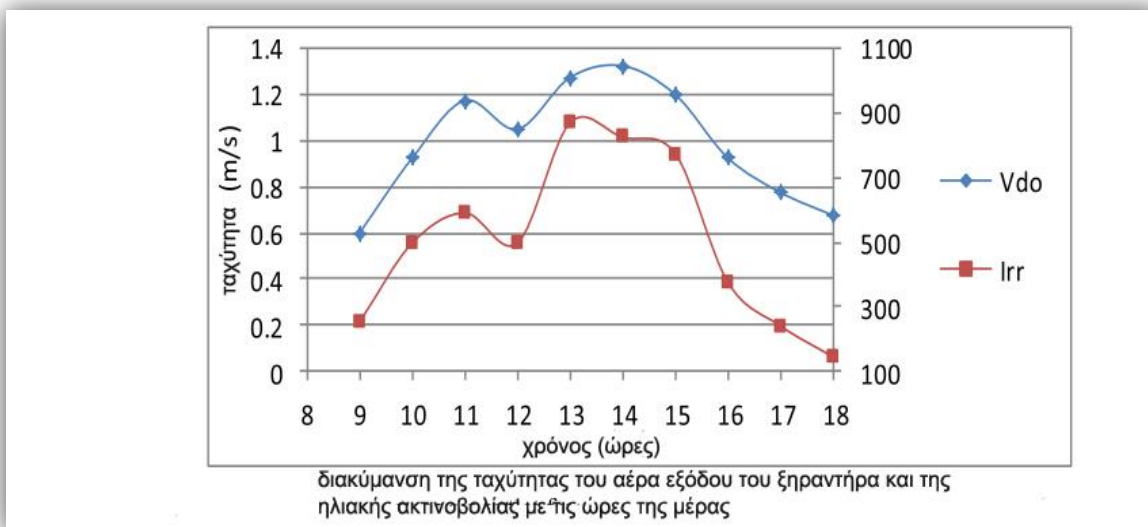
Αυτή η τεχνική μειώνει τις απώλειες από τα τοιχώματα του ξηραντήρα και επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να εισχωρήσει μέσα στον ξηραντήρα. Επίσης είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του ξηραντήρα είναι κατάλληλη για την ξήρανση σχεδόν όλων των προϊόντων.

Η διακύμανση της σχετικής υγρασίας εισόδου και εξόδου καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας με τις ώρες της μέρας απεικονίζονται στο σχήμα 122.



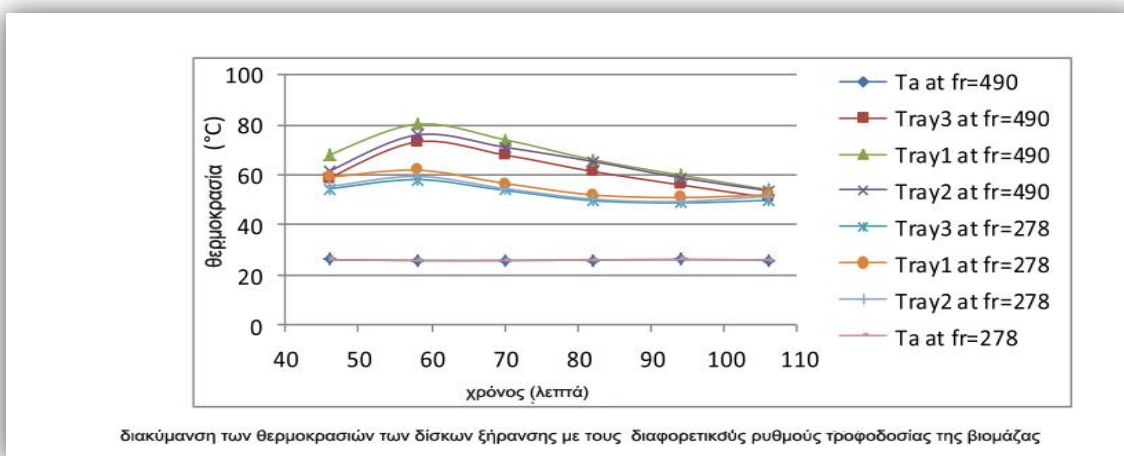
Σχ. 122 [240] διακύμανση σχετικής υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας με τις ώρες της μέρας

Η σχετική υγρασία εξόδου (RHout) ήταν μικρότερη από τη σχετική υγρασία εισόδου (RHin) στο εύρος 15-23%. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας οδήγησε σε μείωση της σχετικής υγρασίας. Η διακύμανση της ταχύτητας αέρα εξόδου και της ηλιακής ακτινοβολίας απεικονίζονται στο σχήμα 123.



Σχ. 123 [240] διακύμανση της ταχύτητας του αέρα εξόδου του ξηραντήρα και της ηλιακής ακτινοβολίας με τις ώρες της ημέρας

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συμπεριφορά της ταχύτητας ήταν η ίδια με τη συμπεριφορά της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ταχύτητα ήταν στο εύρος 0.6-1.35m/s δια μέσου της επιφάνειας εξόδου ($0.0176m^2$) όταν η ηλιακή ακτινοβολία βρισκόταν στο εύρος 150 – 880 W/ m² . Η διακύμανση της θερμοκρασίας των δίσκων με την αλλαγή του ρυθμού τροφοδοσίας καυσόξυλων απεικονίζεται στο σχήμα 124.



Σχ. 124 [240] διακύμανση θερμοκρασιών των δίσκων ξήρανσης με τους διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας της βιομάζας

Δύο ρυθμοί τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκαν για να ερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του ξηραντήρα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σε ρυθμό τροφοδοσίας 490g/hr η μέγιστη θερμοκρασία του ξηραντήρα ήταν 80°C . Αυτό δεν είναι βιώσιμο για την ξήρανση όλων των προϊόντων. Σε ρυθμό

τροφοδοσίας 278g/hr η μέγιστη θερμοκρασία του ξηραντήρα ήταν 62°C , το οποίο είναι πιο κατάλληλο για την ξήρανση πολλών τύπων προϊόντων. Η μέγιστη θερμοκρασία του παρόντος ξηραντήρα σε ηλιακή λειτουργία ήταν 63°C .

2.8.7 Συμπεράσματα

Πειραματική αξιολόγηση των παραμέτρων ξήρανσης του υβριδικού ηλιακού ξηραντήρα διεξάχθηκε χρησιμοποιώντας το σχεδιασμένο και κατασκευασμένο πρωτότυπο. Στην ηλιακή λειτουργία, η μέγιστη θερμοκρασία του ξηραντήρα είναι 63°C και επιτυγχάνεται στην ώρα μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας. Η σχετική υγρασία εξόδου είναι μικρότερη από τη σχετική υγρασία εισόδου στο εύρος 15% με 23%. Η θερμοκρασία ξήρανσης δεν είναι σταθερή και ακολουθεί την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ταχύτητα ήταν στο εύρος 0.6 – 1.35 m/s διαμέσου της επιφάνειας 0.0176 m^2 στην έξοδο όταν η ηλιακή ακτινοβολία ήταν στο εύρος $150 - 880\text{ W / m}^2$. Στη λειτουργία εφεδρικής θέρμανσης, η σχετική υγρασία εξόδου είναι μικρότερη από τη σχετική υγρασία εισόδου στο εύρος 30% με 50%.

Επομένως η υβριδική ηλιακή ξήρανση είναι πιο αποδοτική σε σύγκριση με τη μικτή λειτουργία. Για επέκταση της έρευνας, συνίσταται να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα ξήρανσης διάφορων τύπων γεωργικών προϊόντων, καθώς και ψαριών.

3 ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Γεωθερμία

Γεωθερμία (Γη + θερμός) είναι ο κλάδος της Γεωφυσικής που ερευνά τα θερμικά φαινόμενα, τα οποία συμβαίνουν στο εσωτερικό της Γης. Κάθε γεωφυσικό φαινόμενο συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με τη γεωθερμία, αφού είτε συνοδεύεται από μετακίνηση ποσοτήτων θερμότητας, είτε επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Η θερμότητα λοιπόν είναι μια μορφή ενέργειας, και η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης, η οποία προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα.

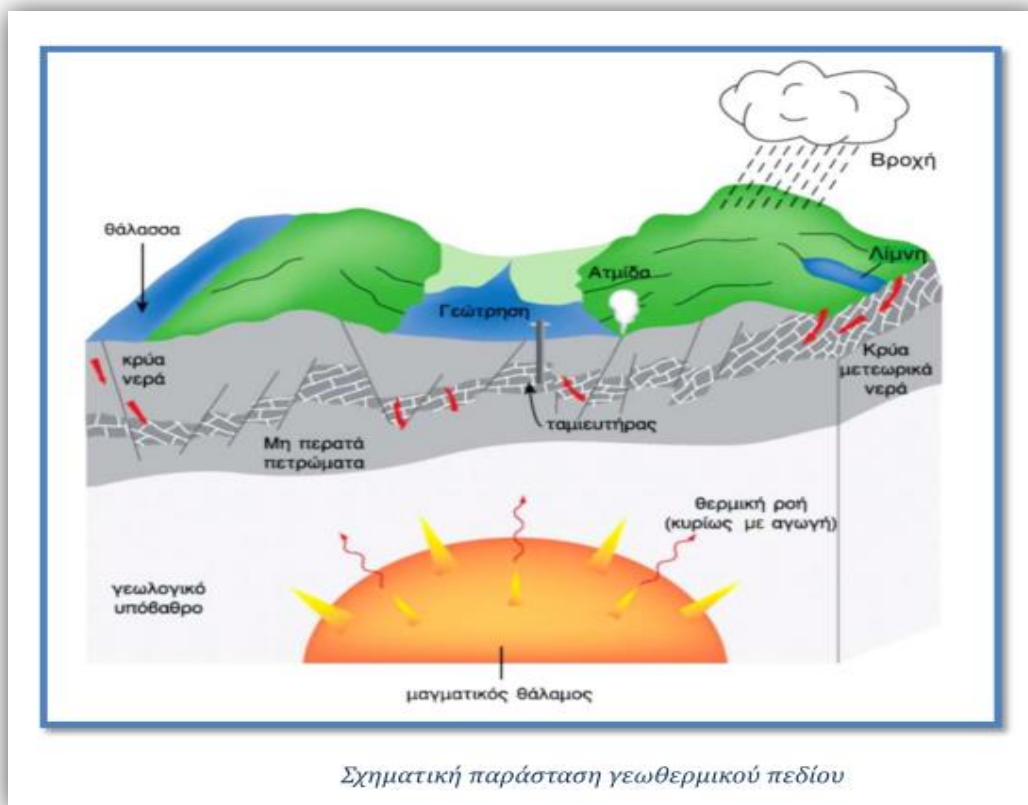
Συνήθως όμως, ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο. Ένας κλάδος λοιπόν που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις μέρες μας, είναι η εφαρμοσμένη έρευνα στον τομέα της Γεωθερμίας, που αποσκοπεί στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας, η οποία ανήκει στις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Κατσιφάρακης, 2009).

3.1.1 Γεωθερμικά πεδία

Η συγκεντρωμένη στο εσωτερικό της γης θερμότητα μεταφέρεται κοντά στην επιφάνειά της μέσω γεωλογικών φαινομένων, δημιουργώντας έτσι υπέρθερμες περιοχές με γεωθερμική βαθμίδα μεγαλύτερη από 700 °C/km. Το σημαντικότερο από αυτά τα γεωλογικά φαινόμενα είναι αυτό της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών: Το εξωτερικό κέλυφος της γης, η λιθόσφαιρα, δεν είναι ενιαίο αλλά αποτελείται από πολλά κομμάτια, τις λιθοσφαιρικές πλάκες. Οι πλάκες αυτές βρίσκονται σε μια διαρκή κίνηση που πραγματοποιείται με πολύ μικρή ταχύτητα, μερικά μόλις εκατοστά το χρόνο. Ανάλογα με τη σχετική κίνηση των πλακών, στα όριά τους παρατηρούνται τρία διαφορετικά φαινόμενα: Οι δύο πλάκες αποκλίνουν, δηλαδή κινούνται έτσι που να απομακρύνονται η μια από την άλλη. Στο κενό που αφήνουν, αναβλύζει μάγμα που στερεοποιείται, γεμίζει το κενό και δημιουργεί καινούργια λιθόσφαιρα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι λεγόμενες «ράχες». Οι δύο πλάκες συγκλίνουν έτσι που η μια να βυθίζεται κάτω από την άλλη και τελικά να απορροφάται από το μανδύα ή να καταστρέφεται.

Φαινόμενα τριβής στα όρια των πλακών έχουν σαν αποτέλεσμα, μέρος της μηχανικής ενέργειας να μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή η θερμότητα εκτονώνεται με τη μορφή ηφαιστειακής δράσης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι «τάφροι». Στις τάφρους η λιθόσφαιρα καταστρέφεται με το ρυθμό που δημιουργείται στις ράχες. Οι δύο πλάκες «γλιστρούν» η μια παράλληλα στην άλλη με τρόπο που ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται λιθόσφαιρα. Τόσο οι «τάφροι» όσο και οι «ράχες» συνδέονται με ηφαιστειακή δράση και κατά συνέπεια με υπέρθερμες περιοχές. Γι' αυτό και τα σημαντικότερα γεωθερμικά πεδία εντοπίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές, δηλαδή στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, τις λεγόμενες «ζώνες σεισμικών εστιών». Περιοχές με μικρότερο γεωθερμικό ενδιαφέρον, δηλαδή με γεωθερμική βαθμίδα λίγο υψηλότερη από τη μέση, μπορεί να βρεθούν και εκτός των εν λόγω ζωνών. Γενικά, θα μπορούσαμε να πούμε πως γεωθερμικά πεδία είναι οι περιοχές στις οποίες οι συνθήκες για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ευνοϊκές. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα (Κατσιφάρακης, 2009):

- Αυξημένη (σε μικρό ή μεγάλο βαθμό) θερμική ροή. Αυτή συνδέεται με την ύπαρξη μαγματικού όγκου σε μικρό σχετικά βάθος.
- Ύπαρξη υπόγειου υδροφορέα, σε βάθος μικρότερο των 3 km, ο οποίος θερμαίνεται από τον μαγματικό όγκο. Μεταξύ του υδροφορέα και της πηγής θερμότητας πρέπει να υπάρχουν θερμοπερατά στρώματα ή ρήγματα, που ευκολύνουν την κυκλοφορία ρευστών.
- Ύπαρξη πρακτικά αδιαπέρατου, θερμικά και υδραυλικά, στρώματος πάνω από τον υδροφορέα, για την προστασία του θερμικού περιεχομένου του.



Σχ. 125 [241] Σχηματική παράσταση γεωθερμικού πεδίου

Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων

Είδος πηγής	(α)	(β)	(γ)	(δ)
Χαμηλής ενθαλπίας	$T < 90^{\circ}\text{C}$	$T < 125^{\circ}\text{C}$	$T < 100^{\circ}\text{C}$	$T < 150^{\circ}\text{C}$
Μέσης ενθαλπίας	$90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$	$125^{\circ}\text{C} < T < 225^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C} < T < 200^{\circ}\text{C}$	-
Υψηλής ενθαλπίας	$T > 150^{\circ}\text{C}$	$T > 225^{\circ}\text{C}$	$T > 200^{\circ}\text{C}$	$T > 150^{\circ}\text{C}$

(Πηγή: Dickson and Fanelli (2004))

Π. 25 [241] Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων

Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται, όπως και οι γεωθερμικές ενεργειακές πηγές, σε υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας. Είναι φανερό ότι τα πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι πολύ πιο αποδοτικά από οικονομική και τεχνική άποψη. Τα χαμηλής ενθαλπίας όμως είναι πολύ περισσότερα.

Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις.

- Η **υψηλής ενθαλπίας** (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς τέτοιων εγκαταστάσεων το 1979 ήταν 1.916 MW με παραγόμενη ενέργεια 12×10⁶ kWh/yr.
- Η **μέσης ενθαλπίας** (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. με κλειστό κύκλωμα φρέον που έχει χαμηλό σημείο ζέσεως).
- Η **χαμηλής ενθαλπίας** (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.

Η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στο Λαρνταρέλλο (Lardarello) της Ιταλίας, όπου από τα μέσα του περασμένου αιώνα χρησιμοποιήθηκε ο φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και να θερμάνει διάφορα κτίρια. Το 1904 έγινε στο ίδιο μέρος η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεωθερμία (σήμερα παράγονται εκεί 2,5 δισ. kWh/y). Σπουδαία είναι η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας από την Ισλανδία, όπου καλύπτεται πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών της για ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση.

Η ύπαρξη όμως υψηλής γεωθερμικής βαθμίδας σε κάποια περιοχή δεν είναι η μοναδική συνθήκη-προϋπόθεση για την ύπαρξη εκμεταλλεύσιμου γεωθερμικού πεδίου.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι πρωτογενώς αποθηκευμένη μέσα στα πετρώματα, είναι διασκορπισμένη μέσα στη μάζα τους και πρέπει να συγκεντρωθεί και να μεταφερθεί στην επιφάνεια της γης, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί.

Το μεταλλικό νερό (σε υγρή ή αέρια φάση) που περιέχεται μέσα σε πορώδη πετρώματα ή σε συστήματα ρηγμάτων αποτελεί το μέσο που μεταφέρει τη θερμότητα από τα πετρώματα αυτά στην επιφάνεια της γης. Έτσι, η παραγωγικότητα μιας θερμικής περιοχής προσδιορίζεται και συχνά καθορίζεται από την υδρολογία των γεωλογικών σχηματισμών. Δεν έχουν όμως όλες οι θερμικές περιοχές κατάλληλη υδρολογία που αποτελεί τη δεύτερη συνθήκη για την ύπαρξη εκμεταλλεύσιμου γεωθερμικού πεδίου. Κατά συνέπεια, ένα φυσικό γεωθερμικό πεδίο είναι συνδυασμός θερμών πετρωμάτων και ύπαρξης νερού που να κυκλοφορεί μέσα σ' αυτά.

Το οικονομικό ενδιαφέρον των γεωθερμικών πεδίων, όπως και όλων των γεωθερμικών πηγών, εξαρτάται και από τη μέγιστη παροχή γεωθερμικού ρευστού που μπορεί να αντληθεί, χωρίς εξάντληση του νερού του θερμού υδροφορέα και χωρίς σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του (δηλαδή με βιώσιμη διαχείριση της ανανεώσιμης ενεργειακής πηγής).

Η παροχή αυτή εξαρτάται από τον όγκο και τη διαπερατότητα του υδροφόρου στρώματος, καθώς και από την τροφοδοσία του σε νερό και τη διαδικασία θέρμανσής του.

3.1.2 Προέλευση των γεωθερμικών ρευστών

Κύριο γεωθερμικό ρευστό είναι το νερό, σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται στα επόμενα και ο όρος γεωθερμικό νερό. Το γεωθερμικό ρευστό έχει και άλλα στερεά ή αέρια συστατικά, τα οποία είναι επιβλαβή και δυσχεραίνουν την θερμική εκμετάλλευση, αν και μερικές φορές δίνουν χρήσιμα παραπροϊόντα (όπως CO₂ για τη βιομηχανία αναψυκτικών).

Το γεωθερμικό νερό προέρχεται από (Κατσιφαράκης, 2009):

- Μετεωρικό νερό (Meteoric water), δηλαδή νερό που πρόσφατα συμμετείχε στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία και κατέβηκε μέχρι τον θερμό υδροφορέα.
- Ωκεάνιο νερό (Ocean water), που εισδύει στον φλοιό στις περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης.
- Νέο νερό (Juvenile water), που προέρχεται από το μάγμα και δεν συμμετείχε προηγουμένως στην υδρόσφαιρα.

- Συγγενές νερό (Connate water), δηλαδή απολιθωμένο νερό, που εμπεριέχεται σε ιζήματα από τον χρόνο εναπόθεσής τους.
- Μαγματικό νερό (Magmatic water), δηλαδή νερό άλλων κατηγοριών (όχι νέο), που σε κάποια φάση αποτέλεσε μέρος του μάγματος.
- Μεταμορφικό νερό (Metamorphic water), που προκύπτει από την ανακρυστάλλωση υδρομεταλλικών ενώσεων κατά τη διαδικασία της μεταμόρφωσης.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση των σταθερών ισotόπων του υδρογόνου και του οξυγόνου, το γεωθερμικό νερό έχει κυρίως μετεωρική προέλευση. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύθηκε με πειράματα, που αφορούν στη σύσταση του γεωθερμικού ρευστού. Το ωκεάνιο νερό αποτελεί την κύρια πηγή των υποθαλάσσιων γεωθερμικών συστημάτων, που βρίσκονται κοντά σε ωκεάνιες ράχες, αλλά και ορισμένων γεωθερμικών πεδίων, που βρίσκονται στην ξηρά. Τα ρευστά των πεδίων αυτών διακρίνονται από τη μεγάλη περιεκτικότητά τους σε μέταλλα, που είναι αποτέλεσμα της μεγάλης οξύτητάς τους.

3.1.3 Γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας

Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας, που παρέχεται από τα αντίστοιχα πεδία, χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκμετάλλευση άρχισε από γεωθερμικά πεδία που παράγουν ξηρό ατμό. Η πρώτη μονάδα λειτούργησε στο Larderello, όπως αναφέρθηκε, το 1913 και είχε ισχύ 250 kW.

Σήμερα η εκμετάλλευση έχει επεκταθεί και σε πεδία, τα οποία παράγουν θερμό νερό, ενώ η συνολική εγκαταστημένη ισχύς έχει ξεπεράσει τα 8000 MW. Στην Ελλάδα υπάρχουν γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, που συνδέονται με το ρηαιοσειακό τόξο του Αιγαίου. Πιο γνωστό είναι το πεδίο της Μήλου, όπου έγινε προσπάθεια για κατασκευή σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς όμως να ολοκληρωθεί. Εξ ίσου αξιόλογο είναι και το γεωθερμικό πεδίο της Νισύρου.

3.1.4 Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας

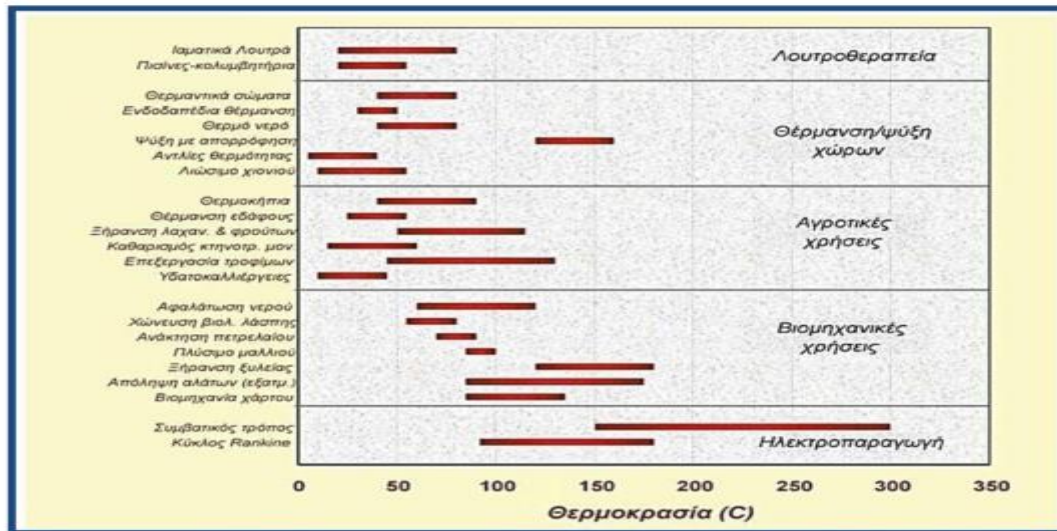
Στις περιοχές της Γης με κανονική θερμοβαθμίδα, δηλαδή στο μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη, η θερμοκρασία σε βάθος 2000 m φθάνει τους 80 οC. Επομένως όλοι οι υδροφορείς που υπάρχουν σ' αυτό το βάθος, αποτελούν γεωθερμικές πηγές χαμηλής ενθαλπίας. Για την εκμετάλλευσή τους απαιτούνται γεωτρήσεις μεγάλου βάθους. Γι' αυτό το κόστος κατασκευής και λειτουργίας είναι σχετικά μεγάλο. Πάντως σε ορισμένες χώρες γίνεται εκτεταμένη εκμετάλλευση των πηγών αυτών. Ενεργειακές πηγές πολύ χαμηλής ενθαλπίας αποτελούν οι υδροφορείς που βρίσκονται σε μικρό βάθος. Σε κλιματικές συνθήκες όμοιες με τις ελληνικές, η θερμοκρασία σε βάθος 30-50 m κυμαίνεται από 12 ως 15 °C.

Επομένως το νερό των υδροφορέων αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, με τη βοήθεια αντλίας θερμότητας. Η απόδοση των πηγών αυτών βελτιώνεται, αν το καλοκαίρι διοχετεύεται στον υδροφόρο νερό, που έχει θερμανθεί με ηλιακούς συλλέκτες (ηλιογεωθερμία). συνδυασμός αυτός παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τη χώρα μας.

Κριτήρια αξίας των γεωθερμικών πηγών χαμηλής ενθαλπίας είναι το ποσό θερμίδων που παρέχουν και η θερμοκρασία του παρεχομένου νερού. Για τον λόγο αυτό η ενέργεια που παράγεται από τις πηγές αυτές, μετρείται με βάση την ποσότητα πετρελαίου που υποκαθιστούν στη θέρμανση κάποιου χώρου (ή σε άλλη χρήση). Η μονάδα μέτρησης ονομάζεται TEP (Tonne Equivalent Petrole = Ισοδύναμο Τόνου Πετρελαίου).

3.1.5 Εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας

Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα οικονομικών δραστηριοτήτων και εφαρμογών ανάλογα με τη θερμοκρασία και την ποιότητα των ρευστών. Μάλιστα μπορούν να διακριθούν σε ηλεκτρικές και άμεσες χρήσεις.



Σχ. 126 [241] Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal

Στις άμεσες χρήσεις γίνεται απευθείας εκμετάλλευση της θερμότητας των ρευστών (χωρίς να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια). Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμίας παρουσιάζονται συνοπτικά στο τροποποιημένο διάγραμμα Lindal. Το διάγραμμα αυτό είναι ενδεικτικό, γεγονός που σημαίνει ότι οι δυνατότητες χρήσης δεν περιορίζονται μόνο σ' αυτές που αναφέρονται στο διάγραμμα ούτε τα θερμοκρασιακά όρια που τίθενται είναι πολύ αυστηρά.

Γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία > 150 °C (υψηλής ενθαλπίας) χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι άμεσες χρήσεις (όπως η λουτροθεραπεία, η θέρμανση χώρων και η τηλεθέρμανση, οι αγροτικές εφαρμογές, οι υδατοκαλλιέργειες, διάφορες βιομηχανικές χρήσεις) καλύπτουν όλη την κλίμακα των θερμοκρασιών (12,5% της συνολικής χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας κατά το έτος 2000). Με κατάλληλη διαδικασία, όπως είναι ο λεγόμενος «δυναμικός κύκλος» (ή κύκλος Rankine με οργανικό ρευστό), είναι δυνατή η ηλεκτροπαραγωγή και με τη χρησιμοποίηση ρευστών χαμηλότερης θερμοκρασίας (85 – 150 °C).

Στην Ελλάδα υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο με ρευστά υψηλής ενθαλπίας όσο και με τον δυναμικό κύκλο. Το διάγραμμα του Lindal δίνει έμφαση σε δύο σημαντικές παραμέτρους που αφορούν στην αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων (Dickson and Fanelli, 2004):

- με διαδοχικές και συνδυασμένες εφαρμογές μπορούν να αυξηθούν οι πιθανότητες επιτυχούς έκβασης και η αποτελεσματικότητα των γεωθερμικών προγραμμάτων και
- η θερμοκρασία των ρευστών μπορεί να περιορίσει τις πιθανές χρήσεις. Παρόλα αυτά, το πεδίο εφαρμογών μπορεί να διευρυνθεί εάν ο σχεδιασμός ενός προγράμματος είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.

3.2 Ξήρανση γεωργικών προϊόντων με γεωθερμική ενέργεια

Η βασική ιδέα της ξήρανσης γεωργικών προϊόντων είναι η παροχή μακροχρόνιας αποθήκευσης χωρίς υποβιβασμό, έγκαιρης συγκομιδής η οποία μειώνει τις απώλειες, υψηλότερων τιμών των γεωργικών προϊόντων και καλύτερης ποιότητας.

Οι διαδικασίες βιομηχανικής ξήρανσης πραγματοποιούνται με κατανάλωση θερμότητας και ηλεκτρισμό για την οδήγηση του βοηθητικού εξοπλισμού. Οι βασικές ενεργειακές απαιτήσεις συνδέονται με τη θέρμανση του προϊόντος σε κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της εξάτμισης (της υγρασίας) και με την απαραίτητη ενέργεια για την εξάτμιση συγκεκριμένου ποσοστού της υγρασίας.

Κατά κύριο λόγο, η διαδικασία γίνεται με άμεση επαφή του προϊόντος (σπόροι, λαχανικά, φρούτα, κλπ.) προς ξήρανση με θερμό αέρα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (από 35 °C έως 80 °C). Επομένως, γεωθερμικά ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας για τη θέρμανση του αέρα για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων.

3.2.1 Βασικά στοιχεία

Η βασική απαίτηση για το σχεδιασμό του εξοπλισμού ξήρανσης είναι η μεγιστοποίηση της έντασης της διαδικασίας ξήρανσης υπό βέλτιστες συνθήκες για τη διατήρηση της ποιότητας του υλικού.

3.2.2 Ο αέρας ως ρευστό ξήρανσης

Ο αέρας ως ρευστό ξήρανσης στη διαδικασία ξήρανσης έχει διάφορες ευθύνες, όπως να μεταφέρει τη θερμότητα που είναι απαραίτητη για την εξάτμιση της υγρασίας, να μεταφέρει το εξατμισμένο νερό έξω απ' το φυτό, και, όταν η διαδικασία ξήρανσης τελειώσει, να ψύχει το αποξηραμένο προϊόν. Η θερμοκρασία του θερμού αέρα έχει περιορισμένες τιμές ανάλογα με τα εκάστοτε προϊόντα. Για παράδειγμα, η μέγιστη συνιστώμενη θερμοκρασία για την ξήρανση σπόρων είναι συνήθως 43 °C. Οι περισσότεροι σπόροι καταστρέφονται αν υποστούν θερμοκρασία 52 °C. Όταν πρόκειται για αλεσμένους σπόρους, οι θερμοκρασίες πάνω από 60 °C δεν είναι επιτρεπτές.

Συνεπώς, η διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης εξαρτάται από τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, δηλαδή όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ξήρανση του προϊόντος.

Υψηλότερη θερμοκρασία από την επιτρεπόμενη στη διαδικασία ξήρανσης μπορεί να προκαλέσει φυσικές και χημικές βλάβες στα προϊόντα. Όταν πρόκειται για σπόρους (ρύζι, καλαμπόκι, σόγια), αυτό σημαίνει ράγισμα και σκάσιμο. Υψηλότερες θερμοκρασίες απ' τις επιτρεπόμενες για φρούτα και λαχανικά προκαλούν βλάβη στα θρεπτικά συστατικά, τη δομή, υποβάθμιση του αρώματος, απώλεια του τυπικού χρώματος και άλλες απώλειες ποιότητας. Για την αποφυγή αυτών των συνεπειών είναι απαραίτητο:

- Να χρησιμοποιούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες στην ξήρανση
- Να ψύχονται οι αποξηραμένοι σπόροι αργά
- Να αφαιρείται μόνο ένα μέρος της περιεκτικότητας σε υγρασία (διαφορετικό για κάθε τύπο προϊόντος)
- Να χρησιμοποιείται αέρας με συγκεκριμένη υγρασία ως ρευστό ξήρανσης σε αυξημένη θερμοκρασία

3.2.3 Εναλλάκτες θερμότητας και γεωθερμική ενέργεια

Αναφέρθηκε ήδη ότι οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες για την ξήρανση βιο-προϊόντων είναι σχετικά χαμηλές (ειδικά για την ξήρανση σπόρων, δηλαδή από 40 °C έως 65 °C). Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος είναι κατάλληλο για την εφαρμογή γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας ως πηγή θερμότητας.

Ο κύριος λόγος για τη χρήση εναλλακτών θερμότητας στα γεωθερμικά συστήματα είναι να

περιορίζονται τα γεωθερμικά νερά με τις εγγενείς προσμίξεις τους όπου η διάβρωση ή η σκωρίωση μπορούν να ελεγχθούν με την επιλογή υλικού είτε όπου ο καθαρισμός είναι σχετικά εύκολος και οικονομικός. Ωστόσο, η εφαρμογή εναλλάκτη θερμότητας περιλαμβάνει επιπρόσθετη μείωση της διαθέσιμης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ρευστού. Για παράδειγμα από 3 °C έως 5 °C όταν χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας πλάκας.

Αρχικά, ο αέρας χρησιμοποιείται ως μέσο θέρμανσης για την ξήρανση. Έτσι, ο αέρας είτε θερμαίνεται από το δευτερεύον ρευστό (μέσω δευτερεύοντος εναλλάκτη θερμότητας) αν πρόκειται για πιο περίπλοκο σύστημα (ολοκληρωμένο γεωθερμικό σχέδιο όπου η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για διάφορους σκοπούς), είτε κυκλοφορεί ως δευτερεύον ρευστό στον εναλλάκτη θερμότητας, εξάγοντας την απαιτούμενη θερμική ενέργεια από το γεωθερμικό νερό.

Η προετοιμασία και η συντήρηση τροφίμων είναι ένα πρόβλημα καθώς πρέπει να διατηρούνται υψηλού επιπέδου συνθήκες υγιεινής. Αυτό, περιλαμβάνει την αναπόφευκτη εφαρμογή εναλλακτών θερμότητας όπου χρησιμοποιείται γεωθερμική ενέργεια.

3.2.4 Γεωθερμική πηγή

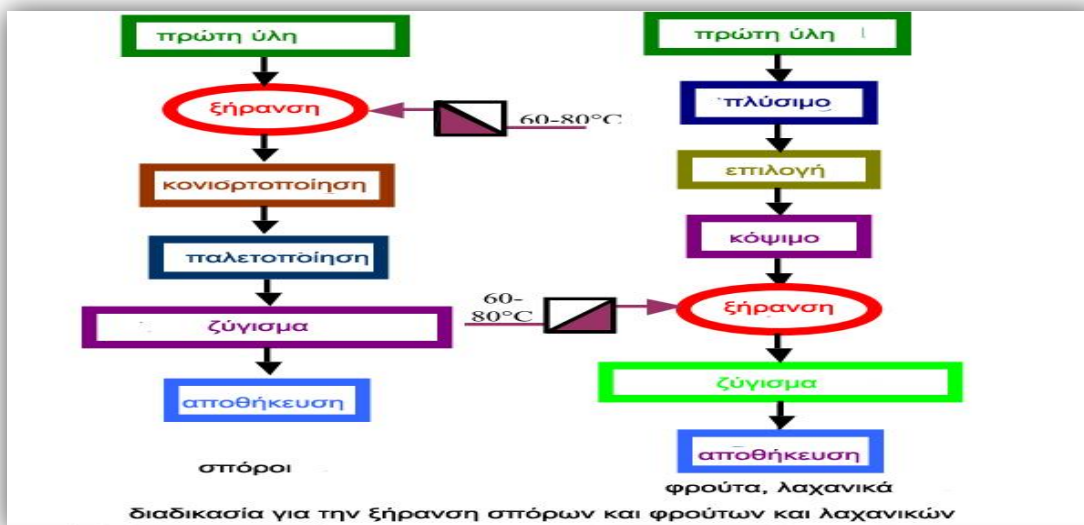
Όταν μια γεωθερμική πηγή εφαρμόζεται στην ξήρανση, οι ακόλουθοι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

- Απόσταση από την προγραμματισμένη τοποθεσία
- Θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού
- Ροή του γεωθερμικού νερού
- Χημική σύνθεση
- Πιθανή ενσωμάτωση σε άλλες εφαρμογές
- Κόστος της χρησιμοποιούμενης θερμοκρασιακής διαφοράς

Όταν υπάρχουν αυτά τα στοιχεία και συγκρίνονται με την επιθυμητή εφαρμογή, πρέπει να αποφασίζεται αν είναι εφικτή ή όχι η χρήση γεωθερμικής πηγής για την ξήρανση.

3.2.5 Διαδικασίες προ – ξήρανσης και μετα – ξήρανσης

Η τεχνολογία των διαδικασιών προ - ξήρανσης και μετα - ξήρανσης είναι διαφορετική ανάλογα με τον τύπο του αποξηραμένου προϊόντος (σπόροι, λαχανικά, φρούτα) και το επιθυμητό αποτέλεσμα (υγρασία, σχήμα, περαιτέρω επεξεργασία). Το σχήμα 127 παρουσιάζει τυπικές τεχνολογίες για σπόρους, φρούτα και λαχανικά.



Σχ.127 [242] Διαδικασία για την ξήρανση σπόρων φρούτων και λαχανικών

3.2.6 Ξηραντήρες γεωθερμικής ενέργειας

3.2.6.1 Σχεδιασμός ξηραντήρων

Οι θερμικοί υπολογισμοί εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πώς η θερμότητα εισάγεται στο υλικό προς ξήρανση. Για θέρμανση με συναγωγή, το καθεστώς ξήρανσης (οι παράμετροι οι οποίες καθορίζουν τον απαραίτητο χρόνο για την ξήρανση) καθορίζεται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα της ροής, και τη σχετική υγρασία του μέσου ξήρανσης. Παρόλα αυτά, για άλλους τρόπους εισαγωγής θερμότητας στη διαδικασία ξήρανσης (αγωγή, ακτινοβολία, υψίσυχο ρεύμα κλπ.) η ένταση της ροής θερμότητας είναι τέτοια ώστε η θερμοκρασία του υλικού να μην ξεπερνά τη δεδομένη οριακή τιμή. Η ξήρανση γεωργικών προϊόντων συνήθως περιλαμβάνει ξήρανση με συναγωγή.

Οι θερμικοί υπολογισμοί των κλίβανων ξήρανσης και οι υπολογισμοί της κατασκευής δεν εξαρτώνται μόνο από το πως η θερμότητα εισάγεται αλλά και από τον τύπο και την κατασκευή του κλίβανου.

3.2.6.2 Ξηραντήρες συναγωγής

Οι όροι αναφοράς για το σχεδιασμό του ξηραντήρα αποτελούνται από τον τύπο του ξηραντήρα, το υλικό προς ξήρανση με την αρχική και τελική του υγρασία, το καθεστώς ξήρανσης ή οι αρχικές παράμετροι του αέρα ξήρανσης. Όταν σχεδιάζονται ξηραντήρες συναγωγής είναι απαραίτητα τα ακόλουθα:

- Σύνθεση του κύριου συστήματος του ξηραντήρα, συμπεριλαμβανομένων των σχεδιαστικών παραμέτρων, των δεδομένων και αυτών που πρέπει να καθοριστούν
- Σύνθεση του ισοζυγίου υλικών και υπολογισμός της ροής υγρασίας στον ξηραντήρα
- Σχεδιασμός της διαδικασίας σε διάγραμμα h-x και καθορισμός της απαραίτητης ροής μάζας του ξηρού αέρα. Εκ των προτέρων, πρέπει να καθοριστεί η ροή θερμότητας που είναι απαραίτητη για τη θέρμανση του υλικού, έπειτα η ροή θερμότητας που εξάγεται στο περιβάλλον μέσω των τοιχωμάτων, και η ροή θερμότητας που είναι απαραίτητη για την εξάτμιση της υγρασίας και το εσωτερικό ισοζύγιο του ξηραντήρα
- Σύμφωνα με τις υπολογισμένες τιμές του εσωτερικού ισοζυγίου του ξηραντήρα, των ολικών θερμικών απωλειών και τις δεδομένες τιμές των αρχικών παραμέτρων του αέρα ξήρανσης και των τελικών παραμέτρων (θερμοκρασία ή σχετική υγρασία), σχεδιασμός του

διαγράμματος h-x της διαδικασίας ξήρανσης και εύρεση των παραμέτρων του αέρα ξήρανσης στην έξοδο του θαλάμου ξήρανσης

- Σύμφωνα με τη μάζα της εξατμισμένης υγρασίας στον ξηραντήρα, υπολογισμός της μάζας του αέρα ξήρανσης που είναι απαραίτητη για την εξάτμιση 1kg υγρασίας, και επίσης της ροής θερμότητας και της ολικής ποσότητας θερμότητας που είναι απαραίτητες για την ξήρανση του υλικού
 - Καθορισμός των τιμών των ειδικών όγκων του υγρού αέρα στην είσοδο και στην έξοδο σε σχέση με 1kg ξηρού αέρα
 - Σύμφωνα με τη ροή και τη μάζα του αέρα ξήρανσης στον ξηραντήρα και την πίεση που είναι απαραίτητη για να ξεπεραστεί η αεροδυναμική αντίσταση στον ξηραντήρα, επιλογή του κατάλληλου ανεμιστήρα, και επιλογή του εναλλάκτη θερμότητας σύμφωνα με τη ροή του αέρα ξήρανσης
- Η τελική φάση του σχεδιασμού του ξηραντήρα είναι ο καθορισμός των βασικών τεχνικό – οικονομικών δεικτών, δηλαδή:
- Συνολικές και ειδικές επενδυτικές δαπάνες
 - Δαπάνες ειδικής ενέργειας
 - Απαραίτητος αριθμός ανθρώπων που πρέπει να προσληφθούν για αξιοποίηση του ξηραντήρα
 - Τιμή για την ξήρανση 1kg εξατμισμένης υγρασίας

3.2.6.3 Τύποι ξηραντήρων συναγωγής

Οι τρεις βασικοί τρόποι ξήρανσης με συναγωγή είναι:

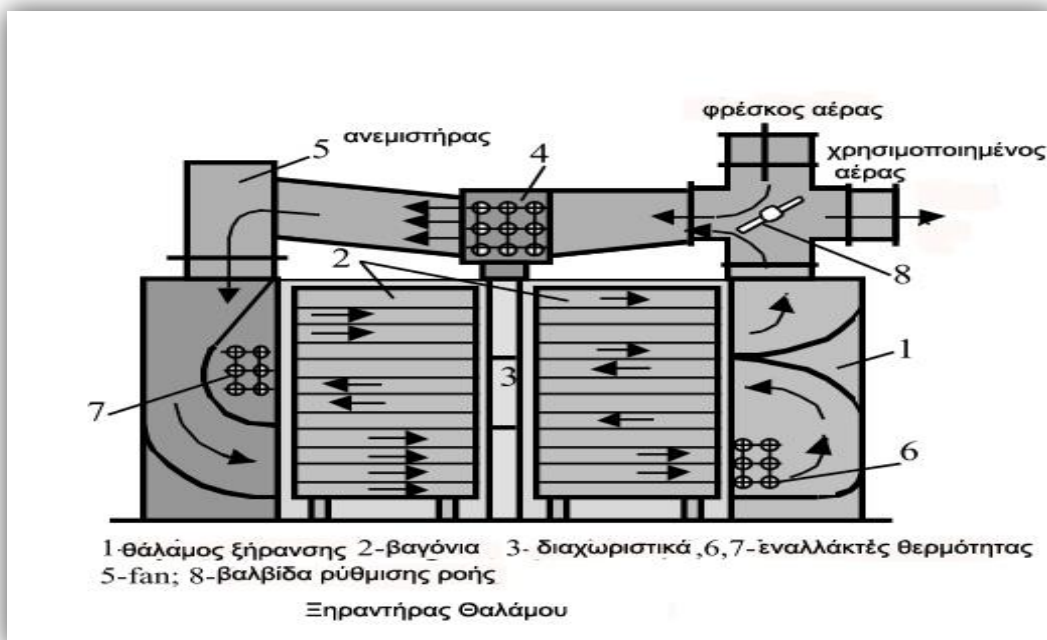
- Ξήρανση με αναθέρμανση του αέρα (ξηραντήρες πολλαπλής ζώνης, για ξήρανση θερμοευαίσθητων υλικών, που δεν επιτρέπουν χρήση αέρα με υψηλές αρχικές θερμοκρασίες)
Ξήρανση με ανακυκλοφορία του αέρα (ο αέρας που εγκαταλείπει τον ξηραντήρα εξάγεται μερικώς στην ατμόσφαιρα, και αναμειγνύεται μερικώς με φρέσκο αέρα, όπου η μάζα του φρέσκου αέρα ισούται με τη μάζα του εξαγόμενου αέρα)
- Συνδυασμός (αυτή η διαδικασία ξήρανσης χρησιμοποιείται κυρίως σε ξηραντήρες πολλαπλής ζώνης, με ροή αντίθετου ρεύματος)

3.2.6.4 Ξηραντήρες θαλάμου

Αυτοί οι τύποι ξηραντήρων λειτουργούν περιοδικά και σε ατμοσφαιρική πίεση. Βασικό μέρος του ξηραντήρα θαλάμου (σχήμα 128) είναι ο θάλαμος με ορθογωνική διατομή, όπου τοποθετείται το υλικό. Το υλικό βρίσκεται σε σταθερή θέση κατά τη διάρκεια του κύκλου ξήρανσης. Η φόρτωση και εκφόρτωση του υλικού γίνεται μόνο απ' τη μία πλευρά του ξηραντήρα. Αυτοί οι ξηραντήρες μπορούν να είναι με δίσκους, διαμερίσματα, άγκιστρα και με βαγόνια.

Κανονικά, η χρήση τους είναι για ξήρανση ξυλείας, πλακών μόνωσης, κεραμικών και πυριτικών αντικειμένων, και διάφορων διασκορπισμένων και ινωδών υλικών. Η εφαρμογή τους είναι βολική για μικρές ποσότητες υλικών και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ακριβής ρύθμιση του καθεστώτος ξήρανσης.

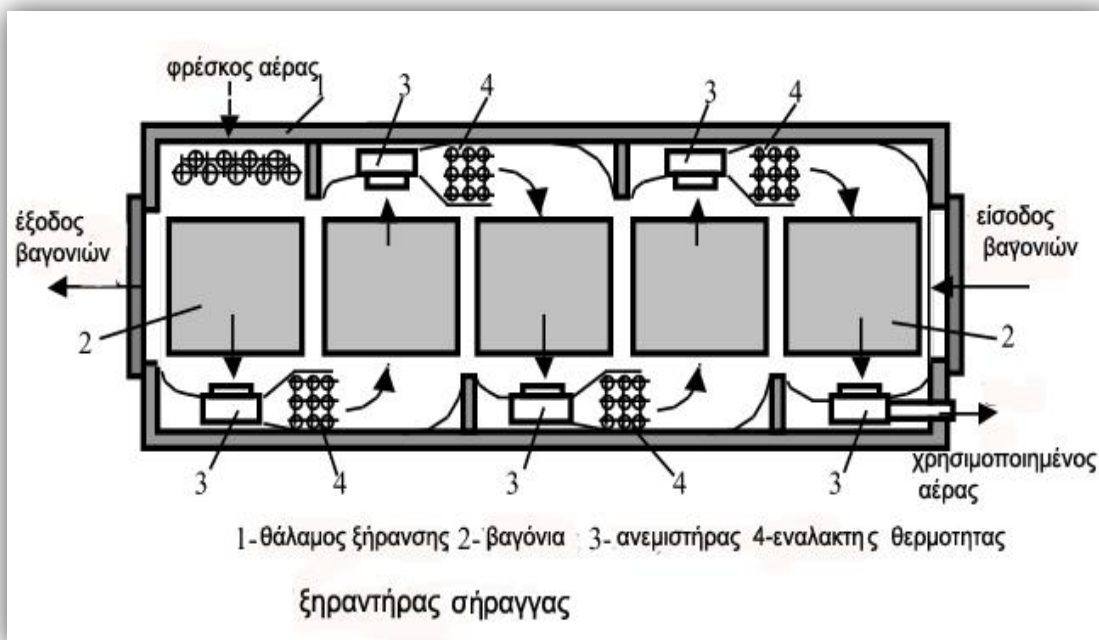
Αυτοί οι ξηραντήρες χαρακτηρίζονται από χαμηλή παραγωγικότητα και μεγαλύτερη περίοδο ξήρανσης. Η ξήρανση δεν είναι ομαλή λόγω άνισης διάθεσης θερμοκρασιών στο θάλαμο, η οποία είναι αποτέλεσμα της μερικής ροής αέρα στα ανώτερα επίπεδα μέσω μικρότερων περασμάτων (μέσω διακένων). Ένα μειονέκτημα αυτού του τύπου ξηραντήρων είναι η ανάγκη για χειρονακτική εργασία.



Σχ. 128 [242] Ξηραντήρας θαλάμου

3.2.6.5 Ξηραντήρες σήραγγας (διαδρόμου)

Αυτοί οι τύποι ξηραντήρων έχουν συνεχή λειτουργία. Βασικό μέρος του ξηραντήρα (σχήμα 129) είναι ο επιμήκης θάλαμος ξήρανσης. Τα διασυνδεδεμένα βαγόνια κινούνται αργά σε ράγες κατά μήκος του θαλάμου. Στην είσοδο και στην έξοδο η σήραγγα είναι εξοπλισμένη με θύρες. Αυτές ανοίγονται ταυτόχρονα και περιοδικά ώστε να επιτρέπουν τη φόρτωση και εκφόρτωση του ξηραντήρα με υλικό. Ο αέρας ξήρανσης κινείται προς την ίδια ή προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με το αποξηραμένο υλικό. Η κυκλοφορία του αέρα μπορεί να είναι φυσική ή εξαναγκασμένη αλλά καλύτερο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με εξαναγκασμένη κίνηση αντίθετης ροής. Οι ξηραντήρες σήραγγας μπορούν να λειτουργούν με απλή χρήση του θερμού αέρα, με ανακυκλοφορία ή με αναθέρμανση.



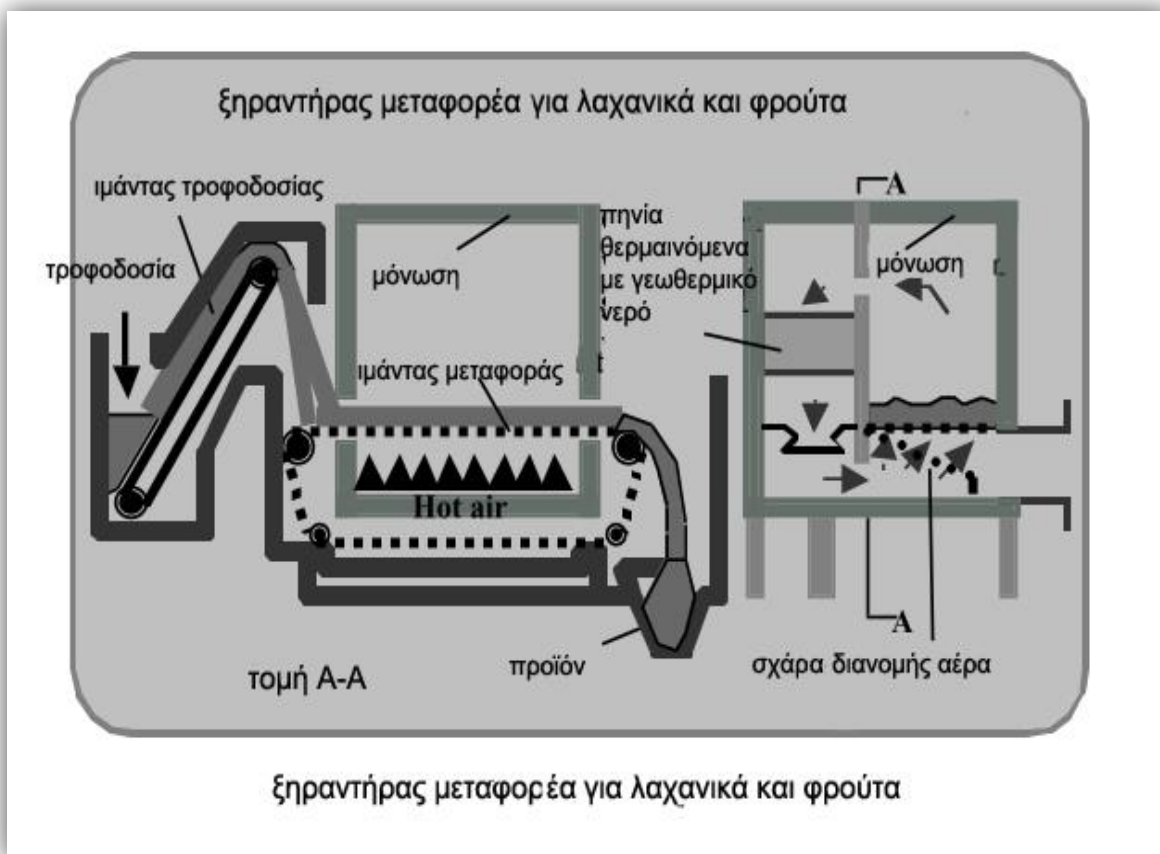
Σχ. 129 [242] Ξηραντήρας σήραγγας

3.2.6.6 Ξηραντήρες μεταφορέα

Οι ξηραντήρες μεταφορέα χρησιμοποιούνται για την ξήρανση βαμβακιού, μαλλιού και άλλων ινωδών υλικών (κομμάτια πάχους από 5mm έως 7mm και πλάτους από 20mm έως 30mm –φρούτα, λαχανικά, τσάι, στουπί, τύρφη, κλπ.). Αυτοί οι ξηραντήρες λειτουργούν συνεχόμενα, με τη χρήση ενός θαλάμου, όπου το υλικό προς ξήρανση τοποθετείται και κινείται στην ταινία φόρτωσης. Η ξήρανση πραγματοποιείται με θερμοκρασία αέρα (ή αερίου) μεταξύ 70 °C και 170 °C .

Η κυκλοφορία του αέρα ξήρανσης γίνεται με τη χρήση αξονικών ανεμιστήρων. Το αποξηραμένο υλικό συλλέγεται από τις ταινίες σε ένα καλάθι ή σε κάποια άλλη συσκευή μεταφοράς. Αυτοί οι ξηραντήρες είναι κατασκευασμένοι με πλάτος από 2m έως 2.5m και μήκος 40m. Ένα μειονέκτημα είναι η άνιση ξήρανση κατά ύψος του ξηραντήρα, η οποία μειώνεται σημαντικά με την ανάμιξη όταν περνάει από ταινία σε ταινία.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ρυπαρότητα που προέρχεται από τα σωματίδια που περνούν μέσα από την οθόνη προστασίας η οποία πέφτει στον εναλλάκτη θερμότητας. Η ειδική κατανάλωση θερμότητας είναι $q =$ από 5000kJ/kg έως 7500kJ/kg.

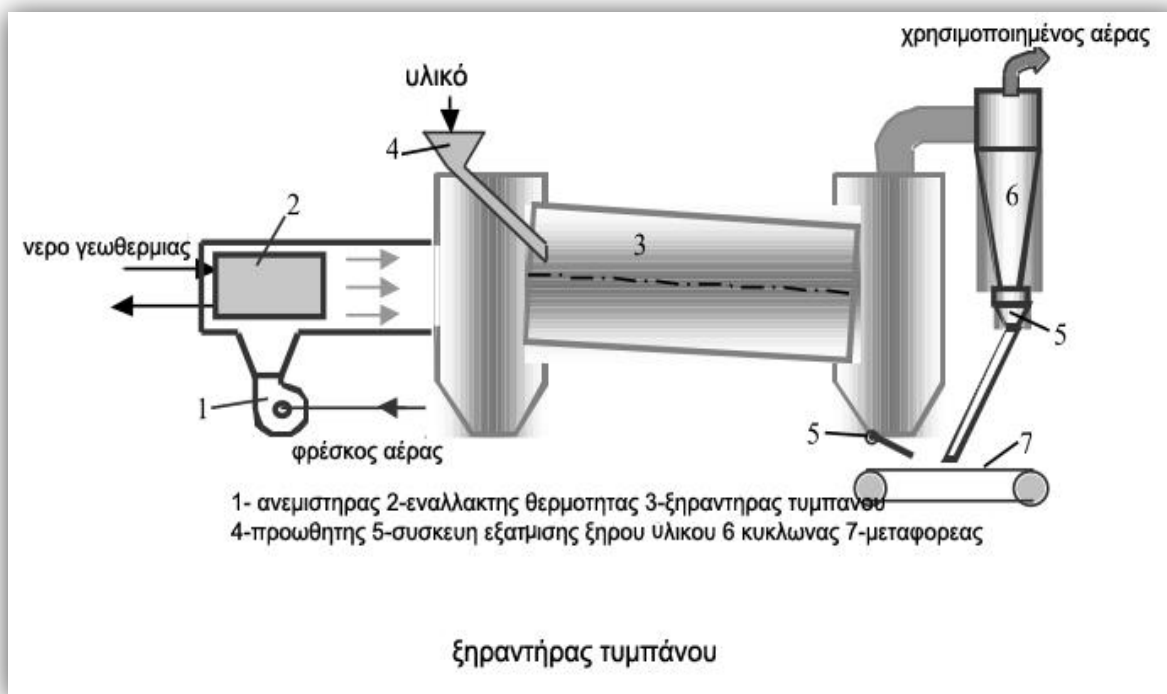


Σχ. 130 [242] Ξηραντήρας μεταφορέα για λαχανικά και φρούτα

3.2.6.7 Ξηραντήρες τυμπάνου

Αυτοί οι τύποι ξηραντήρων είναι κατάλληλοι για ξήρανση μύρας και ζάχαρης, σπόρων, γαλακτοκομικών τροφίμων και άλλων υλικών. Βασικό μέρος είναι το οριζόντιο ή κεκλιμένο τύμπανο (σχήμα 131), με 0.5 έως 0.8 στροφές ανά λεπτό, που επιτρέπει την κίνηση και την ανάμιξη του διασκορπισμένου υλικού. Η γωνία του τυμπάνου σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (για σταδιακή κίνηση του υλικού από τη μία άκρη στην άλλη) είναι συνήθως από 0.5 έως 3 μοίρες. Μέσα στο τύμπανο και ανάλογα με το υλικό, τοποθετούνται διάφορα διαμερίσματα τα οποία συμβάλλουν στην καλύτερη ξήρανση του υλικού.

Η ειδική κατανάλωση θερμότητας είναι $q = 3350-5000 \text{ kJ/kg}$ και της ηλεκτρικής ενέργειας για περιστροφή και αερισμό είναι από 5 έως 7 kWh/1000 kg.

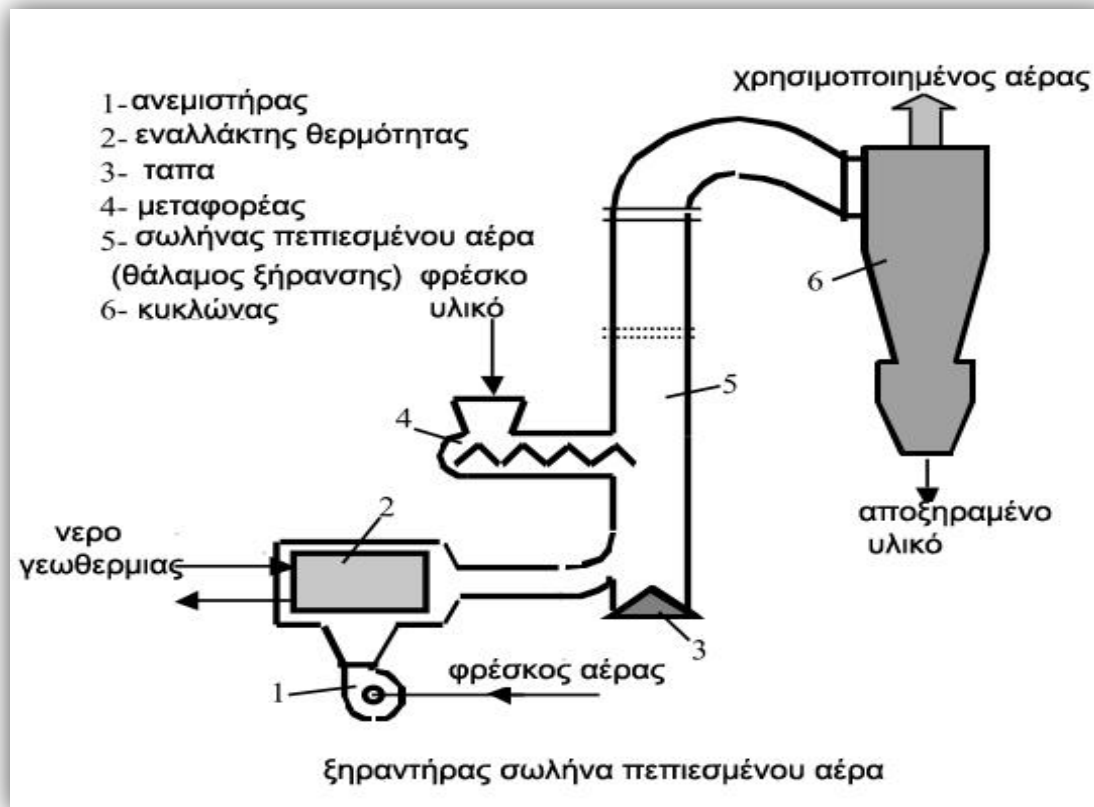


Σχ. 131 [242] Ξηραντήρας τυμπάνου

3.2.6.8 Ξηραντήρες πεπιεσμένου αέρα

Βασικό μέρος αυτών των Ξηραντήρων είναι ο θάλαμος ή σωλήνας (σχήμα 132) μέσα στον οποίο το διασκορπισμένο υλικό Ξηραίνεται κατά τη διάρκεια μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα. Η ταχύτητα του αέρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη απ' την ταχύτητα αιώρησης σωματιδίων (από 10% έως 20% μεγαλύτερη απ' την ταχύτητα αιώρησης των μεγαλύτερων σωματιδίων) ώστε να μεταφέρει τα σωματίδια. Διατηρείται στο πλαίσιο των 10m/s με 40m/s ανάλογα με τις διαστάσεις των σωματιδίων. Αυτό απαιτεί επιπρόσθετη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρχικά, η λειτουργία των Ξηραντήρων πεπιεσμένου αέρα είναι συνεχής. Χρησιμοποιούνται για την Ξήρανση σπόρων, ψιλοκομμένων γαλακτοκομικών τροφίμων, φύλλων λαχανικών, κλπ. Το πέρασμα των σωματιδίων μέσα απ' το σωλήνα δεν ξεπερνά τα 1 με 2 δευτερόλεπτα, και γι αυτό είναι δυνατό να εξατμίζεται μόνο η επιφανειακή υγρασία το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία μόνο από 6% έως 10%. Η ειδική κατανάλωση θερμότητας είναι $q =$ από 3800 έως 6700 kJ/kg.



Σχ. 132 [242] Ξηραντήρας σωλήνα πεπιεσμένου αέρα

3.3 Εφαρμογές ξήρανσης με γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα

3.3.1 Μονάδα αφυδάτωσης ντομάτας με χρήση γεωθερμικής ενέργειας

Πρόκειται για την πρώτη ουσιαστικά εφαρμογή στη χώρα μας της γεωθερμίας για την αφυδάτωση-ξήρανση αγροτικών προϊόντων. Πρόκειται για μονάδα αφυδάτωσης βιομηχανικής ντομάτας στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης, η λειτουργία της οποίας ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2001. Το τελικό προϊόν, με μείωση της αρχικής του μάζας κατά 12 φορές, διανέμεται στην αγορά με την ονομασία "λιαστή ντομάτα".

Παρουσιάζονται ο σχεδιασμός και η κατασκευή της μονάδας, καθώς και τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις από την πρώτη περίοδο λειτουργίας της (Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2001), κατά την οποία παρήχθησαν 4,2 τόνοι τελικού προϊόντος.

3.3.2 Περιγραφή της μονάδας και της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας

Η όλη διαδικασία ξήρανσης της ντομάτας διαιρείται σε τρία στάδια, δύο στάδια προετοιμασίας του νωπού προϊόντος και το τελικό στάδιο ξήρανσης, όπως παρουσιάζεται στο σχηματικό διάγραμμα της μονάδας στο Σχήμα 1. Στο αρχικό στάδιο προετοιμασίας γίνεται η εισαγωγή του προϊόντος (ποικιλία ντομάτας Roma, η οποία είναι καταλληλότερη για ξήρανση λόγω του υψηλού λόγου 'σάρκα/χυμός') και η τοποθέτησή του στην τράπεζα διαλογής. Εκεί ελέγχεται η ποιότητα της ντομάτας και όσες ντομάτες δεν πληρούν τις προδιαγραφές οδηγούνται με μεταφορική ταινία σε βυτίο για μεταφορά σε τοπική μονάδα παραγωγής

τοματοπολτού. Οι φρέσκιες ντομάτες πρέπει να είναι 'σφικτές' και ώριμες, όχι όμως υπερώριμες. Το ποσοστό επιλογής κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70%. Εν συνεχεία οι ντομάτες οδηγούνται στο σύστημα ταξινόμησης, από το οποίο διαχωρίζονται σε δύο μεγέθη: στις ντομάτες με βάρος 90-110 g και στις ντομάτες με βάρος μικρότερο των 90 g, και τοποθετούνται σε τελάρα για αποθήκευση ή για περαιτέρω προετοιμασία στο δεύτερο στάδιο.

Το δεύτερο στάδιο προετοιμασίας, στο οποίο υπόκεινται μόνο οι ντομάτες που θα οδηγηθούν στη σήραγγα ξήρανσης, γίνεται το πλύσιμο του προϊόντος, η κοπή τους στα δύο (halves) και η τοποθέτησή τους σε χαλύβδινους δίσκους (τύπου πλέγματος, διαστάσεων 100x50 cm), οι οποίοι θα εισαχθούν στη σήραγγα ξήρανσης. Σημειώνεται ότι στη ντομάτα δεν απαιτείται 'ζεμάτισμα' (blanching) πριν από τη διεργασία ξήρανσης, λόγω της αφθονίας των αντιοξειδωτικών συστατικών της.

Στο τρίτο στάδιο επιτελείται η ξήρανση του προϊόντος, το οποίο επιθεωρείται στην έξοδο της σήραγγας ξήρανσης πριν οδηγηθεί στη συσκευασία. Το κύριο σύστημα αφυδάτωσης αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα (Σχήμα 1):

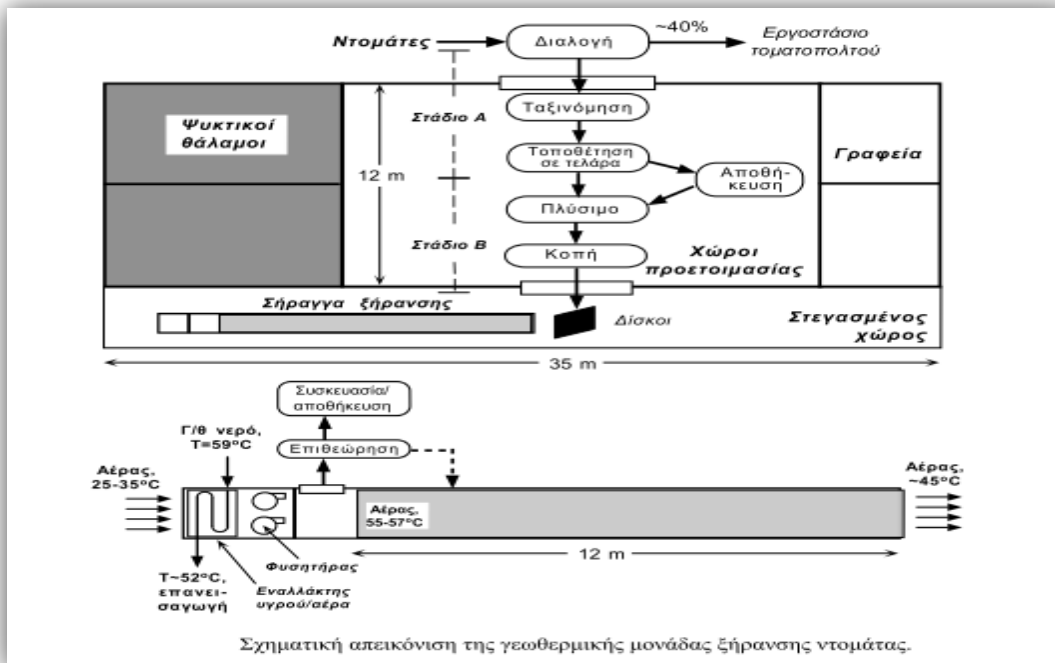
1) Εναλλάκτης εκτεινόμενης επιφάνειας υγρού-αέρα (INTERKLIMA) για τη θέρμανση ατμοσφαιρικού αέρα (δυναμικότητας 300000 kcal). Ο αέρας εισέρχεται στον εναλλάκτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20-35°C) και εξέρχεται από τον εναλλάκτη με σχεδόν σταθερή θερμοκρασία 55-57°C. Η θερμοκρασία του εισερχόμενου γεωθερμικού νερού είναι 59°C και η παροχή του ανέρχεται σε 25 m³/h. Το νερό εξέρχεται από τον εναλλάκτη με θερμοκρασία 51-53°C και οδηγείται για επανεισαγωγή στον ταμιευτήρα μέσω γειτονικής γεώτρησης. Το γεωθερμικό νερό, καλής ποιότητας (χαμηλής αγωγιμότητας και χωρίς προβλήματα διάβρωσης ή δημιουργίας επικαθίσεων) [243], μεταφέρεται στο ξηραντήριο με μη-μονωμένους σωλήνες PVC Φ110 mm από απόσταση 1400 m. Λόγω της χαμηλής σχετικά απαιτούμενης παροχής οι θερμικές απώλειες κατά τη μεταφορά του νερού είναι 2-3°C.

2) Φυσητήρες αέρα.

Η ισχύς των δύο φυγοκεντρικών ανεμιστήρων ανέρχεται σε 7 kW, αν και μόνο το ~30% αυτής της ισχύος χρησιμοποιήθηκε την περασμένη χρονιά με τη βοήθεια μετατροπέα στροφών. Η συνολική παροχή του αέρα μέσα στη σήραγγα ανέρχεται σε 10.000-12.000 m³/h και η ταχύτητά του σε κενή σήραγγα είναι 1,7 m/s, αν και με την παρουσία των δίσκων με το προϊόν η πραγματική ταχύτητα είναι κατά 20-50% μεγαλύτερη.

3) Σήραγγα ξήρανσης.

Η σήραγγα έχει συνολικό μήκος 14 m, πλάτος 1 m και ύψος 2 m και είναι κατασκευασμένη από αλουμινένια πάνελα πολυουρεθάνης. Στην έξοδο της σήραγγας υπάρχει χώρος 2 m για την απομάκρυνση του τελικού προϊόντος και έτσι το καθαρό μήκος της σήραγγας είναι 12 m. Στα εσωτερικά τοιχώματα της σήραγγας υπάρχουν ειδικά στηρίγματα για την τοποθέτηση και μετακίνηση 25 δίσκων. Η απόσταση μεταξύ των κενών δίσκων είναι 8 cm, κάτι που διασφαλίζει ικανοποιητική ροή του θερμού αέρα. Σε κάθε δίσκο



Σχ. 133[248]Σχηματική απεικόνιση της γεωθερμικής μονάδας ξήρανσης ντομάτας

τοποθετούνται περίπου 7 kg νωπού προϊόντος, τα οποία πριν από την τοποθέτηση του δίσκου στη σήραγγα ψεκάζονται με κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα (κάθε 45 min) 25 δίσκοι με αποξηραμένο προϊόν απομακρύνονται από τη έξοδο της σήραγγας και 25 νέοι δίσκοι με νωπό προϊόν τοποθετούνται στην είσοδο με παράλληλη μετακίνηση όλων των δίσκων κατά μία θέση. Στον αρχικό χώρο εισόδου του αέρα υπάρχουν ειδικά πτερύγια για την ομοιόμορφη κατανομή του αέρα στη σήραγγα ξήρανσης. Η ομοιόμορφη κατανομή του αέρα επιβεβαιώνεται από την ομοιομορφία ξήρανσης του προϊόντος ανεξάρτητα από τη θέση του και από μετρήσεις της θερμοκρασίας στην έξοδο της σήραγγας και σε διάφορα επίπεδα.

4) Μετρητικά όργανα. Οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέριου ρεύματος και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες της γεωθερμικού νερού μετριοούνται συστηματικά με ψηφιακό μετρητή θερμοκρασίας (θερμοστοιχεία) και καταγράφονται συστηματικά. Το ποσοστό υγρασίας του νωπού και του αποξηραμένου προϊόντος ελέγχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα με μετρητή υγρασίας.

3.3.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Τα στερεά συστατικά της νωπής ντομάτας κυμαίνονται από 8 μέχρι 10%, ενώ το αποξηραμένο προϊόν περιέχει υγρασία περίπου 10%. Έτσι με την απομάκρυνση του νερού βάρος του προϊόντος μειώνεται κατά 89%-91%. Όπως είναι αναμενόμενο, η απομάκρυνση της υγρασίας του προϊόντος φαίνεται ότι προχωρεί γρηγορότερα στα πρώτα στάδια της ξήρανσης και με αργότερο ρυθμό στο δεύτερο μισό της σήραγγας.

Στο σχήμα 134 παρουσιάζονται προκαταρκτικές μετρήσεις του ποσοστού της υγρασίας του προϊόντος

Κατά μήκος της σήραγγας ξήρανσης (ή με το χρόνο παραμονής). Ο συνολικός χρόνος παραμονής του προϊόντος στη σήραγγα είναι 30 ώρες. Σε αυτό το διάστημα εισάγονται περίπου 4200 kg νωπής ντομάτας και παράγονται περίπου 400 kg αποξηραμένου προϊόντος.

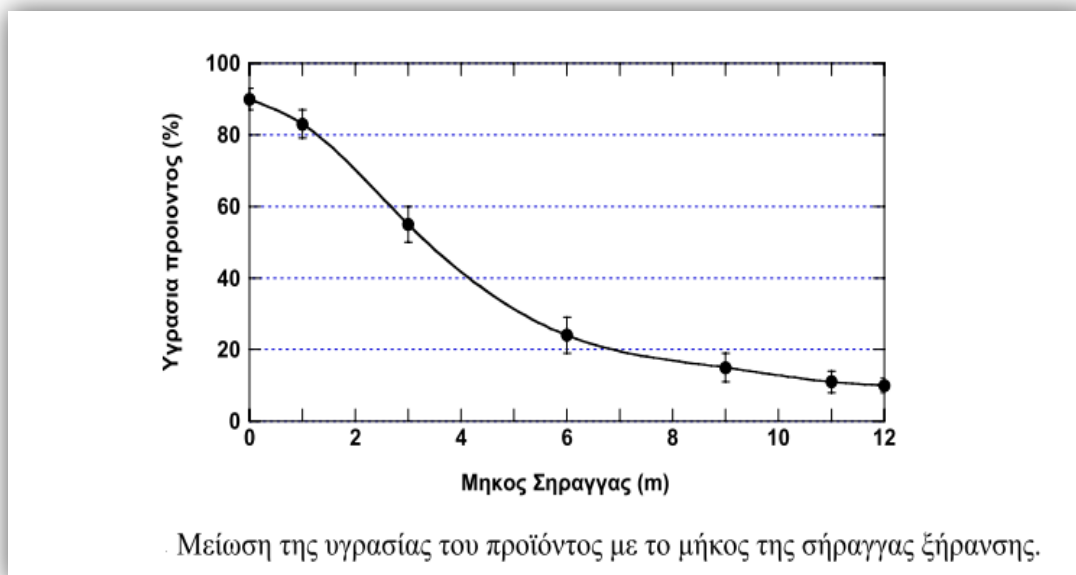
Η αφυδάτωση στους 55-57°C, σε ήπιες δηλαδή συνθήκες θερμοκρασίας και σε σχετικά

μεγάλο χρονικό διάστημα, διατηρεί το χρώμα και το άρωμα της ντομάτας, σε αντίθεση με τη ντομάτα που ξηραίνεται σε βιομηχανικά ξηραντήρια στους 80°C (με χρήση συμβατικών καυσίμων) και σε συντομότερο χρονικό διάστημα με μερική ανακύκλωση του αέρα ξήρανσης. Εκτός από τη διατήρηση του χρώματος, οι ήπιες συνθήκες ξήρανσης αναμένεται να περιορίζουν τον ισομερισμό του λυκοπενίου [244-246]. Το λυκοπένιο είναι υπεύθυνο για το βαθύ κόκκινο χρώμα της ντομάτας και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σημαντικό θρεπτικό συστατικό και έχει προταθεί ότι δρα προστατευτικά (ως φυσικό αντιοξειδωτικό) σε διάφορες μορφές καρκίνου.

Οι υψηλές θερμοκρασίες αφυδάτωσης αναφέρεται ότι οδηγούν στην υποβάθμιση του λυκοπενίου μέσω ισομερισμού και οξείδωσης. Αν και δεν έχει συσχετιστεί απόλυτα μέχρι τώρα, αλλαγή του χρώματος της ντομάτας συνδέεται με την υποβάθμιση του λυκοπενίου.

Το λυκοπένιο στις φρέσκες ντομάτες βρίσκεται με τη μορφή *trans* και ισομερίζεται σε ισομερές *cis* κατά τη διάρκεια της θερμικής διεργασίας, το οποίο αποτελεί λιγότερο βιοενεργό συστατικό.

Κατά την πρώτη χρονιά λειτουργίας της μονάδας παρήχθησαν περίπου 4 τόνοι αποξηραμένου προϊόντος, το οποίο συσκευάστηκε σε γυάλινα βάζα διαφόρων μεγεθών και διατέθηκε στην Ελλάδα και στο εξωτερικό με την ονομασία 'λιαστή' ντομάτα. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας ανήλθε περίπου σε 1 TJ, το οποίο αντιστοιχεί σε ποσοστό 0,5% της συνολικής χρήσης γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα ετησίως [247]. Η παραπάνω ενέργεια αντιστοιχεί σε περίπου 22 τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ). Σημειώνεται επίσης ότι από την ίδια γεωθερμική γεώτρηση αντλείται ετησίως ενέργεια ίση περίπου με 2 TJ για την παραγωγή πρώιμου σπαραγγιού.



Σχ. 134 [248] Μείωση της υγρασίας του προϊόντος με το μήκος της σήραγγας ξήρανσης

3.3.4 Συμπεράσματα και προοπτικές

Με την πρώτη χρονιά λειτουργίας της μονάδας ξήρανσης ντομάτας με γεωθερμική ενέργεια στο Ν. Εράσμιο αποδείχτηκε όχι μόνο η δυνατότητα επέκτασης της χρήσης της γεωθερμίας στην Ελλάδα και σε άλλους τομείς εκτός από τη θέρμανση θερμοκηπίων, αλλά και η παραγωγή προϊόντων καλύτερης ποιότητας από τα προϊόντα που παράγονται με συμβατικά

καύσιμα. Οι ήπιες συνθήκες ξήρανσης της ντομάτας με γεωθερμία έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή αποξηραμένης ντομάτας η οποία διατηρεί τα θρεπτικά συστατικά της νωπής ντομάτας, χωρίς επιφανειακή οξειδωση και τη συνακόλουθη αλλοίωση του χρώματός της.

Η επιτυχής λειτουργία της μονάδας μπορεί να οδηγήσει τόσο στην επέκταση της μονάδας σε μέγεθος και στην επέκταση του χρόνου λειτουργίας με ξήρανση άλλων λαχανικών (π.χ. πιπεριάς) ή φρούτων (σύκα, βερίκοκα). Σημειώνεται ότι οι δυνατότητες της μονάδας (γεωθερμικό νερό, εναλλάκτης και ανεμιστήρες) είναι σχεδόν διπλάσιες από την παραγωγή του 2001. Τέλος, ένα σημαντικό στοιχείο από τη λειτουργία της μονάδας είναι ότι γεωθερμική ξήρανση φρούτων και λαχανικών μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες νερών γύρω στους 55°C, κάτι που πληρούν τα περισσότερα γεωθερμικά πεδία στη Βόρεια Ελλάδα.

3.4 Εφαρμογές ξήρανσης με γεωθερμική ενέργεια σε άλλες χώρες

3.4.1 Γεωθερμική μονάδα ξήρανσης ρυζιού

Το παράδειγμα της μονάδας ξήρανσης ρυζιού στην Kochani (ΠΓΔΜ) είναι ένα απ' τα λίγα παραδείγματα εφαρμογής γεωθερμικής ενέργειας στον κόσμο για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Το γεωθερμικό νερό προέρχεται από τις πηγές Rodlog και η μονάδα ξήρανσης ανήκει στη γεωργική κοινοπραξία «Kotchansko pole» στην Kochani.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της πηγής είναι:

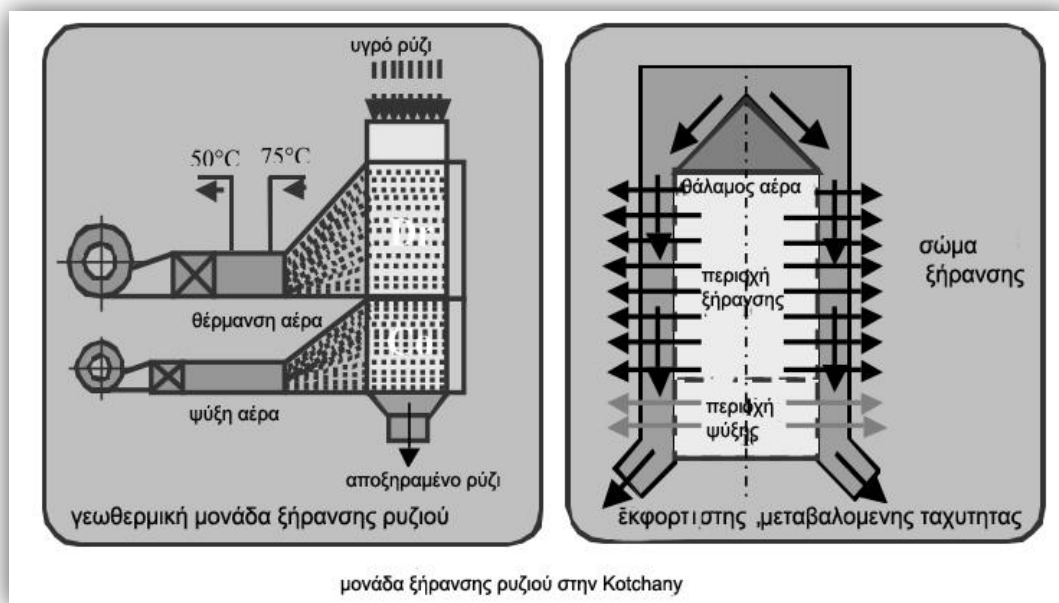
- Θερμοκρασία 75 °C
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε ανόργανα στοιχεία
- Χαμηλός ρυθμός σκωρίωσης και απουσία προβλημάτων διάβρωσης

Τα χαρακτηριστικά της μονάδας ξήρανσης ρυζιού είναι:

- Παραγωγική ικανότητα: 10t/h, ακατέργαστου ή αλεσμένου ρυζιού
- Θερμαντική ικανότητα: 1360kW
- Περιεκτικότητα σε υγρασία του ρυζιού: 20% στην είσοδο και 14% στην έξοδο
- Θερμοκρασία του αέρα θέρμανσης: 35 °C
- Εξωτερικές συνθήκες: θερμοκρασία 35 °C , σχετική υγρασία 60%
- Σύστημα ξηραντήρα: ξηραντήρες διασταυρούμενης ροής

Ξεχωριστοί τομείς του ξηραντήρα είναι:

- Δοχείο τροφοδοσίας σπόρων στην κορυφή
- Οι ανώτεροι πυρήνες της ζώνης ξήρανσης τροφοδοτούνται με θερμό αέρα (σωλήνας θερμού αέρα, εναλλάκτης θερμότητας και ανεμιστήρας)
- Οι κατώτεροι πυρήνες της ζώνης ξήρανσης τροφοδοτούνται με κρύο φρέσκο αέρα (ο ανεμιστήρας φυσάει εξωτερικό αέρα δια μέσω των σπόρων)
- Συσκευή για εκφόρτωση του αποξηραμένου ρυζιού, στον πυθμένα.



Σχ. 135 [242] Μονάδα ξήρανσης ρυζιού στην Kotchany

Το ρύζι κινείται προς τα κάτω με ίση ταχύτητα σε όλα τα σημεία της διατομής. Υπάρχει βαρυτική ανάμιξη των σπόρων καθώς η στήλη των σπόρων κινείται προς τα κάτω. Οι ροές του αέρα θέρμανσης και του αέρα ψύξης είναι κάθετες στην κατεύθυνση της κίνησης των σπόρων.

Ο εξωτερικός αέρας μπαίνει στον εναλλάκτη θερμότητας όπου το γεωθερμικό νερό 75/50 °C χρησιμοποιείται ως ρευστό θέρμανσης. Για να αποφευχθεί το ράγισμα του ρυζιού, η θερμοκρασία του θερμού αέρα ελέγχεται αυτόματα ώστε να είναι κάτω από 40 °C.

Η ψύξη των σπόρων είναι απαραίτητη μετά το τέλος της διαδικασίας ξήρανσης καθώς η έκθεση θερμών σπόρων στον αέρα περιβάλλοντος προκαλεί ραγδαία απορρόφηση υγρασίας. Ένα απ' τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της μονάδας είναι ότι απαιτεί θερμική ενέργεια σε μία περίοδο του χρόνου (καλοκαίρι) όπου τα θερμοκήπια δε θερμαίνονται.

3.4.2 Ξηραντήρας γεωθεμίας για ξήρανση φρούτων

Ένας ξηραντήρας φρούτων προτάθηκε για ένα έργο στο γεωθερμικό τμήμα Los Azufres στο Μεξικό (Lund και Rangel, 1995) [250]. Καθώς ο ξηραντήρας προοριζόταν για μια επίδειξη για τους καλλιεργητές και τους επεξεργαστές φρούτων, το μέγεθος ήταν ελάχιστο για να επισπεύσει την κατασκευή και να ελαχιστοποιήσει το κόστος. Το σχέδιο βασίστηκε σε προκαταρκτική εργασία που αναφέρθηκε από τον Herman Guillen (1987) [249]. Το σχέδιο περιγράφεται εδώ, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί σε πολλές μικρές ή πειραματικές καταστάσεις.

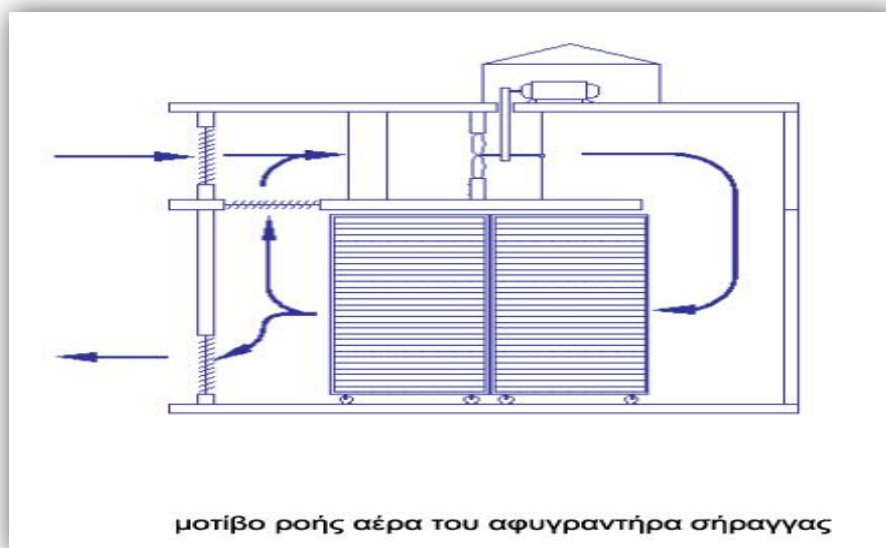
Το σχέδιο χειρίζεται περίπου 900kg (2000 lbs) υγρών φρούτων ανά κύκλο ξήρανσης. Η κοπή, η αποθήκευση και η συσκευασία των φρούτων πρέπει να γίνονται σε ξεχωριστό κτήριο. Μια ψυκτική αποθήκη μπορεί να σχεδιαστεί για να κρατάει τα φρέσκα φρούτα όταν η συγκομιδή ξεπερνάει τη χωρητικότητα του ξηραντήρα.

3.4.2.1 Σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας

Η απαιτούμενη ταχύτητα αέρα για ξήρανση φρούτων είναι υψηλή, ιδανικά περίπου 240 με 300 m/min (800 - 1000 ft/min), με ελάχιστο 150 m/min (500 ft/min) (Thompson, 1992) [252]. Υποθέτοντας ότι οι δίσκοι και τα φρούτα μπλοκάρουν το 50% της σήραγγας, η διατομή για τη ροή αέρα είναι $1.00\text{m} \times 2.00\text{m} \times 0.50 = 1.00 \text{ m}^2$ (10 ft^2). Έτσι, μια ελάχιστη χωρητικότητα $150 \text{ m}^3 / \text{min}$ ($5000 \text{ ft}^3 / \text{min}$), είναι απαραίτητη με την ιδανική να είναι 240 με 300 m^3 / min (8500 με $10000 \text{ ft}^3 / \text{min}$).

Υποτίθεται ελάχιστη θερμοκρασία αέρα εισόδου 0°C (32°F) και μέγιστη θερμοκρασία ξήρανσης 70°C (158°F). Η ιδανική θερμοκρασία για ξήρανση αχλαδιών, είναι 60°C (140°F) και η μέγιστη είναι 74°C (165°F). Η γεωθερμική πηγή υποτίθεται ότι εισέρχεται με 120°C (250°F) και εξέρχεται με 100°C (210°F). Με βάση τις παραδοχές, ο απαιτούμενος εναλλάκτης θερμότητας χρειάζεται δύο σειρές των 8 σωλήνων με πτερύγια, με διατομή $91\text{cm} \times 91\text{cm}$ ($36 \text{ in} \times 36 \text{ in}$) (Rayner, 1992) [251]. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαμηλότερη θερμοκρασία, με τροποποίηση στο σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας.

Αυτός είναι ο σχεδιασμός για τις πιο αντίξοες συνθήκες. Ο γεωθερμικός ρυθμός ροής μπορεί να προσαρμοστεί με μία βαλβίδα η οποία αντισταθμίζει τις αλλαγές στη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Μια τρίοδη βαλβίδα με αισθητήρα θερμοκρασίας στο ρεύμα αέρα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αυτόματο έλεγχο. Η ροή αέρα εισέρχεται μέσω μιας περσίδας $60\text{cm} \times 100\text{cm}$ ($24 \text{ in} \times 40 \text{ in}$), μέσω ενός σωλήνα $91\text{cm} \times 91\text{cm}$ ($36 \text{ in} \times 36 \text{ in}$) στην κορυφή του κτηρίου, και έπειτα ρέει προς τα κάτω δια μέσω των βαγονέτων (σχήμα 138). Ο αέρας μπορεί τότε να εξαχθεί ή μπορεί να ανακυκλωθεί αν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι πολύ χαμηλή. Σε πολλούς αφυγραντήρες, ανακυκλώνεται τουλάχιστον το 90% του αέρα για να συντηρεί την εισαγόμενη ενέργεια.



Σχ. 138 [253] Μοτίβο ροής αέρα του αφυγραντήρα σήραγγας

Οι πραγματικές θερμοκρασίες και οι πραγματικοί ρυθμοί ροής αέρα πρέπει να προσαρμόζονται με μέθοδο δοκιμής-σφάλματος ώστε να επιτευχθεί το κατάλληλο τελικό προϊόν όσον αφορά την υγρασία, την υφή και το χρώμα.

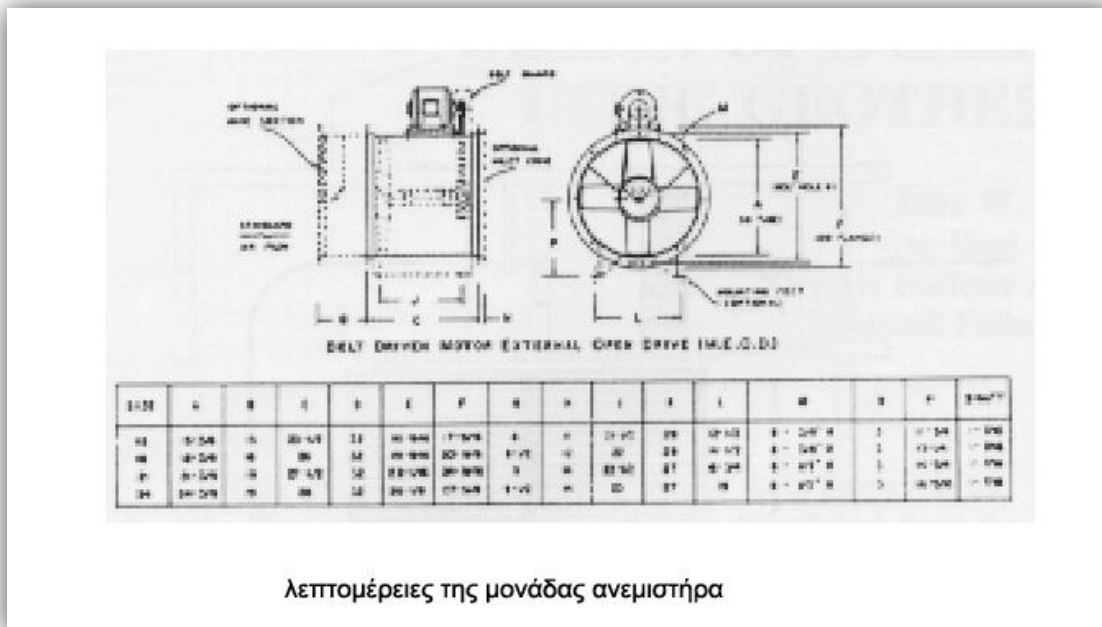
Ένας δεύτερος εναλλάκτης θερμότητας τύπου νερού-νερού ίσως είναι απαραίτητος για τη μείωση των πιθανών επιπτώσεων διάβρωσης ή σκωρίωσης από το γεωθερμικό νερό. Αυτός αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας μικρής πλάκας με έναν δευτερεύοντα βρόχο που θα παρέχει παθητικό νερό στον

εναλλάκτη θερμότητας νερού-αέρα στο κτήριο του ξηρατήρα. Ο εναλλάκτης θερμότητας πλάκας μπορεί να διαστασιολογηθεί για να χειρίζεται το μελλοντικό φορτίο θέρμανσης από τα γειτονικά κτήρια.

3.4.2.2 Σχεδιασμός μονάδας ανεμιστήρα

Καθώς το πεδίο Los Azufres βρίσκεται σε 2864 m (9400 ft) ύψος (ο λόγος πυκνότητας αέρα είναι περίπου 0.70), συνίσταται ένας ελάχιστος όγκος σχεδιασμού. Ευτυχώς, ο ρυθμός εξάτμισης αυξάνεται σ' αυτό το ύψος λόγω της μείωσης της εξωτερικής πίεσης σε σχέση με την τάση ατμών του φρούτου, επιτρέποντας έτσι τη χρήση της ελάχιστης ροής αέρα σχεδιασμού.

Ο αξονικός ανεμιστήρας αγωγού, έτσι, σχεδιάστηκε για $215 \text{ m}^3 / \text{min}$ ($7500 \text{ ft}^3 / \text{min}$) και 2cm (3/4 in) απώλειας πίεσης νερού (απώλεια τριβής ροής αέρα) σε 0.722 g/L (0.045 lb/ft^3) αέρα (1.20 g/L [0.0750 lb/ft^3] στο επίπεδο της θάλασσας). Αυτό απαιτεί κινητήρα 1.05 BHP ή 1.5 hp (1.12 kW). Ο ανεμιστήρας είναι διαμέτρου 61cm (24 in) και έχει 5 πτερύγια με κλίση στο άκρο τους 10.5 μοίρες. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της ροής αέρα, ο κινητήρας του ανεμιστήρα πρέπει να είναι τοποθετημένος στην κορυφή του κτηρίου έξω απ' το ρεύμα θερμού αέρα. Λεπτομέρειες του ανεμιστήρα και του περιβλήματος φαίνονται στο σχήμα 139 (Rayner, 1992) [251].



Σχ. 139 [253] Λεπτομέρειες της μονάδας ανεμιστήρα

3.4.2.3 Εκτιμώμενα κόστη

Τα εκτιμώμενα κόστη είναι:

Κτήριο:	1790€
Βαγονέτα και δίσκοι:	447€
Εναλλάκτης θερμότητας:	716€
Μονάδα ανεμιστήρα:	1521€
Έλεγχος/σωλήνωση:	895€
Συνολικό κόστος:	5369€

Η χρήση τοπικών υλικών και εργασίας μπορούν να μειώσουν αυτά τα κόστη.

3.4.2.4 Συμπεράσματα

Ένα κτήριο κατασκευάστηκε στο Los Azufres το 1995 και ο ξηραντήρας άρχισε να λειτουργεί τον Απρίλιο. Το σχέδιο τροποποιήθηκε. Οι βασικές τροποποιήσεις ήταν η χρήση δίσκων ανοξείδωτου χάλυβα αντί για ξύλο, και αλλαγές στα μοτίβα ροής αέρα. Ο άερας κυκλοφορούσε διαμέσου των δίσκων 5 φορές πριν εξαχθεί. Ως αποτέλεσμα, η ξήρανση ήταν ανομοιογενής, υπερβολική στο πρώτο πέρασμα και ανεπαρκής στο πέμπτο πέρασμα.

Ο αφυγραντήρας έχει χωρητικότητα 400kg (880 lbs) φρούτων. Η ενεργειακή κατανάλωση είναι 10 kJ/sec (570 Btu/min) σε γεωθερμικό ρυθμό ροής 0.03 kg/sec (0.5 gal/min) η οποία κρατάει τον αφυγραντήρα στους 60 °C (140 °F).

Τροποποίηση του σχεδίου πραγματοποιείται επί του παρόντος η οποία διαχειρίζεται δαμάσκηνα, ροδάκινα, αχλάδια και μήλα. Ο σκοπός είναι να βελτιώσει τα οικονομικά της αποθήκευσης, της διαχείρισης και της αποστολής αυτών των προϊόντων καθώς και η έλξη εθνικών και παγκόσμιων επενδυτών για επέκταση του πρότυπου σχεδίου σε μια λειτουργία εμπορικού μεγέθους.

4 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετήθηκε η ξήρανση τροφίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η οποία είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς έχει τη δυνατότητα να αντικαθιστά τις συμβατικές πηγές ενέργειας ή να λειτουργεί παράλληλα με αυτές μειώνοντας έτσι το κόστος χρήσης των συμβατικών καυσίμων.

Η ηλιακή ξήρανση, δηλαδή η ξήρανση με ηλιακούς ξηραντήρες είναι μία αποδοτική μέθοδος ξήρανσης η οποία μπορεί να αντικαταστήσει την παραδοσιακή φυσική ηλιακή ξήρανση επειδή είναι απαλλαγμένη από τα προβλήματα της τελευταίας, όπως την προσβολή των καλλιέργειών από σκόνη, μύκητες, μούχλες, πουλιά και τρωκτικά, καθώς και την αδυναμία προστασίας τους από απροσδόκητα καιρικά φαινόμενα, όπως βροχές κλπ.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα της, η ηλιακή ξήρανση δεν αποτελεί μόνιμη λύση, καθώς εξαρτάται από την ηλιοφάνεια και την υψηλή θερμοκρασία. Επομένως σε περιόδους συννεφιάς, χαμηλών θερμοκρασιών, βροχών κλπ. δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί κι έτσι οι καλλιέργειες σε τέτοιες περιόδους είναι ευάλωτες σε περαιτέρω απορρόφηση υγρασίας και κατά συνέπεια σε αλλοίωση.

Μία μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τέτοιες περιόδους είναι η ξήρανση με βιομάζα η οποία γίνεται με την ενσωμάτωση καυστήρων βιομάζας στους ηλιακούς ξηραντήρες. Έτσι, κατά τη διάρκεια της νύχτας και όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, η καύση βιομάζας παρέχει στις καλλιέργειες τη θερμότητα που χρειάζονται για την ξήρανση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει συνεχόμενη ξήρανση όλο το 24ωρο, πράγμα που μειώνει το συνολικό χρόνο ξήρανσης και βελτιώνει την ποιότητα των προϊόντων.

Τέλος, ένας σημαντικός παράγοντας για την ξήρανση τροφίμων είναι η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται έχουν κάποια όρια ανάλογα με το εκάστοτε προϊόν. Υψηλότερες θερμοκρασίες από τις επιτρεπόμενες μπορούν να προκαλέσουν φυσικές και χημικές βλάβες στα τρόφιμα. Επομένως, γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας είναι χρήσιμα σε τέτοιες περιπτώσεις και η ξήρανση τροφίμων με γεωθερμική ενέργεια αποτελεί μία αποδοτική λύση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] McLean KA. Drying and storage of combinable crops. Sunworld Farm Press, 1980.
- [2] Ekechukwu OV. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. Ph.D. thesis. Cranfield Institute of Technology, United Kingdom, 1987.
- [3] Arinze EA, Schoenau G, Bigsby FW. Solar-energy absorption properties of some agricultural products. ASAE paper, no. 79-3071, 1979.
- [4] Brooker DB, Bakker-Arkema FW, Hall CW. Drying cereal grains. Westport AVI, 1974.
- [5] Hall CW. Drying and storage of agricultural crops. Westport AVI, 1980.
- [6] Norton B, Probert SD. Solar-energy, stimulated open-looped thermosyphonic air heaters. *App Energy* 1984;17:217±34.
- [7] Brenndorfer B, Kennedy L, Bateman COO, Mrema GC, Wereko-Brobby C. Solar dryers—their role in postharvest processing. London: Commonwealth Science Council (Commonwealth Secretariat Publications), 1985.
- [8] Brace Research Institute. Types of solar agricultural dryers. *Sunworld* 1980;4(6):181.
- [9] International Labour Organization. Solar drying: practical methods of food preservation. International Labour Office, Geneva, Switzerland, 1986.
- [10] Fleming PD, Ekechukwu OV, Norton B, Probert SD. Design, installation and preliminary testing of natural-circulation solar-energy tropical crop dryer. In: Solar drying in Africa—Proc of workshop, Dakar, Senegal: Bassey MW, Schmidt OG, editors. IDRC, Ottawa, Canada, 1987:147±61.
- [11] Norton B, Fleming PD, Ekechukwu OV. Passive autarkic solar drying techniques. In: Garg HP et al., editors. *Physics and Technology of Solar Energy—Proc Int Workshop*, New Delhi, India. D. Reidal, Netherlands, 1987. p. 447±66.
- [12] Fleming PD, Norton B, Ekechukwu OV, Onyegebu SO, Probert SD. A large-scale facility for experimental studies of natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. In: *Proc Int Drying Symp (Drying '86)*. Cambridge, Mass., U.S.A., Hemisphere Pub Coy Washington, 1986. p. 685±93.
- [13] Bowrey RG, Buckle KA, Hamey I, Pavenayotin P. Use of solar-energy for banana drying. In: *Food Technol. Aust.* 1980;32(6):290±1. [91] Bassey MW. Design and performance of hybrid crop dryer using solar-energy and sawdust. In: *Proc ISESCong INTERSOL 85*. Montreal, Canada, Pergamon Press, Oxford, 1985. p. 1039±42.
- [14] Huang BK, Toksoy M. Design and analysis of greenhouse solar systems in agricultural production. *Energy in Agric* 1983;2:115±36.
- [15] Ozisik MN, Huang BK, Toksoy M. Solar grain drying. *Solar Energy* 1980;24:397±401.
- [16] Huang BK. Effective solar-energy utilization in tobacco production with greenhouse bulk curing solar barn. In: *Inf Bull 7th Int Tobacco Sci Congr Manila*. Philippines, 1980;14.
- [17] Huang BK, Bowers CG. Solar-energy utilization using greenhouse bulk curing and drying systems. In: *Proc Solar Crop Drying Conf*. Raleigh, 1977. p. 117±45.
- [18] Huang BK, Ozisik MN, Toksoy M. Development of greenhouse solar drying of farm crops and processed products. *Agric Mech Asia, Africa and Latin America* 1981;12(1):47±52.
- [19] Huang BK, Toksoy M. Greenhouse solar system for effective year-round solar-energy utilization in agricultural production. *Agric Energy* 1981;1:152.
- [20] Alberti P, Serravezza A. Autonomous solar-energy plant for drying of agricultural produce. In: *Proc Solar Energy Symp, The Utilization of Solar Heat in Industry and Agric*. Nice, France, 1979. p. 143±55.
- [21] Smith CC. Solar process drying of potato products. *ISES Amer Sect Annual Conf*, Orlando, U.S.A. 1977;1:32±7.
- [22] Singhal OP, Gupta GP. Use of solar-energy for par-boiling and drying of paddy. *ISES Conf New Delhi, India*, 1978:1958±63.
- [23] McLendon BD, Allison JM. Solar-energy utilization in alternate grain systems in the southeast. *Trans ASAE* 1980;23:1289±92.
- [24] Troeger JM, Butler JL. Simulation of solar peanut drying. *ASAE Paper*, 1977:77±3537.
- [25] Baker KD, Foster GH. Low temperature, low air flow solar drying of corn with and without stirring. *Solar Grain Drying Conf West Lafayette, Ind. U.S.A.*, 1978:111±8.
- [26] Sohns J, Fisch N, Haug A, Tanes Y. Performance of a solar heated drying plant. *ISES Solar World Forum*, Brighton, UK, Pergamon Press, Oxford, 1981;10112±7.
- [27] Bose SV. Systems approach in the design of commercial solar-energy dryer. In: *Proc Solar Energy Symp The Utilization of Solar Heat in Industry and Agriculture*. Nice, France, 1979. p. 161±72.
- [28] Chakraverty A, Das SK. Design and testing of an integrated solar-cum-husk reduced paddy dryer of one tonne per day capacity. *Int Drying Symp, Drying 86*, Cambridge, Mass, U.S.A., 1986:692±702.
- [29] Akyurt M, Selcuk MK. A solar dryer supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation. *Solar Energy* 1973;14(3):313±20.
- [30] Selcuk MK, Ersay O, Akyurt M. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf-type solar dryers. *Solar Energy* 1974;16:81±8.
- [31] Akyurt M, Ozdaglar I, Selcuk MK. A solar dehydrator for orchards. *COMPLES Conf*, Istanbul, Turkey, 1972.
- [32] O.V. Ekechukwu, B. Norton / *Energy Conversion & Management* 40 (1999) 615±655
- [33] Hall CW. Drying and storage of agricultural products. *Avi*, Westport, 1980.
- [34] McLean KA. Drying and storage of combinable crops. *Farm Press*, Sunworld, 1980.
- [35] Howe ED. Principles of drying and evaporating. *Sunworld* 1980;4 (6):182±6.
- [36] Brooker DB, Bakker-Arkema FW, Hall CW. Drying cereal grains. *Avi*, Westport, 1974.
- [37] Foster GH. Drying cereal grains. In: Christensen CM, editors. *Storage of cereal grains and their products*. *Am Ass Cereal Chem*, 1982. p. 79±116.
- [38] Gustafson G. Solar assisted grain drying in hot and humid areas. *Rapport, Sveriges Lantbruksuniversitet*, 1982;20.
- [39] Kelvin WT. (1871), cited by Gregg SJ, Sing SW, Adsorption surface area and porosity. *New York: Academic Press*, 1967.
- [40] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass and mica and platinum. *J. Am Chem Soc* 1918;40:1361±5.
- [41] Brunauer S, Emmett PH, Teller E. Adsorption in multi-molecular layers. *J Am Chem Soc* 1938;60:309±19.
- [42] Harkins WD, Jura G. A vapour adsorption method for the determination of the area of a solid. *J Am Chem Soc* 1944;66:1366±71
- [43] Smith JE. The sorption of water vapour by high polymers. *J. Am Chem Soc* 1947;69:646±51.
- [44] Henderson SM. A basic concept of equilibrium moisture. *Agric Engng* 1952;33 (1):29±32.
- [45] Bailey CH. Respiration temperature on moisture content equilibrium of wheat. *J Council Sci Ind Res* 1946;19:187±9. of shelled corn. *Minn Agric Exp Station Tech Bull*, 1921;3.
- [46] Brokington SF, Dorin HC, Howerton HK. Hygroscopic equilibrium of whole kernel corn. *Cereal Chem* 1949;26:166±73.
- [47] Gay FJ. Effects of solid. *J Am Chem Soc* 1944;66:1366±71.
- [48] Fenton FC. Storage of grain sorghum. *Agric Engng* 1941;22:185±8.
- [49] Lamour RK, Sallans HR, Craig BM. Hygroscopic equilibrium of sunflower seed, faxseed and soybeans. *Can J Res* 1944;22:(F1±8).
- [50] International critical tables listed, vol. II. McGraw-Hill, 1927. 321±5.
- [51] Day DL, Nelson GL. Desorption for wheat. *Trans ASAE* 1965;8:293±7.
- [52] Thompson TL. Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers. PhD thesis. *Purdue University*, Lafayette, Ind., U.S.A., 1967.
- [53] Haynes BC. Vapour pressure determination of seed hygroscopicity. In: *Tech Bull. ARS, USDA, Washington D.C., U.S.A.*, 1961;1229.
- [54] Bakker-Arkema FW, Lerew LE, DeBoer SF. Corn drying simulation. In: *Agric Exp Station Res Bull. Michigan State Univ, East Lansing, Mich, U.S.A.*, 1974.
- [55] Rodriguez-Arias JH. Desorption isothermals and drying rates of shelled corn in the temperature range of 40±140 °F. Ph.D thesis. *Michigan State Univ, East Lansing, Mich, U.S.A.*, 1956.
- [56] Henderson SM, Perry RL. *Agricultural process engineering*. New York: Wiley, 1955.

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- [57] Hukill WV. Grain drying. In: Storage of cereal grains. Am Soc Cereal Chem, 1955; also in Christensen CM, editor., 2nd ed. ed. Storage of cereal grain and their products, 1974.
- [58] Henderson SM, Pabis S. Grain drying theory. J Agric Engng Res 1961;6:169±74.
- [59] Luikov AV. Heat and mass transfer in capillary±porous bodies. London: Pergamon Press, 1966.
- [60] Troeger JM, Hukill WV. Mathematical description of the drying rate of fully exposed corn. Trans ASAE 1962;14:1153±56.
- [61] Schumann TEW. Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. J Franklin Inst 1929;208:305±14.
- [62] O.V. Ekechukwu / Energy Conversion & Management 40 (1999) 593±613
- [63] V. Belessiotis, E. Delyannis / Solar Energy 85 (2011) 1665–1691
- [64] Muhlbauer W. Present status of solar crop drying. Energy Agric. 1986;5(2):121–37.
- [65] Purohit P, Kumar A, Kandpal TC. Solar drying vs. open sun drying a framework for financial evaluation. Solar Energy 2006;80(12):1568–79.
- [66] Ekechukwu OV. Review of solar energy drying I: an overview of drying principles and theory. Energy Convers Manage 1999 40(6):593–613.
- [67] Ekechukwu OV, Norton B. Review of solar energy drying II, an overview of drying technology. Energy Convers Manage 1999,40(6):615–55.
- [68] Ekechukwu OV, Norton B. Review of solar Energy drying III, low temperature air heating solar collectors for crop drying applications. Energy Convers Manage 1999,40(6):657–67.
- [69] Fudholi A, Sopian K, Ruslan MH, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renew Sustain Energy Rev 2010;14(1):1–30.
- [70] Chua KJ, Chou SK. Low-cost drying methods for developing countries. Trends Food Sci Technol 2003;14(12):519–28.
- [71] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G, Pistocchi F. Preliminary economic appraisal of solar air heating system used for drying of agricultural products. Energy Convers Manage 1994;35(2):105–10.
- [72] Saif-Ul-Rehman M. Prospects and limitations of solar energy utilization in developing countries. Solar Energy 1967;11(2):98–108.
- [73] Ong KS. Solar dryers in the Asia-Pacific region. Renew Energy 1999;16(1–4):779–84.
- [74] Vecchia D, Formisano G, Rosseli V, Ruggi D. Possibilities for the application of solar energy in the European community agriculture. Solar Energy 1981;26(6):479–89.
- [75] Wisniewski G. Market development of solar crops drying technologies in Poland and Europe. Renew Energy 1999;16(1–4):1278–83.
- [76] Arinze EA, Sokhansanj S, Schoenau GJ. Simulation of natural and solar-heated air hay drying systems. Comput Electron Agric 1993;8(4):325–45.
- [77] Kumar A, Kandpal TC. Solar drying and CO₂ emission mitigation: potential for selected cash crops in India. Solar Energy 2005;78(2):321–9.
- [78] Bansal NK. Solar energy heater application in India. Renew Energy 1999;16(1–4):618–23.
- [79] Joshi CB, Pradhan BD, Pathak TP. Application of solar drying systems in Nepal. World Renewable Energy congress VI; 2000. p. 2237–2240.
- [80] Lhendup T. Technical and financial feasibility of a solar dryer in Bhutan. Energy Sustain Dev 2005;9(4):17–24.
- [81] Sopontonnarit S. Solar drying in Thailand. Energy Sustain Dev 1995;2(2):19–25.
- [82] Roman F, Nagle M, Leis H, Janjai S, Mahayothee B, Haewsungcharoen M, et al. Potential of roof-integrated solar collectors for preheating air at drying facilities in Northern Thailand. Renew Energy 2009;34(7):1661–7.
- [83] Oztek S, Bacet ncel k A, Soysal Y. Crop drying programme in Turkey. Renew Energy 1999;16(1–4):789–94.
- [84] Salihoglu NK, Pinarli V, Salihoglu G. Solar drying in sludge management in Turkey. Renew Energy 2007;32(10):1661–75.
- [85] Headley OSC. Solar thermal applications in the West Indies. Renew Energy 2000;21(3–4):505–22. 1998;15(1–4):257–63.
- [86] Headley OSC. Solar crop drying in the West Indies. World Renewable Energy congress VI; 2000. P.934–939
- [87] Lawrence SA, Pole A, Tiwari GN. Performance of a solar crop dryer under PNG congress VI; 2000. p. 934–939. climatic conditions. Energy Convers Manage 1990;30(4):333–42.
- [88] Zahed AH, Bashir MD, Khalifa AMA. A perspective of solar drying of crops – a country profile. Solar Wind Technol 1988;5(3):249–62.
- [89] Cheapok C, Pornnareay P. Introducing solar drying in a developing country: the case of Cambodia. World Renewable Energy congress VI; 2000. p.2198–2201.
- [90] Ben Mabrouk S, Belghith A. Development of the solar crop dryers in Tunisia. World Renewable Energy congress VI; 2000. p. 2206–2211.
- [91] Roman R. Solar drying in northern Chile. Solar Wind Technol 1984;1(1):49–58.
- [92] Sharma A, Chen CR, Lan NV. Solar energy drying systems: a review. Renew Sustain Energy Rev 2009;13(6–7):1185–210.
- [93] Sodha MS, Chandra R. Solar drying systems and their testing procedures: a review. Energy Convers Manage 1994;35(3):219–67.
- [94] Augustus Leon M, Kumar S, Bhattacharya SC. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. Renew Sustain Energy Rev 2002;6(4):367–93.
- [95] Ramana Murthy MV. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. Renew Sustain Energy Rev 2009;13(4): 835–44.
- [96] Arata A, Sharma VK. Performance evaluation of solar assisted dryers for low temperature drying applications: plants description. Renew Energy 1991;1(5–6):729–35.
- [97] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G. Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. Renew Energy 1995;6(4):413–24.
- [98] Chandra R, Sodha MS. Testing procedures for solar air heaters: a review. Renew Sustain Energy Rev 1991;3(2):11–33.
- [99] Henriksson R, Gustafsson G. Use of solar collectors for drying agricultural crops and for heating farm buildings. Energy Agric 1986;5(2):139–50.
- [100] Koyuncu T. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. Renew Energy 2006;31(7):1073–88.
- [101] Ayensu A, Asiedu Bondzie V. Solar drying with convective self-flow and energy storage. Solar Wind Technol 1986;3(4):273–9.
- [102] Othman MYH, Sopian K, Yatim B, Daud WRW. Development of advanced solar drying systems. Renew Energy 2006;31(5):703–9
- [103] Womac AR, Tompkins FD, DeBusk KE. Evaluation of solar air heaters for crop drying. Energy Agric 1985;4:147–57
- [104] Garg HP, Mahajan RB, Sharma VK, Acharya HS. Design and development of a simple solar dehydrator for crop drying. Energy Convers Manage 1984;24(3):229–35.
- [105] Tiris C, Tiris M, Dincer I. Investigation of the thermal efficiencies of a solar dryer. Energy Convers Manage 1995;36(3):205–12.
- [106] Tiwari GN, Bhatia PS, Singh AK, Sutar Roy F. Design parameters of a shallow bed solar crop dryer with reflector. Energy Convers Manage 1994;35(6):535–42.
- [107] Pitt RE. Stochastic theory of forage drying as related to pan evaporation. Agric Forest Meteorol 1984;32(3–4):197–215.
- [108] Chemkhi S, Zagrouba F, Bellagi A. Drying of agricultural crops by solar energy. Desalination 2004;168:101–9.
- [109] Tripathy PP, Kumar S. A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: application to solar drying. J Food Eng 2009;90(2):212–8
- [110] Anwar SI, Tiwari GN. Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. Energy Convers Manage 2001;42(5):627–37.
- [111] Anwar SI, Tiwari GN. Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying – an experimental study. Energy Convers Manage 2001;42(14):1687–98.
- [112] Sharma VK, Sharma S, Ray RA, Garg HP. Design and performance studies of a solar dryer suitable for rural applications. Energy Convers Manage 1986;26(1):111–9.
- [113] Jain D. Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer. J Food Eng 2007;78(2):637–47.
- [114] Bena B, Fuller RJ. Natural convection solar dryer with biomass back-up heater. Solar Energy 2002;72(1):75–83.

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- [115] Pangavhane DR, Sawhney RL, Sarsavadiya PN. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy* 2002;27(6):579–90.
- [116] GbahaP, YobouetAndohH, KouassiSarakaj, KamenanKouaB, ToureS. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renew Energy* 2007;32(11):1817–29
- [117] Huang BK, Toksoy M. Design and analysis of greenhouse solar systems in agricultural production. *Energy Agric* 1983;2:115–36.
- [118] Janjai S, Lamler N, Intawee P, Mahayothee B, Bala BK, Nagle M, et al. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy* 2009;83(9):1550–
- [119] Jain D. Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *J Food Eng* 2005;71(2):170–8
- [120] Sethi VP, Arora S. Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. *Solar Energy* 2009;83(9):1472–84
- indirect type solar fruit and vegetable dryer. *Energy Convers Manage*
- [121] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer. *Energy Convers Manage* 2002;43(16):2251–66.
- [122] Boughali S, Benmoussa H, Bouchekima B, Mennouche D, Bouguettaia H, Bechki D. Crop drying by indirect active hybrid solar – electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy* 2009;83(12):2223–32
- [123] El-Sebaï AA, Aboul-Enein S, Ramadan MRI, El-Gohary HG. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Convers Manage* 2002;43(16):2251–66.
- [124] Celma AR, Cuadros F. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renew Energy* 2009;34(3):660–6.
- [125] Madhlopa A, Ngwalo G. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. *Solar Energy* 2007;81(4):449–62
- lector air gap height to improve the performance of indirect passive solar
- [126] Bassey MW, Oosthuizen PH, Sarr J. Using heated chimneys and reduced col-dryers. *Renew Energy* 1994;4(2):169–78
- [127] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G. Investigation of an indirect type multi-shelf solar fruit and vegetable dryer. *Renew Energy* 1992;2(6):577–86.
- [128] Singh S, Singh PP, Dhaliwal SS. Multi-shelf portable solar dryer. *Renew Energy* 2004;29(5):753–65.
- [129] Singh PP, Singh S, Dhaliwal SS. Multi-shelf domestic solar dryer. *Energy Convers Manage* 2006;47(13–14):1799–815
- [130] Al-Juamili KEJ, Khalifa AJN, Yassen TA. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. *Desalination* 2007;209(1–3):163–70
- [131] Dutta G, Garg HP, Ray RA, Prakash J. Performance prediction of a cabinet-type solar drier. *Solar Wind Technol* 1988;5(3):289–92
- [132] Sharma S, Sharma VK, Jha R, Ray RA. Evaluation of the performance of a cabinet-type solar dryer. *Energy Convers Manage* 1990;30(2):75–80
- [133] Sreekumar A, Manikantan PE, Vijayakumar KP. Performance of indirect solar cabinet dryer. *Energy Convers Manage* 2008;49(6):1388–95
- [134] Goyal RK, Tiwari GN. Performance of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. *Energy Convers Manage* 1999;40(4):385–92.
- [135] Garg HP, Kumar R. Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector. *Appl Therm Eng* 2000;20(2):115–31
- [136] Amir EJ, Grandegger K, Esper A, Sumarsono M, Djaya C, Muhlbauer W. Development of a multi-purpose solar tunnel dryer for use in humid tropics. *Renew Energy* 1991;1(2):167–76
- [137] Ekechukwu OV, Norton B. Experimental studies of integral type natural-circulation solar energy tropical crop dryers. *Energy Convers Manage* 1997;38(14):1483–500
- [138] Ekechukwu OV, Norton B. Effects of seasonal weather variations on the measured performance of a natural-circulation solar energy tropical crop dryer. *Energy Convers Manage* 1998;39(12):1265–76.
- [139] Onyegegbu SO, Morhenne J, Norton B. Second law optimization of integral type natural circulation solar energy crop dryers. *Energy Convers Manage* 1994;35(11):973–83.
- [140] Sharma VK, Rizzi G, Garg HP. Design and development of an augmented integrated solar collector with rock storage system for heating applications. *Energy Convers Manage* 1991;31(4):369–77.
- [141] Forson FK, Nazha MAA, Rajakaruna H. Modeling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop -dryer. *Solar Energy* 2007;81(3):346–57.
- [142] Forson FK, Nazha MAA, Akuffo FO, Rajakaruna H. Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renew Energy* 2007;32(14):2306–19.
- [143] Ferreira AG, Cristina VM, Marcio FBC, Ramon MV. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy* 2008;82(3):198–205.
- [144] Afriyie JK, Nazha MAA, Rajakaruna H, Forson FK. Experimental investigations of a chimney-dependent solar crop dryer. *Renew Energy* 2009;34(1):217–22.
- [145] Das SK, Kumar Y. Design and performance of a solar dryer with vertical collector chimney suitable for rural application. *Energy Convers Manage* 1989;29(2):129–35.
- [146] Othman MYH, Yatim B, Hafid RM. Preliminary results of a V-groove back-pass solar collector. *Renew Energy* 1996;9(1–4):622–5.
- [147] Sopian K, Alghoul MA, Alfegi EM, Sulaiman MY, Musa EA. Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-nonporous media. *Renew Energy* 2009;34(3):640–5.
- [148] Jain D, Jain RK. Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application. *J Food Eng* 2004;65(4):497–509.
- [149] Jain D. Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage. *J Food Eng* 2005;71(1):44–54.
- [150] Esper A, Lutz K, Muhlbauer W. Development and testing of plastic film solar air heaters. *Solar Wind Technol* 1989;6(3):189–95.
- [151] Ahmad NT. Agricultural solar air collector made from low cost plastic packing film. *Renew Energy* 2001;23(3–4):663–71.
- [152] Saleh A, Badran I. Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer. *Renew Energy* 2009;34(10):2239–45.
- [153] Tiris C, Tiris M, Dincer I. Experiments on a new small-scale solar dryer. *Appl Therm Eng* 1996;16(2):183–7.
- [154] Khanna ML, Singh NM. Industrial solar drying. *Solar Energy* 1967;11(2):87–9.
- [155] Lutz K, Muhlbauer W, Muller J, Reisinger G. Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones. *Solar Wind Technol* 1987;4(4):417–24.
- [156] Aboul-Enein S, El-Sebaï AA, Ramadan MRI, El-Gohary HG. Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying application. *Renew Energy* 2002;27(1):69–86.
- [157] Enibe SO. Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renew Energy* 2002;27(1):69–86.
- [158] Tiwari GN, Bhatia PS, Singh AK, Goyal RK. Analytical studies of crop drying cum water heating system. *Energy Convers Manage* 1997;38(8):751–9.
- [159] Akyurt M, Selcuk MK. A solar drier supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation. *Solar Energy* 1973;14(3):313–20.
- [160] Thoruwa TFN, Johnstone CM, Grant AD, Smith JE. Novel, low cost CaCl₂ based desiccants for solar crop drying applications. *Renew Energy* 2000;19(4):513–20.
- [161] Shanmugam V, Natarajan E. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Appl Therm Eng* 2007;27(8–9):1543–51.
- [162] Shanmugam V, Natarajan E. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renew Energy* 2006;31(8):1239–51.
- [163] Mahmouda KG, Ball HD. Solar desiccant systems for grain drying. *Energy Convers Manage* 1991;31(6):595–8.
- [164] Hodali R, Bougard J. Integration of a desiccant unit in crops solar drying installation: optimization by numerical simulation. *Energy Convers Manage* 2001;42(13):1543–58.

- [165] Thoruwa TFN, Smith JE, Grant AD, Johnstone CM. Developments in solar dry-ing using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials. *Renew Energy* 1996;9(1-4):686-9.
- [166] Punlek C, Pairintra R, Chindaraksa S, Maneewan S. Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). *Food Bioprod Process* 2009;87(2):77-86.
- [167] Λεωνίδα Καραπιτέρη, «Πρακτική Μετεωρολογία», Αθήνα 1966.
- [168] Παναγιώτη Γιαννούλη, «Νέες Πηγές Ενέργειας», έκδοση Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1989.
- [169] J. Duffie, W. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley N.Y. 1980.
- [170] G. S. Campbell, J. M. Norman, "An Introduction to Environmental Biophysics", Springer.
- [171] Κ.Α.Μπαλαράς, Α.Α.Αργυρίου, Φ.Ε.Καραγιάννης, «Συμβατικές και Ήπιες Μορφές Ενέργειας», ΣΕΛΚΑ-4Μ, ΕΚΔΟΤΙΚΗ, ΑΘΗΝΑ, 2006.
- [172] Βασίλης Σταματόπουλου, «Μελέτη κατασκευής και λειτουργίας έμμεσου ηλιακού ξηραντηρίου για την αποξήρανση Κορινθιακής σταφίδας στην περιοχή του Αιγίου», Πάτρα 2006
- [173] Brenndorfer B, Kennedy L, Bateman COO, Mrema GC, Wereko-Brobby C. Solar dryers Their role in post-harvest processing. Commonwealth Science Council, Commonwealth Secretariat Publications, London, 1985.
- [174] Ferguson WE, Bailey PH. Solar air heater for near ambient crop drying: description, test methods and 1977 results. The British Society for Res Agric Engng, Scottish Inst Agric Engng Departmental Note, 1979;no. SIN/275.
- [175] Ong KS. Solar drying of paddy and timber. In: Proc Solar Energy Symp.: The Utilization of Solar Heat in Industry and Agric. Nice, France, Oct, 1979. p. 339±50.
- [176] Sodha MS, Bansal NK, Kumar K, Bansal PK, Malik MAS. 1987. Solar crop drying. Vol. 1. C. R. C. Press, Palm Beach, Florida, USA.
- [177] Kreider JF, Kreith G. Solar heating and cooling; engineering practical design and economics. McGraw-Hill, New York, 1977.
- [178] Close DJ, Yuso MB. The effects of air leaks on solar air heater behaviour. *Solar Energy* 1978;20:459±63.
- [179] Ezeike GOI. Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system. *Energy in Agric* 1986;5:1±20.
- [180] Henry ZA, Bledsoe BL, Eller DD. Drying of large hay packages with solar heated air. ASAE paper, 1977; no.77-3001.
- [181] Macedo IC, Altermani CAC. Experimental Evaluation of Natural convection solar air heaters. *Solar Energy* 1978;20:367±9.
- [182] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. Wiley, New York, 1980.
- [183] Dickinson WC, Cheremisino PN. Solar Energy Technology Handbook (Part A; Engineering Fundamentals). Marcel Dekker, New York, 1980.
- [184] Gayanilo VC. A solar heated grain dryer for the tropics. Ph.D thesis, Iowa State University, U.S.A., 1980.
- [185] Ekechukwu OV. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. Ph.D thesis, Cranfield Institute of Technology, U.K., 1987.
- [186] Burek SAM, Norton B, Probert SD. Air supported greenhouses. *Appl Energ* 1987;26:245±313.
- [187] Agrano J, editor. Modern plastics encyclopedia. McGraw Hill, New York, 1985±86.
- [188] O.V. Ekechukwu, B. Norton / *Energy Conversion & Management* 40 (1999) 657±667
- [189] J. Watmuff, Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. *Rev. Intern. Heliotech, Marseille, France, 1977.*
- [190] W.C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, *Q. J. Royal Meteorol. Soc.*, 89(1963)339-248.
- [191] S. A. Klein, J.A. Duffie and W.A. Beckmann, Transient consideration of flat-plate solar collectors, *Trans. ASME*, 96A(1974)109-113.
- [192] J.J. Bimbenet, J.D. Daudin and E. Wolf, Air drying kinetics of biological partivle. *Pov. Fourth Internat. Drying Symp., IDS Kyoto, 1989.*
- [193] F. Zagroyba, D. Mihoubi, A. Bellagi and A. Slay, kinetics and characteristic curve for convective and infra-red conditions during drying of clay, *Hung J. Ind. Chem.*, 30(2002)155-160.
- [194] S. Timoumi, D. Mihoubi and F. Zagrouba Etude expérimentale du séchage des pommes et des carottes : cinétiques de séchage et retrait volumique. *Proc. 2nd Symp. Of Science and Technology, Tunisia, 2003, pp.149-155*
- [195] A. Steinfeld and I. Segal, A simulation model for solar thin-layer Drying Technol. 4(44)(1986)535-554
- [196] M. K. Krikida, V.T. Karathanow, Z.B. Maroulis and D. Marinos-Kouris, Druing kineticks of some vegetables, *J. Food Engrn.*, 59(2003)391-403.
- [197] Sachidananda Swain, Din M, Chandrika R, Sahoo GP and S Dam Roy (2014), Performance evaluation of biomass fired dryer for copra drying : A comparison with traditional drying in subtropical climate, *J Food Process Technol* 5 : 294, doi :10.4172/2157-7110.1000294
- [198] agroselida.blogspot.gr/2014/05/blog-post_6193.html
- [199] Thiruchelvam T, Nimal DAD, Upali S (2007) Comparison of quality and yield of copra processed in CRI improved kiln drying and sun drying. *J. of Food Engng* 78: 1446-1451.
- [200] AOAC (1989) Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists.
- [201] Pabuayon IM, Cabahug RD, Castillo SVA, Mendoza MD (2009) Key actors, prices and value shares in the Philippine coconut market chains: Implications for poverty reduction. *J. ISSAS* 15: 52-62.
- [202] Swain S, Din M, Chandrika R, Sahoo GP, Roy SD (2014) Performance Evaluation of Biomass Fired Dryer for Copra Drying: A Comparison with Traditional Drying in Subtropical Climate. *J Food Process Technol* 5: 294. doi:10.4172/2157-7110.1000294
- [203] «A new construction of a mobile combine dryer» Prof. Geramitchioski T. PhD., Prof. Mitrevski V. PhD., Doc. Vilos I. PhD. PhD., Doc. Trajcevski Lj. Faculty of Technical Science – University St. Kliment Ohridski Bitola, Republic of Macedonia [235] Bena B., Fuller R. J. (2002), Natural convection solar dryer with biomass
- [204] Design and evaluation of combined solar and biomass dryer for small and medium Enterprises for developing countries, Okoroigwe E. C., Eke M. N. and Ugwu H. U., Vol. 8(25), pp. 1341-1349, 9 July, 2013, DOI: 10.5897/IJPS2013.3937 ISSN 1992 - 1950 © 2013 Academic Journals, <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- [205] Agona, J.A. and S.M. Nadhy, 1998. Effect of solar drying period of beans on seed viability, cooking time and injuriousness of *Acanthoscelides obtectus* Say. *Afr. Crop Sci. J.*, 6:417-421. [206] Agona, J.A., C. Mutyaba, C. Owori, A. Akol and C. Sembatya, 1999. Manual on improved post harvest handling technologies for food crops in Uganda. MAAIF in Collaboration with SASAKAWA GLOBAL 2000, Kambala-Uganda. [207] AOAC, 1999. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th Edn., Association of Official Analytical Chemists, Maryland, USA. [208] Atukwase, A. A.N. Kaaya and C. Muyanja, 2009. Factors associated with fumonisin contamination in Uganda. *J. Sci. Food Agric.*, 89:2393-2398.
- [209] Axtell, B. and A. Bush, 1991. Try Drying It! Case Studies in the Dissemination of Tray Drying Technology. Practical Action Publishing, London, ISBN-10:1853390399, pp:86.
- [210] Carruthers, I and M. Rodriguez, 1992. Tools for Agriculture: A Guide to Appropriate Equipment for Smallholder Farmers. 4th Edn., Intermediate Technology Publications, London, ISBN:1-85339-100-x, pp:256
- [211] Cassel, K., B. Cambel, M. Draper and B. Epperson, 2001. Aflatoxins: Hazards in grain/aflatoxicosis and Livestock. South Dakota State University Cooperative Extension Service Report, FS 907. College of Agriculture and Biological Science/USDA. <http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS907.pdf>.
- [212] Duangpatra, J. P. Chompreeda, A. Chinaputhi and P. Promchote, 2005. Quality and aflatoxin contamination in imported raw peanut. Proceedings of the International Peanut Conference 2005 Prospects and Emerging Opportunities for Peanut Quality and Utilization Technology, Jan. 9-12, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, pp:63-65.
- [213] FAO, 2000. Mycotoxins in grain. CTA, Postbus 380, 6700 AJ Wageningen, The Netherlands. <http://www.fao.org/wairdocs/x5008e/x5008e01.htm>.
- [214] FAO, 2009. Maize production trends in Uganda. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
- [215] Grybauskas, A.P., P.R. Thomison and E.K. Cassel, 2000. Aflatoxins. Maryland Cooperative Extension Fact Sheet, 444, P88/R2000. <http://dairy.vitaplus.com/pdf/Maryland%20Extention%3B%20Aflotoxins.pdf>.

- [216] Hanlin, R.T. and M. Uiloa, 1979. Atlas of Introductory Mycology. Hunter Publishing Company, Winston-Salem, North Carolina, USA., pp:3-8.
- [217] Kaaya, A.N. and W. Kyamuhangire, 2006. The effect of storage time and agroecological zone on mould incidence and aflatoxin and contamination of maize from trades in Uganda. *Int. J. Food Microbiol.*, 110:217-223.
- [218] Kaaya, A.N., H.L. Warren, S. Kyamanywa and W. Kyamuhangire, 2005. The effect of delayed harvest on moisture content, insect damage, moulds and aflatoxin contamination of maize in Mayuge district. *Of Uganda, J.Sci.Food.Agric.*, 85:2595-2599. [219] Kaaya, A.N., W. Kyamuhangire and S. Kyamanywa, 2006. Factors affecting aflatoxin contamination of harvested maize in the three agroecological zones of Uganda. *J.Applied Sci.*, 6:2401-2407.
- [220] Kyamanywa, S., 1994. Factors Influencing Safe Grain Storage. In: Management of Storage Pests in Uganda. A Training Manual, Kyamanywa, s.(Ed). Export Policy Analysis and Development Unit (EPADU), Ministry of Finance and Economic Planning, Kampala, pp 1-30.
- [221] Munimbazi, C. and L.B. Bullerman, 1996. Molds and mycotoxins in foods from Burundi. *J. Food Prot.*, 59:869-875.
- [222] Mutyaba, C.J., 2000. Biomass-heated natural convection dryer. National Post-Harvest Research Programme, Kawanda Agricultural Research Institute (KARI) Report.
- [223] Nagler, M.J., D. Buangsuwon, K. Jewers, J. Meadley and S. Kenniford et al., 1986. Production and quality control of low aflatoxin maize in the rainy season. Proceedings of the 1986 Department of Agriculture Annual Research Conference, Experts Presentation, Bangkok, Thailand.
- [224] Odogola, W.R. and R. Henriksson, 1991. Postharvest management and storage of maize. Technical Systems for Agriculture. UNDP/OPS Regional Programme on Agricultural Operations Technology for small Holders in East and Southern Africa, pp:162.
- [225] Pitt, J.I. and A.D. Hocking, 1977. Fungi and Food Spoilage. 2nd Edn., Springer, New York, ISBN-10:0834213060, pp:593.
- [226] Sauer, D.B. and R. Burroughs, 1980. Fungal growth, aflatoxin production and moisture equilibration in mixtures of wet and dry corn. *Phytopathology*, 70:516-521.
- [227] Tuite, J., 1982. Examining and Identifying Fungal Cultures Growing out from Corn Kernels. A Laboratory Manual. Perdue University, USA., pp:30.
- [228] USP, 1973. Monthly report of Uganda seed project. Ministry of Agriculture, Entebbe, Uganda, pp:115. Back-up heater, *Solar Energy*, 72, 75-83.
- [229] A.N. Kaaya and W. Kyamuhangire, Drying Maize Using Biomass-Heated Natural Convection Dryer Improves Grain Quality During Storage, *Journal of Applied Sciences* 10 (11): 967-974, 2010, ISSN 1812-5654
- [230] ASTA., 1997. American Spices Trade Association. Available At: <http://www.asta.org>.
- [231] CD-Adapco., 2001. STAR-CD Version 4.02 Methodology. Japan: Computational Dynamics Limited.
- [232] Bolaji, B.O. and P.A. Olalusi, 2008. Performance Evaluation of a Mixed Mode Solar Dryer. Technical Report, pp: 225-231.
- [233] Brenndorfer, B., L. Kennedy, C.O.O. Bateman and D.S. Trim, 1985. Solar Dryers-Their Role in Post-Harvest Processing. Commonwealth Science Council, Commonwealth Secretariat, Marlborough House, pp: 258-260.
- [234] Andrew Ragai Henry Rigit, Abdul Qayoom Jakhriani, Shakeel Ahmed Kamboh and Patrick Low TiongKie, Development of an indirect solar dryer with biomass backup burner for drying pepper berries *World Applied Sciences Journal* 22 (9): 1241-1251, 2013, ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications, 2013, DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.09.2724
- [236] Hall C. (1980). Drying and storage of agricultural crops, The Avi Publishing Company, INC. Westport, Connecticut.
- [237] Leon A.M., Kumar S., Bhattacharya S.C. (2002), A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 367-393.
- [238] E. Tarigan & P. Tekasakul (2005), A mixed mode natural convection solar dryer with biomass burner and heat storage back-up heater
- [239] Dhanushkodi Saravanan, Vincent H. Wilson, Sudhakar Kumarasamy, Design and thermal performance of the solar biomass hybrid dryer for cashew drying, *Series: Mechanical Engineering Vol. 12, No 3, 2014*, pp. 277 – 288
- [240] Tadahmun Ahmed Yassen, Hussain H. Al-Kayiem and Khairul Habib *Mechanical Engineering Department, Universiti Teknologi PETRONAS, Tronoh 31750*, Evaluation of hybrid solar – biomass dryer with no load, *MATEC Web of Conferences* 13, 06007 (2014), DOI: 10.1051/mateconf/201413 06007
C Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2014
- [241] Λαμπριανίδης Γεώργιος, Θωδίδης Γεώργιος, Μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας στα σύγχρονα ξηραντήρια, Τ.Ε.Ι. Καβάλας, Σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, τμήμα Μηχανολογίας, (2012) [243] Κολιός, Ν., Σαραντέας, Α., 'Γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας περιοχής μαγγάνων-Ν. Ερασμίου Ξάνθης. Εφαρμογή των γεωθερμικών ρευστών στην καλλιέργεια σπαραγγιού', 4ο Συνέδριο 'Ήπιων Μορφών Ενέργειας, Ξάνθη, Οκτώβριος 6-9, Πρακτικά, Τόμος Β, σελ. ΓΕΩ 97-106, 1992.
- [242] Sanja Popovska – Vasilevska, Drying of agricultural products with geothermal energy, St. Kliment Ohridski University, Faculty of technical sciences – Bitola ul. «Ivo Ribar Lola» bb, 7000 Bitola, Macedonia
- [244] Shi, J., Le Maguer, M., Kakuda, Y., Liptay, A., Niekamp, F., 'Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration', *Food Research International*, 32, pp. 15-21, 1999.
- [245] Zononi, B., Peri, C., Nani, R., Lavelli, V., 'Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying', *Food Research International*, 31, pp. 395-401, 1998.
- [246] Giovanelli, G., Zononi, B., Lavelli, V., Nani, R., 'Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products', *Journal of Food Engineering*, 52, pp. 135-141, 2002.
- [247] Fytikas, M, Andritsos, N, Karydakis, G, Kolios, N, Mendrinou, D, Papachristou, M. 'Geothermal exploration and development activities in Greece during 1995-1999', *proc. of 'World Geothermal Congress 2000'*, (ed. S. Rybach et al), Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- [248] Ν. Ανδρίτσος, Π. Δαλαμπάκης, Ν. Κολιός, Μονάδα αφυδάτωσης ντομάτας με χρήση γεωθερμικής ενέργειας, Ινστιτούτο τεχνικής χημικών διεργασιών, Θέρμη
- [249] Guillen, H. V., 1987. "A Feasibility Study on the Establishment of Geothermal Food Dehydration Centers in the Philippines," *Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR*, 205 p.
- [250] Lund, J. W. and M. A. Rangel, 1995. "Pilot Fruit Drier for the Los Azufres Geothermal Field, Mexico," *Proceeding of the World Geothermal Congress, Vol. 3*, pp. 2335-2338, Florence, Italy.
- [251] Rayner, R., August 1992. Personal communication. Pace Engineering Sales, Clackamas, OR.
- [252] Thompson, J. F., August 1992 and October 1994. Personal communication. Extension Agricultural Engineer, Biological and Agricultural Engineering Department, University of California at Davis.
- [253] John W. Lund, Design of small fruit dryer using geothermal energy Geo-Heat center, Oregon Institute of technology, Klamath Falls, OR 97601, 1996