

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΞΗΡΑΝΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ**

υπό

Χρυσάφη Νικόλαο

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2007



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5866/1
Ημερ. Εισ.: 26-09-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2007
ΧΡΥ

Copyright © 2007 Χρυσάφης Νικόλαος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Ανδρίτσος Νικόλαος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Μποντόζογλου Βασίλειος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Βλαχογιάννης Μιχάηλ
Διδάσκων Π.Δ. 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ'όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Ανδρίτσο Νικόλαο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Μποντόζογλου Βασίλειο και Βλαχογιάννη Μιχάλη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον κκ. Δαλαμπάκη Πασχάλη για την φιλοξενία του, αλλά και τα πολύτιμα στοιχεία για τη μονάδα ξήρανσης ντομάτας στον Νέο Εράσμιο Ξάνθης. Ευχαριστώ τους φίλους μου Δημήτρη Παπαπροκοπίου, Τάσο Χοροζίδη, Κώστα Σοϊλεμεζίδη και Παναγιώτη Ψωμαδάκη για την ηθική υποστήριξη σε όλα τα έτη των σπουδών μου. Επίσης, ευχαριστώ την Ειρήνη για την κατανόησή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Τέλος, αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου, Γιώργο και Αναστασία, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Χρυσάφης Νικόλαος

ΞΗΡΑΝΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΧΡΥΣΑΦΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ξήρανση αγροτικών προϊόντων με χρήση γεωθερμίας. Η γεωθερμία είναι μία από τις μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι μορφές ενέργειες καθαρές προς το περιβάλλον που έχουν ως απώτερο στόχο την μείωση των εκπομπών των ρύπων που δημιουργούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ορίζεται τι είναι γεωθερμία και τι γεωθερμική ενέργεια. Ποιες είναι οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, τι ρόλο παίζουν στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο, ποια είναι τα τεχνικά και οικονομικά προβλήματα που εμφανίζουν οι εν λόγω εφαρμογές, ενώ αναφέρονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση γεωθερμίας. Στη συνέχεια, ορίζεται τι είναι η ξήρανση αγροτικών προϊόντων και γιατί χρησιμοποιείται. Ποια είναι τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία ξήρανσης καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τη ξήρανση. Ποιες είναι οι κύριες μέθοδοι ξήρανσης ενώ καταγράφονται όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της ξήρανσης (προεπεξεργασία, μεταξηραντική επεξεργασία). Από εκεί και πέρα γίνονται αναφορές για ήδη εγκατεστημένες εφαρμογές ξήρανσης αγροτικών προϊόντων με χρήση γεωθερμίας. Αναφέρονται τα διαφορετικά στοιχεία σε σχέση με τη συμβατική ξήρανση αγροτικών προϊόντων καθώς και τα οφέλη από τη δημιουργία τέτοιων

μονάδων. Ακολούθως, γίνεται περιγραφή μίας μονάδας ξήρανσης ντομάτας με χρήση γεωθερμίας που βρίσκεται στο Ν. Εράσμιο Ξάνθης και η οποία λειτουργεί για αρκετά χρόνια με ιδιαίτερη επιτυχία. Περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας καθώς και ο μηχανολογικός εξοπλισμός που περιλαμβάνει η εν λόγω μονάδα. Επίσης, αναλύονται τα οικονομικά στοιχεία της επένδυσης και καταδεικνύονται τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση γεωθερμίας. Στη συνέχεια επιχειρείται η μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας καθώς και η βελτιστοποίηση της μονάδας ξήρανσης η οποία περιγράφηκε προηγουμένως. Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο υπολογισμού του χρόνου ξήρανσης το οποίο φαίνεται να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών. Παρ' όλα αυτά για τη βελτίωση του μοντέλου, καθώς και για την επιτυχή βελτιστοποίηση της μονάδας ξήρανσης, απαιτούνται περισσότερα στοιχεία από τη λειτουργία της μονάδας.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Ενέργεια και περιβάλλον	1
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	2
1.3 Φαινόμενο του θερμοκηπίου	3
1.4. Στόχος και διάρθρωση της διπλωματικής.....	4
2. Γεωθερμική ενέργεια	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2. Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας.....	9
2.2.1 Ηλεκτρικές χρήσεις.....	9
2.2.2 Άμεσες χρήσεις.....	10
2.3 Η γεωθερμία στην Ελλάδα.....	16
2.4 Τεχνικά και οικονομικά προβλήματα	17
2.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	19
3. Ξήρανση.....	22
3.1 Γενικά.....	22
3.2 Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα	23
3.3 Θεωρία της ξήρανσης	26
3.4 Διεργασίες ξήρανσης	29
3.4.1 Προεπεξεργασία.....	30
3.4.2 Κύριες μέθοδοι ξήρανσης.....	31
3.4.3 Μεταξηραντική επεξεργασία	36
3.4.4 Εκπομπές ρύπων και αντιρρυπαντική τεχνολογία	37
3.5 Επίδραση της ξήρανσης στα αγροτικά προϊόντα.....	38
3.6 Μαθηματικό μοντέλο της ξήρανσης.....	41
4. Ξήρανση με χρήση γεωθερμίας	48
4.1 Εισαγωγή.....	48
4.2 Αρχές λειτουργίας.....	49
5. Περιγραφή της μονάδας και της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας	52
5.1 Εισαγωγή.....	52
5.2 Διεργασίες ξήρανσης	53
5.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	59
5.4 Οικονομικά στοιχεία	60
5.5 Συμπεράσματα και προοπτικές.....	62
6. Μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας	64
6.1 Εισαγωγή.....	64
6.2 Μαθηματικό μοντέλο.....	64
6.3 Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου	68
6.4 Εφαρμογή του μοντέλου στη μονάδα ξήρανσης	69
6.5 Βελτιστοποίηση της διεργασίας.....	71
7. Σύνοψη διπλωματικής εργασίας	75
7.1 Συμπεράσματα	75
7.2 Προτάσεις	76
Βιβλιογραφία	78

1. Εισαγωγή

1.1. Ενέργεια και περιβάλλον

Η κατανάλωση ενέργειας καθώς και η εξέλιξη των ανθρώπινων κοινωνιών είναι άμεσα συνυφασμένες από την αρχή της ιστορίας. Σε κάθε βήμα του ανθρώπινου είδους η εξέλιξη της κοινωνίας συνδυάζεται με αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Απόγειο αυτής της ιστορικής πραγματικότητας είναι η βιομηχανική επανάσταση με τη δραματική αύξηση των ενεργειακών δαπανών και την πλήρη εξάρτηση της ανθρωπότητας από τα ορυκτά καύσιμα. Οι ενεργειακοί πόροι είναι ένας από τους θεμέλιους λίθους του σύγχρονου πολιτισμού και κάθε καθημερινή μας δραστηριότητα σχετίζεται με άμεσο ή έμμεσο τρόπο με την κατανάλωση ενέργειας.

Έτσι δύο από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα είναι η εξάντληση των ενεργειακών πόρων και η μη δημοκρατική κατανομή τους, καθώς και η υπερθέρμανση του πλανήτη και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτά τα δύο πολυσύνθετα προβλήματα πρέπει να αρχίσουν να επιλύονται άμεσα καθώς οι επιπτώσεις του είναι πάρα πολύ μεγάλες και δύσκολα αναστρέψιμες. Τα προβλήματα αυτά αυξάνονται με γεωμετρική πρόοδο λόγω της αύξησης του πληθυσμού της γης αλλά και της προσπάθειας αυτού για καλύτερη ποιότητα ζωής. Σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα το πρόβλημα είναι τόσο μεγάλο που μπορεί μέσα στις επόμενες δεκαετίες οι κλιματικές αλλαγές να είναι τόσο έντονες που οι γενιές που έρχονται να αντιμετωπίσουν πρόβλημα επιβίωσης. Επομένως δεν θα ήταν υπερβολικό να θεωρήσουμε ότι στη παρούσα στιγμή αλλά και στο κοντινό μέλλον το ενεργειακό και περιβαλλοντικό πρόβλημα του πλανήτη ως πρώτη προτεραιότητα της ανθρωπότητας καθώς και το μεγάλο στοίχημα που πρέπει οπωσδήποτε να κερδίσει. Στη κατεύθυνση αυτή έχουν προταθεί διάφορα μέτρα τα πιο σημαντικά από αυτά είναι:

- Καθαρότερες τεχνολογίες και αξιοποίηση νέων κοιτασμάτων
- Εξοικονόμηση-ορθολογική χρήση ενέργειας
- Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργεια.

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως *ανανεώσιμη πηγή ενέργειας* (ΑΠΕ) ονομάζεται εκείνη η μορφή ενέργειας η οποία δεν εξαντλείται στο απώτερο ορατό μέλλον της ανθρωπότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σταθερό και αξιόπιστο τρόπο. Συχνά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται με τις ονομασίες εναλλακτικές μορφές ενέργειας (alternative energy resources), από το γεγονός ότι μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές ενέργειας, ήπιες (bening), επειδή έχουν σχετικά μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον ή μικρότερες από τις επιπτώσεις των συμβατικών μορφών ενέργειας και πρόσθετες (additive), επειδή με το τωρινό επίπεδο τεχνολογίας μόνο συμπληρωματικά μπορούν να συνυπάρχουν με τις συμβατικές μορφές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Σήμερα οι ΑΠΕ καλύπτουν το 8% της ενέργειας που καταναλώνει η Αμερική και το 6% στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Σύμφωνα με παγκόσμιο οργανισμό ενέργειας (International Energy Association) οι ΑΠΕ ταξινομούνται ως εξής:

- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Αιολική ενέργεια
- Καύσιμες ανανεώσιμες πηγές και απορρίμματα (π.χ. βιομάζα)
- Γεωθερμία
- Παλιρροϊκή ενέργεια
- Ενέργεια από τα κύματα
- Θερμότητα από τους ωκεανούς

Συχνά οι τρεις τελευταίες αναφέρονται και ως ενέργεια από τη θάλασσα.

Περίληπτικά θα λέγαμε ότι τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ συνοψίζονται στις μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, ενώ συμβάλλουν αποφασιστικά στην ενεργειακή ανεξάρτηση και σταθερότητα κάθε χώρας καθώς η τιμή της ενέργειας παραμένει σταθερή και δεν επηρεάζεται από τις διεθνείς εξελίξεις (πετρελαϊκές κρίσεις). Επιπλέον βοηθούν σημαντικά στην αποκέντρωση των ενεργειακών αγορών με ταυτόχρονη δημιουργία θέσεων εργασίας καθώς μπορούν να δημιουργήσουν μικρά και ευέλικτα ενεργειακά συστήματα ιδιαίτερα σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές. Τέλος, το δυναμικό των

ανανεώσιμων πόρων είναι τόσο μεγάλο που όταν διαχειρίζεται με ορθολογικό τρόπο μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανεξάντλητο.

Βέβαια δεν υπάρχουν μόνο πλεονεκτήματα στην χρησιμοποίηση των ΑΠΕ. Πρωταρχικό πρόβλημα και βασική τροχοπέδη στη διείσδυση των ΑΠΕ αποτελεί το υψηλό αρχικό κόστος. Επίσης δεν υπάρχει ακόμα το τεχνολογικό υπόβαθρο έτσι ώστε οι ΑΠΕ να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες σε μεγάλη κλίμακα.

1.3 Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Τελευταία γίνονται εκτενείς συζητήσεις για το κατά πόσο μπορούν οι ΑΠΕ να παίξουν σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας και να βοηθήσουν στην απεξάρτηση του πλανήτη από τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Η αιτία για αυτές τις συζητήσεις είναι η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Τι εννοούμε όμως με τον όρο φαινόμενο του θερμοκηπίου; Ως *φαινόμενο του θερμοκηπίου* ορίζουμε την ιδιότητα που έχει η ατμόσφαιρα της γης να διατηρεί μία θερμοκρασία ικανή για να αναπτυχθεί ζωή στο πλανήτη. Οφείλεται στην υγρασία και τα νέφη που περιέχει η γήινη ατμόσφαιρα σε συνδυασμό με ορισμένα αέρια που υπάρχουν στην συγκέντρωση της, τα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου. Χωρίς τα φαινόμενο του θερμοκηπίου η θερμοκρασία της γης θα ήταν κατά 33°C χαμηλότερη και πολλά είδη, ανάμεσα τους και ο άνθρωπος, ίσως να μην υπήρχαν. Βέβαια τα τελευταία χρόνια ο όρος έχει συνδυαστεί με την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στη γήινη ατμόσφαιρα. Πέρα από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) που είναι το πλέον γνωστό, αλλά αέρια του θερμοκηπίου είναι το μεθάνιο (CH₄) και τα οξειδία του αζώτου (NO_x) και οι χλωροφθοράνθρακες (CFC).

Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης είναι ένα πολύ σημαντικό περιβαλλοντικό φαινόμενο με επιπτώσεις σε παγκόσμια κλίμακα που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές στο πλανήτη. Πρωτίστως προκαλεί την αύξηση στη στάθμη της θάλασσας λόγω του λιώσιματος των πάγων στους δύο πόλους φαινόμενο που μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αφανισμό παραθαλάσσιων περιοχών του πλανήτη. Επιπλέον προκαλεί την εμφάνιση με μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με το παρελθόν ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι τυφώνες και τροπικές καταιγίδες καθώς και παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας.

Καθώς όλοι αντιλαμβάνονται το μέγεθος του προβλήματος και των άμεσων αποφάσεων που πρέπει να ληφθούν, 160 χώρες υπέγραψαν το 1997 το πρωτόκολλο του Κιότο σαν μία πρώτη προσπάθεια για την αντιμετώπισή του. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό όλες οι χώρες που το υπέγραψαν οφείλουν να μειώσουν κατά 5% τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως το 2012 σε σχέση με τις εκπομπές του 1990. Το δυστύχημα σε αυτή τη προσπάθεια είναι η μη υπογραφή του πρωτοκόλλου από τις Η.Π.Α., οι οποίες εκπέμπουν σχεδόν το 1/3 των παγκόσμιων ρύπων, καθώς και από τις δύο ταχύτατα αναπτυσσόμενες υπερδυνάμεις Κίνα και Ινδία.

Στην προσπάθεια αυτή οι ΑΠΕ θα παίξουν σημαντικό ρόλο καθώς το μεγάλο τους πλεονέκτημα σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα είναι οι πολύ μικρότερες επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον. Εάν παρατηρήσουμε τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά το κύκλο ζωής μίας ενεργειακής πηγής θα δούμε ότι το πετρέλαιο εκπέμπει 818 g/kWh ενώ οι ανανεώσιμες έχουν σημαντικά μικρότερες. Η γεωθερμία που έχει τις μεγαλύτερες εκπομπές είναι της τάξης των 79 g/kWh ενώ τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα που εμφανίζουν και τις χαμηλότερες εκπομπές είναι μόλις 2 g/kWh. Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα με τη χρήση των ΑΠΕ αποτρέπονται εκπομπές πάνω από 1500 εκατομμυρίων τόνων CO₂ σε ετήσια βάση ενώ ως το 2020 υπολογίζεται ότι θα μπορέσουν να αποτραπούν εκπομπές της τάξης των 6000-9000 εκατομμυρίων τόνων CO₂.

1.4. Στόχος και διάρθρωση της διπλωματικής

Μία από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι και η γεωθερμία. Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιεί τη θερμότητα που υπάρχει σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια της γης για διάφορες εφαρμογές. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δεν απαιτεί μεγάλο αρχικό κεφάλαιο, μπορεί να ανακτηθεί σχετικά εύκολα ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Το κόστος λειτουργίας τέτοιων εφαρμογών είναι συγκρίσιμο με το κόστος των συμβατικών καυσίμων. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά κάνουν αυτές τις εφαρμογές αρκετά ελκυστικές καθώς πέρα από το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει υπάρχουν και σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ιδιαίτερα η Ελλάδα εμφανίζει ιδιαίτερες προοπτικές καθώς η γεωθερμία είναι παρούσα σε αρκετές περιοχές της χώρας μας.

Οι κύριες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας είναι η θέρμανση χώρων, η θέρμανση θερμοκηπίων, η θέρμανση υδατοκαλλιεργειών, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η ξήρανση αγροτικών προϊόντων.

Η ξήρανση αγροτικών προϊόντων με χρήση γεωθερμίας είναι και το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αέρα που εισέρχεται μέσα στο ξηραντήριο. Είναι μία εφαρμογή με ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς έχει εξαιρετικές προοπτικές και βοηθάει στην ανάπτυξη της οικονομίας αγροτικών περιοχών. Ήδη υπάρχουν εγκατεστημένα γεωθερμικά ξηραντήρια σε όλο το κόσμο, ενώ και στην Ελλάδα υπάρχει ένα γεωθερμικό ξηραντήριο ντομάτας. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διεργασίας της ξήρανσης, η παρουσίαση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων από τη χρήση γεωθερμίας και οι προοπτικές καθώς και τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν για να ευρύτερη διάδοση της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε έξι ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαιο 2 - 7, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο ορισμός της γεωθερμίας και της γεωθερμικής ενέργειας, οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας καθώς τα τεχνικά και οικονομικά προβλήματα που προκύπτουν. Τέλος αναφέρονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση γεωθερμίας.

Στο Κεφάλαιο 3 ορίζεται τι είναι η ξήρανση αγροτικών προϊόντων καθώς και γιατί χρησιμοποιείται, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη ξήρανση, τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη ξήρανση καθώς και τις κύριες μεθόδους ξήρανσης.

Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρονται εφαρμογές ξήρανσης αγροτικών προϊόντων με χρήση γεωθερμίας, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας τους και οι διαφορές τους από ξηραντήρια με χρήση συμβατικών μεθόδων.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η μονάδα ξήρανσης ντομάτας η οποία είναι εγκατεστημένη στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης. Περιγράφεται αναλυτικά όλος ο μηχανολογικός, εξοπλισμός και η παραγωγική διαδικασία καθώς αναφέρονται και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της εν λόγω μονάδας. Τέλος δίνονται κάποια οικονομικά στοιχεία για τη λειτουργία της μονάδας.

Στο Κεφάλαιο 6 επιχειρείται η μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ξηραντηρίου. Γίνεται μία

σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πραγματικά δεδομένα και στη συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας.

Τέλος στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο ίδιο αντικείμενο.

2. Γεωθερμική ενέργεια

2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο γεωθερμία εννοούμε τον εφαρμοσμένο επιστημονικό κλάδο που περιλαμβάνει όλο το φάσμα της έρευνας από τη γήινη ροή θερμότητας, τις συνθήκες κατανομής των θερμοκρασιών στο υπέδαφος, το μηχανισμό της κυκλοφορίας των θερμών ρευστών σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες, καθώς και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, μέχρι τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των γεωθερμικών πεδίων με κατάλληλες παραγωγικές γεωτρήσεις.

Κυριολεκτικά με τον όρο γεωθερμική ενέργεια εννοούμε την ενέργεια που βρίσκεται στη γη και δημιουργεί διάφορα γεωλογικά φαινόμενα. Στην πραγματικότητα με τον όρο γεωθερμική ενέργεια εννοούμε την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη γη με μορφή ατμού ή θερμού νερού και την οποία μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε. Η ενέργεια αυτή για να είναι εκμεταλλεύσιμη πρέπει να υπάρχουν ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες και να βρίσκεται σε βάθος μικρότερο των τριών χιλιομέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Η ενέργεια αυτή είναι συνήθως συσσωρευμένη σε μία ορισμένη γεωλογική περιοχή που καλείται γεωθερμική περιοχή ή πεδίο. Η ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου όσο και η σπουδαιότητά του ορίζεται από την γεωθερμική βαθμίδα της εκάστοτε περιοχής. Με τον όρο γεωθερμική βαθμίδα ορίζουμε τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος από την επιφάνεια της γης. Η γεωθερμική βαθμίδα ποικίλλει από 5°C/km έως 70°C/km και η μέση τιμή της είναι γύρω στους 30°C/km. Για να είναι μία περιοχή γεωθερμικά ενδιαφέρουσα πρέπει η γεωθερμική της βαθμίδα να είναι μεγαλύτερη από το μέσο όρο. Τέτοιες περιοχές υπάρχουν πολλές σε όλο τον πλανήτη, αλλά και σε όλη την Ελλάδα και κυρίως εμφανίζονται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.

Τι είναι όμως ένα «γεωθερμικό σύστημα» και τι συμβαίνει μέσα σε αυτό; Σχηματικά μπορεί να περιγραφεί ως «ένα σύστημα» που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελείται από «κινούμενο νερό» το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια (Hochstein, 1990). Ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από 3 κύρια συστατικά: μία πηγή θερμότητας, έναν ταμειυτήρα και το ρευστό. Η πηγή θερμότητας μπορεί να είναι μία μαγματική διείδυση (με θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 600°C) η οποία μπορεί να έφτασε σε μικρά βάθη (5

με 10 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης), είτε να προέρχεται από τη φυσιολογική αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος. Ο ταμιευτήρας είναι ουσιαστικά ένα σύστημα διαπερατών πετρωμάτων από τα οποία τα κυκλοφορούντα ρευστά απάγουν θερμότητα. Το γεωθερμικό ρευστό είναι νερό, μετεωρικής προέλευσης τις περισσότερες φορές, σε υγρή ή αέρια φάση, κάτι που εξαρτάται από τη πίεση και τη θερμοκρασία και περιέχει συνήθως σημαντικές ποσότητες διαλυμένων στερεών και αερίων όπως διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο.

Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της συναγωγής/κυκλοφορίας των ρευστών (fluid convection). Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας. Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, οπότε αυτά παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ αντικαθίστανται στη συνέχεια από ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας, που προέρχονται από τα περιθώρια του γεωθερμικού συστήματος. Λόγω της θερμικής συναγωγής προκαλείται λοιπόν θερμοκρασιακή αύξηση στο ανώτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, καθώς οι θερμοκρασίες στα κατώτερα τμήματα μειώνονται (White, 1973).

Γενικά θα λέγαμε ότι η γεωθερμική ενέργεια είναι μία ήπια, εναλλακτική μορφή ενέργειας η οποία με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος των ενεργειακών μας αναγκών. Οι χρήσεις και οι εφαρμογές της ποικίλλουν και περιλαμβάνουν τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη ζήρανση αγροτικών προϊόντων τη θέρμανση θερμοκηπίων και τη θέρμανση κατοικιών . Η περιοχή των θερμοκρασιών των θερμών νερών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αυτές εκτείνεται από τους 20°C (για θέρμανση εδάφους) έως τους 280°C (για παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας). Επίσης λόγω της περιεκτικότητας των γεωθερμικών ρευστών σε αέρια και στερεά τα οποία είναι αξιοποιήσιμα, μπορούν να αποκτηθούν με σχετικά οικονομικό τρόπο από αυτά.

2.2. Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

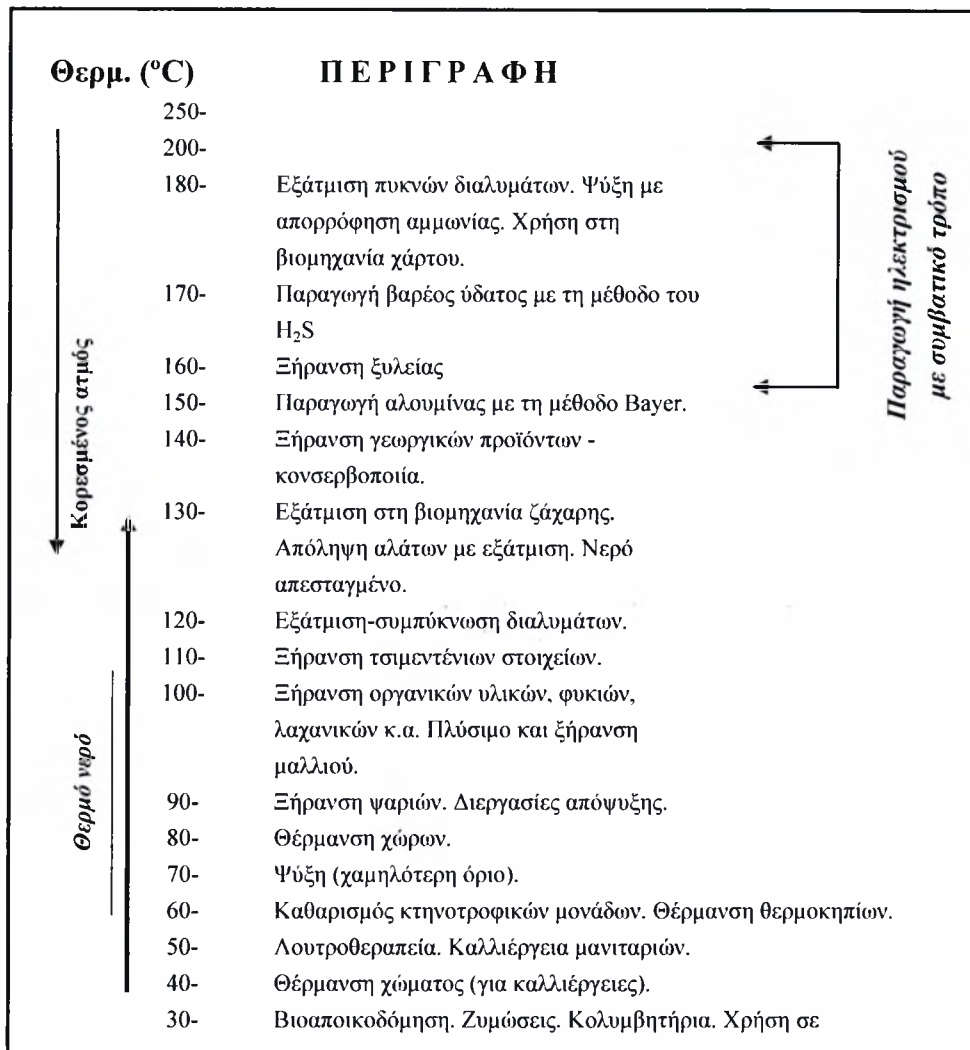
Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες στις άμεσες χρήσεις (direct uses) και στις ηλεκτρικές χρήσεις (electric uses). Ως άμεσες χρήσεις ορίζονται οι χρήσεις που εκμεταλλεύονται τη θερμότητα του ρευστού χωρίς να έχει παραχθεί ενδιάμεσα ηλεκτρική ενέργεια ενώ οι ηλεκτρικές χρήσεις αναφέρονται στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο παγκόσμιο ισοζύγιο ενέργειας η γεωθερμία καταλαμβάνει ποσοστό μόλις 0,1 %, το οποίο αν και αρκετά χαμηλό, σε εθνικό επίπεδο μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Τυπικά το παράδειγμα αυτό της Ισλανδίας που το μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών της αναγκών καλύπτεται από τη γεωθερμία. Οι εφαρμογές με τη μεγαλύτερη διάδοση είναι οι θέρμανση χώρων, οι ιχθυοκαλλιέργειες, οι αγροτικές εφαρμογές και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2.1 δίνεται το διάγραμμα Lindal το οποίο παρουσιάζει τις χρήσεις της γεωθερμίας ανάλογα με τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών που χρησιμοποιούνται.

2.2.1 Ηλεκτρικές χρήσεις

Η πρώτη απόπειρα για τη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με γεωθερμική ενέργεια ξεκίνησε το 1904 στο Larderello της Ιταλίας. Σήμερα περίπου 9000 MW είναι εγκατεστημένα σε όλο το κόσμο. Στη χώρα μας έγινε μια προσπάθεια στη Μήλο με μία μονάδα 2 MW η οποία λειτούργησε από το 1985 έως το 1989. Έχει εκτιμηθεί ότι το γεωθερμικό δυναμικό για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανέρχεται στα 120 MW στη Μήλο και άλλα 60 MW στη Νίσυρο. Το κόστος παραγωγής με γεωθερμία είναι άμεσα συγκρίσιμο με το κόστος παραγωγής με χρήση ορυκτών καυσίμων και κυμαίνεται από 0,03 έως 0,08 € ανά kWh.

Ο τύπος ή ο κύκλος μονάδων που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια καθορίζεται από το είδος του πεδίου (ατμός, διφασικό ρευστό) και από τη σύσταση των γεωθερμικών ρευστών. Συνοπτικά οι κυριότεροι τύποι μονάδων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα είναι οι εξής:

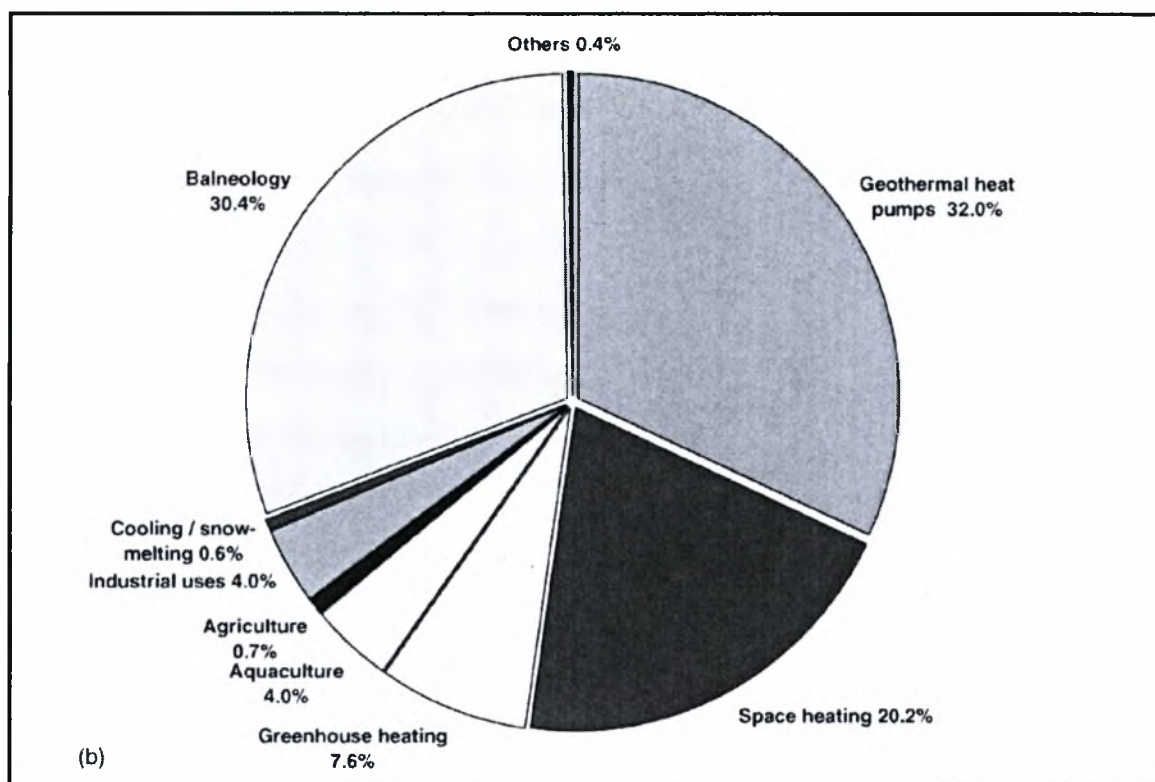
- Με απευθείας χρησιμοποίηση του ατμού (Direct Steam Expansion)
- Με εκτόνωση διφασικού ρευστού (flash Condensing)
- Με χρησιμοποίηση δευτερεύοντος ρευστού (Binary fluid cycle)
- Με συνδυασμένο κύκλο ατμού και δευτερεύοντος ρευστού



Σχήμα 2.1: Διαγράμμα Lindal για της χρήσεις γεωθερμίας.

2.2.2 Άμεσες χρήσεις

Οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας είναι οι πλέον διαδεδομένες και καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Το έτος 2005 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων με άμεση χρήση γεωθερμίας ανήλθε στα 28268 MW. Παρόλο που το ποσοστό των άμεσων χρήσεων της γεωθερμίας δεν καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό στη παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ο ρόλος της δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση γεωθερμίας αντικαθιστά τη χρήση ορυκτών καυσίμων εξοικονομώντας σε ετήσια βάση 128 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου ή ισοδύναμα τη παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου για δύο μέρες. Η άμεση χρήση γεωθερμίας είναι κυρίως υπόθεση της Ευρώπης καθώς κατέχει το 40% της εγκατεστημένης ισχύος.



Σχήμα 2.2: Άμεσες χρήσεις γεωθερμίας σε παγκόσμιο επίπεδο για το 2005 (τα ποσοστά είναι ανά συνολική χρησιμοποιούμενη γεωθερμική ενέργεια).

Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

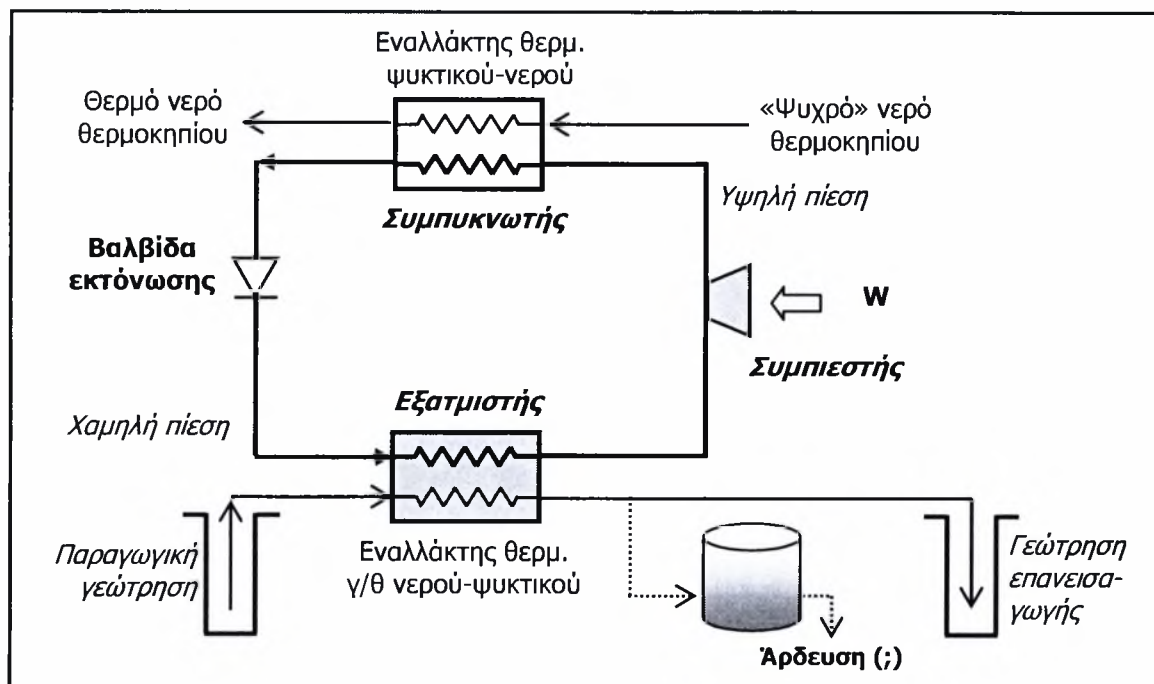
Η πιο διαδεδομένη άμεση χρήση γεωθερμίας είναι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας καθώς καταλαμβάνουν το 32% της χρησιμοποιούμενης γεωθερμικής ενέργειας. Γενικά με τον όρο αντλία θερμότητας ονομάζουμε οποιαδήποτε συσκευή έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο με χαμηλή θερμοκρασία σε ένα μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται είτε για τη ψύξη-θέρμανση κατοικιών είτε για τη θέρμανση θερμοκηπίων.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν ικανοποιητικό συντελεστή απόδοσης (COP), μεγαλύτερο από 3,5 και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις με θερμοκρασίες νερών μικρότερες των 35°C. Επειδή έχουν ένα σημαντικό κόστος εγκατάστασης συνηθίζεται να υπάρχει και ένα συμπληρωματικό συμβατικό σύστημα θέρμανσης με λέβητα καύσης ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Τα βασικά εξαρτήματα μίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας είναι τα εξής:

- Ο συμπυκνωτής
- Ο εξατμιστής

- Ο συμπιεστής
- Η βαλβίδα εκτόνωσης
- Η πηγή ενέργειας (γεωθερμικά ρευστά ή θερμότητα πετρωμάτων και εδάφους σε ορισμένο βάθος)

Η αρχή λειτουργίας αυτών των συστημάτων εμφανίζεται στο Σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα γεωθερμικής αντλίας νερού-νερού.

Γεωθερμική χρήση για λουτροθεραπευτικούς σκοπούς και θέρμανση πισινών

Είναι η δεύτερη πιο διαδεδομένη χρήση καταλαμβάνοντας το 30,2% της συνολικής χρησιμοποιούμενης γεωθερμικής ενέργειας και αποτελεί την αρχαιότερη καθώς τα θερμά λουτρά ήταν αρκετά διαδεδομένα ακόμη και από την αρχαιότητα. Σε αυτές τις εφαρμογές το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται απευθείας και σημαντικό ρόλο στην αξιοποίησή τους παίζουν οι διαλυμένες ουσίες που βρίσκονται σε αυτά. Οι διαλυμένες ουσίες είναι αυτές που προκαλούν τα ευεργετικά αποτελέσματα στους επισκέπτες των λουτρών. Παράλληλα όμως πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με τις διαλυμένες ουσίες που μπορούν να είναι επιβλαβείς και σε μερικές περιπτώσεις ακόμη και τοξικές (π.χ. υδρόθειο).

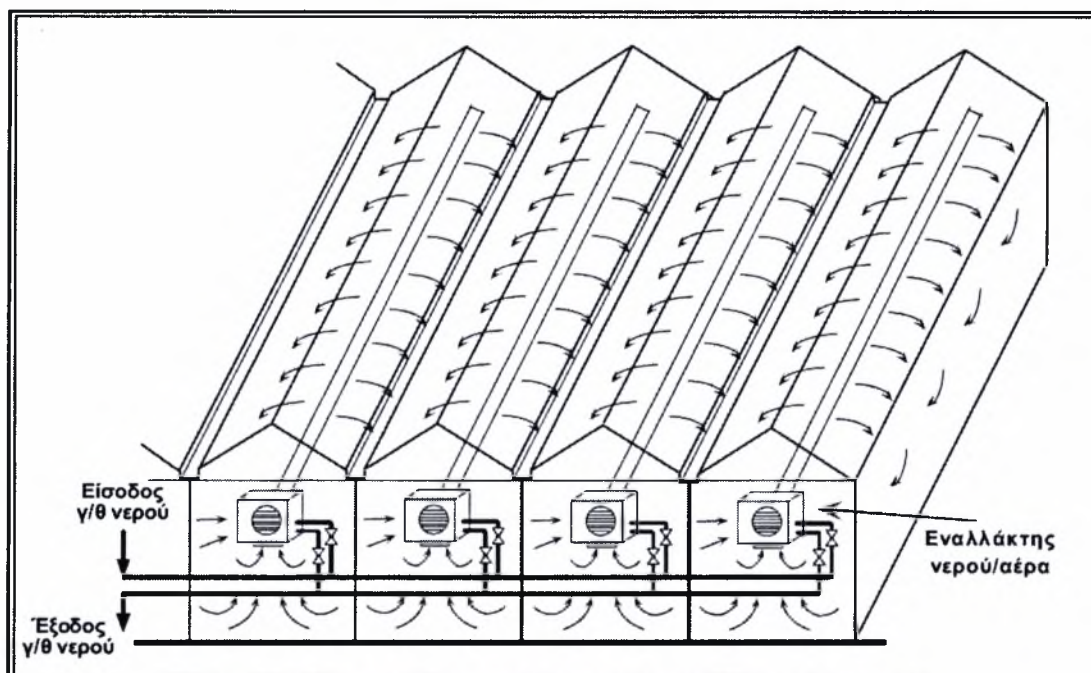
Θέρμανση κατοικιών με χρήση γεωθερμίας

Καταλαμβάνει ένα ποσοστό 15,2% της συνολικής χρησιμοποιούμενης γεωθερμικής ενέργειας. Αν και το ποσοστό της στο συνολικό ισοζύγιο έχει μειωθεί η δυναμικότητα της έχει αυξηθεί. Ένα τυπικό σύστημα θέρμανσης χώρων είναι το εξής:

- Τμήμα στο πεδίο. Αποτελείται από σύστημα γεωτρήσεων, σωληνώσεων συλλογής ρευστών και αν είναι απαραίτητο από αντλίες και εναλλάκτες υγρού-υγρού. Δύο είδη αντλιών είναι περισσότερο διαδεδομένα οι αξονικές φυγόκεντρες αντλίες και οι ηλεκτρικές φυγόκεντρες αντλίες οι οποίες τοποθετούνται σε κάποιο βάθος.
- Ο εναλλάκτης θερμότητας. Οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι δύο τύπων εναλλάκτες: πλακών και εναλλάκτες αυλών και κελύφους. Τέλος λιγότερο συχνά χρησιμοποιείται και ο υπόγειος εναλλάκτης, ο οποίος τοποθετείται στο ταμιευτήρα και θερμαίνει νερό που στέλνεται από την επιφάνεια.
- Οι σωληνώσεις μεταφοράς των ρευστών. Αφορά τις σωληνώσεις των ρευστών ή των νερών που θερμαίνονται από αυτά, από το πεδίο μέχρι τη περιοχή που πρόκειται να θερμανθούν. Το κόστος τους είναι αρκετά σημαντικό και είναι είτε πλαστικοί ($T < 80^{\circ}\text{C}$) είτε χαλύβδινοι.
- Το σύστημα διανομής νερού.
- Το σύστημα θέρμανσης. Αποτελείται από εναλλάκτες αέρα-υγρού όπως και με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Τρεις τύποι εναλλακτών χρησιμοποιούνται, αυτοί που χρησιμοποιούν την εξαναγκασμένη ροή, αυτοί που λειτουργούν με φυσική συναγωγή και αυτοί που λειτουργούν με ακτινοβολία (ενδοδαπέδιοι σωλήνες).
- Βοηθητική εγκατάσταση. Είναι χρήσιμη όταν η γεωθερμική ενέργεια δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες αιχμής για θέρμανση και αποτελείται από συμβατικό σύστημα θέρμανσης με λέβητα.
- Δίκτυο σύνδεσης. Δίκτυο σύνδεσης με τις κατοικίες ή τα θερμοκήπια.
- Σύστημα διάθεσης των γεωθερμικών ρευστών. Αν και ο καλύτερος τρόπος διάθεσης θα ήταν η επανεισαγωγή των ρευστών στο ταμιευτήρα συχνά τα ρευστά διατίθενται σε επιφανειακούς αποδέκτες, ενώ σπανιότερα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άρδευση.

Θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους

Μία πολύ σημαντική χρήση της γεωθερμίας είναι η θέρμανση θερμοκηπίων που σε τοπικό επίπεδο μπορεί να συντελεί ουσιαστικά στην ανάπτυξη της γεωργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της Ουγγαρίας που το 85% των θερμοκηπίων λαχανικών και το 45% των θερμοκηπίων λουλουδιών χρησιμοποιούν γεωθερμική ενέργεια. Η συμμετοχή της θέρμανσης θερμοκηπίων στη παγκόσμια χρησιμοποιούμενη γεωθερμική ενέργεια ανέρχεται στο 7,6%. Λόγω του μεγάλου αρχικού κόστους είναι σημαντική η επιλογή της καλλιέργειας. Τα τελευταία χρόνια ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις ήταν οικονομικά μη συμφέρουσες λόγω του γεγονότος ότι οι καλλιέργειες που είχαν επιλεχθεί δεν είχαν μεγάλο περιθώριο κέρδους και είχαν σημαντικό ανταγωνισμό από ανάλογα προϊόντα που προέρχονταν από χώρες με μικρότερο εργατικό κόστος.



Σχήμα 2.4: Θέρμανση θερμοκηπίου με χρήση εναλλάκτη αέρα υγρού.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων ή του εδάφους επιτυγχάνεται με τις παρακάτω διατάξεις:

- Με τη θέρμανση του αέρα του θερμοκηπίου με τη χρήση εναλλάκτη αέρα υγρού.
- Με τη θέρμανση του χώρου ή του εδάφους με επιδαπέδιους ή/και υπερυψωμένους σωλήνες.
- Με τοποθέτηση εναλλακτών στα πλευρικά τοιχώματα του θερμοκηπίου.

- Με ψεκασμό της οροφής του θερμοκηπίου ή διέλευση υγρού σε διπλά τοιχώματα της οροφής.
- Με συνδυασμό όλων των παραπάνω.

Γεωθερμική θέρμανση υδατοκαλλιιεργειών

Οι υδατοκαλλιιεργειες, που ουσιαστικά αποτελούν την ελεγχόμενη εκτροφή υδρόβιων οργανισμών, αποτελούν σπουδαία εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω της αυξημένης ζήτησής τους στην αγορά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκτροφής των ειδών αυτών είναι πολύ πιο σημαντικός σε σχέση με τα είδη που αναπτύσσονται στην ξηρά (θηλαστικά και πτηνά). Τα είδη που κατά παράδοση εκτρέφονται σε τέτοιες μονάδες είναι: κυπρίνος, γατόψαρο, λαβράκια, κέφαλοι, χέλια, σολομοί, μουρούνες, γαρίδες, αστακοί, караβίδες, κάβουρες, στρείδια, μύδια, χτένια κλπ. Οι υδατοκαλλιιεργειες περιλαμβάνουν επίσης την εκτροφή κροκοδείλων και αλιγατόρων, που αξιοποιούνται συνήθως ως τουριστικό αξιοθέατο αλλά και για την εκμετάλλευση του δέρματός τους, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια πολύ επικερδή δραστηριότητα.

Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τα υδρόβια είδη κυμαίνονται κατά βάση μεταξύ 20 και 30°C. Το μέγεθος των εγκαταστάσεων εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία των ρευστών, τη θερμοκρασία που απαιτείται στις δεξαμενές εκτροφής και από τις θερμικές απώλειες των τελευταίων.

Η καλλιιεργεια της σπιρουλίνας (*spirulina*) θεωρείται επίσης μια μορφή υδατοκαλλιιεργειας. Λόγω της υψηλής διατροφικής του αξίας, αυτό το μονοκυτταρικό, σπειροειδές και γαλάζιο-πράσινο φύκος, συχνά αποκαλείται «υπερτροφία». Επίσης, έχει προταθεί ως λύση στο πρόβλημα της ασιτίας στις φτωχότερες περιοχές του πλανήτη, όμως για την ώρα χαρακτηρίζεται στο εμπόριο απλά ως «συμπλήρωμα διατροφής». Η σπιρουλίνα καλλιιεργείται σήμερα σε αρκετές τροπικές και υπο-τροπικές χώρες, ενώ υπάρχει και μία μικρή μονάδα στον ελληνικό χώρο στη Νιγρίτα Σερρών, σε λίμνες ή τεχνητές δεξαμενές, όπου επικρατούν ιδανικές συνθήκες για τη γρήγορη ανάπτυξή της (μέσα σε ένα ζεστό, αλκαλικό περιβάλλον, πλούσιο σε CO₂).

Βιομηχανικές χρήσεις

Οι βιομηχανικές χρήσεις της γεωθερμίας, αν και δεν είναι πολύ διαδεδομένες έχουν μία σταθερή και σημαντική ανάπτυξη. Η μικρή διεισδυτικότητα της γεωθερμίας στην βιομηχανία οφείλεται στο γεγονός ότι στο 99% των βιομηχανικών εφαρμογών απαιτούνται θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 120°C, ενώ αντίθετα στο 99% των ήδη εγκατεστημένων γεωθερμικών εφαρμογών οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι μικρότερες των 120°C. Συνολικά οι βιομηχανικές χρήσεις αποτελούν το 4% της χρησιμοποιούμενης γεωθερμικής ενέργειας. Οι διάφορες δυνατές μορφές αξιοποίησης περιλαμβάνουν θέρμανση κατά τη διεργασία, εξάτμιση, ξήρανση, απόσταξη, αποστείρωση, πλύσιμο, λιώσιμο πάγων και ανάκτηση αλάτων. Άλλα συγκεκριμένα παραδείγματα βιομηχανικών εφαρμογών είναι η εμφιάλωση νερού και ανθρακούχων ποτών, η παραγωγή χαρτιού, τμημάτων αυτοκινήτων, η ανάκτηση λαδιού, η παστερίωση γάλακτος, η χρήση στη βυρσοδεψία, η χημική ανάκτηση προϊόντων, η παραγωγή με διαχωρισμό του CO₂, η χρήση σε πλυντήρια, η επεξεργασία πολτού και χαρτιού και η παραγωγή βορικών αλάτων και βορικού οξέος. Στην Ιαπωνία λειτουργεί μια μικρή βιομηχανία που χρησιμοποιεί τις λευκαντικές ιδιότητες του υδρόθειου (H₂S) των γεωθερμικών νερών για την παραγωγή πρωτοποριακών και εξαιρετικής ποιότητας υφασμάτων για γυναικεία ρούχα. Στην ίδια χώρα, εφαρμόζεται σε πειραματικό στάδιο μια τεχνική για τη βιοτεχνική-βιομηχανική παρασκευή ενός ελαφρού «γεωθερμικού ξύλου», το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για ειδικές κατασκευές. Κατά την επεξεργασία του κανονικού ξύλου με το νερό μιας γεωθερμικής πηγής, τα πολυσακχαρίδια του υφίστανται υδρόλυση, οπότε το υλικό γίνεται πιο πορώδες και συνεπώς ελαφρύτερο.

2.3 Η γεωθερμία στην Ελλάδα

Η χώρα μας όπως και σχεδόν όλες οι βαλκανικές χώρες έχουν πλούσιο γεωθερμικό δυναμικό. Η Ελλάδα έχει γεωθερμικές πηγές και των τριών γεωθερμικών βαθμίδων (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500 m.). Σε μερικές περιπτώσεις οι ταμειυτήρες βρίσκονται σε πολύ χαμηλά βάθη κάνοντας την γεωθερμική εκμετάλλευση ελκυστική από οικονομική σκοπιά. Τα γεωθερμικά πεδία είναι διάσπαρτα τόσο στη ηπειρωτική όσο και στη νησιώτικη Ελλάδα και σε τοπικό επίπεδο (κυρίως στη νησιώτικη χώρα) μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο. Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική καθώς αποτελούν ενεργειακό πόρο φιλικό προς το περιβάλλον

κοινωνικά αποδεκτό και παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον.

Αν και αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν εγκατεστημένες ηλεκτρικές εφαρμογές οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας για το 2007 (Andritsos et al., 2007) ανήλθαν περίπου στα 88 MW και το 40% των εφαρμογών αποτελούν οι λουτροθεραπευτικές μονάδες και η θέρμανση πισινών με γεωθερμία. Επίσης υπάρχουν κατεστημένες εφαρμογές για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους, για θέρμανση ιχθυοκαλλιέργειών, για ξήρανση αγροτικών προϊόντων καθώς και μία μονάδα αφαλάτωσης νερού στη Κίμωλο. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει την εγκατεστημένη ισχύ αυτών των εφαρμογών το 2007.

Πίνακας 2.1: Εφαρμογές της γεωθερμίας στην Ελλάδα το 2007.

<i>Εφαρμογή</i>	<i>εγκατεστημένη ισχύς (MW)</i>
Λουτρά -θέρμανση πισινών	36
θέρμανση κατοικιών	1,4
θέρμανση θερμοκηπίων	26,4
ιχθυοκαλλιέργειες	9,3
ξήρανση αγροτικών προϊόντων	0,8
Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	14

2.4 Τεχνικά και οικονομικά προβλήματα

Ένα σημαντικό τεχνικό πρόβλημα που συναντάται συχνά στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις είναι ο σχηματισμός επικαθίσεων. Οι επικαθίσεις δημιουργούνται σε κάθε σχεδόν επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το γεωθερμικό ρευστό. Αλλά σημαντικά τεχνικά προβλήματα είναι η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών και σε μερικές περιπτώσεις η διάθεση των ρευστών μετά τη χρήση τους και οι εκπομπές τοξικών αερίων (κυρίως υδρόθειου).

Οι επικαθίσεις στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ανάλογα με τη σύστασή τους. Οι ανθρακικές και οι θειϊκές επικαθίσεις απαντούν κυρίως σε μονάδες χαμηλής ενθαλπίας, ενώ οι πυριτικές και οι θειούχες σε υψηλής ενθαλπίας. Οι τελευταίες δημιουργούνται από ρευστά που περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαλυμένων στερεών. Οι ανθρακικές επικαθίσεις, που είναι οι πλέον συχνές, αντιμετωπίζονται με χρήση χημικών προσθέτων.

Τα στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά που γίνεται εκτίμηση του κόστους της εγκατάστασης ή της λειτουργίας μιας γεωθερμικής μονάδας, και της αξίας των «προϊόντων» της γεωθερμικής ενέργειας, είναι πολύ περισσότερα και πιο σύνθετα σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας. Συνεπώς, θα πρέπει όλα αυτά τα στοιχεία να αξιολογούνται πολύ προσεκτικά. Οι γενικές γραμμές που πρέπει να ακολουθεί ο σχεδιασμός μίας γεωθερμικής μονάδας είναι οι εξής:

- Ένα σύστημα γεωθερμικού πόρου-εγκαταστάσεων (μονάδα εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας) αποτελείται από τις γεωθερμικές γεωτρήσεις, το δίκτυο μεταφοράς των ρευστών, τη μονάδα παραγωγής ή χρήσης και συχνά το σύστημα επανεισαγωγής. Η αλληλεπίδραση όλων αυτών των στοιχείων θα πρέπει να αναλύεται προσεκτικά διότι βαρύνουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος της αρχικής επένδυσης.
- Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να μεταφερθούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις μέσα σε θερμικά μονωμένους σωλήνες. Το κόστος των σωληνώσεων, του απαιτούμενου βοηθητικού εξοπλισμού (αντλίες, βαλβίδες, κ.λ.π) και της συντήρησής τους, επιβαρύνουν πολύ τον προϋπολογισμό και μπορεί να ανεβάσουν σημαντικά το συνολικό λειτουργικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας της εγκατάστασης. Οπότε, η απόσταση μεταξύ του πόρου (γεωτρήσεις) και της εφαρμογής (εγκαταστάσεις) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.
- Για τη μείωση του κόστους συντήρησης και της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας της, η τεχνική πολυπλοκότητα μιας γεωθερμικής μονάδας δε θα πρέπει να ξεπερνά το βαθμό που αυτή θα είναι προσβάσιμη από το τοπικό τεχνικό προσωπικό και τους εύκολα διαθέσιμους ειδικούς.
- Τέλος, εάν η γεωθερμική εφαρμογή αφορά στην παραγωγή καταναλωτικών αγαθών, θα πρέπει να προηγηθεί μια προσεκτική και εμπειρισταωμένη έρευνα αγοράς, ώστε να εξασφαλιστεί η διάθεση αυτών των προϊόντων. Επίσης, θα πρέπει υποχρεωτικά να προϋπάρχουν ή να συμπεριληφθούν στον αρχικό προϋπολογισμό οι απαραίτητες υποδομές για την οικονομικά συμφέρουσα μεταφορά των προϊόντων από το σημείο παραγωγής στον καταναλωτή.

2.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Δυστυχώς για το περιβάλλον και για την ίδια την ανθρωπότητα δεν υπάρχει καμία εντελώς καθαρή ενέργεια. Η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται μία καθαρή, σε σχέση με τη καύση ορυκτών καυσίμων, χωρίς βέβαια οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκμετάλλευσή της να είναι αμελητέες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο βαθμός που μια γεωθερμική εκμετάλλευση επηρεάζει το περιβάλλον είναι ανάλογος με το μέγεθος και την κλίμακα της εκμετάλλευσης. Κάθε μεταβολή στο περιβάλλον θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς νόμους και κανονισμούς (οι οποίοι σε κάποιες χώρες είναι πολύ αυστηροί), αλλά και επειδή κάθε φαινομενικά ασήμαντη αλλαγή θα μπορούσε να προκαλέσει αλυσιδωτά φαινόμενα, των οποίων οι επιπτώσεις είναι δύσκολο να προβλεφθούν πλήρως και να αναλυθούν εκ των προτέρων.

Πηγές ρύπανσης

Η πρώτη περιβαλλοντική επίπτωση που γίνεται αντιληπτή από τα πρώτα κιόλας στάδια εφαρμογής ενός γεωθερμικού έργου, είναι οι γεωτρήσεις, ανεξάρτητα αν αυτές φτάνουν σε μικρά βάθη και αποσκοπούν στη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας κατά το στάδιο έρευνας, ή αν είναι γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής. Η εγκατάσταση ενός γεωτρητικού συγκροτήματος, που περιλαμβάνει και όλο το βοηθητικό εξοπλισμό του, πολλές φορές απαιτεί τη διάνοιξη-επισκευή δρόμων για την πρόσβαση στο σημείο των γεωτρήσεων και την κατασκευή μιας γεωτρητικής εξέδρας και πλατείας. Οι εργασίες για την εγκατάσταση των γεωτρύπανων και την κατασκευή των γεωτρήσεων τροποποιούν ελαφρά την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής ενώ δεν αποκλείεται η πιθανότητα πρόκλησης μικρών ζημιών στη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής. Οι απότομες έξοδοι ρευστών μπορεί να προκαλέσουν ρύπανση των επιφανειακών υδάτων. Επιπλέον η εγκατάσταση του δικτύου μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών και η κατασκευή των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης, επηρεάζει επίσης την πανίδα, τη χλωρίδα και την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής.

Περιβαλλοντικά προβλήματα είναι δυνατόν να προκύψουν και στη φάση λειτουργίας μιας γεωθερμικής εγκατάστασης. Τα γεωθερμικά ρευστά (ατμός ή ζεστό νερό) συνήθως περιέχουν αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρόθειο (H_2S), αμμωνία (NH_3), μεθάνιο (CH_4) και ίχνη από άλλα αέρια, καθώς και διαλυμένες

χημικές ενώσεις, των οποίων η συγκέντρωση συνήθως αυξάνει με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, το χλωριούχο νάτριο (NaCl), το βόριο (B), το αρσενικό (As) και ο υδράργυρος (Hg) αποτελούν πηγές ρύπανσης αν διατεθούν στο επιφανειακό περιβάλλον. Κάποια γεωθερμικά ρευστά, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση οικισμών στην Ισλανδία, μπορεί να είναι καθαρά νερά, όμως κάτι τέτοιο αποτελεί μια σπάνια περίπτωση. Επίσης, όταν τα νερά απορρίπτονται από τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχοντας υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το περιβάλλον, τότε συνιστούν μια πιθανή πηγή θερμικής ρύπανσης.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να αποδειχθεί ένα σχετικά σημαντικό πρόβλημα κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές γεωθερμικές εγκαταστάσεις. Η εκπομπή υδρόθειου αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή μόλυνσης. Το όριο οσμής για την παρουσία υδρόθειου στον αέρα είναι περίπου 5 p.p.b.v., ενώ κάποιες φυσικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου παρατηρούνται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (Weres et al., 1984).

Η διάθεση των χρησιμοποιηθέντων γεωθερμικών νερών (αλμολοίπων) αποτελεί μια πιθανή πηγή χημικής ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, τα γεωθερμικά ρευστά με σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε χημικά στοιχεία όπως βόριο, φθόριο, αρσενικό, θα πρέπει να υφίστανται κάποιου είδους επεξεργασία ή να επανεισάγονται στον ταμιευτήρα ή και τα δύο.

Υπάρχει πιθανότητα η άντληση μεγάλων ποσοτήτων ρευστών από τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες να προκαλέσει φαινόμενα καθίζησης, δηλαδή σταδιακής βύθισης της επιφάνειας του εδάφους. Αυτό αποτελεί ένα μη αναστρέψιμο φαινόμενο, αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι καταστροφικό, καθώς πρόκειται για μια αργή διαδικασία που συνήθως επηρεάζει και «κατανέμεται» σε μεγάλες επιφάνειες. Η απόληψη και/ή η επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών μπορεί να προκαλέσει ή να αυξήσει τη συχνότητα των σεισμικών φαινομένων σε κάποιες περιοχές.

Ο θόρυβος που συνδέεται με τη λειτουργία των γεωθερμικών εγκαταστάσεων θα μπορούσε να αποτελέσει πρόβλημα μόνο στις εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη φάση παραγωγής, πρόκειται για το θόρυβο που προκαλείται από τη μεταφορά του ατμού μέσα από τους σωλήνες και στην περιστασιακή απόρριψή του στο περιβάλλον. Όμως τα συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου είναι συνήθως αποδεκτά. Στην εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής, η κύρια πηγή θορύβου προέρχεται από τους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης, τον εκτοξευτή

ατμού και το βόμβο των ατμοστροβίλων (Brown et al., 2000). Ο θόρυβος που προκαλείται από τις εφαρμογές άμεσης χρήσης της γεωθερμίας είναι συνήθως αμελητέος.

3. Ξήρανση

3.1 Γενικά

Ως *ξηρανση* ορίζουμε τη χρήση της θερμότητας κάτω από επιλεγμένες συνθήκες για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του νερού που υπάρχει σε ένα τρόφιμο μέσω του μηχανισμού της εξάτμισης (Fellows, 2000). Στόχος είναι η περιεκτικότητα σε νερό του τελικού προϊόντος να μην είναι μεγαλύτερη από 20 % κ.β. Η ξήρανση ή αφυδάτωση φρούτων και λαχανικών είναι από τις παλαιότερες μορφές συντήρησης τροφίμων που είναι γνωστές από τον άνθρωπο. Αν και αποτελεί παραδοσιακή τεχνική που χρησιμοποιείται από τους αγροτικούς πληθυσμούς για τη διατήρηση των προϊόντων που αυτοί παράγουν τα τελευταία χρόνια είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία τροφίμων καθώς παρουσιάζει κάποια σημαντικά οφέλη.

Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται η ξήρανση είναι η επιμήκυνση της ζωής ενός προϊόντος στο ράφι. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της ενεργότητας του νερού που περιέχει το κάθε προϊόν. Ως *ενεργότητα του νερού* (water activity) ορίζουμε τον λόγο της τάσης ατμών του νερού μέσα στο τρόφιμο προς τη τάση ατμών του κορεσμένου νερού στην ίδια θερμοκρασία (Fellows, 2000).

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (3.1)$$

όπου P η τάση ατμών μέσα στο τρόφιμο και P₀ η τάση ατμών του κορεσμένου νερού.

Με τη μείωση της ενεργότητας του νερού επιτυγχάνεται:

- Υψηλή οσμωτική πίεση που δημιουργείται με την απομάκρυνση από το τρόφιμο του μεγαλύτερου ποσοστού της υγρασίας του οπότε η ανάπτυξη των μικροοργανισμών είναι από δυσμενής έως αδύνατη. Η αύξηση της οσμωτικής πίεσης οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυτών στερεών που προκαλείται με την απομάκρυνση του νερού του προϊόντος.
- Η καταστροφή των περισσότερων μικροοργανισμών που βρίσκονται στην επιφάνεια της πρώτης ύλης.
- Η μείωση των χημικών και ενζυματικών αντιδράσεων που είναι υπεύθυνες για την αλλοίωση των τροφίμων.

Παρόλα αυτά υπάρχουν και άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα. Αυτά εστιάζονται στη μείωση του κόστους συσκευασίας, αποθήκευσης και μεταφοράς.

Επιπλέον για κάποιους τύπους τροφίμων, η ξήρανση προσφέρει ένα πιο εύκολα χρησιμοποιούμενο προϊόν στον καταναλωτή ή ευκολότερα χρησιμοποιούμενα συστατικά όταν αναφερόμαστε στις βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων. Τέλος πρέπει να αναφερθούμε στα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την ξήρανση καθώς αποτελεί μία πολύ καλή επιλογή για εποχικές καλλιέργειες φρούτων και λαχανικών. Με την επιλογή της ξήρανσης επιτυγχάνεται η διοχέτευση όλης της παραγωγής στην αγορά, ενώ με την χρήση κατάλληλων διεργασιών μπορεί να προκύψει μία μορφή τελικού προϊόντος που έχει υψηλότερη προστιθέμενη αξία από το φρέσκο προϊόν.

Βέβαια υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που έχουν κυρίως να κάνουν με τη ποιότητα και τη θρεπτική αξία του τροφίμου. Ο σχεδιασμός του εξοπλισμού αλλά και των διαδικασιών ξήρανσης στοχεύει στην ελάττωση αυτών των επιπτώσεων επιλέγοντας τις κατάλληλες θερμοκρασίες και διεργασίες για κάθε τρόφιμο.

Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα σε συνδυασμό με τις νέες τεχνικές που ακολουθούνται στη βιομηχανία τροφίμων και επιτρέπουν τη βελτίωση της ποιότητας των αποξηραμένων προϊόντων καταδεικνύουν τις μεγάλες προοπτικές αυτής της τεχνικής. Τυπικά παραδείγματα ευρύτατα διαδεδομένων αποξηραμένων τροφίμων είναι τα εξής: καφές, γάλα, σταφίδες, σταφύλια, τομάτες, ζυμαρικά, αλεύρι, φασόλια, όσπρια, καρύδια, δημητριακά, τσάι και μυρωδικά. Τυπικά παραδείγματα αποξηραμένων συστατικών τροφίμων που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων είναι: αυγό σε σκόνη, συστατικά για την αρωματοποίηση και χρωματοποίηση τροφίμων, σκόνη φρουκτόζης, ένζυμα και διάφορα είδη μαγιάς.

3.2 Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα

Επίδραση της ενεργότητας του νερού στη σταθερότητα του τροφίμου

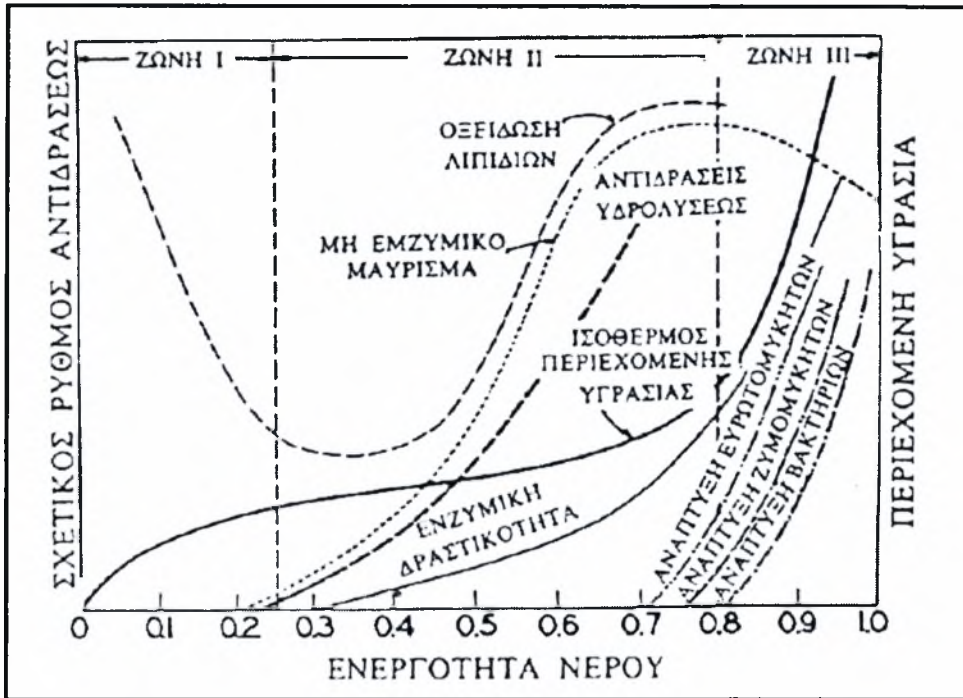
Η ενεργότητα του νερού και όχι η υγρασία του τροφίμου καθορίζει το ελάχιστο όριο του διαθέσιμου νερού για μικροβιακή ανάπτυξη και δράση. Τα περισσότερα βακτήρια δεν αναπτύσσονται σε τιμές ενεργότητας χαμηλότερες από 0,91, οι περισσότεροι ζυμομύκητες σε τιμές χαμηλότερες από 0,88 και οι περισσότεροι ευρωτομύκητες σε τιμές χαμηλότερες από 0,80. Για τους εξαιρετικά ωσμώφιλους μύκητες υπάρχουν ανφορές ότι αναπτύσσονται και σε τιμές 0,60-0,65 αλλά γενικά το κατώτερο όριο ανάπτυξης των συχνότερα ευρισκόμενων μικροοργανισμών στα τρόφιμα είναι 0,7 – 0,75. Ενδεικτικές ελάχιστες τιμές

ενεργότητας νερού για την ανάπτυξη μικροοργανισμών και το εύρος της ενεργότητας νερού ορισμένων κατηγοριών τροφίμων δίνονται στο Σχήμα 3.2. Οι ελάχιστες τιμές βέβαια επηρεάζονται και από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών (pH, θερμοκρασία, θρεπτικά συστατικά, οξυγόνο) και είναι τόσο μεγαλύτερες όσο δυσμενέστεροι είναι αυτοί οι παράγοντες. Οι τοξίνες που παράγονται από τους μικροοργανισμούς αναπτύσσονται σε τιμές ενεργότητας υψηλότερες από εκείνες της ανάπτυξης των αντίστοιχων μικροοργανισμών. Καθώς τα ξηρά ή αφυδατωμένα τρόφιμα έχουν τιμές ενεργότητας νερού κατώτερες από 0,6-0,65, εξασφαλίζεται η αδυναμία ανάπτυξης και παραγωγής τοξίνης των μικροοργανισμών.

Εκτός της ανάπτυξης των μικροοργανισμών το νερό επηρεάζει και άλλες δράσεις που σχετίζονται με τη σταθερότητα του τροφίμου, όπως οι ενζυματικές και ορισμένες χημικές αντιδράσεις. Οι ενζυματικές αντιδράσεις εξελίσσονται με βραδύτατο ρυθμό σε τιμές ενεργότητας που αντιστοιχούν στο ισχυρά δεσμευμένο, μονοστρωματικό νερό. Αύξηση της ενεργότητας του νερού ακολουθείται από αύξηση της δραστηριότητας των ενζύμων.

Από τις χημικές αντιδράσεις ιδιαίτερα επηρεάζονται κυρίως το μη ενζυμικό μαύρισμα και οι οξειδώσεις. Το μη ενζυμικό μαύρισμα επιταχύνεται σε τιμές ενεργότητας 0,4 έως 0,7. Αυτό οφείλεται στο διπλό ρόλο του νερού, ως διαλύτη και ως προϊόν, στην αντίδραση. Σε χαμηλές τιμές ενεργότητας ο περιοριστικός παράγων είναι η κινητικότητα των αντιδρώντων μορίων μέσω του διαλύτη και επομένως η προσθήκη νερού επιταχύνει την αντίδραση. Μεγάλες τιμές ενεργότητας σημαίνουν μεγάλη συγκέντρωση νερού που είναι και προϊόν της αντίδρασης και επομένως επιβράδυνση του ρυθμού αυτής. Ο μέγιστος ρυθμός μη ενζυμικού μαυρίσματος εξαρτάται από το τρόφιμο, αλλά συνήθως απαντάται σε τιμές ενεργότητας νερού 0,6–0,7. Οι οξειδώσεις επιταχύνονται σε χαμηλές τιμές ενεργότητας επειδή δεν υπάρχει νερό διαθέσιμο για τη δημιουργία δεσμών με τα υδροϋπεροξειδία και τις ελεύθερες ρίζες ώστε να μη συνεχίζουν την αλυσωτή αντίδραση. Επίσης δεν υπάρχει νερό διαθέσιμο για την ενυδάτωση των μετάλλων τα οποία αποτελούν καταλύτες της οξείδωσης. Σε μέσες τιμές ενεργότητας η οξείδωση προχωρά με τους βραδύτερους ρυθμούς, ενώ σε μεγάλες τιμές επιταχύνεται πάλι πιθανώς λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας απορρόφησης οξυγόνου και της ευκολότερης διάχυσης μετάλλων που

παραμένουν δραστικά ως καταλύτες. Είναι προφανές ότι η περιοχή μεγαλύτερης σταθερότητας αντιστοιχεί σε τιμές 0,25 έως 0,5-0,65 ανάλογα με το τρόφιμο.



Σχήμα 3.1: Επίδραση της ενεργότητας νερού στον ρυθμό των αντιδράσεων υποβάθμισης αυτού.

Μικροοργανισμοί και ελάχιστες τιμές ανάπτυξής τους	Ενεργότητα νερού	Τρόφιμα και εύρος ενεργότητας νερού αυτών
	1.0	Φρέσκα λαχανικά, φρούτα, κρέας, πουλερικά, ψάρια, γάλα
<i>Cl. botulinum</i>	→	Επεξεργασμένα κρέατα, όπως ζαμπόν
<i>Salmonella</i>	→	
βακτήρια	→	Σαλάμι, σκληρά τυριά, σιρόπια
ζυμομύκητες	→	Αλεύρι, κέικ, ριζί, φασόλια, δημητριακά
<i>Staphylococcus</i>	→	
ευρωτομύκητες	→	Τρόφιμα μέσης υγρασίας
Αλόφιλα βακτήρια	→	Παστά τρόφιμα Μαρμελάδες
	0.7	Ζαχαρώδη, ζελέδες, προϊόντα βρώμης υγρασίας <10%
Εξαιρετικά ωσμόφιλοι μικροοργανισμοί (μερικοί ζυμομύκητες και ευρωτομύκητες)	→	Ξηρά φρούτα, ξηροί καρποί, καραμέλες
	0.6	Αφυδατωμένα τρόφιμα (ζυμαρικά, μπισκότα, σκόνη γάλακτος κ.ά)

Σχήμα 3.2: Ελάχιστες τιμές ενεργότητας νερού για την ανάπτυξη ορισμένων μικροοργανισμών και τυπικό εύρος ενεργότητας νερού μερικών τροφίμων (Karel et al., όπως εμφανίζεται στους Ταούκη-Ωραιοπούλου, 2006).

3.3 Θεωρία της ξήρανσης

Η μελέτη της ξήρανσης και οι υπολογισμοί για το απαιτούμενο μέγεθος του ξηραντήρα περιλαμβάνουν πολλών ειδών επιμέρους προβλήματα από τα πεδία της ρευστομηχανικής, φυσικοχημείας επιφανειών και δομής στερεών καθώς και προβλήματα μεταφοράς θερμότητα και μάζας. Σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα φαινόμενα είναι τόσο πολύπλοκα και τόσο λίγα είναι γνωστά, ώστε οι ποσοτικές εκτιμήσεις στον σχεδιασμό του ξηραντήρα είναι μερικές φορές αδύνατες.

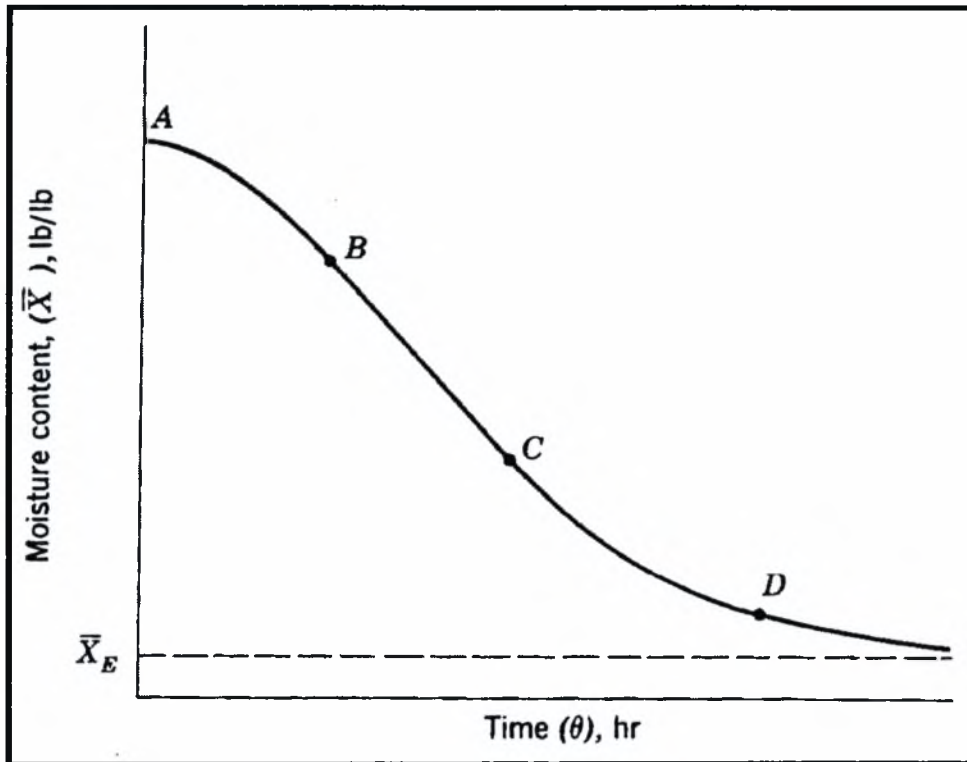
Στην περίπτωση ξήρανσης ενός υγρού στερεού κατά την επαφή του με αέριο σε δεδομένη θερμοκρασία και υγρασία, έχουμε την εμφάνιση μιας συγκεκριμένης συμπεριφοράς στην διεργασία. Αμέσως μετά την αρχική επαφή του υλικού και του μέσου ξήρανσης, η θερμοκρασία του στερεού μεταβάλλεται μέχρι να φτάσει σε σταθερή τιμή. Η θερμοκρασία του στερεού (και ο ρυθμός ξήρανσης) μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί έως ότου επιτευχθούν σταθερές συνθήκες. Σε αυτές τις συνθήκες η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού ταυτίζεται με την θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου του μέσου ξήρανσης. Οι θερμοκρασίες μέσα στο υλικό τείνουν να εξισωθούν με την θερμοκρασία υγρού βολβού του αερίου, χωρίς ωστόσο αυτό να είναι εφικτό εξαιτίας της καθυστέρησης στην μεταφορά μάζας και θερμότητας. Όταν λοιπόν οι θερμοκρασίες φτάσουν την θερμοκρασία υγρού βολβού του αερίου, ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σταθερός. Αυτό το στάδιο είναι γνωστό ως *περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης* (constant-rate drying period) και ολοκληρώνεται όταν το υλικό αποκτήσει ένα μεταβατικό, αλλά καθορισμένο για κάθε υλικό, ποσοστό υγρασίας που καλείται *κρίσιμη υγρασία* (critical moisture content). Μετά από αυτό το σημείο, η επιφανειακή θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται και ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται ταχύτατα. Η *περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης* (falling-rate drying period) είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια από την περίοδο σταθερού ρυθμού, αν και η αφαίρεση υγρασίας είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά. Στην περίοδο αυτή η θερμοκρασία της επιφάνειας αρχίζει και αυξάνεται, γεγονός που συνεχίζεται όσο η ξήρανση προχωρεί πλησιάζοντας τελικά την θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα.

Ο ρυθμός ξήρανσης τείνει στο μηδέν για κάποια τιμή ποσοστού υγρασίας που ονομάζεται *υγρασία ισορροπίας*, X_E , (equilibrium moisture content), η οποία συνιστά το μικρότερο ποσό υγρασίας που μπορεί να παραμείνει στο στερεό στις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης. Τα Σχήματα 3.3 (διάγραμμα υγρασίας ως προς τον χρόνο) και 3.4 (διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης συναρτήσει της υγρασίας) απεικονίζουν

τυπικές καμπύλες ξήρανσης (drying curves). Η μορφή του Σχήματος 3.3 αποτελεί την πλέον συνήθη για πειραματικά δεδομένα ξήρανσης, ενώ το Σχήμα 3.4 είναι πιο περιγραφικό της διεργασίας. Ο διαχωρισμός αυτός προέρχεται από την χρονική παράγωγο των δεδομένων που συναποτελούν το Σχήμα 3.4, γεγονός που οδηγεί στην διασπορά των δεδομένων, όσο και στην ύπαρξη αβεβαιότητας.

Οι προαναφερθείσες τυπικές καμπύλες ξήρανσης σχετίζονται με τον μηχανισμό της ίδιας της ξήρανσης. Η περίοδος ξήρανσης του τμήματος AB (Σχήμα 3.3 και 3.4) είναι η αρχική μεταβατική περίοδος, στην οποία η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς σταθερές συνθήκες. Αν και η μορφή της καμπύλης που απεικονίζεται είναι τυπική, σχεδόν κάθε μορφή είναι πιθανή και η περίοδος AB μπορεί να είναι είτε μειούμενου είτε αυξανόμενου ρυθμού. Κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού, που συμπίπτει με το τμήμα BC στα παρακάτω σχήματα, ολόκληρη η εξωτερική επιφάνεια του στερεού είναι κορεσμένη με νερό. Η ξήρανση επιτελείται με την μετάβαση υδρατμού από την επιφάνεια του υγρού μέσω ενός υμένιου αέρα στην κύρια μάζα του ρεύματος θερμού αέρα. Ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας στην επιφάνεια ξήρανσης. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εξισορροπεί τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και έτσι η θερμοκρασία της επιφάνειας ξήρανσης παραμένει σταθερή. Η κινούσα δύναμη που προκαλεί την κίνηση του υδρατμού μέσω του υμένιου του αέρα είναι η διαφορά της τάσης των υδρατμών μεταξύ της επιφάνειας και της κύριας μάζας του αέρα. Η ξήρανση επιτελείται χωρίς να ασκείται επίδραση στον ρυθμό ξήρανσης από το στερεό υλικό. Σημειώνεται ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του στερεού υλικού πάνω στην οποία βρίσκεται το υγρό ενδεχομένως προκαλεί αύξηση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας και μάζας, χωρίς ωστόσο το φαινόμενο αυτό να είναι πλήρως αποδεδειγμένο. Η περίοδος του σταθερού ρυθμού συνεχίζεται, με την μάζα που απομακρύνεται από την επιφάνεια συνεχώς να αντικαθίσταται από την κίνηση υγρού από το εσωτερικό του υλικού. Ο μηχανισμός της κίνησης του υγρού, και συνεπώς ο ρυθμός της, αλλάζει ανάλογα με την δομή του υλικού. Στα στερεά υλικά που χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλα διάκενα στην δομή τους, η κίνηση ελέγχεται από την επιφανειακή τάση και τις βαρυτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα στο στερεό υλικό. Στα στερεά με ινώδη ή άμορφη δομή, η κίνηση του υγρού γίνεται με διάχυση διαμέσου του στερεού.

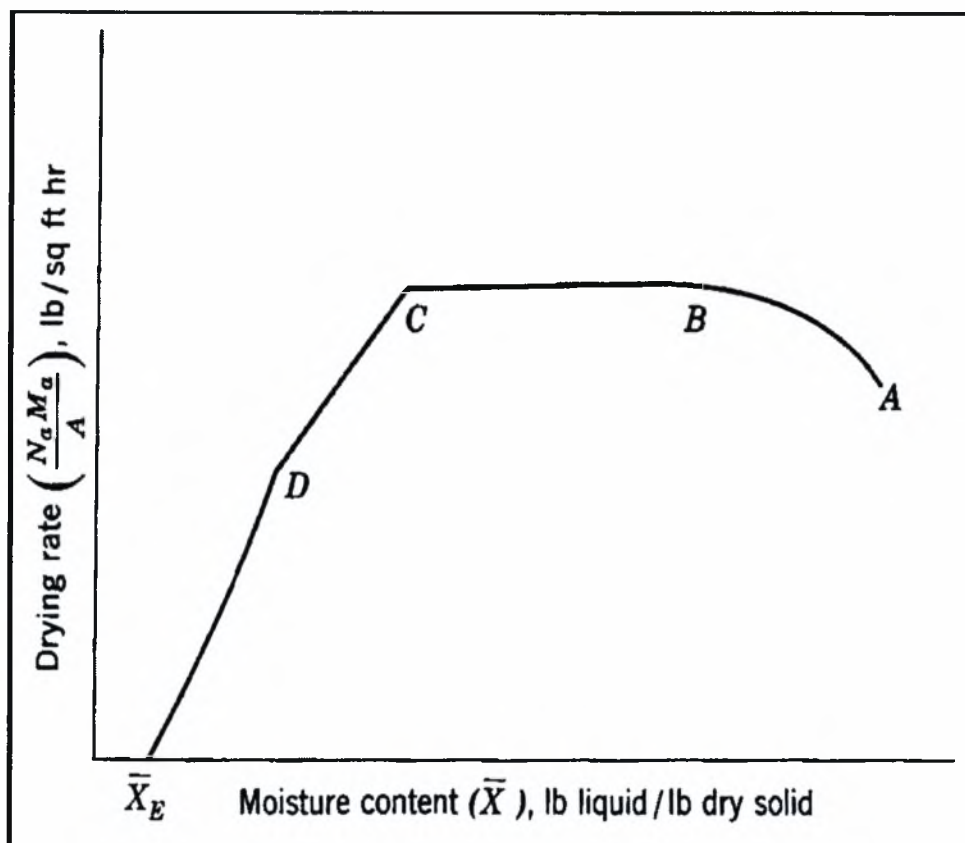
Εφόσον οι ρυθμοί διάχυσης είναι πολύ μικρότεροι από την ροή υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας ή τριχοειδών δυνάμεων, στα στερεά στα οποία συμβαίνει διάχυση του υγρού παρατηρούνται μικρότερες ή ακόμη και μηδενικές περιόδους σταθερού ρυθμού. Στο σημείο C (κρίσιμη υγρασία), το ποσοστό της υγρασίας του στερεού είναι μόλις και μετά βίας αρκετό για να εφοδιάσει με υγρό την ελεύθερη επιφάνεια.



Σχήμα 3.3: Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης, υγρασία ως συνάρτηση του χρόνου.

Κατά την διάρκεια της ξήρανσης μεταξύ των σημείων C και D του Σχήματος 3.4, που καλείται *πρώτη περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης* (first falling-rate period), το ευρισκόμενο στην επιφάνεια υγρό γίνεται όλο και λιγότερο, επειδή ο ρυθμός κίνησης του υγρού προς την επιφάνεια είναι μικρότερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης του από την επιφάνεια προς το αέριο ρεύμα. Τελικά στο σημείο D δεν υπάρχει πλέον σημαντικό ποσοστό της επιφάνειας που να είναι κορεσμένο με υγρό. Το μικρό τμήμα της επιφάνειας που παρέμεινε κορεσμένο ξηραίνεται περαιτέρω με μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από το θερμό ρεύμα αέρα και ταυτόχρονη μεταφορά μάζας προς το θερμό ρεύμα αέρα. Υδατμός από τα εσωτερικά στρώματα του δείγματος διαχέεται προς τα τμήματα της επιφάνειας που δεν είναι κορεσμένα και στην συνέχεια μεταφέρεται στο ρεύμα του αέρα. Αυτός ο μηχανισμός είναι πολύ

αργός σε σχέση με την συναγωγή από τα λίγα εναπομείναντα τμήματα κορεσμένης επιφάνειας.



Σχήμα 3.4.: Τυπική καμπύλη ξήρανσης για σταθερές συνθήκες ξήρανσης, ρυθμός ξήρανσης ως συνάρτηση της υγρασίας.

Για ποσοστά υγρασίας χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του σημείου D του Σχήματος 3.4, η ξήρανση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στο εσωτερικό του στερεού. Εφόσον το ποσοστό υγρασίας συνεχίζει να μειώνεται, η απόσταση για την διάχυση της θερμότητας και της μάζας μεγαλώνει και τελικά η διαφορά συγκεντρώσεων (κινούσα δύναμη) ελαττώνεται, μέχρι που στο X_E (υγρασία ισορροπίας) δεν πραγματοποιείται περαιτέρω ξήρανση. Η υγρασία ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν η τάση ατμών πάνω από το στερεό είναι ίση με την μερική πίεση των υδρατμών στο ρεύμα αέρα. Αυτή η περίοδος καλείται *δεύτερη περίοδος μειούμενου ρυθμού* (second falling rate period).

3.4 Διεργασίες ξήρανσης

Τα αποξηραμένα φρούτα και λαχανικά μπορούν να παραχθούν από μία ποικιλία διεργασιών. Αυτές διαφέρουν βασικά από την μέθοδο ξήρανσης που

ακολουθούν, η επιλογή της οποίας εξαρτάται από το τρόφιμο που θέλουμε να αποξηράνουμε αλλά και από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που θέλουμε να έχει το τελικό προϊόν . Γενικά στις διεργασίες ξήρανσης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Προεπεξεργασία. Περιλαμβάνει τις διαδικασίες της διαλογής των νωπών προϊόντων, της προετοιμασίας του τροφίμου, όπως το πλύσιμο και το ξεφλούδισμα ενός φρούτου και λαχανικού και τις διαδικασίες για τη διατήρηση του χρώματος.
- Ξήρανση είτε με φυσικές είτε με τεχνητές μεθόδους.
- Μεταξηραντική επεξεργασία. Περιλαμβάνει της διαδικασίες του ποιοτικού ελέγχου και της συσκευασίας των προϊόντων.

3.4.1 Προεπεξεργασία

Τα τρόφιμα επιλέγονται, κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος τους, το στάδιο ωρίμανσης και την εξωτερική τους κατάσταση (π.χ. χτυπημένο λαχανικό). Έπειτα πλένονται για να απομακρυνθούν η σκόνη, η βρωμιά, πιθανά έντομα ή υπολείμματα φυτού προσκολλημένα επάνω τους και γενικά οτιδήποτε μπορεί να επηρεάσει το χρώμα το άρωμα και τη οσμή του τελικού προϊόντος. Η αποφλοιώση οποιουδήποτε ανεπιθύμητου μέρους του τροφίμου ακολουθεί το πλύσιμο. Η αποφλοιώση επιτυγχάνεται με τη εμβάπτιση του τροφίμου σε αλκαλικό διάλυμα ή διάλυμα αλισίβας. Εναλλακτικά γίνεται ξηρή καύση και μετά απαλό τρίψιμο με πεπιεσμένο ατμό ή με πλυντήρια υψηλής πίεσης. Για τα φρούτα, αυτά που χρειάζονται αποφλοιώση είναι οι μπανάνες, τα μήλα και ο ανανάς. Τα λαχανικά που συνήθως αποφλοιώνονται είναι τα παντζάρια, τα καρότα, τα κουκιά, οι πατάτες, τα κρεμμύδια και το σκόρδο. Τα δαμάσκηνα και τα σταφύλια συνήθως εμβαπτίζονται σε αλκαλικό διάλυμα για την απομάκρυνση της κηρώδους επιφάνειάς τους η οποία αυξάνει το χρόνο ξήρανσης. Στη συνέχεια τα προϊόντα κόβονται στα κατάλληλο μεγέθος και σχήμα (π.χ. στη μέση, σε φέτες, σε κύβους) για να τοποθετηθούν έπειτα στο ξηραντήριο. Τέλος ορισμένα λαχανικά χρειάζονται ζεμάτισμα που επιτυγχάνεται με εμβάπτιση σε καυτό νερό (95-100°C) ή σε έκθεση σε ρεύμα θερμού ατμού.

Το τελευταίο στάδιο της προεπεξεργασίας είναι η διαδικασία της θείωσης. Τα περισσότερα φρούτα επεξεργάζονται με διοξείδιο του θείου καθώς έχει σημαντικές αντιοξειδωτικές και συντηρητικές ιδιότητες. Το διοξείδιο του θείου περιορίζει το

«μαύρισμα» που εμφανίζουν τα φρούτα κατά τη ξήρανση και η οποία οφείλεται στην μη απενεργοποίηση των ενζύμων που περιέχονται στα φρούτα λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών της διεργασίας. Επιπρόσθετα το διοξείδιο του θείου μειώνει την καταστροφή της καροτίνης και της βιταμίνης C, δύο από τα πιο σημαντικά θρεπτικά συστατικά που περιέχονται στα φρούτα. Η ποσότητα του διοξειδίου του θείου που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι πολύ σωστά επιλεγμένη καθώς πρέπει να καλύπτει όλο το χρόνο παραμονής του αποξηραμένου προϊόντος ενώ παράλληλα να μην επηρεάζεται το άρωμα του. Σε άλλα φρούτα, όπως τα μήλα, χρησιμοποιούνται διαλύματα θειωδών αλάτων καθώς επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό τα φυσικά χαρακτηριστικά του φρούτου όπως το άρωμα και τη φυσική ζάχαρη που περιέχουν.

Ενώ το διοξείδιο του θείου χρησιμοποιείται ευρέως στην προεπεξεργασία φρούτων δεν είναι κατάλληλο για τα λαχανικά. Για τα λαχανικά χρησιμοποιούνται κυρίως διαλύματα θειούχων αλάτων για διατήρηση του χρώματος τους. Επιπλέον τα διαλύματα θειϊκών αλάτων, σε λαχανικά που έχουν ήδη ζεματιστεί, βελτιώνουν τη σταθερότητα αποθήκευσης και επιτρέπουν τη χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών κατά τη διεργασία ξήρανσης. Έτσι επιτυγχάνονται μικρότεροι χρόνοι ξήρανσης και παράγονται μεγαλύτερες ποσότητες προϊόντος.

3.4.2 Κύριες μέθοδοι ξήρανσης

Η ξήρανση των φρούτων και των λαχανικών μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Οι μέθοδοι που ακολουθούνται σε κάθε περίπτωση διαφέρουν και εξαρτώνται από το τύπο του τροφίμου που χρησιμοποιούμε και από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Ξήρανση στον ήλιο. Είναι σχετικά περιορισμένη και εμφανίζεται σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια χαμηλή υγρασία του αέρα και δυνατοί άνεμοι όπως η λεκάνη της Μεσογείου και η Καλιφόρνια.
- Ξήρανση με χρήση θερμού αέρα. Ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος θερμαίνεται διοχετεύεται πάνω από τα προϊόντα που θέλουμε να αποξηράνουμε.
- Ξήρανση σε τύμπανο.
- Ξήρανση σε κενό.
- Ξήρανση με λυοφυλίωση του προϊόντος (freeze drying). Χρησιμοποιείται για προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας (π.χ. καφές).

- Ηλεκτρομαγνητική ξήρανση με χρήση μικροκυμάτων.
- Ξήρανση με εκμετάλλευση του οσμωτικού φαινομένου.

Οι δύο τελευταίες μέθοδοι είναι ακόμα πειραματικές και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε εμπορικές χρήσεις. Στις βιομηχανικές εφαρμογές συναντάται κυρίως η δεύτερη μέθοδος.

Ξήρανση στον ήλιο

Το προϊόν τοποθετείται σε τελάρα και αφήνεται στον ήλιο για διάστημα 20-40 ημερών, ανάλογα με το προϊόν. Εναλλακτικά τοποθετείται στο έδαφος, σε πάγκους ακόμη και σε σκεπές. Το τέλος της περιόδου ξήρανσης προσδιορίζεται ανάλογα με το ποσοστό της τελικής υγρασίας που είναι επιθυμητή. Στα φρούτα συνήθως κυμαίνεται από 14 έως 20%. Η μέτρηση της υγρασίας γίνεται συνήθως με τοποθέτηση του ξηρού προϊόντος μέσα σε κλίβανους υπό κενό μέχρι απώλειας όλης της υγρασίας και σταθεροποίησης του βάρους. Όταν το υλικό είναι μικρόκοκκο (π.χ. σπόροι) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της υγρασίας ειδικά μετρητικά όργανα, τα οποία μετρούν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του προϊόντος η οποία είναι συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας.

Μετά τη ξήρανση το αποξηραμένο προϊόν τοποθετείται για μία βδομάδα τουλάχιστον σε ενιαίο αποθηκευτικό χώρο για να επιτύχουμε εξισορρόπηση της υγρασίας του. Κατόπιν συσκευάζεται σε αεροστεγείς συσκευασίες που προστατεύουν το προϊόν από την ατμοσφαιρική υγρασία.

Η χώρα μας λόγω της μεγάλης ηλιοφάνειας προσφέρεται για τη χρήση της μεθόδου αυτής που είναι αρκετά οικονομική και απλή. Δυστυχώς εμφανίζει όμως κάποια σημαντικά μειονεκτήματα που είναι τα εξής:

- Παραμονή του προϊόντος για μεγάλα διαστήματα στην ύπαιθρο εκτεθειμένο στις μεταβολές του καιρού (π.χ. βροχή), στη σκόνη, στα έντομα.
- Χρειάζεται μεγάλη έκταση και μεγάλο αριθμό τελάρων.
- Είναι κυρίως εμπειρική μέθοδος για αυτό χρειάζεται μεγάλη προσοχή.

Ξήρανση με χρήση θερμού αέρα.

Στα ξηραντήρια με χρήση θερμού αέρα η ξήρανση επιτυγχάνεται με τη κυκλοφορία ρεύματος θερμού αέρα θερμοκρασίας από 40°C έως 120°C. Για τη

θέρμανση του αέρα χρησιμοποιείται μία συσκευή θέρμανσης στις περισσότερες περιπτώσεις κάποιος ηλεκτρικός φούρνος ή κάποιος εναλλάκτης θερμότητας. Ο θερμός αέρας με τη βοήθεια κάποιου ανεμιστήρα διοχετεύεται μέσα στη χώρο ξήρανσης οπού διαχέεται πάνω από τα φρέσκα προϊόντα και αφαιρεί μέρος της υγρασίας τους. Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν το χρόνο ξήρανσης και τη ποιότητα του τελικού προϊόντος δηλαδή τη περιεκτικότητα σε νερό, τη θρεπτική του αξία και την εμφάνισή του εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του αέρα, τη ταχύτητα του, το ποσοστό υγρασίας που περιέχει ο αέρας, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του τροφίμου. Για τον έλεγχο της διαδικασίας χρησιμοποιούνται ελεγκτές για τη θερμοκρασία του αέρα τη ταχύτητά του και το ποσοστό υγρασίας του αέρα. Γενικά όσο χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα εφαρμόζονται και όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα ξήρανσης ή ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι καλύτερη.

Με κυκλοφορία θερμού αέρα

Η ξήρανση επιτυγχάνεται με κυκλοφορία ρεύματος θερμού αέρα θερμοκρασίας 60-75°C και σε ατμοσφαιρική πίεση. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων ξηραντηρίων.

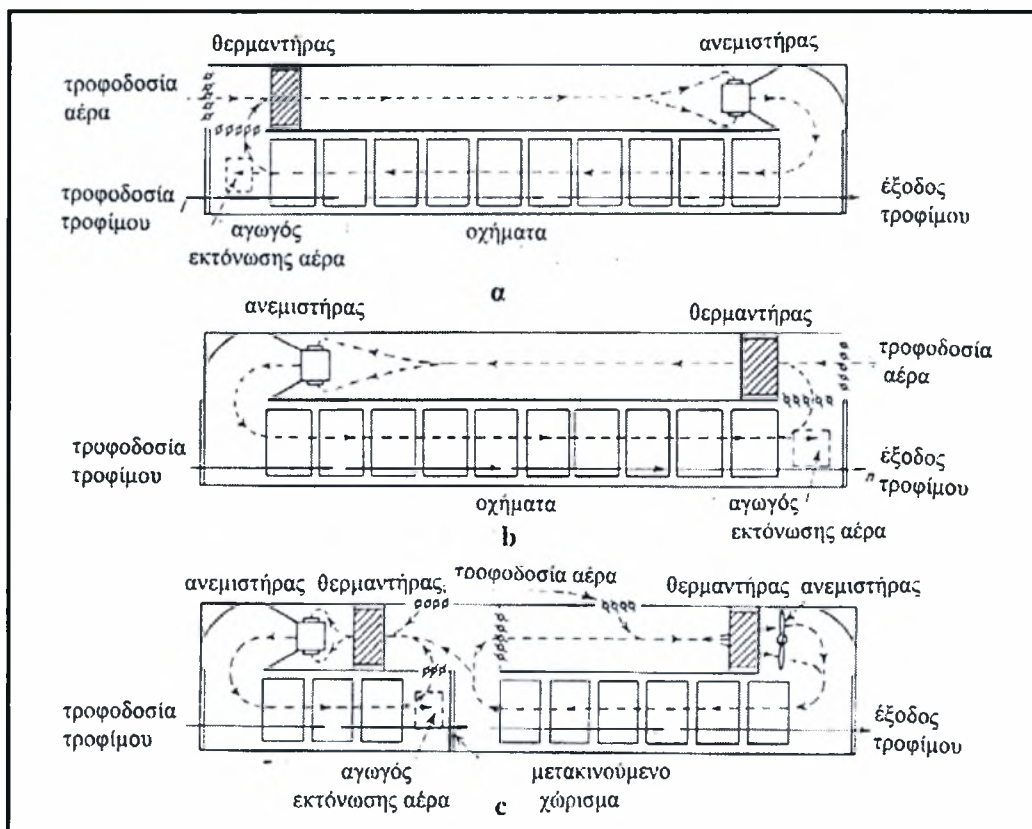
- Ξηραντήρια διαλείπουσας λειτουργίας (batch dryers)

Τα ξηραντήρια διαλείπουσας λειτουργίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα ανοιχτού τύπου τα οποία διοχετεύουν τους υδρατμούς στο περιβάλλον μετά τη χρησιμοποίησή του και στα κλειστού τύπου στα οποία οι υδρατμοί υγροποιούνται πάνω στην επιφάνεια ενός εξατμιστήρα και χρησιμοποιείται ο ίδιος αέρας που κατ' αυτόν το τρόπο περιέχει σταθερό ποσοστό υγρασίας ίδιο με το αρχικό.

- Ξηραντήρια συνεχούς λειτουργίας

Είναι ξηραντήρια περισσότερο εξελιγμένα στηριζόμενα πάντα στην ίδια αρχή, είναι συνεχούς λειτουργίας, όπου το προϊόν τοποθετείται πάνω σε κινούμενες διάτρητες ταινίες ή βαγονέτα (σήραγγα ξήρανσης). Το ρεύμα θερμού αέρα κινείται αντίθετα ή παράλληλα προς τη φορά του προϊόντος. Οι παραπάνω είναι κατάλληλοι κυρίως για ξήρανση φρούτων και λαχανικών. Στη πρώτη φάση της αποξήρανσης διοχετεύεται μέσα στο χώρο ξήρανσης υπέρθερμος αέρας θερμοκρασίας 120°C. Η ταχεία εξάτμιση του νερού από το προϊόν δεν αφήνει τη θερμοκρασία του προϊόντος να ξεπεράσει τους 50°C. Στη φάση αυτή η αφυδάτωση εξελίσσεται πολύ γρήγορα καθώς σε 20 λεπτά περίπου εξατμίζεται η μισή ποσότητα του περιεχόμενου νερού. Στη δεύτερη

φάση για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του προϊόντος, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται στους 90°C. Η θερμοκρασία του προϊόντος παραμένει στους 50°C. Στη τελευταία φάση η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται περισσότερο στους 60°C ενώ η θερμοκρασία του προϊόντος είναι περίπου στους 55°C. Αυτή η τελευταία φάση είναι και η πλέον χρονοβόρα καθώς το 90 % του περιεχόμενου νερού έχει εξατμιστεί.



Σχήμα 3.5: Σήραγγες ξήρανσης α: αντιρροής, b: ομορροής, c: μικτής ροής με απομάκρυνση του αέρα στο μέσο (Porter et al., όπως εμφανίζεται στους Ταούκη-Ωραιοπούλου, 2006).

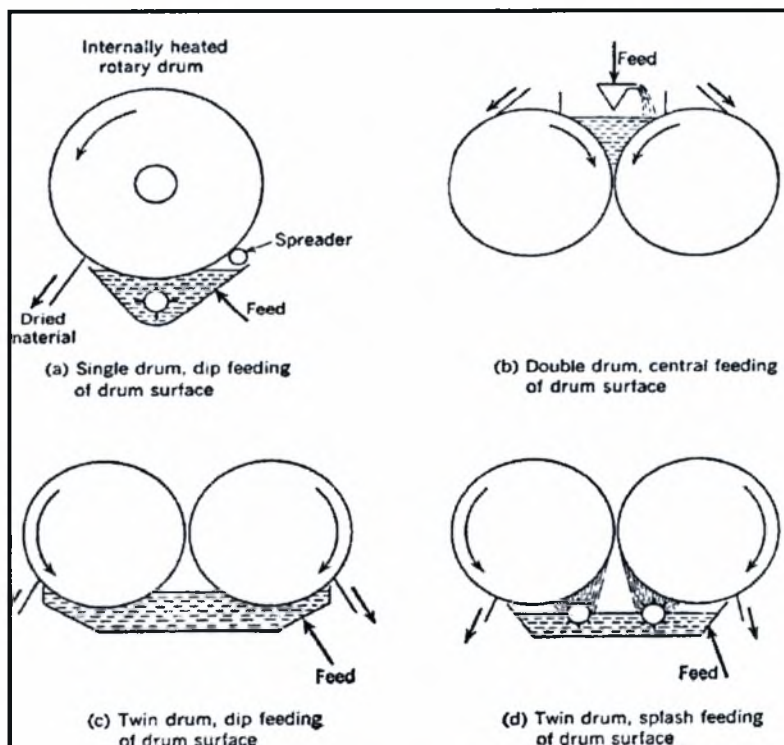
Με ψεκασμό του προϊόντος σε ρεύμα θερμού αέρα

Για την αφυδάτωση υγρών προϊόντων όπως π.χ. καφέ, γάλακτος, χυμών, φρούτων, αβγών, καζεΐνης χρησιμοποιούνται ξηραντήρια με ψεκασμό. Το προϊόν φέρεται υπό μορφή διαλύματος συνήθως συμπυκνωμένο στην οροφή θαλάμου ξήρανσης υπό πίεση 30-50 bars, όπου με τη βοήθεια εκνεφωτών, ειδικών ακροφυσίων ψεκασμού ή φυγοκεντρικών δίσκων που περιστρέφονται με μεγάλο αριθμό στροφών (3000-30000 στροφές/λεπτό) το υγρό υλικό μετατρέπεται σε ένα νέφος μικρών σταγονιδίων διαμέτρου 0,01-0,02 μm. Ένα ρεύμα θερμού αέρα θερμοκρασίας μέχρι και 200°C, που εισάγεται από την οροφή ή και από άλλα σημεία του θαλάμου, παρασύρει τα σταγονίδια σε μία στροβιλώδη διαδρομή διάρκειας 1-10 δευτερολέπτων κατά τη

διάρκεια της οποίας αφυδατώνονται και μετατρέπονται σε κόκκους σκόνης που καταπίπτουν στο κάτω μέρος του θαλάμου. Εκεί με τη βοήθεια ενός διαχωριστήρα τύπου κυκλώνα διαχωρίζεται η σκόνη του προϊόντος από τους υδρατμούς. Για προϊόντα θερμοευαίσθητα, όπως οι χυμοί των φρούτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες αέρα μέχρι και 30°C, αλλά σε θαλάμους μεγαλύτερου ύψους, ώστε η διαδρομή των σταγονιδίων να διαρκεί 90-200 δευτερόλεπτα έτσι ώστε να προλαβαίνουν να αφυδατωθούν.

Ξήρανση σε τύμπανο

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τρόφιμα μορφής πολτού. Ένα λεπτό στρώμα προϊόντος πάχους 0,2 εκατοστών απλώνεται επάνω στην εξωτερική επιφάνεια ενός μεταλλικού τύμπανου που περιστρέφεται με ταχύτητα 10-30 στροφές/λεπτό και που εσωτερικά θερμαίνεται με ατμό. Το προϊόν αφυδατώνεται μετά από μισή περιστροφή του τύμπανου, από την επιφάνεια του οποίου αποκολλάται με τη βοήθεια ενός ξέστρου και στη συνέχεια μετατρέπεται σε σκόνη με θρυμματισμό. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει και υπό κενό και σε μικρότερες θερμοκρασίες, όταν πρόκειται για θερμοευαίσθητα προϊόντα.



Σχήμα 3.6: Ξηραντήρια τύπου τυμπάνου.

Ξήρανση υπό κενό

Μέσα σε ερμητικά κλεισμένο θάλαμο δημιουργείται κενό που μειώνει τη θερμοκρασία βρασμού του νερού. Η απομάκρυνση των υδρατμών γίνεται με ισχυρή απάντληση. Λόγω του κενού (απουσία οξυγόνου) και των χαμηλών θερμοκρασιών αποφεύγονται οι οξειδώσεις πράγμα που είναι επιθυμητό όταν θέλουμε καλής ποιότητας τελικό προϊόν. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ξηραντηρίων με κενό (με δίσκους, με ταινίες συνεχούς λειτουργίας). Παραλλαγές της μεθόδου είναι η αφυδάτωση με εκτόνωση όπου, υπό ορισμένες συνθήκες κενού και θερμοκρασίας, σχηματίζονται φυσαλίδες ατμού μέσα στο υγρό προϊόν, του οποίου ο όγκος αυξάνει έως 20 φορές, επιταχύνεται η αφυδάτωση, το δε τελικό προϊόν αποκτά σπογγώδη υφή που διευκολύνει την επανυδατώσή του.

Κρυοαφυδάτωση ή λυοφιλίωση

Το προϊόν καταψύχεται στους -40°C και στη συνέχεια υπό υψηλό κενό, της τάξεως των 15-40 μm στήλης υδραργύρου ο πάγος του εξαχνώνεται. Για να κρατηθεί το κενό χαμηλά στο θάλαμο οι ατμοί θερμομεταναστεύουν και παγιδεύονται πάνω στη ψυχρή επιφάνεια (-60°C) του εξατμιστή ψυκτικού συγκροτήματος οπότε σχηματίζουν ένα στρώμα πάγου. Το προϊόν τοποθετείται πάνω σε μία θερμαντική πλάκα που προσφέρει τη θερμότητα που αφαιρείται από το προϊόν, λόγω εξάχνωσης. Τα λυοφιλιωμένα προϊόντα παρουσιάζουν πορώδη υφή που δημιουργείται από τα κενά που παραμένουν στη θέση των παγοκρυστάλλων που εξαχνώθηκαν. Για αυτό το λόγο η επανυδάτωση τους είναι ιδιαίτερα εύκολη. Διατηρούν σε άριστη κατάσταση τις αρωματικές και θρεπτικές ουσίες των προϊόντων (π.χ. καφές λυοφιλιωμένος).

3.4.3 Μεταξηραντική επεξεργασία

Η μεταξηραντική επεξεργασία ποικίλλει ανάλογα με το είδος του φρούτου ή του λαχανικού που αποξηράνθηκε. Περιλαμβάνει τις διαδικασίες της εφίδρωσης (sweating), του κοσκινίσματος του προϊόντος, του ποιοτικού ελέγχου και της συσκευασίας. Η διαδικασία της εφίδρωσης περιλαμβάνει τη παραμονή των αποξηραμένων προϊόντων σε κουτιά ή τελάρα με στόχο της σταθεροποίησης του ποσοστού της υγρασίας που περιέχουν. Η διαδικασία του κοσκινίσματος έχει ως στόχο την απόρριψη αποξηραμένων προϊόντων που δεν έχουν το επιθυμητό μέγεθος

και τα οποία είναι μικρότερα από ότι θα έπρεπε. Ακολουθείται ποιοτικός έλεγχος κατά τον οποίο απομακρύνονται ξένα σώματα που έχουν τυχόν προσκολληθεί πάνω στο προϊόν, προϊόντων τα οποία δεν έχουν το σωστό χρώμα και γενικά οποιαδήποτε προϊόντα έχουν ατέλειες στην εμφάνισή τους όπως υπολείμματα από κλαδιά ή ύπερο. Εν συνεχεία ακολουθούνται διαδικασίες που θα βελτιώσουν το ρυθμό επανυδάτωσης του προϊόντος όταν αυτό καταναλωθεί. Τέλος, η συσκευασία είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι όλης της διαδικασίας καθώς καθορίζει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος στο ράφι. Η συσκευασία πρέπει να προστατεύει το προϊόν εναντία της υγρασίας, της έκθεσης στον ήλιο και γενικά σε μεγάλες θερμοκρασίες, τη σκόνη, τη μικροχλωρίδα που μπορεί να εμφανιστεί, ξένες μυρωδιές από έντομα και τρωκτικά. Επίσης πρέπει να έχει την απαιτούμενη ανθεκτικότητα ώστε το προϊόν να διατηρήσει το φυσικό του μέγεθος, σχήμα και εμφάνιση καθόλη τη πορεία του προϊόντος από την παραγωγή μέχρι τη κατανάλωση του ενώ πρέπει να είναι κατασκευασμένη από υλικά εγκεκριμένα για χρήση σε συσκευασία τροφίμων. Οι συσκευασίες των αποξηραμένων προϊόντων που συνήθως συναντώνται είναι οι κονσέρβες, τα βάζα, τα πλαστικά σακουλάκια και τα χάρτινα κουτιά. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή παίζει το κόστος της συσκευασίας ενώ καθοριστικό ρόλο παίζει και η ημερομηνία λήξης.

3.4.4 Εκπομπές ρύπων και αντιρρυπαντική τεχνολογία

Οι εκπομπές αέριων ρύπων κατά τις διεργασίες ξήρανσης προέρχονται από διάφορες πηγές. Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) προέρχονται κυρίως από τις διεργασίες του τεμαχισμού του νωπού τροφίμου καθώς και της ίδιας της ξήρανσης. Τα σωματίδια αποτελούνται κυρίως από σωματίδια σκόνης αλλά και από σωματίδια που προέρχονται από τη συμπύκνωση ατμών και τα οποία είναι αυτά με τη μικρότερη διάμετρο.

Οι εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων (VOCs) μπορούν να προέρχονται από οποιαδήποτε διεργασία της ξήρανσης. Τις περισσότερες φορές όμως προέρχονται από τις διεργασίες με υψηλές θερμοκρασίες όπως το ζεμάτισμα του νωπού προϊόντος και η ξήρανση. Επίσης αιωρούμενα σωματίδια καθώς και συμπυκνώσιμα υλικά μπορούν να συλλεχθούν ή να καταστραφούν μαζί με τα VOCs. Μία άλλη πηγή VOCs είναι οι διεργασίες διατήρησης του χρώματος των φρούτων ή των λαχανικών καθώς χρησιμοποιούνται είτε διοξείδιο του θείου είτε διαλύματα θειωδών αλάτων. Τέλος

εκπομπές VOCs μπορούν να προέλθουν και από την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Για τον έλεγχο των σωματιδίων (PM) χρησιμοποιούνται οι πλυντρίδες venturi, οι κυκλώνες και τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται τα δύο πρώτα ενώ τα ηλεκτροστατικά χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις με ρεύματα αέρα που εμφανίζουν αυξημένα φορτία σωματιδίων.

Ο έλεγχος των VOCs επιτυγχάνεται με διάφορες τεχνικές αλλά οι πλέον χρησιμοποιούμενες είναι η τεχνική της απορρόφησης και της προσρόφησης. Οι μέθοδοι απορρόφησης περιλαμβάνουν όλα τα είδη πλυντρίδων υγρού καθαρισμού που χρησιμοποιούν υδατικά διαλύματα για την απορρόφηση των VOCs. Οι μέθοδοι προσρόφησης περιλαμβάνουν όλα τα υλικά προσρόφησης που είναι ευρέως διαδεδομένα και τα οποία είναι ο ενεργός άνθρακας, η ενεργή αλουμίνα, γέλη οξειδίου του πυριτίου και μοριακά κόσκινα. Η χρήση του ενεργού άνθρακα είναι η πιο διαδεδομένη ενώ τα άλλα τρία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν έχουν ως στόχο μόνο τον έλεγχο της ρύπανσης. Η προσρόφηση είναι μία ακριβή τεχνική και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο εύρος ρύπων.

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι συμπύκνωσης και καθαρισμού με χημικά αντιδρώντα ανάλογα με το τύπο των ρυπαντών που συναντώνται. Οι μέθοδοι συμπύκνωσης είναι είτε άμεσου είτε έμμεσου τύπου. Ο καθαρισμός με χημικά αντιδρώντα χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο των οσμών σε επιλεγμένες εφαρμογές.

3.5 Επίδραση της ξήρανσης στα αγροτικά προϊόντα

Σε όλα τα αγροτικά προϊόντα υφίστανται αλλαγές κατά της διεργασίες της ξήρανσης και της αποθήκευσης και οι οποίες μειώνουν την ποιότητα τους σε σχέση με τα φρέσκα προϊόντα και ο στόχος των νέων τεχνολογιών που αναπτύσσονται είναι η μείωση αυτών των φαινομένων με παράλληλη αύξηση της αποδοτικότητας της διεργασίας. Οι βασικές αλλαγές στα αποξηραμένα προϊόντα έχουν να κάνουν με την απώλεια του αρώματος τους, την υφή τους, το χρώμα τους και τη θρεπτική τους αξία.

Υφή

Η αλλαγή στην υφή ενός αγροτικού προϊόντος είναι ένας σημαντικός παράγοντας μείωσης της ποιότητας του. Η φύση καθώς και το μέγεθος των χημικών

διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται κατά τη προεπεξεργασία, ο τύπος και το μέγεθος του τεμαχισμού του φρέσκου προϊόντος καθώς και η διαδικασία της αποφλοιώσης επηρεάζουν την υφή του αποξηραμένου προϊόντος. Η αλλαγή στη υφή οφείλεται στη ζελατινοποίηση του αμύλου, στην κρυσταλλοποίηση της κυτταρίνης και στις τοπικές μεταβολές του ποσοστού υγρασίας κατά τη ξήρανση, φαινόμενα που δημιουργούν εσωτερικές τάσεις μέσα στο τρόφιμο. Με αυτό τον τρόπο αντιστρέφονται τα σχετικά άκαμπτα κύτταρα δίνοντας στο προϊόν συρρικνωμένη, «μαραμμένη» εμφάνιση. Κατά την επανυδάτωση του προϊόντος ο ρυθμός απορρόφησης νερού είναι πιο αργός και δεν επανακτά την υφή του αρχικού προϊόντος.

Γενικά ο χαμηλός χρόνος ξήρανσης και οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν μεγαλύτερες αλλαγές στην υφή σε σχέση με μέτριους χρόνους ξήρανσης και χαμηλές θερμοκρασίες. Καθώς το νερό απομακρύνεται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, οι διαλυμένες ουσίες μεταφέρονται από το εσωτερικό στην επιφάνεια. Ο μηχανισμός και ο ρυθμός αυτής της κίνησης εξαρτάται από το προϊόν που αποξηραίνουμε και από τις συνθήκες ξήρανσης. Η εξάτμιση του νερού είναι αυτή που προκαλεί τη συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών στην επιφάνεια. Οι υψηλές θερμοκρασίες του αέρα προκαλούν πολύπλοκες φυσικές και χημικές μεταβολές στις διαλυμένες ουσίες της επιφάνειας και το σχηματισμό ενός σκληρού αδιαπέραστου δέρματος. Το φαινόμενο αυτό λέγεται σκλήρυνση εξωτερικού περιβλήματος (case hardening) και μειώνει το ρυθμό ξήρανσης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιοριστεί ελέγχοντας τις συνθήκες ξήρανσης ώστε η υγρασία του εσωτερικού του προϊόντος να μην έχει μεγάλη διαφορά με την υγρασία της επιφάνειας.

Άρωμα

Η θερμότητα όχι μόνο εξατμίζει το νερό κατά τη ξήρανση αλλά εξατμίζει και τα πτητικά συστατικά που περιέχει το τρόφιμο έχοντας ως αποτέλεσμα τη απώλεια αρώματος στο αποξηραμένο προϊόν. Το μέγεθος των πτητικών ουσιών εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ποσοστό υγρασίας του τροφίμου, τη τάση ατμών των πτητικών ουσιών καθώς και της διαλυτότητας των πτητικών ουσιών στους ατμούς του νερού. Τα πτητικά συστατικά με την μεγαλύτερη πτητικότητα και διαχυτότητα είναι αυτά που χάνονται στα αρχικά στάδια της ξήρανσης. Τα προϊόντα που έχουν μεγάλη οικονομική αξία λόγω του αρώματός τους (π.χ. βότανα) ξηραίνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες (Mazza and LeMaguer, 1980).

Η ανοιχτή πορώδη δομή του αποξηραμένου προϊόντος επιτρέπει την είσοδο οξυγόνου που είναι ένας δεύτερος σημαντικός παράγοντας απώλειας αρώματος λόγω της οξείδωση των πτητικών ουσιών και των λιπιδίων κατά την αποθήκευση. Ο βαθμός απώλειας του αρώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία αποθήκευσης και τη ενεργότητα του νερού του αποξηραμένου προϊόντος. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να περιοριστούν χρησιμοποιώντας:

- Συσκευασίες κενού
- Χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης
- Διατήρηση του χαμηλού ποσοστού υγρασίας
- Προσθήκη συνθετικών αντιοξειδωτικών
- Διατήρηση των φυσικών αντιοξειδωτικών
- Αποκλεισμός του προϊόντος από το υπεριώδες και το ορατό φως

Χρώμα

Υπάρχουν διάφορες αιτίες οι οποίες προκαλούν την απώλεια ή αλλαγές στα αποξηραμένα τρόφιμα. Η ξήρανση αλλάζει τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του τροφίμου και για αυτό αλλάζει το χρώμα και η αντανάκλαστικότητα του. Στα φρούτα και τα λαχανικά, οι χημικές μεταβολές στη βαφική ύλη καροτενίδης και χλωροφύλλης οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία και την οξείδωση κατά τη ξήρανση ενώ η ενεργότητα των παραμενόντων πολυφαινολικών ενζύμων προκαλεί το μαύρισμα κατά την αποθήκευση.

Θρεπτική αξία

Σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα δεδομένα υπάρχουν μεγάλες διαφορές στη θρεπτική αξία των αποξηραμένων τροφίμων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θρεπτική αξία του αποξηραμένου προϊόντος είναι οι διεργασίες προεπεξεργασίας, η θερμοκρασία και ο χρόνος ξήρανσης καθώς και οι συνθήκες αποθήκευσης.

Οι βιταμίνες παρουσιάζουν διαφορετικές διαλυτότητες στο νερό. Έτσι για παράδειγμα η ριβοφλαβίνη γίνεται υπέρθερμη και διαχωρίζεται από το διάλυμα και έτσι οι απώλειες είναι μικρές ενώ αντιθέτως η βιταμίνη C είναι διαλυτή ακόμη και σε πολύ χαμηλά ποσοστά υγρασίας και ο ρυθμός διαλυτότητας αυξάνεται όσο η ξήρανση συνεχίζεται. Επίσης η βιταμίνη C είναι πολύ ευαίσθητη στη θερμότητα, στη οξείδωση, στους μικρούς χρόνους ξήρανσης, στις χαμηλές θερμοκρασίες, στα χαμηλά

επίπεδα υγρασίας και οξυγόνου κατά την αποθήκευση επομένως είναι απαραίτητο να αποφευχθούν μεγάλες απώλειες. Η θειαμίνη είναι επίσης ευαίσθητη στη θερμότητα, αλλά άλλες βιταμίνες είναι πιο σταθερές στη θερμότητα και στην οξείδωση και οι απώλειες κατά τη ξήρανση δεν ξεπερνούν το 5-10%.

Τα ελαιοδιαλυτά συστατικά (όπως τα λιπαρά οξέα και οι βιταμίνες A,D,E και K) περιέχονται κυρίως στο ξηρό περιεχόμενο του τροφίμου και έτσι δεν συμπυκνώνονται κατά τη ξήρανση. Ωστόσο το νερό είναι διαλύτης για καταλύτες βαρέων μετάλλων οι οποίοι βοηθούν την οξείδωση ακόρεστων συστατικών. Καθώς το νερό αφαιρείται οι καταλύτες γίνονται πιο ενεργοί και ο ρυθμός οξείδωσης επιταχύνεται. Οι λιποδιαλυτές βιταμίνες χάνονται κατά την αλληλεπίδραση με τα υπεροξείδια που παράγονται κατά την οξείδωση των λιπών. Οι απώλειες κατά την αποθήκευση περιορίζονται με τη μείωση της περιεκτικότητας οξυγόνου και της θερμοκρασίας αποθήκευσης.

3.6 Μαθηματικό μοντέλο της ξήρανσης

Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης

Κατά την περίοδο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης η επιφάνεια του προϊόντος είναι κορεσμένη με νερό και η απομάκρυνση της υγρασίας ελέγχεται από το ρυθμό εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια προς τον περιβάλλοντα χώρο. Η περίοδος αυτή διαρκεί όσο η μεταφορά υγρασίας προς την επιφάνεια είναι ταχύτερη από την εξάτμιση από την επιφάνεια.

Ο ρυθμός ξήρανσης σε επαφή με ρεύμα θερμού αέρα εξαρτάται από τη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς την επιφάνεια του τροφίμου και από τη μεταφορά μάζας από την επιφάνεια προς τον αέρα όπως φαίνεται από την εξίσωση:

$$-\frac{dw}{dt} = \frac{hA(T_o - T_w)}{L} = k_y A(w_w - w_a) \quad (3.2)$$

όπου dw/dt ο ρυθμός ξήρανσης ή εξάτμισης (kg νερού/s), h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$), A η επιφάνεια εξάτμισης (m^2), T_o η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του αέρα ($^\circ\text{C}$), T_w η θερμοκρασία επιφάνειας εξάτμισης, η οποία συμπίπτει με τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου ($^\circ\text{C}$), L η ενθαλπία εξάτμισης του νερού στη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (J/kg), k_y ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (kg/m^2s), w_w υγρασία κορεσμένου αέρα σε T_w (kg νερού/kg αέρα), w_a υγρασία κύριας μάζας αέρα (kg νερού/kg αέρα)

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες, την ταχύτητα του αέρα και τη γεωμετρία του ξηραντήρα. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται προσεγγιστικά από εξισώσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία.

Για την περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας μόνο από το ρεύμα αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι απλοποιημένες εμπειρικές σχέσεις:

- Για ροή παράλληλη προς την επιφάνεια εξάτμισης

$$h = 8,85 \times G^{0.8} / D^{0.2} \quad (3.3)$$

- Για ροή κάθετη προς την επιφάνεια εξάτμισης

$$h = 24,2 \times G^{0.37} \quad (3.4)$$

όπου G η μαζική ροή του αέρα ($\text{kg/m}^2\text{s}$) και D η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού της ροής = $4 \cdot (\text{διατομή}) / (\text{περίμετρο})$ (m). Η εξίσωση 3.3 ισχύει για αριθμούς Reynolds από 2600 έως 22000 και η εξίσωση 3.4 για ταχύτητες 0,9 – 4,5 m/s .

Εάν η μετάδοση θερμότητας γίνεται και με ακτινοβολία ή αγωγή ο προσδιορισμός των συντελεστών είναι αρκετά πιο πολύπλοκος. Επίσης σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασία T_w δεν συμπίπτει με τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου και πρέπει να υπολογισθεί από το ισοζύγιο μεταφοράς θερμότητας.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας δεν μπορεί να μετρηθεί εύκολα στην ξήρανση. Μία συνήθης προσέγγιση γίνεται μέσω του αριθμού Lewis που ορίζεται ως:

$$Le = \frac{h}{k_y c} \quad (3.5)$$

Ο αριθμός Lewis συνήθως χρησιμοποιείται όταν η μεταφοράς μάζας και θερμότητας επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από τις συνθήκες ροής. Αυτό μπορεί να ισχύει κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης και ο αριθμός Lewis ισούται κατά προσέγγιση με 1. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί $k_y = 0.8h$, αφού για τον αέρα μέση τιμή $c=1,21 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$.

Ο ρυθμός ξήρανσης ανά μονάδα ξηρού στερεού δίνεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{dw}{dt} \right)_\xi = \frac{1}{m_s} \frac{dw}{dt} \quad (3.6)$$

όπου $(dw/dt)_\xi$ ο ρυθμός εξάτμισης (kg/s kg ξηρού στερεού) και m_s η μάζα ξηρού στερεού.

Ο ρυθμός ξήρανσης ανά μονάδα ξηρής μάζας από μία στρώση υγρού υλικού, με την παραδοχή ότι δεν επέρχεται μεταβολή του όγκου κατά την ξήρανση, μπορεί να προκύψει από το συνδυασμό των εξισώσεων (3.2) και (3.6). Δεδομένου ότι η μάζα των ξηρών στερεών είναι: $m_s = 2xAp_s$, η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$-\left(\frac{dw}{dt}\right)_\xi = \frac{h}{2xp_s L}(T_a - T_w) \quad (3.7)$$

όπου p_s η πυκνότητα του ξηρού στερεού (kg/m^3) και $2x$ το παχος του στερεού κάθετο προς την επιφάνεια εξάτμισης A (m)

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από στερεά σωματίδια ή από υγρά σταγονίδια αιωρούμενα σε αέρα μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$Nu = \frac{hd_p}{k} = 2 + 0.60 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.8)$$

όπου $Re = d_p G / \mu = d_p v \rho / \mu$ ο αριθμός Reynolds με βάση τη διάμετρο των σωματιδίων $Pr = c\mu/k$ ο αριθμός Prandtl μ , ρ , c και k ιξώδες, πυκνότητα, ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα του αέρα, αντίστοιχα.

Η ανάλογη εξίσωση για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας, με ικανοποιητική ακρίβεια για αριθμούς Reynolds μέχρι 1000, είναι:

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (3.9)$$

Όπου $Sh = k_y d_p / D_u$ ο αριθμός Sherwood ή $Sh = k_y d_p M_y \rho_l / D \rho_A$ (τροποποιημένος αριθμός Sherwood για εξάτμιση από υγρά σταγονίδια), $Sc = \mu / \rho D_u$ ο αριθμός Schmidt, D_u ογκομετρική διαχυτότητα (m^2/h), M_y μέσο μοριακό βάρος του αερίου μίγματος για μεταφορά ατμού στον αέρα D συντελεστής διάχυσης (m^2/s).

Ο αριθμός Nusselt και ο αριθμός Sherwood σε ένα τελείως ακίνητο, ως προς το σωματίδιο, ρεύμα αέρα (οπότε $Re=0$) είναι ίσος με 2.

Περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης

Κατά την περίοδο αυτή η μεταφορά υγρασίας προς την επιφάνεια του τροφίμου είναι το ελέγχον στάδιο και η επιφάνεια δεν είναι πια κορεσμένη με νερό. Η περίοδος του μειούμενου ρυθμού ξήρανσης αρχίζει σε υγρασία χαμηλότερη από την κρίσιμη υγρασία και ο ρυθμός ξήρανσης σε αυτή μπορεί να μειώνεται γραμμικά με την υγρασία. Ορισμένα τρόφιμα εμφανίζουν περισσότερες από μία περιόδους μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, συνήθως δύο ή και τρεις. Η ύπαρξη μιας ή περισσότερων περιόδων μειούμενου ρυθμού ξήρανσης αποδίδεται στη διαφορετική

συμπεριφορά υγροσκοπικών και μη υγροσκοπικών υλικών. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση μη υγροσκοπικά υλικά είναι εκείνα στα οποία η μερική πίεση του νερού στο υλικό είναι ίση με την τάση ατμών του νερού και εμφανίζουν μία μόνο περίοδο μειούμενου ρυθμού ξήρανσης. Υγροσκοπικά είναι τα υλικά στα οποία η μερική πίεση του νερού στο υλικό γίνεται χαμηλότερη από την τάση ατμών του νερού σε ορισμένη τιμή υγρασίας. Αυτά τα υλικά εμφανίζουν δύο ή και τρεις περιόδους μειούμενου ρυθμού ξήρανσης.

Στην πρώτη περίοδο του μειούμενου ρυθμού ξήρανσης το ποσοστό της επιφάνειας του προϊόντος που παραμένει κορεσμένο συνεχώς μειώνεται επειδή η μεταφορά υγρασίας μέσα στο τρόφιμο δεν επαρκεί για τον κορεσμό της επιφάνειας. Ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται καθώς το ποσοστό της κορεσμένης επιφάνειας μειώνεται. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ξήρανσης σε αυτή την περίοδο είναι ο ρυθμός μεταφοράς υγρασίας μέσα στο προϊόν και ο ρυθμός εξάτμισης από την επιφάνεια του προϊόντος. Όταν όλη η επιφάνεια φθάσει σε κατάσταση μη κορεσμού η εσωτερική μεταφορά υγρασίας γίνεται ο ελέγχων παράγων της ξήρανσης. Η μεταφορά υγρασίας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια του τροφίμου γίνεται με διάφορους μηχανισμούς οι κυριότεροι των οποίων είναι η μοριακή διάχυση και η ροή δια τριχοειδών αγωγών. Η εξίσωση που εκφράζει τη διάχυση της υγρασίας προς την εξωτερική επιφάνεια του στερεού λόγω διαφοράς συγκέντρωσης μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{Z}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right] \quad (3.10)$$

όπου D ο συντελεστής διάχυσης (m²/s) και Z=0 για πλάκα 1 για κύλινδρο άπειρου μήκους και 2 για σφαίρα.

Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης στην εξίσωση (3.10) θεωρείται σταθερός. Στην πραγματικότητα ο συντελεστής διάχυσης συνήθως μειώνεται με μείωση της υγρασίας. Επίσης ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία του στερεού και η μεταβολή του ακολουθεί την εξίσωση Arrhenius, στην οποία υπεισέρχεται η ενέργεια ενεργοποίησης για τη διάχυση.

Η εξίσωση (3.10) έχει λυθεί για ορισμένα σχήματα και ο χρόνος ξήρανσης μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις:

- Για πλάκα πάχους 2x

$$t = \frac{4x^2}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \right) \quad (3.11)$$

- Για κύλινδρο άπειρου μήκους ακτίνας r

$$t = \frac{r^2}{5.78D} \ln \left(0.692 \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \right) \quad (3.12)$$

- Για σφαίρα ακτίνας r

$$t = \frac{r^2}{\pi^2 D^2} \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \right) \quad (3.13)$$

όπου w_c , w_e , w : η κρίσιμη υγρασία στην αρχή της περιόδου μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, η υγρασία ισορροπίας και η υγρασία μετά από χρόνο t ξήρανσης, αντίστοιχα.

Η θεωρία της μοριακής διάχυσης εφαρμόζεται στην ξήρανση ομοιογενών υγροσκοπικών στερεών, όπως η ζελατίνη το άμυλο και η κυτταρίνη. Χαρακτηριστική ένδειξη της μοριακής διάχυσης είναι ότι ο χρόνος ξήρανσης είναι ανάλογος του τετραγώνου του πάχους ή της ακτίνας του στερεού.

Η μεταφορά υγρασίας με μηχανισμό ροής δια μέσου τριχοειδών είναι δύσκολο να διατυπωθεί με μορφή εξίσωσης στα τρόφιμα επειδή αποτελούνται από ένα πολύπλοκο σύστημα τριχοειδών πόρων διαφορετικών διαμέτρων. Επίσης είναι δύσκολο να διαφοροποιηθεί η ροή λόγω τριχοειδών φαινομένων από τη ροή λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το μηχανισμό μεταφοράς μάζας στο εσωτερικό του τροφίμου η εμπειρική εξίσωση:

$$-\frac{dw}{dt} = K(w - w_e) \quad (3.14)$$

όπου K εμπειρική σταθερά ξήρανσης (1/s)

Η εξίσωση (3.14) υποδηλώνει ότι ο ρυθμός ξήρανσης μεταβάλλεται γραμμικά με την απομένουσα ελεύθερη υγρασία του τροφίμου. Αυτό στην πραγματικότητα συμβαίνει σε πολλά πορώδη τρόφιμα.

Η ολοκλήρωση της (3.14) δίνει τον χρόνο της περιόδου μειούμενου ρυθμού ξήρανσης από την κρίσιμη υγρασία w_c μέχρι υγρασία w εάν η τιμή του K παραμένει σταθερή:

$$t = \frac{1}{K} \ln \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \quad (3.15)$$

Η σταθερά K προσδιορίζεται πειραματικά από την κλίση της ευθείας σε διάγραμμα του $\ln \frac{w_c - w_e}{w - w_e}$ ως προς t , ή σε διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης ως προς την απομένουσα ελεύθερη υγρασία. Αν υπάρχει μία μόνο περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης μέχρι την τελική υγρασία ισορροπίας w_e , η σταθερά K προκύπτει ως συνάρτηση του σταθερού ρυθμού ξήρανσης $\left(\frac{dw}{dt}\right)_c$ από τη σχέση:

$$k = -\frac{(dw/dt)_c}{w_c - w_e} \quad (3.16)$$

Στις περιπτώσεις που υπάρχουν περισσότερες από μία περιόδους μειούμενου ρυθμού ξήρανσης σχηματίζονται περισσότερες από μία ευθείες από τις οποίες υπολογίζονται τα αντίστοιχα K .

Η κρίσιμη υγρασία μπορεί να υπολογισθεί με εξίσωση των ρυθμών ξήρανσης των δύο περιόδων τη χρονική στιγμή που η υγρασία του τροφίμου λαμβάνει την κρίσιμη τιμή w_c :

$$K(w_c - w_e) = \frac{hA(T_a - T_w)}{L} = k_y A(w_w - w_a) \quad (3.17)$$

Από την εξίσωση (3.17) φαίνεται ότι η κρίσιμη υγρασία είναι συνάρτηση της υγρασίας ή της θερμοκρασίας του αέρα. Με αύξηση της θερμοκρασίας ή μείωση της υγρασίας του αέρα ο ρυθμός ξήρανσης κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης αυξάνεται και κατά συνέπεια αυξάνεται και η κρίσιμη υγρασία.

Ο χρόνος ξήρανσης μπορεί να προσδιορισθεί και γραφικά ή υπολογιστικά εάν είναι γνωστά πειραματικά δεδομένα του ρυθμού ξήρανσης. Ο ρυθμός ξήρανσης N ανά μονάδα επιφάνειας ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$) μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$N = -\frac{m_s}{A} \frac{dw}{dt} \quad (3.18)$$

Επομένως ο χρόνος ξήρανσης θα δίνεται από την εξίσωση:

$$t = \frac{m_s}{A} \int_{w_1}^{w_2} \frac{dw}{N} \quad (3.19)$$

όπου m_s η μάζα του ξηρού προϊόντος (kg) και A η επιφάνεια αυτού (m^2) και w_1 , w_2 η αρχική και η τελική υγρασία αντίστοιχα (kg/kg ξηρού στερεού).

Στην περίοδο του σταθερού ρυθμού ξήρανσης $N=N_c$ και

$$t_c = \frac{m_s (w_1 - w_c)}{AN_c} \quad (3.20)$$

Στην περίοδο του μειούμενου ρυθμού αν ο ρυθμός ξήρανσης μεταβάλλεται γραμμικά με την υγρασία η ολοκλήρωση της (3.19) δίνει:

$$t_f = \frac{m_s}{A} \frac{w_c - w_2}{N_c - N_2} \quad (3.21)$$

Έτσι ο συνολικός χρόνος ξήρανσης είναι ($t_c + t_f$)

Αν ο ρυθμός ξήρανσης δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την υγρασία ο χρόνος ξήρανσης μπορεί να προσδιορισθεί από διάγραμμα του $1/N$ ως προς w ως το εμβαδόν μεταξύ της καμπύλης και του άξονα των w .

4. Ξήρανση με χρήση γεωθερμίας

4.1 Εισαγωγή

Η ξήρανση ή αφυδάτωση αγροτικών προϊόντων αποτελεί τη συνηθέστερη βιομηχανική χρήση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής και μέσης ενθαλπίας (40-150°C). Χρησιμοποιείται σε ξηραντήρια που λειτουργούν με χρήση θερμού αέρα και η διαφορά των γεωθερμικών ξηραντηρίων με τα συμβατικά ξηραντήρια έγκειται στη χρήση γεωθερμικής ενέργειας για την θέρμανση του αέρα που εισέρχεται στο ξηραντήριο. Αγροτικά προϊόντα που αφυδατώνονται με τη χρήση γεωθερμικών ρευστών είναι κρεμμύδια, σκόρδα, μήλα, αχλάδια, μπανάνες, μάγκο, ανανάς, μηδική, φύκια, ξυλεία κτλ. Οι μεγαλύτερες μονάδες ξήρανσης, που ξεκίνησαν στη δεκαετία του 60 και του 70, αφορούν στη ξήρανση μηδικής, ξυλείας και χαρτοπολτού στη Ν. Ζηλανδία.

Οι γεωθερμικές εφαρμογές ξήρανσης αποτελούν μονάδες μικρής κλίμακας με σημαντικό όμως τοπικό χαρακτήρα. Οι μονάδες αυτές εμφανίζουν αυξημένη ανταγωνιστικότητα καθώς το κόστος τους είναι ανταγωνίσιμο και πολλές φορές μικρότερο από το κόστος των συμβατικών μονάδων. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι στις περισσότερες εφαρμογές η απόσβεσή της επένδυσης γίνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Εξασφαλίζουν σταθερό και σημαντικό εισόδημα στους αγροτικούς πληθυσμούς ενώ αποτελούν πολύ καλό συνδυασμό με τη χρήση γεωθερμικών θερμοκηπίων καθώς τα ξηραντήρια λειτουργούν συγκεκριμένο διάστημα του έτους. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των γεωθερμικών ξηραντηρίων είναι ότι οι θερμοκρασίες θερμού αέρα που χρησιμοποιούνται για τη διεργασία της ξήρανσης είναι αρκετά χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές βιομηχανικές μονάδες ξήρανσης. Επιτυγχάνεται έτσι παραγωγή προϊόντων με βελτιωμένη ποιότητα γεγονός που δημιουργεί ένα συγκριτικό πλεονέκτημα και βοηθάει την εμπορική τους πορεία. Τέλος τα ενεργειακά οφέλη που προκύπτουν είναι και αυτά πολύ σημαντικά, καθώς η γεωθερμία αντικαθιστά τη χρήση ορυκτών καυσίμων.

Επιπλέον φαίνεται ότι τα γεωθερμικά ξηραντήρια είναι από τις πλέον αποδοτικές, οικονομικά, εφαρμογές γεωθερμίας. Απαιτεί πολύ μικρότερα κεφάλαια σε σχέση με μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργεί περισσότερες

θέσεις εργασίας και επιπρόσθετα η απόσβεσή γίνεται σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Μία γενική προσέγγιση δίνεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση οικονομικών μεγεθών μονάδων ξήρασης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

		Μονάδα ξήρασης	Μονάδα παραγωγής ενέργειας
Έξοδα Κεφαλαίου	\$ millions	15	50
Έσοδα	>>	18	11
Κέρδη	>>	10	9
Απαιτούμενη παροχή	g.p.m. (gallons per minute)	1200	12000
Θέσεις εργασίας		75	15

Σύμφωνα με τη παγκόσμια έκθεση για τις άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας για το έτος 2005 η ξήραση αγροτικών προϊόντων καταλαμβάνει ποσοστό 0,5% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος γεωθερμικών εφαρμογών με συνολική ισχύ 157 MW (Lund and Freeston, 2005). Ποσοστό αρκετά χαμηλό σε σχέση με τις υπόλοιπες χρήσεις αλλά με τεράστιες προοπτικές και με ιδιαίτερη αύξηση του ενδιαφέροντος για τέτοιου είδους εφαρμογές. Χαρακτηριστικά το έτος 2000 υπήρχαν γεωθερμικά ξηραντήρια εγκατεστημένα σε 10 χώρες ενώ το 2005 σε 15 με μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 16,2%. Η δυναμική της ανάπτυξης τέτοιων εφαρμογών αναμένεται να αυξηθεί και τα επόμενα χρόνια λόγω της αύξησης των τιμών του πετρελαίου αλλά και λόγω της αυξανόμενης ανησυχίας για την υπερθέρμανση του πλανήτη και την προώθηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στην Ελλάδα είχε λειτουργήσει σε πιλοτικό στάδιο ένα προξηραντήριο βαμβακιού (τύπου πύργου) που λειτούργησε επιδεικτικά την περίοδο 1990-91 στη Ν. Κεσσάνη Ξάνθης. Από το 2001 όμως λειτουργεί παραγωγικά στη περιοχή του Νέου Εράσμιου Ξάνθης μία μονάδα ξήρασης ντομάτας με ιδιαίτερη επιτυχία.

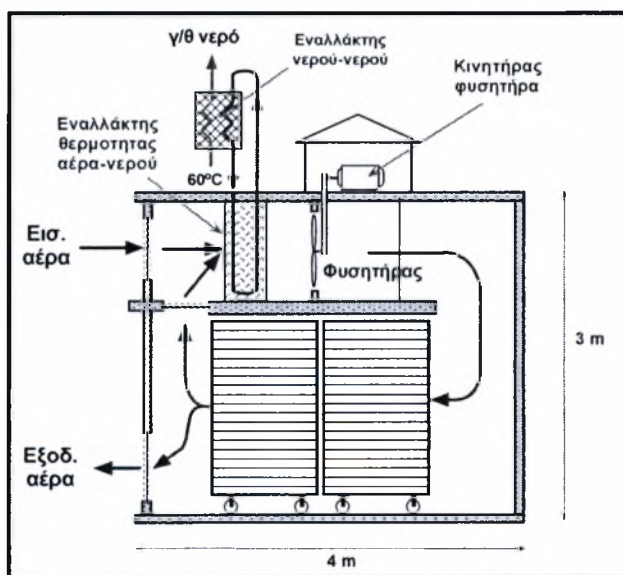
4.2 Αρχές λειτουργίας

Ανεμιστήρες οδηγούν τον αέρα (φρέσκο ή από ανακύκλωση) να διέλθει μέσα από τον εναλλάκτη νερού-αέρα και να θερμανθεί σε θερμοκρασία 40-100°C. Η θερμοκρασία του αέρα είναι άμεση συνάρτηση της φύσης του αγροτικού προϊόντος που επεξεργαζόμαστε αλλά και τη χρήση του τελικού προϊόντος. Έτσι για τα περισσότερα λαχανικά, καρπούς ή φρούτα που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση ή θερμοκρασία δεν θα πρέπει να είναι υψηλότερη των 55-60°C, ενώ όσα

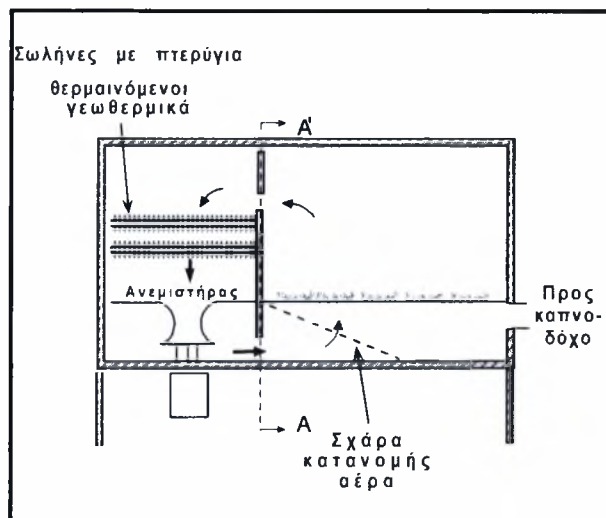
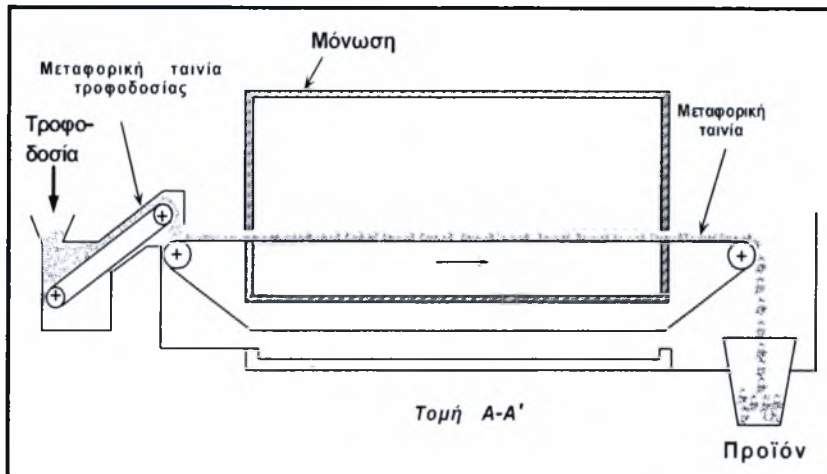
προορίζονται για ζωτροφές η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να είναι αρκετά υψηλότερη. Σε διεργασίες ξήρανσης βαμβάκος, μαλλιού ή ξυλείας χρησιμοποιούνται ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες τις τάξεως των 100-120°C. Το νερό από τον εναλλάκτη μπορεί μετέπειτα να χρησιμοποιηθεί και για άλλες χρήσεις όπως η θέρμανση θερμοκηπίων ή κατοικιών αυξάνοντας την αποδοτικότητα της επένδυσης.

Ο θερμός αέρας ρέει επάνω ή μέσα από τις ταινίες ή τους δίσκους με τα λαχανικά ή τα φρούτα, ή συμπαρασύρει τα προϊόντα (σιτηρά, βαμβάκι) μέσα στους πύργους ξήρανσης, με αποτέλεσμα να εξατμίζεται σημαντικό ποσοστό της υγρασίας των προϊόντων. Η διεργασία ξήρανσης είναι είτε συνεχής είτε διακεκομμένη. Συνήθως ακολουθούνται πλέον του ενός στάδια ξήρανσης μειώνοντας σταδιακά τις θερμοκρασίες του θερμού αέρα για να επιτύχουμε το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας του τελικού προϊόντος.

Οι πιο συχνοί τύποι ξηραντήρων που χρησιμοποιούνται είναι τύπου σήραγγας, ξηραντήρες μεταφορικής ταινίας και ξηραντήρες με ψεκασμό (πύργοι ξήρανσης). Βασικό κριτήριο για την επιλογή του ξηραντήρα αποτελεί το προϊόν που θέλουμε να αποξηράνουμε. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή είναι το κόστος του ξηραντήρα καθώς και η επιθυμητή του απόδοση.



Σχήμα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας γεωθερμικής ξήρανσης-ξηήρανση σε παρτίδες



Σχήμα 4.2: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας γεωθερμικής ξήρανσης-συνεχής διεργασία με κυλιόμενη ταινία.

Εκτός από τη θέρμανση του αέρα σε μία γεωθερμική μονάδα ξήρανσης απαιτείται και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τους ανεμιστήρες, τις αντλίες, τη μεταφορά των προϊόντων κτλ. Σημειώνεται ότι επιβάλλεται αυστηρός έλεγχος της ροής του αέρα, της θερμοκρασίας και της πίεσης σε όλα τα τμήματα ενός ξηραντηρίου για να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη ξήρανση του προϊόντος. Ως μεταβλητές χειρισμού στις διεργασίες ξήρανσης χρησιμοποιούμε την ποσότητα του θερμού αέρα και τη ποσότητα νωπού προϊόντος που τοποθετούμε στο ξηραντήριο. Ο απαιτούμενος χρόνος ξήρανσης επηρεάζεται επίσης από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν.

5. Περιγραφή της μονάδας και της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας

5.1 Εισαγωγή

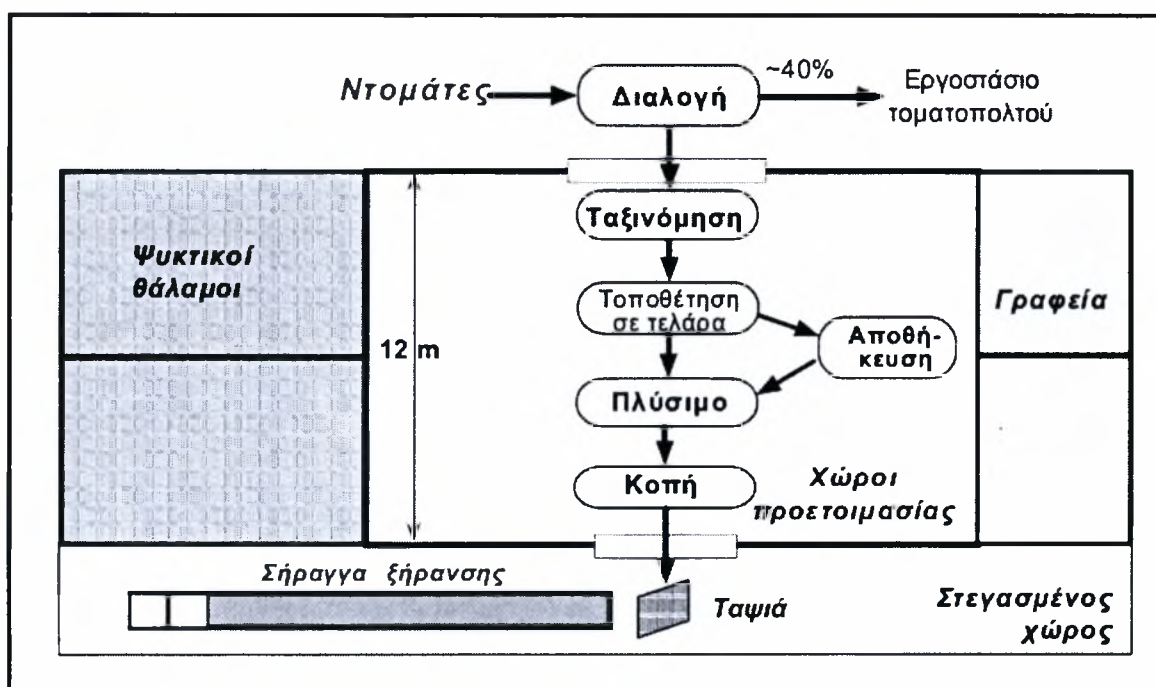
Η ντομάτα όπως και τα υπόλοιπα αγροτικά προϊόντα μπορούν να αποξηρανθούν με διάφορες μεθόδους. Όποια μέθοδος και αν χρησιμοποιηθεί αυτό που είναι σημαντικό είναι ο υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου ξήρανσης. Ο χρόνος ξήρανσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ποικιλία ντομάτας που θα χρησιμοποιηθεί, η περιεκτικότητα σε διαλυμένα στερεά (°brix) του νωπού προϊόντος, το μέγεθος των κομματιών που εισάγονται στο ξηραντήριο, η υγρασία του θερμού αέρα, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του θερμού αέρα καθώς και η απόδοση της μεθόδου ξήρανσης. Είναι σημαντικό να υπολογιστεί σωστά ο ρυθμός ξήρανσης καθώς επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η ξήρανση ντομάτας ακολουθεί τα ίδια βήματα που ακολουθούνται στις διεργασίες ξήρανσης των αγροτικών προϊόντων. Υπάρχουν τα στάδια της προεπεξεργασίας, το στάδιο της ξήρανσης και της μεταξηραντικής επεξεργασίας.

Η παραδοσιακή μέθοδος της ξήρανσης ντομάτας είναι η ξήρανση στον ήλιο και είναι ευρύτατα διαδεδομένη στη χώρα μας. Η μέθοδος αυτή έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι είναι αρκετά απλούστερη και χρειάζεται πολύ μικρότερα αρχικά κεφάλαια. Απαιτεί όμως μεγαλύτερους χρόνους ξήρανσης ενώ μπορεί να παρουσιαστεί σημαντικό πρόβλημα στην ποιότητα του τελικού προϊόντος καθώς οι αποξηραμένες ντομάτες επηρεάζονται από τη σκόνη και από τη ενζυματική και μικροβιακή δραστηριότητα. Από την άλλη μεριά, η βιομηχανική ξήρανση, που συνήθως χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες αέρα (~90°C), επηρεάζει σημαντικά το άρωμα και το χρώμα του τελικού προϊόντος. Επίσης μπορεί να οδηγήσει σε σκλήρυνση του εξωτερικού περιβλήματος (case hardening) της ντομάτας γεγονός που επηρεάζει την ξήρανση του εσωτερικού. Γίνεται εμφανές ότι οι ιδανικότερες θερμοκρασίες για τη ξήρανση ντομάτας είναι ανάμεσα στους 45 με 55°C καθώς δεν επηρεάζονται σημαντικά τα χαρακτηριστικά της ντομάτας, θερμοκρασίες οι οποίες είναι εφικτές με τη ξήρανση με χρήση γεωθερμικής ενέργειας.

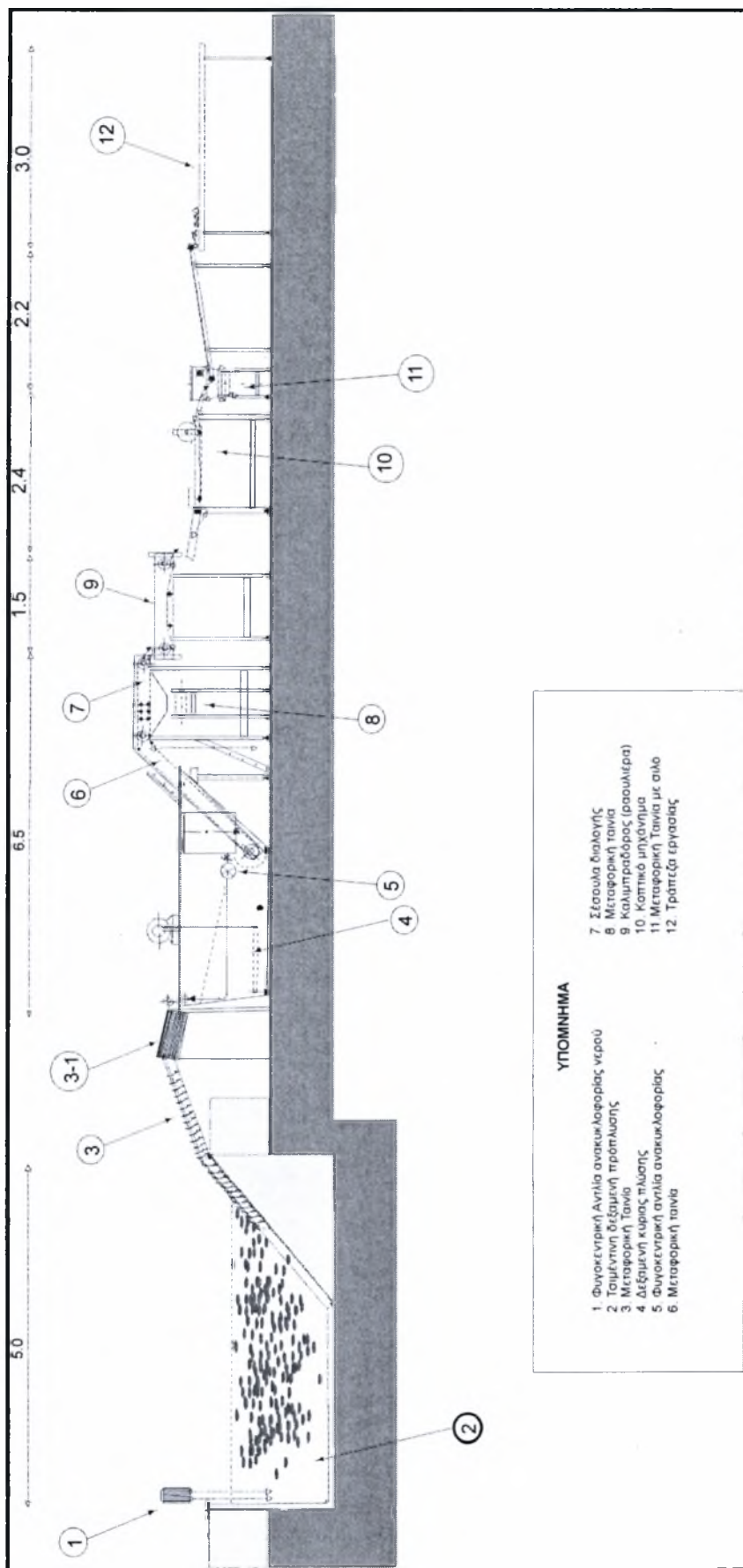
5.2 Διεργασίες ξήρανσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η διαδικασία ξήρανσης διαιρείται σε τρία στάδια. Κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας το νωπό προϊόν περνάει από το σύστημα πρόπλυσης-πλύσης-διαλογής (Σχήμα 5.3) και ακολουθεί το δεύτερο στάδιο που είναι η διαδικασία της ξήρανσης. Τέλος στο στάδιο της μεταξηραντικής επεξεργασίας το τελικό προϊόν αποθηκεύεται και συσκευάζεται. Η όλη διαδικασία παρουσιάζεται στο σχηματικό διάγραμμα της μονάδας στο Σχήμα 5.1.



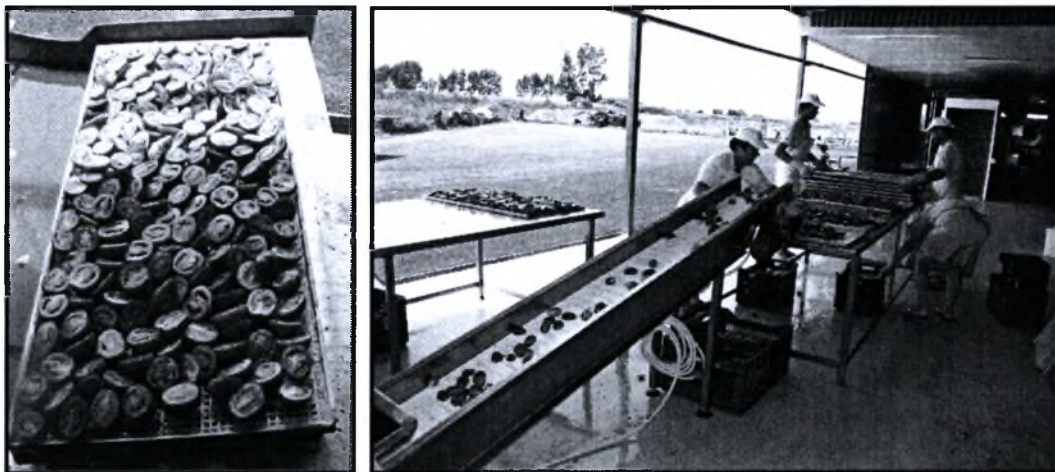
Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της γεωθερμικής μονάδας ξήρανσης ντομάτας.

Αρχικά όλες οι τομάτες οι οποίες συλλέγονται, (ποικιλία ντομάτας Roma, η οποία είναι καταλληλότερη για ξήρανση λόγω του υψηλού λόγου «σάρκα/χυμός») τοποθετούνται σε μία δεξαμενή πρόπλυσης με όγκο περιεχόμενου νερού 6 m³ (Σχήμα 5.2). Μέσα στη δεξαμενή πρόπλυσης το νερό ανακυκλοφορεί με ρυθμό 10 m³/h. Η ανακυκλοφορία επιτυγχάνεται μέσω μίας φυγοκεντρικής αντλίας ενώ κάθε 24 ώρες το νερό της δεξαμενής ανανεώνεται. Έπειτα, μέσω μεταφορική ταινίας το νωπό προϊόν οδηγείται σε μία σχάρα κατακράτησης φυτικών υπολειμμάτων όπου αφαιρούνται τυχόν κλαδιά ή φύλλα που παραμένουν προσκολλημένα πάνω στις φρέσκιες ντομάτες. Εν συνέχεια το προϊόν μεταφέρεται στο σύστημα κύριας πλύσης



Σχήμα 5.2: Τομή συστήματος προπλυσσης-πλυσσης-διαλογής τομάτας.

όπου παραμένει για τουλάχιστον 1 ώρα. Η δεξαμενή κύριας πλύσης περιέχει συνολικά 1,5 m³ νερό που και αυτό ανανεώνεται καθημερινά. Μετά τη δεξαμενή κύριας πλύσης πάλι μέσω μεταφορικής ταινίας οι ντομάτες μεταφέρονται στο σύστημα ταξινόμησης όπου διαχωρίζονται σε δύο μεγέθη: στις ντομάτες με βάρος 90-110g και στις ντομάτες με βάρος μικρότερο των 90g. Και στις δύο μεταφορικές ταινίες διενεργείται ποιοτικός έλεγχος κατά τον οποίο αφαιρούνται όσες τομάτες δεν πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές ποιότητας (σάπιες, άγουρες). Οι φρέσκιες ντομάτες πρέπει να είναι 'σφικτές' και ώριμες, όχι όμως υπερώριμες. Τέλος οι φρέσκιες ντομάτες οδηγούνται στο κοπτικό μηχάνημα το οποίο κόβει τις ντομάτες στα δύο (halves). Οι κομμένες ντομάτες οδηγούνται σε δύο τράπεζες εργασίας (ανάλογα με το μέγεθος τους) όπου τοποθετούνται σε χαλύβδινους δίσκους (τύπου πλέγματος, διαστάσεων 124x50 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.

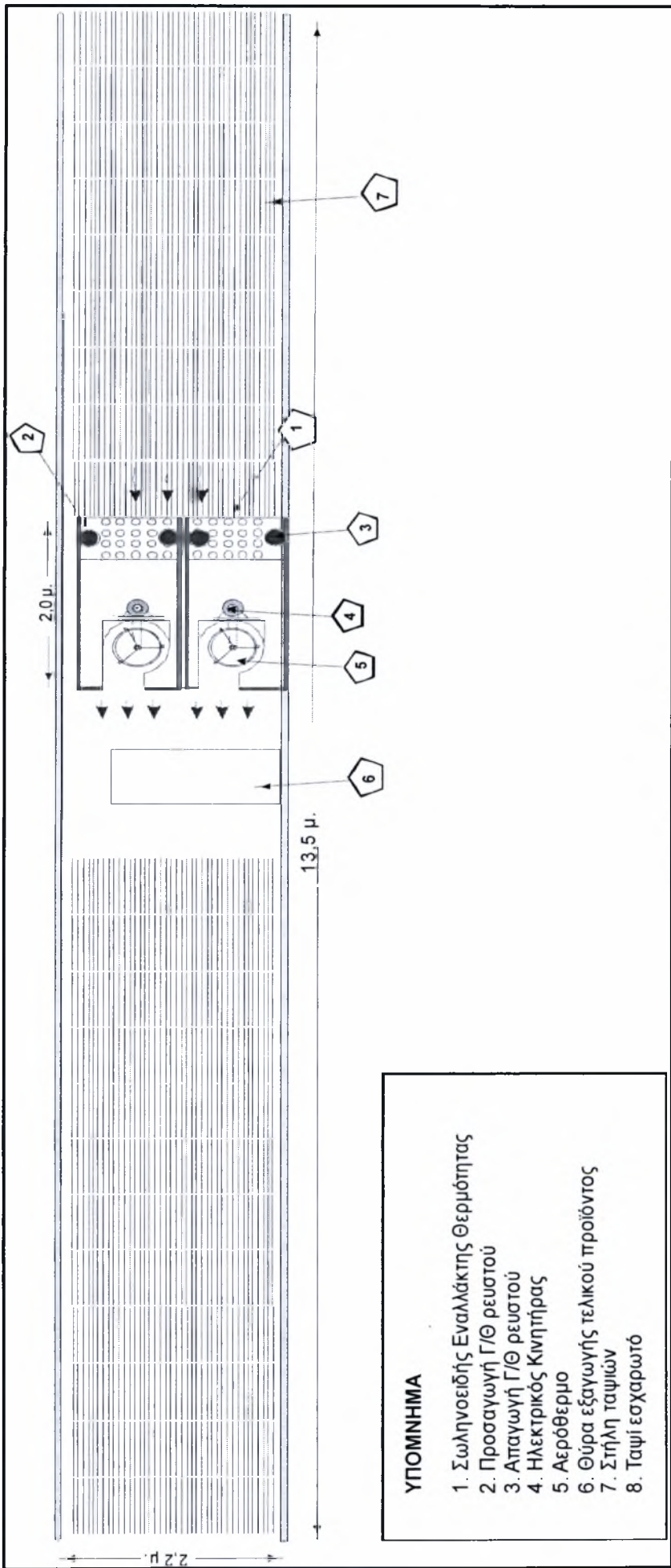


Σχήμα 5.3: Αριστερά, νωπό προϊόν έτοιμο για τη σήραγγα ξήρανσης. Δεξιά, Τοποθέτηση της κομμένης ντομάτας στα ταμιά στη τράπεζα διαλογής.



Στο δεύτερο 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 5.4):

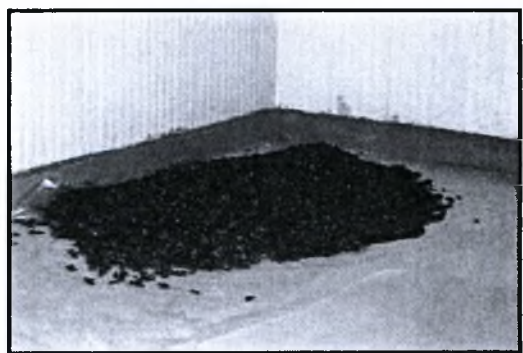
- *Εναλλάκτης εκτεινόμενης επιφάνειας υγρού-αέρα.* Αποτελείται από συγκρότημα 4 ενότητων. Η κάθε ενότητα περιλαμβάνει σωληνωτό εναλλάκτη θερμότητας 10 στηλών με απόσταση 1,8mm η μία από την άλλη. Κάθε εναλλάκτης περιέχει 32 κυκλώματα. Ο αέρας εισέρχεται στον εναλλάκτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20-35°C) και εξέρχεται από τον εναλλάκτη με σχεδόν σταθερή θερμοκρασία 57,5-58,4°C. Η θερμοκρασία του εισερχόμενου γεωθερμικού νερού είναι 59,3°C και οι εναλλάκτες έχουν προδιαγραφεί για παροχή που ανέρχεται σε 8 m³/h και θερμικό φορτίο 145 kW. 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), 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.
- *Φυσητήρες αέρα.* Σε κάθε ενότητα υπάρχει φυγοκεντρικός ανεμιστήρας με ισχύ 3,5 kW. Η συνολική παροχή του αέρα μέσα στη σήραγγα από κάθε ενότητα ανέρχεται σε 7.000 m³/h.
- *Σήραγγα ξήρανσης.* Η σήραγγα έχει συνολικό μήκος 13,5m, πλάτος 1,24m και ύψος 2,2 m και είναι κατασκευασμένη από αλουμινένια πάνελα πολυουρεθάνης. Η είσοδος του νωπού προϊόντος γίνεται από τα 2 άκρα της σήραγγας και συνολικά μπορούν να τοποθετηθούν 23 στήλες 12 από τη μία και 11 από την άλλη πλευρά. Στο κέντρο της σήραγγας υπάρχει χώρος 2 m για την απομάκρυνση του τελικού προϊόντος και έτσι το καθαρό μήκος της σήραγγας είναι 11,5 m. Στα εσωτερικά τοιχώματα της σήραγγας υπάρχουν ειδικά στηρίγματα για την τοποθέτηση και μετακίνηση 32 δίσκων. Η απόσταση μεταξύ των κενών δίσκων είναι περίπου 7 cm, κάτι που διασφαλίζει ικανοποιητική ροή του θερμού αέρα. Σε κάθε δίσκο τοποθετούνται περίπου 9 kg νωπού προϊόντος, τα οποία πριν από την τοποθέτηση του δίσκου στη σήραγγα ψεκάζονται με κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα (κάθε 60 λεπτά) 32 δίσκοι με αποξηραμένο



Σχήμα 5.4: Τομή σήραγγας ξήρανσης.

προϊόν απομακρύνονται από τη έξοδο της σήραγγας και 32 νέοι δίσκοι με νωπό προϊόν τοποθετούνται σε μία από τις εισόδους με παράλληλη μετακίνηση όλων των δίσκων κατά μία θέση μέσω αυτόματου μηχανισμού. Η εισαγωγή των δίσκων γίνεται εναλλάξ με δίσκους που περιέχουν ντομάτες μέσου βάρους 90-110g και ντομάτες μέσου βάρους μικρότερου των 90g με στόχο την ομοιομορφία στη ροή του αέρα καθώς και της ξήρανσης. 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.

Στο τρίτο στάδιο της διεργασίας έχουμε την αποθήκευση και τη συσκευασία του αποξηραμένου προϊόντος. Όταν το αποξηραμένο προϊόν εξέρχεται από τη σήραγγα ξήρανσης τοποθετείται μη συσκευασμένο σε θάλαμο σε θερμοκρασία δωματίου για τουλάχιστον 12 ώρες με στόχο την ομογενοποίηση της υγρασίας που περιέχει (Σχήμα 5.5). Στη συνέχεια το προϊόν συσκευάζεται σε αεροστεγείς συσκευασίες των 5 κιλών και τοποθετείται μέσα σε ψυκτικούς θαλάμους με θερμοκρασία (4,5-7°C) στους οποίους παραμένει μέχρι την τελική διάθεση του στην αγορά. Πριν από τη διάθεση του στην αγορά, εάν το τελικό προϊόν προορίζεται για λιανική πώληση, συσκευάζεται σε γαύλινα βάζα διάφορων μεγεθών.



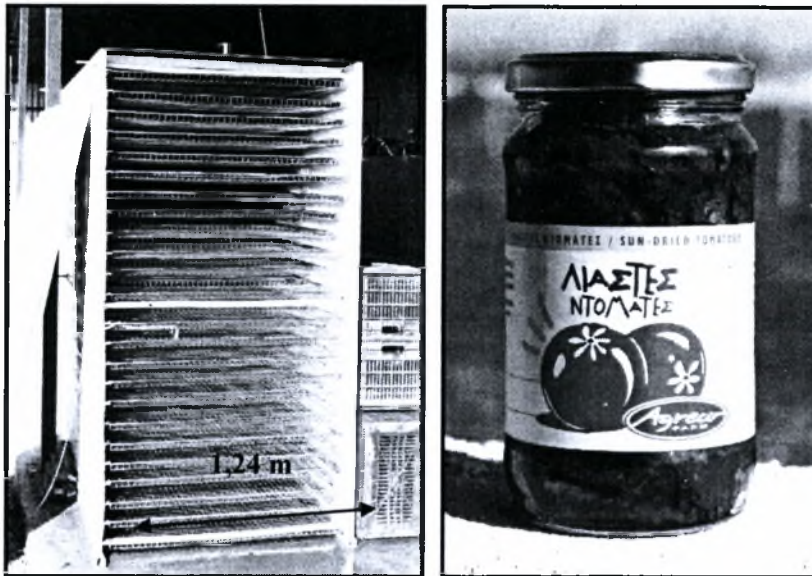
Σχήμα 5.5: Αριστερά, συσκευασμένα ντομάτα στο θάλαμο ψύξης, και δεξιά, αποξηραμένα ντομάτα στο στάδιο της ομογενοποίησης.

5.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα στερεά συστατικά της νωπής ντομάτας κυμαίνονται γύρω στο 7%, ενώ το αποξηραμένο προϊόν περιέχει υγρασία περίπου 15%. Έτσι με την απομάκρυνση του νερού το 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 διαδικασίας.

Η αφυδάτωση στους 55-57°C, σε ήπιες δηλαδή συνθήκες θερμοκρασίας και σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, διατηρεί το χρώμα (όπως φαίνεται και στη φωτογραφία του τελικού προϊόντος στο Σχήμα 5.6) 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. 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 οξειδωσης. 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.

Για το έτος 2006 και σε περίοδο 56 ημερών παρήχθησαν 14.800 κιλά αποξηραμένου προϊόντος και διατέθηκε στην Ελλάδα και στο εξωτερικό με την ονομασία «*λιαστή*» ντομάτα. Η μέση ημερήσια παραγωγή της μονάδας ανήλθε στα 270 kg αποξηραμένου προϊόντος την ημέρα.



Σχήμα 5.6: Αριστερά, φωτογραφία της εισόδου της σήραγγας και, δεξιά, φωτογραφία συσκευασμένου προϊόντος.

5.4 Οικονομικά στοιχεία

Εκτός από την περιγραφή του ξηραντηρίου επιχειρείται και η ανάλυση των οικονομικών στοιχείων της μονάδας. Σύμφωνα με τα στοιχεία κόστους από την λειτουργία της μονάδας καθώς και από τα στοιχεία για το κόστος της επένδυσης και των πρώτων υλών καθώς και τις τιμές πώλησης των αποξηραμένων προϊόντων υπολογίζεται το κέρδος που προέκυψε από την λειτουργία της μονάδας το έτος 2006.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για το 2006 παρήχθησαν 15 τόνοι αποξηραμένου προϊόντος από 200 τόνους νωπού. Το νωπό προϊόν αγοράζεται από τους τοπικούς παραγωγούς για 0,10 € το κιλό ενώ το τελικό προϊόν έχει τιμή πώλησης στα 6 € αν πρόκειται για χονδρική πώληση και 8,5 € αν πρόκειται για λιανική πώληση. Έτσι μία καλή θεώρηση είναι ότι η μέση τιμή πώλησης ανέρχεται στα 7 €. Το κόστος της συνολικής επένδυσης (κτιριακές εγκαταστάσεις, μηχανολογικός εξοπλισμός, κόστος γεώτρησης) ανήλθε στα 400.000 €. Βέβαια λόγω του γεγονότος ότι η μονάδα βρίσκεται στο νομό Ξάνθης όπου οι περισσότερες επενδύσεις είναι επιδοτούμενες, αλλά και του είδους της επένδυσης, η επένδυση ήταν επιδοτούμενη με ποσοστό 60%. Το κόστος λειτουργίας (εκτός του εργατικού) είναι ιδιαίτερα χαμηλό καθώς οφείλεται στο ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται για τη αντλία μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού από το γεώτρηση στον εναλλάκτη θερμότητας, καθώς και για την λειτουργία των φυσητήρων αέρα. Ο κάθε φυσητήρας έχει

ονομαστική ισχύ 3,5 kW ενώ η αντλία έχει ονομαστική ισχύ 4 kW. Έτσι το συνολικό κόστος ενέργειας δεν ξεπερνάει τα 1500 € για όλη τη περίοδο λειτουργίας. Συνοπτικά τα έξοδα και τα έσοδα καθώς και τα καθαρά κέρδη για το έτος 2006 δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα χρήσης γεωθερμικού ξηραντηρίου για το έτος 2006

	ΕΞΟΔΑ		ΕΣΟΔΑ
Κόστος πρώτης ύλης (€)	20000	Συνολική παραγωγή (kg)	15000
Κόστος εργασίας (€)	13000	Μέση τιμή πώλησης (€/kg)	7
Κόστος λειτουργίας (€)	1500		
Λοιπά έξοδα (€)	1500		
ΣΥΝΟΛΟ	36000	ΣΥΝΟΛΟ	105000
		ΚΑΘΑΡΟ ΚΕΡΔΟΣ	69000

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1 τα κέρδη ήταν ιδιαίτερα σημαντικά καταδεικνύοντας με το καλύτερο τρόπο ότι τέτοιες εφαρμογές είναι ιδιαίτερα επικερδής. Παρ'όλα αυτά οι δυνατότητες ανάπτυξης και αύξησης των κερδών είναι πολύ μεγαλύτερες καθώς η μονάδα αξιοποιεί την παραγωγική της ικανότητα μόνο κατά το ήμισυ ενώ το γεωθερμικό πεδίο της περιοχής μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες 5 μονάδων της ίδιας δυναμικότητας.

Για να φανεί όμως κατά πόσον μπορεί μία τέτοια εφαρμογή να ανταγωνιστεί μία συμβατική εφαρμογή υπολογίζεται και το κόστος ενέργειας για την περίπτωση ενός συμβατικού ξηραντηρίου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996) υπάρχουν δύο μέθοδοι θέρμανσης του αέρα. Η πρώτη είναι η άμεση και χρησιμοποιεί τα καυσαέρια ενός καυστήρα ορυκτών καυσίμων τα οποία αναμειγνύονται με το ρεύμα του εισερχόμενου φρέσκου αέρα με πολύ μικρή περιεκτικότητα στο τελικό μίγμα (>0,5%). Η μέθοδος αυτή δεν προτείνεται καθώς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η δεύτερη μέθοδος, που είναι και η πλέον διαδεδομένη, είναι η έμμεση μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί για τη θέρμανση του αέρα έναν εναλλάκτη θερμότητας.

Για τη θέρμανση του νερού στον εναλλάκτη απαιτείται η χρήση καυστήρα θέρμανσης. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ένα καυστήρα πετρελαίου (το φυσικό αέριο δεν είναι διαθέσιμο τη περιοχή) και ο οποίος θερμαίνει το νερό που εισέρχεται στον εναλλάκτη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C) στη θερμοκρασία

εισόδου του γεωθερμικού ρευστού (59,3°C). Επομένως το κόστος καυσίμων που θα προέκυπτε δίνεται στον Πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Στοιχεία και κόστος λειτουργίας καυστήρα ξηραντηρίου.

Παροχή νερού	m ³ /h	32
Παροχή μάζας νερού	kg/h	32000
Απαιτούμενη ενέργεια	kWh	1263
Βαθμός απόδοσης καυστήρα	n	0,82
Απαιτούμενη απόδοση Λέβητα	kW	1540
Θερμογόνος δύναμη καυσίμου	kJ/kg	43200
Απαιτούμενη παροχή καυσίμου	L/h	45
Συνολικός χρόνος λειτουργίας	h	1320
Κόστος καυσίμου	€/L	0,6
Συνολικό κόστος ενέργειας	€	35640

Το κόστος που προκύπτει είναι αρκετά μεγάλο και προσεγγίζει σχεδόν το 50% των καθαρών κερδών για το έτος 2006. Επομένως ακόμη και η διαφορά στο κόστος του εξοπλισμού μπορεί να υπερκεραστεί καθώς το κόστος της ενέργειας είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Επιπλέον το κόστος αυτό μακροπρόθεσμα θα αυξηθεί ιδιαίτερα καθώς οι τιμές των ορυκτών καυσίμων προβλέπεται τα επόμενα χρόνια να ακολουθήσουν μία ανησυχητική ανοδική τάση. Ίσως έτσι η μονάδα ακόμα και μετά από λίγα χρόνια να ήταν ζημιογόνος.

5.5 Συμπεράσματα και προοπτικές

Με τη λειτουργία 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 συμβατικές μεθόδους. 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. Επίσης από την ανάλυση των οικονομικών μεγεθών της όλης επένδυσης φαίνεται ότι η μονάδα είναι ιδιαίτερα επικερδής και με μεγάλες προοπτικές περαιτέρω ανάπτυξης.

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, κρεμμύδια), μανιταριών ή φρούτων (σύκα, βερίκοκα). 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.

6. Μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης ντομάτας

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια μοντελοποίησης της διεργασίας της ξήρανσης ντομάτας σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ξηραντηρίου. Στόχος είναι να υπολογίσουμε τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης και έπειτα γίνεται μία προσπάθεια βελτιστοποίησης της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης επιλέγοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας. Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ξήρανσης είναι:

- Η θερμοκρασία και η υγρασία του εισερχόμενου αέρα
- Η ταχύτητα του αέρα
- Η ποσότητα του νωπού προϊόντος
- Το σχήμα του νωπού προϊόντος
- Η ποικιλία της ντομάτας που επιλέγεται (κυρίως λόγω διαφορετικής υγρασίας ή αριθμό brix)
- Ο βαθμός απόδοσης της μεθόδου ξήρανσης που επιλέγεται

Λόγω της πολυπλοκότητας και του συνδυασμού των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις διεργασίες ξήρανσης δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή κάποιο μαθηματικό μοντέλο διαθέσιμο που να λαμβάνει υπ' όψιν όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διεργασία και να υπολογίζει με ακρίβεια το ρυθμό ξήρανσης καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης για κάθε προϊόν. Διάφοροι ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορα ημιεμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε πειραματικές τιμές σε ξηραντήρια εργαστηριακής κλίμακας. Σε κάθε περίπτωση ένα επιτυχημένο ημιεμπειρικό μοντέλο μπορεί να μας δώσει μία κατεύθυνση για ποια μπορεί να είναι τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μίας βιομηχανικής εφαρμογής, αλλά στη πραγματικότητα μόνο μέσω της διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος μπορούμε να υπολογίσουμε τα πραγματικά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

6.2 Μαθηματικό μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο κεφάλαιο η ξήρανση ενός τροφίμου χωρίζεται γενικά σε 2 περιόδους, τη περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης και τη περίοδο μειούμενου ρυθμού ξήρανσης. Βέβαια αυτό δεν είναι ισχύει πάντοτε καθώς υπάρχουν

τρόφιμα τα οποία εμφανίζουν πάνω από μία περίοδο μειούμενου ρυθμού ξήρανσης ενώ σε άλλα εμφανίζεται δεν έχουμε καθόλου περίοδο σταθερού ρυθμού ξήρανσης.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει για τη ξήρανση ντομάτας υποστηρίζεται ότι δεν εμφανίζεται καθόλου το διάστημα σταθερού ρυθμού ξήρανσης (Doymaz, 2004), ή είναι πάρα πολύ μικρό (μικρότερο των 10 λεπτών) και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο (Giovanelli et al., 2001), ενώ σύμφωνα με άλλες έρευνες η διεργασία ξήρανσης της τομάτας εμφανίζει πλέον της μίας περιόδους μειούμενου ρυθμού ξήρανσης (Hawlder et al., 1991, Akanbi et al., 2004). Επομένως εύκολα μπορεί να συμπεράνει ότι κατά τις διεργασίες ξήρανσης ντομάτας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εμφανίζεται μόνο η περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης.

Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο κεφάλαιο ο κύριος μηχανισμός που διέπει τη περίοδο μειούμενου ρυθμού ξήρανσης είναι η μοριακή διάχυση.

Ο νόμος του Fick για τη διάχυση γράφεται με τη σχέση:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (6.1)$$

όπου D_{eff} ο ενεργός συντελεστής μοριακής διάχυσης (effective diffusivity), ο οποίος υπολογίζεται μόνο πειραματικά μέσω του διαγράμματος ρυθμού ξήρανσης-χρόνου (MR-t).

Ο ρυθμός μεταβολής υγρασίας MR (moisture ratio) ισούται με:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (6.2)$$

όπου X η υγρασία τη χρονική στιγμή t , X_e η υγρασία ισορροπίας και X_0 η υγρασία στη αρχή της περιόδου μειούμενου ρυθμού ξήρανσης.

Η εξίσωση (6.1) έχει λυθεί για συγκεκριμένες γεωμετρίες. Έτσι έχουμε:

- Για κύλινδρο άπειρου μήκους ακτίνας r

$$MR = \frac{4}{r^2} e^{-D_{eff}t} \quad (6.3)$$

- Για πλάκα άπειρου μήκους πάχους L

$$MR = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}} \quad (6.4)$$

- Για σφαίρα ακτίνας r

$$MR = \frac{6}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D_{eff}t}{r^2}} \quad (6.5)$$

Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης υπολογίζεται μόνο πειραματικά μέσω του διαγράμματος ρυθμού ξήρανσης-χρόνου (MR-t). Το διάγραμμα δημιουργείται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 6.2 και μία εκ των 6.3-6.5.

Βέβαια διάφοροι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να συνδέσουν το συντελεστή της μοριακής διάχυσης με κάποιες από τις παραμέτρους που επηρεάζουν το ρυθμό ξήρανσης. Έχουν δημιουργηθεί κάποιες εξισώσεις που συνδέουν αυτές τις μεταβλητές, αλλά στις περισσότερες των περιπτώσεων τα αποτελέσματα των ερευνών δίνουν καλά αποτελέσματα μόνο για τις συνθήκες των πειραμάτων ενώ πολλά από αυτά δεν λαμβάνουν υπ' όψιν όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν το ρυθμό ξήρανσης.

Μετά από έλεγχο όλων των διαθέσιμων μοντέλων που υπάρχουν για την ξήρανση ντομάτας αυτό το οποίο είναι το πιο ακριβές είναι αυτό που πρότεινε ο Hawlader (1991). Κοινός παρανομαστής όλων των μοντέλων είναι ότι θεωρούμε τη ντομάτα κομμένη είτε στη μέση (halve) είτε ως λεπτή φέτα (slice), ως πλάκα άπειρου μήκους πάχους L (m).

Σύμφωνα με τον Hawlader ο συντελεστής μοριακής διάχυσης ισούται με:

$$D_{eff} = 1.67 \times 10^{-8} D_0 \exp\left(-\frac{3024}{T}\right) \quad (6.6)$$

Στην προσπάθεια μας για τον σωστό υπολογισμό του χρόνου ξήρανσης βρέθηκε ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:

$$D_{eff} = 1.67 \times 10^{-7} D_0 \exp\left(-\frac{3024}{T}\right) \quad (6.7)$$

όπου T η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του αέρα (K) και D_0 ημιεμπειρική σταθερά του συντελεστή διάχυσης.

Η ημιεμπειρική σταθερά D_0 ισούται με:

$$D_0 = \exp(1.022 \times v^{0.5} + 4.477) \quad (6.8)$$

όπου v η ταχύτητα του αέρα (m/s).

Επίσης ενώ σε άλλα μοντέλα θεωρείται ότι δεν έχουμε μείωση της μάζας του ναπού προϊόντος εδώ υπολογίζεται ο ρόλος που παίζει η μείωση της μάζας στο ρυθμό μεταφοράς υγρασίας χρησιμοποιώντας στη σχέση (6.3) αντί το αρχικό πάχος L το τροποποιημένο πάχος L' το οποίο ισούται με:

$$\frac{L'}{L} = \frac{m_1}{m_0} \quad (6.9)$$

όπου m_t η μάζα του προϊόντος τη χρονική στιγμή t και m_0 η μάζα του νεπού προϊόντος την χρονική στιγμή 0.

Επιλύοντας την (6.3) για το χρόνο έχουμε:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{\pi^2 MR}{8}\right)}{\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)} \quad (6.10)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς υγρασίας υπολογίζεται από τη σχέση (6.5) αφού υπολογίσουμε αρχικά τις παραμέτρους της εξίσωσης. Η αρχική και η τελική υγρασία του προϊόντος σε ξηρή βάση υπολογίζονται γνωρίζοντας την υγρασία σε υγρή βάση από τη σχέση:

$$X_{db} = \frac{X_{wb}}{1 - X_{wb}} \quad (6.11)$$

όπου X_{db} η υγρασία σε ξηρή βάση (kg νερού/kg ξηρών στερεών) και X_{wb} η υγρασία σε υγρή βάση (kg νερού/kg συνολικά).

Η υγρασία ισορροπίας X_e υπολογίζεται από την εξίσωση GAB (Kiranoudis et al., 1992) η οποία είναι η πλέον διαδεδομένη και η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση:

$$X_e = X_m C k a_w [(1 - k a_w)(1 - (1 - C)k a_w)] \quad (6.12)$$

όπου X_m είναι η μονομοριακή υγρασία του τροφίμου (monolayer moisture content) (kg νερού/kg ξηρών στερεών), a_w η ενεργότητα του νερού και C, k σταθερές που σχετίζονται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$C = C_0 \exp(DH_c / RT) \quad (6.13)$$

$$k = k_0 \exp(DH_k / RT) \quad (6.14)$$

όπου T η θερμοκρασία του αέρα (K), R η σταθερά των αερίων (J/mol K), και DH_c και DH_k είναι συναρτήσεις της θερμότητας απορρόφησης του νερού (J/kg).

Οι τιμές των $X_m, DH_c, DH_k, C_0, k_0$ έχουν υπολογιστεί πειραματικά για ορισμένα λαχανικά και βρίσκονται πινακοποιημένες στη βιβλιογραφία.

Τέλος η ενεργότητα του νερού του τελικού προϊόντος εκτιμάται από τη σχέση (Krokida et al., 2002):

$$a_w = \frac{RH}{100} \quad (6.15)$$

Όπου RH η σχετική υγρασία του αέρα (%).

6.3 Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου

Αρχικά χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω γίνεται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τα πειραματικά δεδομένα από διάφορες έρευνες για τη ξήρανση ντομάτας για να δείξουμε την αξιοπιστία του μοντέλου.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση των προβλέψεων του προτεινόμενου μοντέλου με τα δεδομένα του Doymaz., 2004

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΕΥΝΑΣ					
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ	T (°C)	55	60	65	79
ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	aw	0,2	0,2	0,2	0,2
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	v (m/s)	1,5	1,5	1,5	1,5
ΠΑΧΟΣ ΝΩΠΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	L (m)	0,025	0,025	0,025	0,025
ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X ₀ (%)	94,5	94,5	94,5	94,5
ΤΕΛΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X _f (%)	11	11	11	11
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	D _{eff} (m ² /s)	3,91 × 10 ⁻¹⁰	4,91 × 10 ⁻¹⁰	5,78 × 10 ⁻¹⁰	6,65 × 10 ⁻¹⁰
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	35,5	28	26,5	24
ΜΟΝΤΕΛΟ					
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	D _{eff} (m ² /s)	5,77 × 10 ⁻⁹	6,63 × 10 ⁻⁹	6,71 × 10 ⁻⁹	7,64 × 10 ⁻⁹
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	36,5	29,5	27,2	24,7

Πίνακας 6.2: Σύγκριση των προβλέψεων του προτεινόμενου μοντέλου με τα δεδομένα του Giovanelli et al., 2001

ΕΡΕΥΝΑ	Giovanelli, 2001		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΕΥΝΑΣ			
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ	T (°C)	80	110
ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	aw	0,028	0,009
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	v (m/s)	1,5	1,5
ΠΑΧΟΣ ΝΩΠΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	L (m)	0,016	0,016
ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X ₀ (%)	94	94,5
ΤΕΛΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X _f (%)	10	10
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	Deff (m ² /s)	2,26 × 10 ⁻⁹	4,01 × 10 ⁻⁹
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	7	4
ΜΟΝΤΕΛΟ			
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	Deff (m ² /s)	9,81 × 10 ⁻⁹	1,91 × 10 ⁻⁸
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	6,6	3,3

Πίνακας 6.3: Σύγκριση των προβλέψεων του προτεινόμενου μοντέλου με τα δεδομένα του Akanbi et al., 2005

ΕΡΕΥΝΑ	Akanbi,2005	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΕΥΝΑΣ		
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ	T (°C)	45
ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	aw	0,15
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	v (m/s)	0,13
ΠΑΧΟΣ ΝΩΠΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	L (m)	0,016
ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X0 (%)	94
ΤΕΛΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	Xf (%)	15
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	Deff (m ² /s)	3,72 × 10 ⁻⁹
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	48
ΜΟΝΤΕΛΟ		
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	Deff (m ² /s)	1,58 × 10 ⁻⁹
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	53

Η διαφορά που προκύπτει με την έρευνα του Akanbi είναι απολύτως φυσιολογική καθώς στη συγκεκριμένη έρευνα οι ντομάτες πριν εισαχθούν στο θάλαμο ξήρανσης περνούν από ένα στάδιο προεπεξεργασίας για τη διατήρηση του χρώματος γεγονός που επηρεάζει το συνολικό χρόνο ξήρανσης.

6.4 Εφαρμογή του μοντέλου στη μονάδα ξήρανσης

Στην περίπτωση μας έχουμε τα εξής δεδομένα. Θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου αέρα $T_a = 58^\circ \text{C}$ (χαρακτηριστικό λειτουργίας του ξηραντηρίου) και θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου αέρα $T_w = 34^\circ \text{C}$. Η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου υπολογίστηκε θεωρώντας ως μέση θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα για την περιοχή της Ξάνθης ίση με $T = 28^\circ \text{C}$. Εφόσον ο αέρας αυτός θερμαίνεται μέσα στον εναλλάκτη σε θερμοκρασία 58°C ενώ η υγρασία που περιέχει είναι σταθερή, με τη χρήση ψυχομετρικού διαγράμματος προκύπτει $T_w = 34^\circ \text{C}$ και $RH = 20\%$.

Επομένως η ενεργότητα νερού ισούται με:

$$a_w = \frac{20}{100} = 0.2$$

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές οι ντομάτες ποικιλίας Roma έχουν αρχικό ποσοστό υγρασίας $X_{wb} = 93\%$, ενώ το επιθυμητό τελικό ποσοστό υγρασίας είναι γύρω στο 15%. Για ντομάτες μέσου βάρους 100 g η μέση διάμετρος ισούται με 5 cm. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι το πάχος της κομμένης ντομάτας ισούται με $L = 2,5 \text{ cm}$. Τέλος για τον υπολογισμό της ταχύτητας θα χρειαστεί να κάνουμε κάποιες συγκεκριμένες παραδοχές. Η ταχύτητα v δίνεται από τη σχέση:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (6.16)$$

Όπου Q η ογκομετρική παροχή του αέρα (m³/s) και A η κάθετη επιφάνεια στη ροή (m²).

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ξηραντηρίου η παροχή για κάθε πλευρά του ξηραντηρίου και άρα για κάθε στήλη νωπού προϊόντος ισούται με:

$$Q=14.000 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Η κάθετη επιφάνεια στη ροή A θα υπολογιστεί έπειτα από κάποιες παραδοχές. Η σήραγγα ξήρανσης έχει ύψος 2,2 m και κάθε στήλη έχει 32 ταψιά. Άρα ανάμεσα στα ταψιά υπάρχει ένα κενό 6,875 cm. Ο όγκος ανάμεσα σε κάθε ταψί στη στήλη ισούται με:

$$V_{\text{ταψιού}}=1,24*0,5*0,06875=0,042625 \text{ m}^3$$

Ο όγκος που καταλαμβάνει το νωπό προϊόν στο ταψί θα υπολογιστεί από τη βασική σχέση:

$$V_{\text{πρ}}=m*\rho$$

όπου m η μάζα του νωπού προϊόντος και ρ η πυκνότητα του. Η μάζα είναι γνωστή (9 kg) και τη πυκνότητα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ισούται με τη πυκνότητα του νερού καθώς η ντομάτα περιέχει κατά 93% νερό. Άρα:

$$V_{\text{πρ}} = m * \rho = 0.009 \text{ m}^3.$$

Επομένως ο όγκος για τη ροή του αέρα θα ισούται με

$$V=V_{\text{ταψιού}} - V_{\text{πρ}}=0,033625 \text{ m}^3$$

και έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε τη μέση κάθετη επιφάνεια στη ροή \bar{A} :

$$\bar{A}=(0,033625/0,5)*32=2,152 \text{ m}^2$$

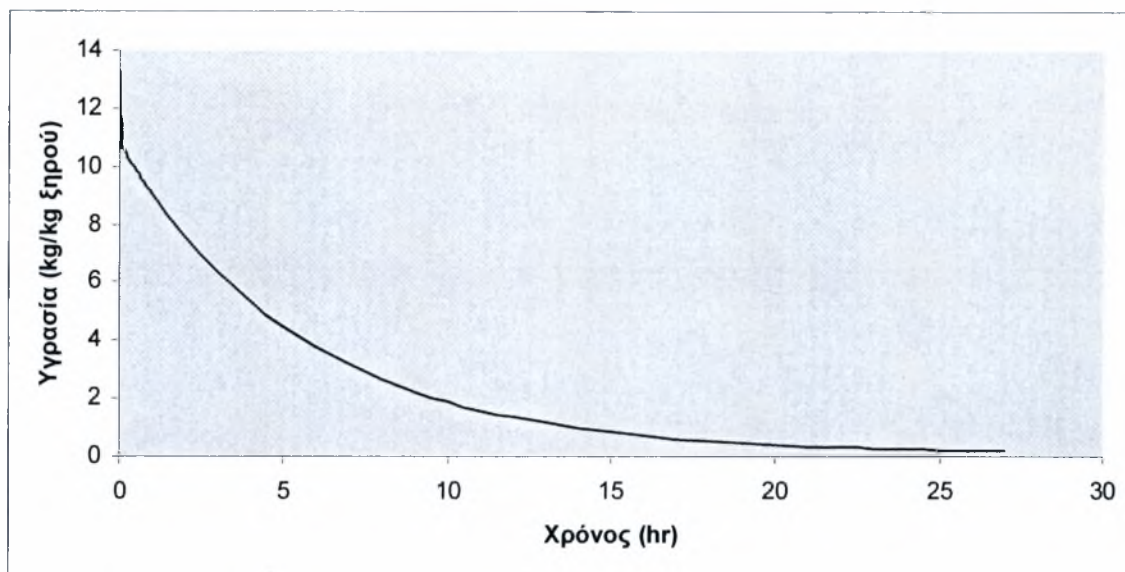
Επομένως:

$$v=(14000/3600)/2,152=1,8 \text{ m/s}$$

Τα αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας συνοψίζονται στον Πίνακα 6.4:

Πίνακας 6.4: Στοιχεία λειτουργίας και υπολογιζόμενος χρόνος ξήρανσης γεωθερμικού ξηραντηρίου.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ	T (°C)	58
ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	aw	0,2
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	v (m/s)	1,8
ΠΑΧΟΣ ΝΩΠΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	L (m)	0,025
ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X0 (%)	93
ΤΕΛΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	Xf (%)	15
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	27



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα υγρασίας-χρόνου ξήρανσης.

Στην πραγματικότητα ο χρόνος ξήρανσης είναι 32 ώρες. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του αέρα καθώς και το ποσοστό υγρασίας δεν είναι σταθερό κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η ταχύτητα κατά μήκος του ξηραντηρίου μειώνεται καθώς υπάρχει πτώση πίεσης στη ροή του αέρα λόγω της αντίστασης στη ροή από το ίδιο το προϊόν στα ταψιά, η οποία είναι ιδιαίτερα μεγάλη όταν το προϊόν εισάγεται μέσα στη σήραγγα ξήρανσης. Η απόλυτη υγρασία του αέρα μεταβάλλεται σημαντικά καθώς κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία του αέρα μεταβάλλονται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Επομένως υπάρχουν περίοδοι της ημέρας (κυρίως τις μεσημεριανές ώρες) που ο αέρας είναι κορεσμένος σε μεγάλο ποσοστό επιβραδύνοντας τον ρυθμό ξήρανσης.

6.5 Βελτιστοποίηση της διεργασίας

Εάν θέλουμε να μειώσουμε το χρόνο ξήρανσης χωρίς να μεταβάλλουμε κάποιο στοιχείο από τον ήδη υπάρχοντα μηχανολογικό εξοπλισμό μόνο μία παράμετρο μπορούμε να θεωρήσουμε ως μεταβλητή χειρισμού και αυτή είναι η ταχύτητα της ροής του αέρα. Η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα στη σήραγγα ξήρανσης είναι πάντα σταθερή και παρουσιάζει ελάχιστες διαφοροποιήσεις ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), ενώ η υγρασία του μεταβάλλεται σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες. Μεταβολή στο πάχος δεν μπορεί να υπάρξει καθώς πρέπει να προστεθεί νέο κοπτικό μηχάνημα στη

διάταξη της προεπεξεργασίας ενώ πιθανή μείωση του πάχους του νωπού προϊόντος μπορεί μεν να μειώσει το χρόνο ξήρανσης, αλλά πιθανώς να επηρεάσει τη ποιότητα του τελικού προϊόντος (σκλήρυνση εξωτερικού περιβλήματος αποξηραμένης ντομάτας).

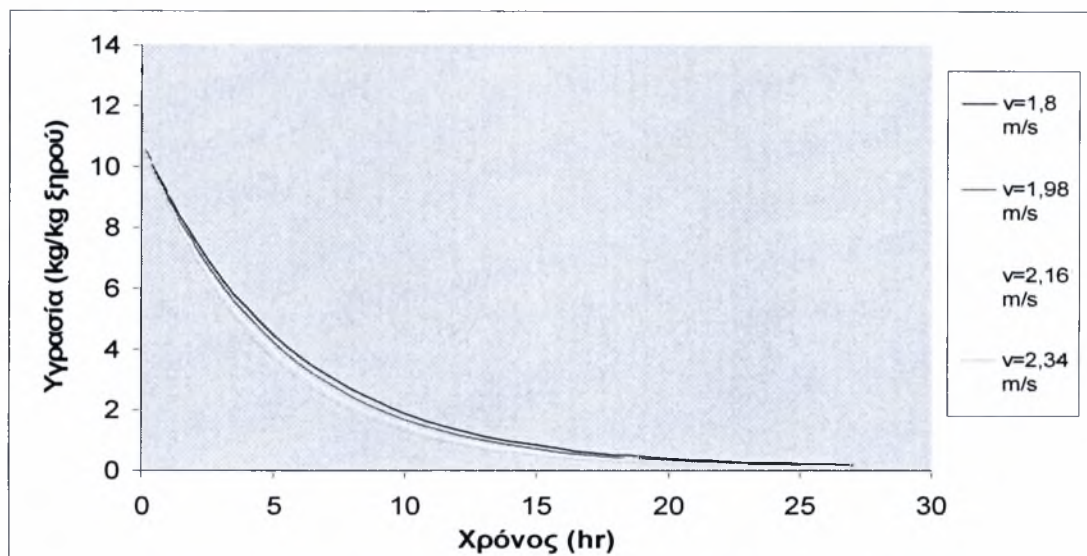
Η ταχύτητα του αέρα μπορεί να αυξηθεί με δύο μεθόδους. Πρώτον, με μείωση των ταμιών σε κάθε στήλη επιτρέποντας τη ροή να κινηθεί πιο ελεύθερα και δεύτερον με μείωση του νωπού προϊόντος σε κάθε ταμί, μειώνοντας πάλι την αντίσταση στη ροή του αέρα. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μέθοδοι ταυτόχρονα. Βέβαια, μπορεί να επιτύχουμε μικρότερους χρόνους ξήρανσης αλλά μικρότερο ρυθμό παραγωγής τελικού προϊόντος. Επομένως πρέπει να γίνει πολύ προσεκτική επιλογή των 2 αυτών παραμέτρων με στόχο το πραγματικό όφελος που είναι η αύξηση του ρυθμού παραγωγής και όχι μονόπλευρα τη μείωση του χρόνου ξήρανσης.

Θεωρητικά αυξάνοντας το κενό μεταξύ των δίσκων η μειώνοντας το νωπό προϊόν πάνω σε αυτόν η επιφάνεια κάθετα στη ροή θα μεγάλωνε και σύμφωνα με την σχέση (6.15) η ταχύτητα θα μειώνονταν. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν συμβαίνει. Σύμφωνα με τα στοιχεία που είχαμε για τη λειτουργία της μονάδας αρχικά επιχειρήθηκε να τοποθετηθούν 40 δίσκοι σε κάθε στήλη, αλλά σε αυτή τη περίπτωση και εν αντιθέσει με τη θεωρία η ταχύτητα ήταν πολύ μικρή και επηρεαζόταν η ομοιομορφία της ξήρανσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη πτώση πίεσης της ροής λόγω της αντίστασης που προκαλείται από το προϊόν στα ταμιά. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη χρήση φυσητήρων που λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση και δεν έχουν τη δυνατότητα αύξησης της πίεσης της ροής οδηγεί στη μείωση της ταχύτητας. Ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης αλλά και της πραγματικής ταχύτητας είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς οι ακριβείς εξισώσεις της ροής είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιλυθούν.

Έτσι θα επιχειρήσουμε να κάνουμε μία σύγκριση του χρόνου ξήρανσης που υπολογίστηκε προηγουμένως με το χρόνο που θα προέκυπτε αν η ταχύτητα της ροής είτε αυξηθεί είτε μειωθεί κατά 10, 20 και 30% αντίστοιχα. Στόχος είναι να δούμε πόσο σημαντική είναι η επίδραση της ταχύτητας στον υπολογιζόμενο χρόνο ξήρανσης. Επιλέον θα δούμε και το χρόνο ξήρανσης σε περίπτωση μείωσης της ταχύτητας της ροής για τα ίδια ποσοστά. Τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 6.5 και 6.6 και στα Σχήματα 6.2 και 6.3.

Πίνακας 6.5: Χρόνος ξήρανσης για αυξημένες ταχύτητες.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ	T (°C)	58	58	58	58
ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	aw	0,2	0,2	0,2	0,2
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	v (m/s)	1,8	1,98	2,16	2,34
ΠΑΧΟΣ ΝΩΠΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	L (m)	0,025	0,025	0,025	0,025
ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X0 (%)	93	93	93	93
ΤΕΛΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	Xf (%)	15	15	15	15
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	27	25	23	22

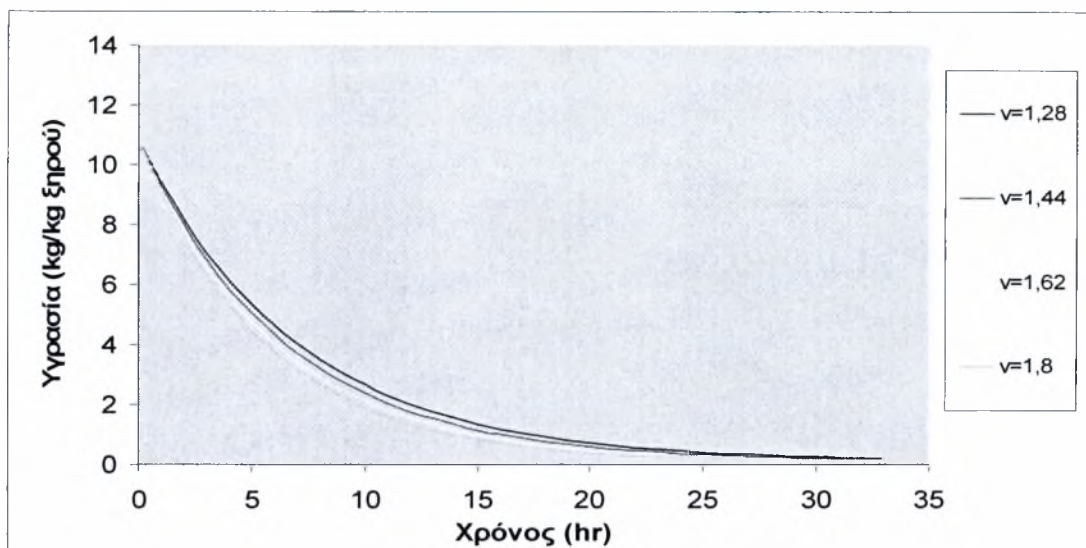


Σχήμα 6.2: Διάγραμμα υγρασίας-χρόνου ξήρανσης για αυξημένες ταχύτητες.

Στην περίπτωση της αύξησης οι ταχύτητες μεταβάλλονται με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσοστά όταν έχουμε μείωση της ταχύτητας ενώ μία προσεκτική παρατήρηση δείχνει ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές στην ταχύτητα οι μεταβολές του χρόνου γίνονται μικρότερες.

Πίνακας 6.6: Χρόνος ξήρανσης για μειωμένες ταχύτητες.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ	T (°C)	58	58	58	58
ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	aw	0,2	0,2	0,2	0,2
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ	v (m/s)	1,8	1,62	1,44	1,28
ΠΑΧΟΣ ΝΩΠΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	L (m)	0,025	0,025	0,025	0,025
ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	X0 (%)	93	93	93	93
ΤΕΛΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	Xf (%)	15	15	15	15
ΧΡΟΝΟΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	t (h)	27	29	31,2	34



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα υγρασίας-χρόνου ξήρανσης για μειωμένες ταχύτητες.

Ακριβώς η αντίθετη συμπεριφορά εμφανίζεται σε περίπτωση μείωσης της ταχύτητας της ροής. Οι μεταβολές στην ταχύτητα επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το χρόνο. Επομένως γίνεται εμφανές ότι ακόμη και σε περίπτωση που είχαμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε και άλλες μεταβλητές χειρισμού θα ήταν σημαντικό να μην μειώσουμε την ταχύτητα καθώς επηρεάζει σε αρκετά μεγάλο βαθμό το χρόνο ξήρανσης.

7. Σύνοψη διπλωματικής εργασίας

7.1 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ξήρανση των αγροτικών προϊόντων με χρήση γεωθερμικής ενέργειας. Αρχικά έγινε μία συνοπτική περιγραφή της γεωθερμικής ενέργειας καθώς και στις χρήσεις της. Αναφερθήκαμε στη ξήρανση αγροτικών προϊόντων καθώς δόθηκαν στοιχεία για εφαρμογές ξήρανσης με χρήση γεωθερμίας. Έγινε εκτενής περιγραφή μίας μονάδας ξήρανσης ντομάτας στο Ν. Εράσμιο Ξάνθης ενώ επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν συνοψίζονται ως εξής:

- Η γεωθερμία είναι μία πηγή ενέργειας με τεράστιες προοπτικές καθώς πλην του περιβαλλοντικού οφέλους μπορεί με τα σημερινά οικονομικά και τεχνολογικά δεδομένα να χρησιμοποιηθεί για πλήθος εφαρμογών με κόστος άμεσα συγκρίσιμο ή μικρότερο σε σχέση με εφαρμογές που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.
- Η ξήρανση αγροτικών προϊόντων είναι μία τεχνική διατήρησης αρκετά διαδεδομένη εδώ και αιώνες. Τα φυσικά φαινόμενα τα οποία διέπουν τη ξήρανση είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και δεν υπάρχουν οι μαθηματικές εξισώσεις που να περιγράφουν πλήρως τη συμπεριφορά του τροφίμου σε όλα τα στάδια της ξήρανσης. Χρειάζεται λεπτομερής σχεδιασμός τέτοιων εγκαταστάσεων για την παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας. Η μέθοδος ξήρανσης αλλά και το προϊόν που θα επιλεγεί παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στη λειτουργία όσο και στο οικονομικό όφελος που θα προκύψει από τέτοιες εφαρμογές.
- Η γεωθερμική ξήρανση είναι μία τεχνική ιδιαίτερα ελπιδοφόρα που όπου είναι διαθέσιμη μπορεί να αξιοποιηθεί σχετικά εύκολα με ιδιαίτερα σημαντικά οφέλη. Το πιο σημαντικό ίσως όφελος που προκύπτει είναι η ενδυνάμωση της οικονομίας των αγροτικών περιοχών. Επειδή είναι μία διεργασία με εποχικό χαρακτήρα μπορεί κάλλιστα να συνδυαστεί με εφαρμογές θέρμανσης θερμοκηπίων. Λόγω του σχετικού υψηλού αρχικού κόστους πρέπει να επιλέγονται προϊόντα με αυξημένη προστιθέμενη αξία που μπορούν εύκολα να ανταγωνιστούν προϊόντα που προέρχονται από συμβατικές μονάδες ξήρανσης. Επιπλέον, η συντήρηση και η λειτουργία τέτοιων μονάδων δεν

απαιτεί ιδιαίτερη εξειδίκευση γεγονός που θα βοηθήσει στην εξάπλωση αυτής της τεχνικής.

- Από τη μελέτη και περιγραφή του γεωθερμικού ξηραντηρίου ντομάτας προέκυψε ένα προϊόν υψηλής ποιότητας λόγω των ήπιων θερμοκρασιών ξήρανσης που είναι δυνατές με τη χρήση γεωθερμίας. Όπως υπολογίστηκε το κέρδος που προκύπτει είναι ιδιαίτερα σημαντικό οδηγώντας σε απόσβεση της επένδυσης σε μικρό χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό ίσως ήταν και μικρότερο αν αναλογιστεί κανείς ότι η δυναμικότητα της μονάδας δεν αξιοποιείται πλήρως. Επιπλέον, υπολογίστηκε ότι σε περίπτωση που είχαμε μία συμβατική μονάδα ξήρανσης το ενεργειακό κόστος που θα προέκυπτε θα ήταν ιδιαίτερα μεγάλο. Επιπρόσθετα μία πιθανή αύξηση στις τιμές των καυσίμων θα καθιστούσε την επένδυση ζημιογόνο και μη συμφέρουσα.
- Η μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης βασίζεται σε ημιεμπειρικά μαθηματικά μοντέλα τα οποία δεν είναι καθολικά αποδεκτά και φαίνεται να υπολογίζουν σωστά το χρόνο ξήρανσης μόνο για συγκεκριμένες εργαστηριακές συνθήκες. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο το οποίο υπολογίζει ικανοποιητικά το χρόνο ξήρανσης και έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών. Για τον υπολογισμό του ακριβή χρόνου ξήρανσης καθώς και τη βελτιστοποίηση απαιτούνται περισσότερα στοιχεία κυρίως για το σωστό υπολογισμό της ταχύτητας της ροής του αέρα. Για την πλήρη παραμετροποίηση της διεργασίας χρειάζεται να γνωρίζουμε κάθε χρονική στιγμή τις φυσικές ιδιότητες του αέρα και του προϊόντος (θερμοκρασία, υγρασία).

7.2 Προτάσεις

Η συλλογή περισσότερων στοιχείων από τη μονάδα ξήρανσης ντομάτας είναι το πρώτο βήμα για την επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τοποθέτηση μετρητικών οργάνων στη διάταξη του ξηραντηρίου.

Τα στοιχεία που απαιτούνται είναι η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, η υγρασία του προϊόντος κατά τη διεργασία ξήρανσης καθώς και η ταχύτητα της ροής του αέρα στη είσοδο και την έξοδο της σήραγγας.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα μπορεί να επιτευχθεί με τοποθέτηση θερμοστοιχείων και μετρητών υγρασίας κατά μήκος της

σήραγγας ξήρανσης (κάθε 2 μέτρα). Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται αρκετές φορές στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου για να μπορέσει να υπολογιστεί η επίδραση των ιδιοτήτων του εισερχόμενου αέρα.

Η υγρασία του προϊόντος να μετρηθεί σχετικά εύκολα απλά χρησιμοποιώντας μία ζυγαριά ακριβείας μετρώντας το βάρος συγκεκριμένων κομματιών ντομάτας από την εισαγωγή τους στην σήραγγα μέχρι την έξοδο. Η μεταβολή στο βάρος ανάγεται εύκολα στη μεταβολή του ποσοστού υγρασίας. Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται τις ίδιες χρονικές στιγμές και στα ίδια σημεία με τις μετρήσεις των ιδιοτήτων του αέρα για να μπορέσουν να καταστρωθούν ισοζύγια μάζας νερού τα οποία θα μπορούσαν να μας δώσουν περαιτέρω στοιχεία για τη διεργασία. Επιπλέον στη αρχή της εισόδου του προϊόντος στη σήραγγα η συχνότητα των μετρήσεων πρέπει να είναι μεγαλύτερη καθώς κατά τις πρώτες ώρες μεταφέρεται το μεγαλύτερο ποσοστό της υγρασίας.

Η ταχύτητα της ροής αρχικά πρέπει να μετρηθεί στην είσοδο και στην έξοδο για να εξεταστεί αν υπάρχει μείωση στην ταχύτητα και πόσο σημαντική είναι. Επίσης θα μπορούσε να επιχειρηθεί πριν τεθεί η μονάδα σε κανονική λειτουργία να γίνουν μέτρησεις της ταχύτητας τοποθετώντας μόνο μία στήλη προϊόντος στη σήραγγα και δοκιμάζοντας τοποθέτηση διαφορετικού αριθμού ταψιών ανά στήλη καθώς και ψόφηση προϊόντος ανά ταψί. Έτσι είναι δυνατός ο υπολογισμός της επίδρασης αυτών των δύο χαρακτηριστικών στην ταχύτητα.

Μέσω αυτής της συλλογής στοιχείων μπορεί να κατασκευαστεί το πραγματικό διάγραμμα υγρασίας και να συγκριθεί με αυτό που κατασκευάστηκε με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου. Εν συνέχεια, τα στοιχεία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του μαθηματικού μοντέλου.

Περεταίρω μπορεί να επιχειρηθεί η μελέτη τοποθέτησης αφυγραντήρα του αέρα πριν από την είσοδο στο θάλαμο ξήρανσης καθώς και οι τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί μίας τέτοιας εφαρμογής. Η επιλογή αυτή θα αύξανε με βεβαιότητα την αποδοτικότητα της μονάδας.

Τέλος, μία άλλη ενδιαφέρουσα περιοχή για έρευνα θα ήταν η μελέτη επαναχρησιμοποίησης των γεωθερμικών ρευστών μετά την έξοδο τους από τον εναλλάκτη για κάποια άλλη εφαρμογή όπως η θέρμανση κατοικιών ή πισινών.

Βιβλιογραφία

- [1] Lund, J.W., and Freeston, D.H., 'World Wide Direct Uses of Geothermal Energy', Elsevier Ltd, 2001
- [2] Ανδρίτσος, Ν., 'Ενεργειακή Οικονομία, Διδακτικές Σημειώσεις', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος, pp. 65-76, 157-176, 2004
- [3] Dickson, M.H., Fanelli, M., 'What is geothermal Energy?', Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy, pp. 30-56, 2004
- [4] Lund, J.W., Freeston, D. H., Boyd, T. L., 'Direct Application of Geothermal Energy: 2005 Worldwide Review', Elsevier Ltd, 2005
- [5] Andritsos, N., Dalampakis, P., Karydakis, G., Kolios, N. and Fytikas, M., "Update and Characteristics of Low-enthalpy Geothermal Applications in Greece", Proceedings, European Geothermal Congress EGC 2007, May 30-June 1, 2007, Unterhaching, Germany
- [6] Brown, K., L., 'Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development', WGC 2000 Short Courses, Japan, 2000
- [7] Fellows, P.J., 'Food Processing Technology: Principles and Practice', CRC Press, New York, pp. 311-339, 2000
- [8] Ταούκη, Π., Ωραιοπούλου, Β., 'Τεχνολογία Τροφίμων, Σημειώσεις', ΕΜΠ, Αθήνα, pp. 255-292, 2004
- [9] Mujumdar, A.S., 'Handbook of Industrial Drying', Marcel Dekker Inc., New York, pp. 137-145, 1987
- [10] Barbosa-Canovas, G.V., Vega-Mercado, G., 'Dehydration of Foods', Chapman & Hall, pp. 24-25, 111-118, 1996
- [11] Rafson, H.J., 'Odor Emission Control for the Food Industry', Food Industry, 1977
- [12] Lienau, P.J., 'Chapter 16-Industrial Applications', in 'Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook', 3rd Edition, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, Oregon, 1998
- [13] Lund, J.W., 'Direct Heat Utilization of Geothermal Resources', Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, Oregon, 2000.
- [14] Andritsos, N., Dalampakis, P., Kolios, N., 'Use of Geothermal Energy for Tomato Drying', GHC bulletin, 2003

- [15] Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., 'Drying Kinetics of Some Vegetables', *Journal of Food Engineering*, 59, pp. 391-403, 2003
- [16] Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S., Ho, J.S., Teng, A.B.W., 'Drying Characteristics of Tomatoes', *Journal of Food Engineering*, 14, pp. 259-268, 1991
- [17] Akanbi, C.T., Adeyemi, R.S., Ojo, A., 'Drying Characteristics and Sorption Isotherms of Tomato Slices', *Journal of Food Engineering*, 73, pp. 157-163, 2006
- [18] Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D., 'Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables', *Journal of Food Engineering*, 20, pp. 55-74, 1993
- [19] Zanoni, 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
- [20] Giovanelli, G., Zanoni, B., Lavelli, V., Nani, R., 'Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products', *Journal of Food Engineering*, 52, pp. 135-141, 2002.
- [21] Doymaz, I., 'Air-drying Characteristics of Tomatoes', *Journal of Food Engineering*, 73, pp. 172-179, 2006



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085875