



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Μεταφορά θερμότητας κατά την ξήρανση σταφυλιών σε ρεύμα θερμού
αέρα: Προσομοίωση με CFD

Σοφία Γ. Λαζαρίδου

Επιβλέπων Καθηγητής:
Νικόλαος Γ. Στοφόρος, Καθηγητής ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2021**

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Μεταφορά θερμότητας κατά την ξήρανση σταφυλιών σε ρεύμα θερμού
αέρα: Προσομοίωση με CFD

“Heat transfer during hot air drying of grapes: CFD Simulation”

Σοφία Γ. Λαζαρίδου

Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Γ. Στοφόρος, Καθηγητής ΓΠΑ

Γεώργιος Σκεύης, Κύριος Ερευνητής ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ

Θωμάς Μπαρτζάνας, Αναπληρωτής Καθηγητής Γ.Π.Α

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Επιστήμη και Τεχνολογία Τροφίμων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στο Εργαστήριο Μηχανικής και Επεξεργασίας Τροφίμων. Μέσα από αυτή την παράγραφο οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με τον δικό τους τρόπο στην ολοκλήρωση του έργου μου. Πιο συγκεκριμένα, ευχαριστώ τους καθηγητές μου για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν αλλά και για τις προκλήσεις που μου έθεσαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη, υπομονή και συμπαράσταση που μου έδειξαν.

«Με την άδεια μου, η παρούσα μελέτη ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της»

Μεταφορά Θερμότητας κατά την ξήρανση σταφυλιών σε ρεύμα θερμού αέρα

*Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου
Εργαστήριο Μηχανικής και Επεξεργασίας Τροφίμων*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης ήταν η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας που πραγματοποιείται κατά την ξήρανση των τροφίμων σε ένα ξηραντήριο σταθερής κλίνης. Μέσω αυτής της ανάλυσης σκοπός ήταν η κατανόηση του φαινομένου της ξήρανσης ως συνδυασμός της μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Τα αποτελέσματα για την θερμοκρασία στο κέντρο του φρούτου συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές τιμές, όπως βρίσκονται από τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας.

Το προϊόν που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν το σταφύλι. Το εν λόγω τρόφιμο είναι ένα μίγμα που απαρτίζεται κατά κύριο λόγο από νερό, πρωτεΐνες, σάκχαρα, λίπος και τέφρα. Αέρας θερμοκρασίας $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ταχύτητας $u=0,5\text{ m/s}$, χρησιμοποιείται για την ξήρανση των σταφυλιών, η οποία διαρκεί περίπου 46 h. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω συναγωγής από το ρεύμα του αέρα στο φρούτο και μέσω αγωγής από την επιφάνεια στο εσωτερικό αυτού.

Για την εργασία αυτή δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες:

1. Όπου σχεδιάστηκαν 25 ρώγες σταφυλιού μέσα στην κλίνη.
2. Όπου σχεδιάστηκε μία ρώγα σταφυλιού στο κέντρο της κλίνης, για τη σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα και
3. Όπου όλη επιφάνεια των σταφυλιών θεωρήθηκε ως ένα ενιαίο πορώδες υλικό για την μελέτη της πτώσης πίεσης.

Αρχικά προσδιορίστηκαν με την χρήση εξισώσεων και βιβλιογραφικά οι ιδιότητες του σταφυλιού και των υπόλοιπων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν οι γεωμετρίες, για τις οποίες οι διαστάσεις της κλίνης παρέμειναν σταθερές, δηλαδή $L=170\text{ mm}$, $D=113\text{ mm}$. Κατόπιν, ακολούθησε η επίλυση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας και λήφθηκαν τα αποτελέσματα για το θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του φρούτου. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι η άνοδος της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φρούτου πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό στην αρχή, ο οποίος μειώνεται στην πορεία όσο πλησιάζουμε στη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης. Στη γενική του μορφή το μοτίβο αυτό επιβεβαιώνεται και από τα θεωρητικά αποτελέσματα με τη χρήση εξισώσεων αν και παρατηρούνται μικρές διαφορές. Τέλος, η πτώση πίεσης που παρατηρείται εντός της κλίνης είναι αρκετά μικρή.

Επιστημονική Περιοχή: Θέρμανση σταφυλιών

Λέξεις-Κλειδιά: σταφύλια, ξήρανση, μεταφορά θερμότητας, υπολογιστική ρευστοδυναμική

Heat transfer during hot air drying of grapes: CFD Simulation

*Department of Food Science & Human Nutrition
Laboratory of Food Process Engineering*

ABSTRACT

The purpose of this study was to simulate the heat transfer that takes place during food drying in a fixed bed dryer, using the Computational Fluid Dynamics. Through this analysis we tried to better understand the drying process, as a combination of heat and mass transfer phenomenon. The temperature results for the center of the fruit were compared with those found using the heat transfer equations in order to investigate whether Computational Fluid Dynamics can be used to estimate the heat transfer mechanism.

The product selected for the study was grape which is a mixture consisted mostly of water, proteins, sugars, fat and ash. The drying process of grapes uses hot air ($T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u=0,5$

m/s) and needs approximately 46 h to be completed. Heat transfer is a combination of convection from the air stream to the surface of fruit and conduction from the surface of grape to the center of it.

For this simulation three different geometries were designed:

- Firstly 25 grapes were designed in a fixed bed.
- In the second geometry, only one grape was designed in the middle of the bed.
- In the third geometry, the entire surface covered by grapes was considered as a porous zone, in order to simulate the pressure drop.

Firstly, the properties of grapes and other materials used in the simulation were found using equations and literature. Next, the three geometries were designed, for which the dimensions of the bed remained constant, $L = 170\text{ mm}$, $D = 113\text{ mm}$. Then, heat transfer problem was computed and the results for the temperature profile in the fruit were obtained. The simulation results showed, a high increasing rate of temperature at the beginning which is gradually decreasing as far as the center temperature approaches the heating medium temperature. These results were compared with those occurred by heat transfer equations and little differences were observed. Finally, the pressure drop across the fixed bed is quite small.

Scientific area: Grapes heating

Key Words: grapes, drying, heat transfer, CFD

Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT.....	iii
Κατάλογος Εικόνων.....	vii
Κατάλογος Πινάκων	viii
Κατάλογος Σχημάτων	viii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Η διεργασία της ξήρανσης	4
1.3 Φαινόμενα μεταφοράς	5
1.3.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας	5
1.3.2 Μηχανισμός Μεταφοράς Μάζας.....	6
1.4 Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα	7
1.5 Φάσεις ξήρανσης	8
1.5.1 Φάση θέρμανσης	9
1.5.2 Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης.....	9
1.5.3 Μαθηματική προσέγγιση του σταθερού ρυθμού ξήρανσης.....	10
1.5.4 Περίοδος ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης.....	13
1.6 Καμπύλες ξήρανσης-ρυθμός ξήρανσης	15
1.7 Ταξινόμηση ξηραντήρων	16
1.7.1 Ξηραντήρες για στερεά και πολτούς.....	16
1.7.2 Ξηραντήρες για διαλύματα και πολτούς	22
1.8 Ωσμωτική αφυδάτωση	25
1.9 Καινούργιες μέθοδοι ξήρανσης	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΤΑΦΥΛΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑΦΙΔΕΣ: ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΞΗΡΑΝΣΗ.....	27

2.1	Εισαγωγή.....	27
2.2	Σύσταση Σταφυλιών και Σταφίδων	28
2.3	Επιπτώσεις στην υγεία	31
2.4	Ξήρανση Σταφυλιών	33
2.4.1	Προκατεργασία των προς ξήρανση σταφυλιών	34
2.4.2	Διαφορετικές μέθοδοι ξήρανσης και οι επιπτώσεις τους στην ξήρανση σταφυλιών	35
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ	38
3.1	Γενικά Στοιχεία.....	38
3.2	Πλεονεκτήματα του CFD.....	39
3.3	Μειονεκτήματα του CFD.....	40
3.4	Εμπορικά Πακέτα CFD.....	41
3.5	Αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	42
3.6	Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων CFD	45
3.7	Εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη Βιομηχανία Τροφίμων	46
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΤΑΦΥΛΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	49
4.1	Εισαγωγή.....	49
4.2.1	Θερμοφυσικές ιδιότητες.....	49
4.2.2	Επίλυση του προβλήματος με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης	54
4.2.3	Μεθοδολογία CFD	54
4.2.4	Σχεδιασμός Γεωμετρίας	54
4.2.5	Δημιουργία Πλέγματος	57
4.2.6	Δημιουργία Ορίων Γεωμετρίας (Named Selections)	59
4.2.7	Ανεξαρτησία του πλέγματος	59
4.3	Μελέτη Μεταφοράς Θερμότητας	61
4.3.1	Ορισμός των υλικών.....	61
4.3.2	Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)	62

4.3.3 Μέθοδοι Επίλυσης	65
4.3.4 Αρχικοποίηση & Επιδιόρθωση των λύσεων	65
4.3.5 Επιλογή Χρονικού Βήματος.....	67
4.3.6 Υπολογισμός Λύσεων (Run Calculation)	69
4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη μεταφορά θερμότητας.....	71
4.4.1 Contours Πίεσης.....	71
4.4.2 Contours Ταχύτητας.....	72
4.4.3 Contours Θερμοκρασίας	73
4.4.4 Εξέλιξη θερμοκρασίας	74
4.4.5 Κατανομή θερμοκρασίας στο φρούτο.....	75
4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με θεωρητικές τιμές	78
4.6 Πτώση Πίεσης.....	84
4.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	94

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Θερμοφυσικές ιδιότητες αέρα	50
Εικόνα 2. Θερμοφυσικές ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα.....	53
Εικόνα 3. Γεωμετρία 2D της κλίνης με 25 σωματίδια.....	55
Εικόνα 4. Γεωμετρία 2D της κλίνης με 1 σωματίδιο.....	56
Εικόνα 5. Γεωμετρία 2D της κλίνης όπου τα σωματίδια θεωρούνται ως ένα ενιαίο υλικό	57
Εικόνα 6. Πλέγμα της κλίνης για τη γεωμετρία της κλίνης με τα 25 σωματίδια	58
Εικόνα 7. Πλέγμα της κλίνης για τη γεωμετρία με το 1 σωματίδιο	58
Εικόνα 8. Δημιουργία του στερεού υλικού grapes	62
Εικόνα 9. Οριακές συνθήκες στην είσοδο (Inlet)	63
Εικόνα 10. Οριακές συνθήκες στην έξοδο (Outlet).....	63
Εικόνα 11. Οριακές συνθήκες για τα τοιχώματα της κλίνης (Wall_bed).....	64
Εικόνα 12. Οριακές συνθήκες για την επιφάνεια των φρούτων.....	64
Εικόνα 13. Μέθοδοι επίλυσης προβλήματος.....	65
Εικόνα 14. Εντολή Patch για τη μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής.....	66
Εικόνα 15. Κριτήρια Σύγκλισης Λύσεων	69
Εικόνα 16. Παράμετροι αριθμητικής επίλυσης προσομοίωσης	70
Εικόνα 17. Κατανομή της πίεσης σε όλη τη γεωμετρία τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=1020$ sec (γ) $t=1770$ sec (δ) $t=2270$ sec (ε) $t=2770$ sec (στ) $t=3270$ sec (ζ) $t=3790$ sec και (η) $t=4290$ sec.....	71
Εικόνα 18. Κατανομή της ταχύτητας σε όλη τη γεωμετρία τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=1020$ sec (γ) $t=1770$ sec (δ) $t=2270$ sec (ε) $t=2770$ sec (στ) $t=3270$ sec (ζ) $t=3790$ sec και (η) $t=4290$ sec.....	72
Εικόνα 19. Κατανομή της θερμοκρασίας σε όλη τη γεωμετρία τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=1020$ sec (γ) $t=1770$ sec (δ) $t=2270$ sec (ε) $t=2770$ sec (στ) $t=3270$ sec (ζ) $t=3790$ sec και (η) $t=4290$ sec.....	73
Εικόνα 20. Αναπαράσταση (α) του σημείου και (β) της ρώγας σταφυλιού, στα οποία μελετάται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα από $t=0$ έως $t=4290$ sec.....	75
Εικόνα 21. Κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φρούτου στο μέσο της κλίνης τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=770$ sec (γ) $t=1270$ sec (δ) $t=1770$ sec (ε) $t=2270$ sec (στ) $t=2770$ sec (ζ) $t=3270$ sec (η) $t=3790$ sec και (θ) $t=4290$ sec77	

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Σύσταση φρέσκων σταφυλιών και σταφίδας, % κ.β.	29
Πίνακας 2. Σύσταση του σταφυλιού % κ.β.	51
Πίνακας 3. Πυκνότητα επιμέρους συστατικών και σταφυλιού	51
Πίνακας 4. Ειδική θερμοχωρητικότητα c_p (kJ/kg°C) επιμέρους συστατικών και σταφυλιού	52
Πίνακας 5. Θερμική αγωγιμότητα k (W/m°C) επιμέρους συστατικών και σταφυλιού	53
Πίνακας 6. Παράμετροι Σχεδιασμού πλέγματος	60
Πίνακας 7. Χαρακτηριστικές τιμές δ , και K_v για Σφαίρα, Κύλινδρο και Πλάκα	82

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Πίεση (Pa) κοντά στην έξοδο για τα έξι διαφορετικά πλέγματα.....	60
Σχήμα 2. Θερμοκρασία στο σημείο $x=56,34$ mm και $y=84,51$ mm για διαφορετικά χρονικά βήματα (2, 3, 4, 5 και 10 sec).....	68
Σχήμα 3. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου στο μέσο της κλίνης ($x=56,34$ mm, $y=84,51$ mm) για το χρονικό διάστημα από $t=0$ έως $t=4290$ sec.	74
Σχήμα 4. Κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της διαμέτρου του φρούτου στο μέσο της κλίνης ($x_1=47,5$ mm, $y_1=84,51$ mm και $x_2=65,5$ mm, $y_2=84,51$ mm) τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=770$ sec (γ) $t=1270$ sec (δ) $t=1770$ sec (ε) $t=2270$ sec (στ) $t=2770$ sec (ζ) $t=3270$ sec (η) $t=3790$ sec και (θ) $t=4290$ sec	76
Σχήμα 5. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου στο μέσο της κλίνης μέσω της προσομοίωσης(ansys) και των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας σε μη σταθερή κατάσταση (Sphere, Infinite Cylinder, Infinite Slab).....	83
Σχήμα 6. Πτώση Πίεσης κατά μήκος της πορώδους ζώνης κατά τη διάρκεια της μεταφοράς θερμότητας	85

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τρόφιμα αποτελούν τα δομικά συστατικά της διατροφής και της ζωής του ανθρώπου. Η ανάγκη των καταναλωτών για ασφαλή και ποιοτικά τρόφιμα σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, έχει οδηγήσει στη συνεχή ανάπτυξη νέων μεθόδων συντήρησης. Ειδικότερα η εποχικότητα των φρούτων και των λαχανικών έχουν καθιερώσει την ξήρανση ως μία από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους επέκτασης της διάρκειας ζωής τους.

Ως ξήρανση ορίζεται η διεργασία απομάκρυνσης νερού από τα τρόφιμα μέσω της εξάτμισης αυτού από τον όγκο του τροφίμου. Είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη διεργασία καθώς συνδυάζει την ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας, μάζας και ορμής. Στη βιομηχανία συναντάμε διαφορετικές μεθόδους ξήρανσης ανάλογα με τη φύση του προϊόντος που πρόκειται να επεξεργαστεί.

Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της μεθόδου σε συνδυασμό με τις διαφορετικές ιδιότητες των τροφίμων καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολο τον σχεδιασμό των ξηραντήρων. Στα πλαίσια αυτά κρίνεται σκόπιμη η ανεύρεση νέων τρόπων για τον εύκολο προσδιορισμό των παραμέτρων. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και ιδιαίτερα των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έδωσε τη δυνατότητα ανάπτυξης προγραμμάτων για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε μικρό χρόνο.

Στο 1^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής, αρχικά γίνεται μία περιγραφή της διεργασίας της ξήρανσης και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια αυτής. Ακόμη, το φαινόμενο προσεγγίζεται και αριθμητικά με τη χρήση των κατάλληλων εξισώσεων, ενώ παρουσιάζονται και τα είδη των ξηραντήρων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία τροφίμων.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται το τρόφιμο που αποτελεί το αντικείμενο της μελέτης, δηλαδή το σταφύλι. Δίνονται πληροφορίες σχετικά με τη σύσταση του φρέσκου και του αποξηραμένου σταφυλιού (σταφίδα) και τις ευεργετικές ιδιότητες για την υγεία του ανθρώπου. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις μεθόδους προκατεργασίας και ξήρανσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή σταφίδας.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η υπολογιστική ρευστοδυναμική ως μία νέα μέθοδος επίλυσης προβλημάτων. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής όπως επίσης και τα κύρια εμπορικά πακέτα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση προβλημάτων σε τρόφιμα. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων.

Τέλος στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της προσομοίωσης του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας στο σταφύλι υπό την επίδραση θερμού ρεύματος αέρα. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται τα υλικά και οι ιδιότητες αυτών όπως επίσης και οι αρχικές συνθήκες για τη επίλυση του προβλήματος. Παρουσιάζεται η γεωμετρία και το πλέγμα που σχεδιάστηκε και τα κριτήρια επίλυσης. Συνοψίζονται τα αποτελέσματα με τη χρήση διαγραμμάτων και απεικονίσεων. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα θεωρητικά και εξάγονται τα συμπεράσματα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας σε σταφύλι. Σκοπός της μελέτης ήταν η κατανόηση του φαινομένου της ξήρανσης ως συνδυασμός της μεταφοράς θερμότητας και μάζας και ο προσδιορισμός των παραμέτρων για τον κατάλληλο σχεδιασμό της διεργασίας. Μπορεί να αποτελέσει το έναυσμα για την εισαγωγή ψηφιακών τεχνολογιών στη βιομηχανία τροφίμων. Πιο συγκεκριμένα, δύναται να χρησιμοποιηθεί ως υπόβαθρο για την ανάπτυξη της επίλυσης προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας και μάζας με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τις βασικές αρχές που διέπουν την ξήρανση και πιο συγκεκριμένα θα γίνει ανάλυση των φαινομένων που προκύπτουν κατά τη διεργασία και θα παρατεθούν οι μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών. Ακόμη, θα αναλυθούν σε μεγάλο βαθμό οι περίοδοι σταθερού και ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης. Τέλος, θα γίνει μια ταξινόμηση των ξηραντήρων και μια αναφορά στις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους ξήρανσης στη βιομηχανία τροφίμων.

1.1 Εισαγωγή

Πολλές επιχειρήσεις για την εμπορία των πρώτων υλών (π.χ. φρέσκα φρούτα και λαχανικά, κρέας, δημητριακά, γαλακτοκομικά προϊόντα κλπ.) έχουν παραδοσιακά βασιστεί στον τομέα των τροφίμων και της γεωργίας. Η μεγαλύτερη ευκαιρία για την ανάπτυξη αυτού του τομέα έγκειται στην προσθήκη αξίας σε αυτά τα βασικά ακατέργαστα προϊόντα, η οποία έχει τη δυνατότητα να προσφέρει αποδόσεις σε ολόκληρη την αλυσίδα. Η διάρκεια ζωής των εποχικά ακατέργαστων προϊόντων μπορεί να επεκταθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ξήρανσης, η οποία είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στην παγκόσμια βιομηχανία και αποτελεί τον ευκολότερο τρόπο διανομής αυτών των προϊόντων σε όλο τον κόσμο και σε όλες τις εποχές του χρόνου. Πολλά προϊόντα διατροφής συντηρούνται συνήθως με ξήρανση συμπεριλαμβανομένων σπόρων, θαλάσσιων προϊόντων, προϊόντων κρέατος, γαλακτοκομικών αλλά και κηπευτικών. Πολλά αποξηραμένα τρόφιμα είναι έτοιμα για κατανάλωση, ενώ τα περισσότερα παρασκευασμένα τρόφιμα ουσιαστικά περιέχουν συστατικά που υφίστανται κάποια μορφή ξήρανσης.

Ο όρος ξήρανση (drying) στη βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιείται για τη διεργασία στην οποία η απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο γίνεται με εξάτμιση. Διαφέρει από τη συμπύκνωση (concentration) ως προς το τελικό περιεχόμενο νερού στο τρόφιμο, το οποίο είναι χαμηλότερο στην περίπτωση της ξήρανσης. Αντί του όρου ξήρανση πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος αφυδάτωση (dehydration), αν και ο όρος αυτός αποδίδει καλύτερα την πλήρη απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό διεργασίες απομάκρυνσης νερού με κατάλληλους διαλύτες ή μείωσης του διαθέσιμου νερού με προσθήκη ζάχαρης ή αλατιού δεν περιλαμβάνονται στον όρο ξήρανση. Ιδιαίτερα πρέπει να αναφερθεί η απομάκρυνση νερού υπό τη μορφή εξάχνωσης πάγου, η οποία γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες και καλείται ξήρανση με κατάψυξη (freeze drying, freeze

dehydration). Επίσης η απομάκρυνση νερού με διαλύματα ζαχάρων ή αλατιού, υψηλής ωσμωτικής πίεσης η οποία αποδίδεται με τον όρο ωσμωτική αφυδάτωση (osmotic dehydration) (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Τα στερεά που πρόκειται να ξηραθούν μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές μορφές: νιφάδες, κόκκους, κρυστάλλους, σκόνη, πλάκες ή φύλλα και να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες. Το υγρό που πρόκειται να εξατμιστεί μπορεί να βρίσκεται στην επιφάνεια του στερεού, όπως κατά την ξήρανση στερεών κρυστάλλων, ή εξ' ολοκλήρου στο εσωτερικό του στερεού ή εν μέρει έξω και εν μέρει στο εσωτερικό. Το περιεχόμενο υγρό μιας ξηραμένης ουσίας ποικίλει από το ένα προϊόν στο άλλο. Μερικές φορές το προϊόν δεν περιέχει καθόλου υγρό και χαρακτηρίζεται «εντελώς ξηρό». Η ξήρανση αποτελεί συνήθως το τελευταίο βήμα σε μια σειρά διεργασιών και το προϊόν που εξέρχεται από έναν ξηραντήρα είναι συνήθως έτοιμο για συσκευασία (McCabe, Smith, & Harriott).

Το νερό ή τα άλλα υγρά μπορούν να απομακρυνθούν από τα στερεά μηχανικά με πρέσες ή φυγόκεντρους ή θερμικά με εξάτμιση. Γενικά η μηχανική απομάκρυνση του νερού είναι πιο οικονομική από τη θερμική. Κατά συνέπεια είναι καλύτερα να μειωθεί το περιεχόμενο υγρό όσο το δυνατόν περισσότερο πριν την τροφοδοσία του υλικού σε ένα ξηραντήρα. Το ξηραμένο προϊόν μπορεί να έχει τη δυνατότητα να υποστεί έντονη επεξεργασία και να αντέχει σε ένα πολύ θερμό περιβάλλον ή μπορεί να απαιτεί προσεκτική επεξεργασία σε χαμηλές ή μέτριες θερμοκρασίες γεγονός που έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών τεχνικών ξήρανσης. Τέτοιες μέθοδοι ξήρανσης χρησιμοποιούν χαμηλές θερμοκρασίες αλλά συχνά απαιτούν και πολύ μεγάλους χρόνους ξήρανσης και υψηλή κατανάλωση ενέργειας ενώ παράλληλα βλάπτουν την ποιότητα του προϊόντος και τα καθιστούν επιρρεπή σε μικροβιακή αλλοίωση.

1.2 Η διεργασία της ξήρανσης

Η ξήρανση είναι μια πολύπλοκη διεργασία καθώς συνδυάζει μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, μάζας και ορμής που συνοδεύονται από ταυτόχρονους φυσικούς και χημικούς μετασχηματισμούς φάσης. Δύο ξεχωριστοί μηχανισμοί μεταφοράς συμβαίνουν ταυτόχρονα κατά την ξήρανση, (i) μεταφορά θερμότητας από το μέσο ξήρανσης στο υλικό, γεγονός που προκαλεί αλλαγή φάσης του νερού και (ii) μεταφορά νερού από το εσωτερικό του προϊόντος στην επιφάνεια του στην οποία οι υδρατμοί τελικά μεταφέρονται μακριά από το προϊόν στην αέρια φάση. Τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας επηρεάζονται συνήθως τόσο από τις διαφορές θερμοκρασίας όσο και από τη συγκέντρωση

νερού, καθώς και από το πεδίο της ταχύτητας του αέρα, μαζί με τις ιδιότητες του ίδιου του τροφίμου. Οι εσωτερικές διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας μπορεί επίσης να επηρεαστούν από τις φυσικές αλλαγές (π.χ. συρρίκνωση) που μπορεί να συμβούν στο προϊόν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης (Sabarez, 2020).

1.3 Φαινόμενα μεταφοράς

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αέρας αποτελεί το μέσο για την απομάκρυνση της υγρασία από το προϊόν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Συνήθως σχηματίζεται ένα στρώμα αέρα στη διεπιφάνεια αέρα-τροφίμου κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, στην οποία η ροή του αέρα επιβραδύνεται αναπόφευκτα (κοντά στη διεπιφάνεια του τροφίμου) λόγω τριβής. Αυτό το στρώμα δρα τόσο για τη μεταφορά θερμότητας όσο και για τη μεταφορά των υδρατμών κατά την ξήρανση. Οι υδρατμοί διαχέονται μέσω αυτού του οριακού στρώματος και τελικά παρασύρονται από το κινούμενο ρεύμα αέρα. Το πάχος αυτού του οριακού στρώματος καθορίζεται κυρίως από την ταχύτητα του αέρα. Συγκεκριμένα, οι εξωτερικοί ρυθμοί μεταφοράς τόσο θερμότητας όσο και υδρατμών επηρεάζονται σημαντικά από το πεδίο ταχύτητας αέρα και από τις ιδιότητες του αέρα (δηλαδή θερμοκρασία και σχετική υγρασία). Εάν η ταχύτητα του αέρα είναι πολύ χαμηλή το οριακό στρώμα γίνεται πιο παχύ και η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών αυξάνεται. Επιπλέον, οι υδρατμοί που απελευθερώνονται από την επιφάνεια του τροφίμου αυξάνουν την υγρασία του αέρα στο οριακό στρώμα λόγω της αργής μοριακής κίνησης του κινούμενου ρεύματος αέρα. Αυτό προκαλεί τη μείωση του δυναμικού πίεσης των υδρατμών και επιβραδύνει τη διαδικασία ξήρανσης που ελέγχεται εξωτερικά (Sabarez, 2020).

1.3.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας

Υπάρχει μεγάλη απαίτηση σε ενέργεια κατά την ξήρανση ώστε να δημιουργηθεί μια αλλαγή φάσης του περιεχόμενου νερού στα τρόφιμα. Τρεις είναι κύριοι τρόποι μεταφοράς θερμότητας (με αγωγή, με συναγωγή και με ακτινοβολία) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μόνοι τους είτε σε συνδυασμό με την παροχή θερμότητας από την πηγή θερμότητας στα τρόφιμα. Αυτοί οι διαφορετικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας μπορούν να αναπτυχθούν ταυτόχρονα ή διαδοχικά ανάλογα με τη μεμονωμένη εφαρμογή για την επίτευξη μιας ενεργειακά αποδοτικής διαδικασίας. Όλοι οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας εκτός από εκείνους που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια παρέχουν θερμότητα στην επιφάνεια του τροφίμου, έτσι ώστε η θερμότητα στη συνέχεια να

μεταφέρεται εντός του τροφίμου κυρίως μέσω αγωγής. Κατά τη μεταφορά θερμότητας, ο αέρας χρησιμοποιείται για την παροχή θερμότητας για την αλλαγή της φάσης του νερού στα υλικά τροφίμων, επιπλέον του ρόλου του να μεταφέρει την εξατμισμένη υγρασία από το προϊόν. Η κατανάλωση ενέργειας στην ξήρανση λόγω συναγωγής είναι συνήθως υψηλή λόγω της εγγενούς αναποτελεσματικότητας της χρήσης αέρα ως μέσου ξήρανσης. Ενώ βρίσκεται σε αγώγιμη μεταφορά θερμότητας, η θερμότητα παρέχεται στα υλικά τροφίμων μέσω επαφής με θερμαινόμενα μεταλλικά / μη μεταλλικά στερεά (μέσω μοριακών κραδασμών) ή υγρά χαρτικών (κυρίως με μοριακή σύγκρουση). Η ενέργεια μέσω ακτινοβολίας, από την άλλη πλευρά, μπορεί να παρέχεται σε διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, κατηγοριοποιημένων σύμφωνα με την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (π.χ. ραδιοσυχνότητα (RF), υπέρυθρες (IR), φούρνο μικροκυμάτων (MW), κ.λπ.) . Στις εφαρμογές ξήρανσης τροφίμων, οι κύριοι τύποι ακτινοβολίας που εφαρμόζονται είναι οι IR, MW και RF, οι οποίοι χρησιμοποιούν πολύ διαφορετικούς μηχανισμούς θέρμανσης όπως περιγράφεται αλλού (Sabarez, 2020).

1.3.2 Μηχανισμός Μεταφοράς Μάζας

Η ταχύτητα απομάκρυνσης της υγρασίας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης μπορεί να ελέγχεται είτε από το ρυθμό διάχυσης της υγρασίας στο εσωτερικό του τροφίμου (εσωτερική μεταφορά μάζας) είτε από το ρυθμό εξάτμισης της υγρασίας από την επιφάνεια του τροφίμου στο μέσο ξήρανσης (εξωτερική μεταφορά μάζας). Η εξωτερική μεταφορά υγρασίας από την επιφάνεια του τροφίμου στο μέσο ξήρανσης επηρεάζεται κυρίως από τις ιδιότητες του αέρα ξήρανσης. Όταν ο εσωτερικός ρυθμός μεταφοράς της υγρασίας από το εσωτερικό στην επιφάνεια του προϊόντος είναι πιο αργός από τον εξωτερικό ρυθμό μεταφοράς της υγρασίας, τότε η εσωτερική διάχυση γίνεται κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς μάζας. Σύμφωνα με τους Heldman και Hartel (1997), η υγρασία εντός του τροφίμου μπορεί να μεταναστεύσει με διάφορους τρόπους μέσω ενός αριθμού διαφορετικών μηχανισμών (φάση υγρού ή ατμού). Οι μηχανισμοί μεταφοράς υγρών περιλαμβάνουν τριχοειδή ροή, διάχυση επιφανείας και διάχυση υγρού, ενώ οι μηχανισμοί μεταφοράς ατμών αποτελούνται από διάχυση Knudsen, αμοιβαία διάχυση, διάχυση Stefan, ροή Poiseuille και εξάτμιση συμπύκνωσης. Η εξάτμιση σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί εντός του προϊόντος και έτσι το νερό διαχέεται με τη μορφή ατμών μέσω της μήτρας τροφίμων, με τη διαφορά στην πίεση ατμών ως κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά υγρασίας. Οι διαφορές στην πίεση μεταξύ του μέσου ξήρανσης και της εσωτερικής δομής τροφής (ροή πίεσης) και οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του

εσωτερικού του προϊόντος (θερμική ροή) μπορεί επίσης να επηρεάσουν την εσωτερική κινητικότητα της υγρασίας. Η υγρασία (στη φάση του υγρού ή ατμού) πρέπει να μετακινηθεί στο όριο του υλικού πριν μεταφερθεί στη συνέχεια (σε φάση ατμού) από τον αέριο φορέα (ή με εφαρμογή κενού για στεγνώτηρες που δεν έρχονται σε επαφή) (Sabarez, 2020).

1.4 Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα

Ελεύθερο και δεσμευμένο νερό

Το νερό στα τρόφιμα βρίσκεται υπό μορφή δεσμευμένου (bound) ή ελεύθερου (free) νερού. Το ποσό του δεσμευμένου νερού διαφέρει από τρόφιμο σε τρόφιμο και έχουν διατυπωθεί διάφοροι ορισμοί αυτού. Το δεσμευμένο νερό είναι αυτό που υπάρχει στην περιοχή κοντά στα μη υδατικά συστατικά του τροφίμου και παρουσιάζει ιδιότητες σημαντικά διαφορετικές από αυτές του συνόλου του νερού στο τρόφιμο. Το δεσμευμένο νερό δεν παγώνει σε θερμοκρασία έως $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ και δεν είναι διαθέσιμο ως διαλύτης προστιθέμενων ουσιών ούτε ως χημικό αντιδραστήριο. Υπάρχουν πολλοί βαθμοί δέσμευσης του νερού. Το πιο ισχυρά δεσμευμένο νερό είναι εκείνο που αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των μη υδατικών συστατικών π.χ. είναι μέρος των υδριτών ή βρίσκεται στα πολύ μικρά κενά των πρωτεϊνών. Το αμέσως επόμενο είναι το γειτνιάζον νερό που καταλαμβάνει τα πρώτα στρώματα σε επαφή με τα μη υδατικά συστατικά, συνδεδεμένο με ιοντικές κυρίως ομάδες αυτών των συστατικών. Ακολουθεί το πολυστρωματικό νερό που καταλαμβάνει τα αμέσως επόμενα στρώματα μετά από το γειτνιάζον και, αν και δεν είναι τόσο ισχυρά συνδεδεμένο (κυρίως με δεσμούς υδρογόνου), παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του ελεύθερου νερού. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού δεν παγώνει έως τους $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ εμφανίζει μικρή ικανότητα ως διαλύτης (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Το ελεύθερο νερό είναι εκείνο που καταλαμβάνει τις πιο απομακρυσμένες θέσεις από τα μη υδατικά συστατικά και μπορεί να δρα ως διαλύτης, ενώ παγώνει σε θερμοκρασία κατώτερη των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (η μείωση του σημείου πήξης εξαρτάται από τη συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών). Το ελεύθερο νερό μπορεί να βρίσκεται παγιδευμένο σε τριχοειδείς πόρους, οπότε παρουσιάζει μειωμένη τάση ατμών όσο μικρότερη είναι η ακτίνα των τριχοειδών πόρων. Αυτό το νερό δεν εμφανίζει μακροσκοπική ροή. Αντίθετα το μη παγιδευμένο νερό εμφανίζει ελεύθερη μακροσκοπική ροή (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Η ποσότητα του δεσμευμένου νερού που υπάρχει στα τρόφιμα υψηλής υγρασίας (περίπου 9 g νερού/g ξηρού τροφίμου) είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα οι δύο πρώτες κατηγορίες δεσμευμένου νερού αποτελούν περίπου το 0,5% και το πολυστρωματικό νερό το 1-5% του ολικού νερού του τροφίμου (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

Η απομάκρυνση του νερού από τα τρόφιμα είναι τόσο δυσκολότερη όσο ισχυρότερα είναι αυτό δεσμευμένο. Το ελεύθερο νερό απομακρύνεται ευκολότερα και η θερμότητα εξάτμισης του είναι η ίδια με του καθαρού νερού. Το πολυστρωματικό νερό είναι το επόμενο και παρουσιάζει θερμότητα εξάτμισης λίγο έως αρκετά μεγαλύτερη από το καθαρό νερό. Το γειτνιάζον νερό απομακρύνεται ακόμη δυσκολότερα και παρουσιάζει πολύ αυξημένη θερμότητα εξάτμισης, ενώ το νερό που αποτελεί τμήμα των μη υδατικών συστατικών του τροφίμου απομακρύνεται πολύ δύσκολα (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

1.5 Φάσεις ξήρανσης

Η διεργασία της ξήρανσης μπορεί εύκολα να χωριστεί σε φάσεις (φάση θέρμανσης, φάση σταθερού ρυθμού ξήρανσης και φάση ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης) που σηματοδοτούν κάποιες αλλαγές στον προϊόν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της λειτουργίας και του σχεδιασμού του ξηραντήρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας του προϊόντος και η μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία μπορούν να μετρηθούν με τη λήψη δειγμάτων. Η μεταβολή στην πυκνότητα του προϊόντος λόγω συρρίκνωσης μπορεί επίσης να μετρηθεί άμεσα και να υπολογιστεί με βάση το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας του προϊόντος. Για τους χειριστές αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων κατά την παραγωγή και οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν αυτή την ανάλυση για να ενημερώσουν και να βελτιώσουν το σχεδιασμό. Η απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας του προϊόντος με το χρόνο ή η θέση στον ξηραντήρα μας δίνει άμεση κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία. Η δημιουργία του ίδιου γραφήματος για τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία του προϊόντος παρέχει πληροφορίες για το ρυθμό μεταβολής. Οι αλλαγές στους ρυθμούς θέρμανσης και εξάτμισης συνδυάζονται για τον έλεγχο της εσωτερικής αντίστασης του προϊόντος στη μετανάστευση νερού (Breslin, 2020).

1.5.1 Φάση θέρμανσης

Η πρώτη φάση αντιπροσωπεύει τη φάση θέρμανσης, στην οποία το προϊόν απορροφά ενέργεια από τον αέρα του ξηραντήρα και αυξάνει τη θερμοκρασία του.

Η εξάτμιση ενός μορίου νερού από την επιφάνεια του προϊόντος τραβά μέσω διάχυσης το επόμενο διαθέσιμο μόριο νερού στην εξωτερική επιφάνεια. Η δύναμη που ωθεί το μόριο του νερού στην επιφάνεια ασκείται σε όλα τα εσωτερικά μόρια νερού μέχρι το κέντρο του σωματιδίου (Breslin, 2020).

Εάν η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι ιδιαίτερα υψηλή η ταχύτητα διάχυσης του νερού στην επιφάνεια του προϊόντος μπορεί να είναι πιο γρήγορη από ότι η ταχύτητα εξάτμισης αυτού. Σε ορισμένες περιπτώσεις η εξάτμιση μειώνει τη θερμοκρασία της επιφάνειας καθώς το προϊόν εισέρχεται στον ξηραντήρα πριν φανεί η αύξηση αυτής. Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας σταματά να αυξάνεται η φάση θέρμανσης έχει τελειώσει (Breslin, 2020).

1.5.2 Περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης

Στη δεύτερη φάση, αυτή του σταθερού ρυθμού ξήρανσης η θερμοκρασία της επιφάνειας των σωματιδίων παραμένει σχετικά σταθερή. Το πλάτος της θερμοκρασίας δείχνει ότι σχεδόν όλη η ενέργεια που απορροφάται από το προϊόν χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια. Η ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από το προϊόν διέπει το ρυθμό ξήρανσης. Οι δυνάμεις που δημιουργούνται από την εξάτμιση μεταφέρουν μόρια νερού από το εσωτερικό στην επιφάνεια των σωματιδίων γρηγορότερα από ότι μπορούν να εξατμιστούν. Επομένως, η εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος έχει πάντα πλεονάζον νερό διαθέσιμο για εξάτμιση (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009; Breslin, 2020).

Οποιαδήποτε ενέργεια απορροφά το προϊόν από τον αέρα εξισορροπείται από την ενέργεια που χάνεται λόγω εξάτμισης. Η ενέργεια που χάνεται με εξάτμιση ψύχει την επιφάνεια του προϊόντος διατηρώντας τη θερμοκρασία ισορροπίας στην επιφάνεια του προϊόντος, που είναι και η θερμοκρασία υγρού βολβού του περιβάλλοντος αέρα.

Όταν οι εξωτερικές δυνάμεις λόγω εξάτμισης είναι μεγαλύτερες από τις εσωτερικές δυνάμεις συγκράτησης των μορίων νερού, τότε η διάχυση είναι αυτή που ελέγχει τη ξήρανση. Η περιεκτικότητα σε υγρασία σε αυτό το σημείο ονομάζεται «κρίσιμη υγρασία». Η κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία σηματοδοτεί την έναρξη της φάσης μειούμενου ρυθμού ξήρανσης, καθώς ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται ανά μονάδα χρόνου. Σε αυτήν τη

φάση η θερμοκρασία της ξηρής μάζας και του περιεχόμενου νερού στο σωματίδιο αυξάνονται (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009; Breslin, 2020).

Μόλις το προϊόν φτάσει στην κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία η εσωτερική αντίσταση αυξάνεται και η μεταφορά νερού είτε σε υγρή μορφή ή ατμός επιβραδύνεται. Περισσότερη ενέργεια απορροφάται από την ξηρή μάζα και την εσωτερική υγρασία. Σε αυτήν τη φάση ο χρόνος που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού αυξάνεται (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009).

1.5.3 Μαθηματική προσέγγιση του σταθερού ρυθμού ξήρανσης

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:

$$-\frac{dw}{dt} = \frac{hA(T_a - T_w)}{L} = k_y A(w_w - w_a) \quad (1)$$

Όπου:

dw/dt ο ρυθμός ξήρανσης ή εξάτμισης (kg νερού/s)

h συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W/m^2\text{ }^\circ C$)

A επιφάνεια εξάτμισης (m^2)

T_a θερμοκρασία (ξηρού θερμομέτρου) αέρα ($^\circ C$)

T_w θερμοκρασία επιφάνειας εξάτμισης, η οποία συμπίπτει με τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου ($^\circ C$)

L θερμότητα εξάτμισης του νερού (J/kg)

k_y συντελεστής μεταφοράς μάζας (kg/s m^2)

w_w υγρασία κορεσμένου αέρα σε T_w (kg νερού/kg ξηρού αέρα)

w_a υγρασία κύριας μάζας αέρα (kg νερού/kg ξηρού αέρα) (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009; McCabe, Smith, & Harriott).

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 αέρα παράλληλη προς την επιφάνεια εξάτμισης

$$h = 8,85G^{0,8}/D^{0,2} \quad (2)$$

- για ροή κάθετη προς την επιφάνεια εξάτμισης

$$h = 24,2G^{0,37} \quad (3)$$

όπου G η μαζική παροχή του αέρα ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

D η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού ροής

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 θερμότητας.

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

$$Le = \frac{h}{k_y c} \quad (4)$$

ο οποίος συνήθως χρησιμοποιείται όταν η μεταφορά 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 $k_y = 0.8 h$, αφού για τον αέρα μέση τιμή $c = 1.21 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

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

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_\xi = \frac{1}{m_s} \frac{dw}{dt} \quad (5)$$

Όπου $(dw/dt)_\xi$ ο ρυθμός εξάτμισης (kg/s kg ξηρού στερεού)

m_s η μάζα ξηρού στερεού (kg)

Δεδομένου ότι η μάζα των ξηρών στερεών είναι: $m_s = 2xA\rho_s$, η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$-\left(\frac{dw}{dt}\right)_\xi = \frac{h}{2x\rho_s L} (T_a - T_w) \quad (6)$$

Όπου ρ_s η πυκνότητα του ξηρού στερεού (kg/m^3) και $2x$ το πάχος του στερεού (κάθετο προς την επιφάνεια εξάτμισης A) (m)

Για ξήρανση με κυκλοφορία αέρα μέσω κλίνης υγρού υλικού η αντίστοιχη εξίσωση γίνεται:

$$-\left(\frac{dw}{dt}\right)_\xi = \frac{h\alpha}{\rho_s L} (T_a - T_w) \quad (7)$$

Όπου α είναι η ανοιγμένη επιφάνεια της κλίνης (m^2/m^3). Η τιμή του α δίνεται από τις σχέσεις:

- για κλίνη σφαιρικών σωματιδίων διαμέτρου d_p :

$$\alpha = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (8)$$

- για κλίνη κυλινδρικών σωματιδίων διαμέτρου d_p και μήκους l :

$$\alpha = \frac{4(1-\varepsilon)(l+0,5d_p)}{d_p} \quad (9)$$

Όπου ε το πορώδες της κλίνης

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας όταν ο αέρας διαβιβάζεται μέσα από την κλίνη των σωματιδίων και όχι πάνω από αυτή, μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά, με βάση τις ιδιότητες και την ταχύτητα (v) του αέρα, από τη σχέση:

$$Nu = \frac{hd_p}{k} = 1.17Re^{0,585}Pr^{1/3} \quad (10)$$

Όπου,

$$Re = d_p G / \mu = d_p v \rho / \mu, \quad (11)$$

ο αριθμός Reynolds με βάση τη διάμετρο των σωματιδίων

$$Pr = Cp\mu / k \quad (12)$$

ο αριθμός Prandtl

μ , ρ , Cp και k ιξώδες, πυκνότητα, ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα του αέρα, αντίστοιχα.

Η παραπάνω εξίσωση συνιστάται για σωματίδια σφαιρικού σχήματος που σχηματίζουν κλίνη με 40-45% κενό χώρο, Για κυλινδρικά σωματίδια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια εξίσωση χρησιμοποιώντας τη διάμετρο του κυλίνδρου. Για κλίνες με μεγαλύτερο κενό χώρο ή για άλλου σχήματος σωματίδια υπάρχουν άλλες συσχετίσεις στη βιβλιογραφία.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από στερεά σωματίδια ή από υγρά σταγονίδια αιωρούμενα σε αέρα μπορεί να υπολογισθεί από την $E\zeta$. (13):

$$Nu = \frac{hd_p}{k} = 2 + 0,60Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (13)$$

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

$$Sh = 2 + 0,60Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (14)$$

Όπου $Sh = k_y d_p / D_u$ ή $Sh = k_y d_p M_y \rho_L / D \rho_A$ (15)

Ο αριθμός Sherwood

$$Sc = \mu / \rho D_u \quad (16)$$

Sc αριθμός Schimidt

D_u η ογκομετρική διαχυτότητα (m²/h)

M_y το μέσο μοριακό βάρος του αερίου μίγματος για μεταφορά ατμού στον αέρα

D ο συντελεστής διάχυσης (m²/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 (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009; Heldman & Singh, 1981).

1.5.4 Περίοδος ελαττούμενου 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 μειωνόμενου 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 μειωνόμενου ρυθμού ξήρανσης συνήθως δύο ή και τρεις. Η ύπαρξη μίας ή περισσότερων περιόδων μειωνόμενου 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 ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης. Υγροσκοπικά είναι τα υλικά στα οποία η μερική πίεση των ατμών του νερού στο υλικό γίνεται χαμηλότερη από την τάση ατμών του νερού σε ορισμένη τιμή υγρασίας. Αυτά είναι και τα υλικά που εμφανίζουν δύο ή και τρεις περιόδους ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης (Breslin, 2020).

Στην πρώτη περίοδο του ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης η κορεσμένη επιφάνεια του προϊόντος μειώνεται συνεχώς καθώς ο ρυθμός μεταφοράς υγρασίας μέσα στο τρόφιμο είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο κορεσμού της επιφάνειας. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ξήρανσης αυτής της περιόδου είναι ο ρυθμός μεταφοράς της υγρασίας στο εσωτερικό του τροφίμου και ο ρυθμός εξάτμισης του νερού από την

επιφάνεια του προϊόντος. Όταν όλη η επιφάνεια βρεθεί σε κατάσταση μη κορεσμού τότε ελέγχων παράγοντας της ξήρανσης γίνεται η μεταφορά της υγρασίας μέσα στο τρόφιμο. Από τους μηχανισμούς μεταφοράς της υγρασίας στην επιφάνεια των τροφίμων οι κυριότεροι είναι η μοριακή διάχυση και ροή με τη βοήθεια τριχοειδών αγωγών. Πιο συγκεκριμένα η διάχυση της υγρασίας από το εσωτερικό στην επιφάνεια των τροφίμων, λόγω διαφοράς συγκέντρωσης μπορεί μαθηματικά να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{Z}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right] \quad (17)$$

Όπου D ο συντελεστής διάχυσης (m^2/s), $Z=0$ για πλάκα, 1 για κύλινδρο και 2 για σφαίρα. Στην παραπάνω εξίσωση γίνεται η θεώρηση ενός σταθερού συντελεστή διάχυσης το οποίο δεν ανταποκρίνεται επαρκώς στην πραγματικότητα, καθώς η μείωση της υγρασίας έχει ως επακόλουθο τη μείωση του συντελεστή. Ακόμη ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η μεταβολή ακολουθεί την εξίσωση Arrhenius, στην οποία υπεισέρχεται η ενέργεια ενεργοποίησης για τη διάχυση.

Ο χρόνος ξήρανσης για διαφορετικές γεωμετρίες προϊόντων μπορεί εύκολα να υπολογισθεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

- Για πλάκα πάχους $2x$:

$$t = \frac{4x^2}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \right) \quad (18)$$

- Για κύλινδρο απείρου μήκους ακτίνας r :

$$t = \frac{r^2}{5,78 D} \ln \left(0,692 \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \right) \quad (19)$$

- Για σφαίρα ακτίνας r :

$$t = \frac{r^2}{\pi^2 D^2} \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \right) \quad (20)$$

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

Η θεωρία της μοριακής διάχυσης εμφανίζει μεγαλύτερη εφαρμογή σε υδροσκοπικά στερεά όπως η ζελατίνη, το άμυλο και η κυτταρίνη και υποδηλώνεται μέσω του χρόνου ξήρανσης ο οποίος είναι ανάλογος του τετραγώνου του πάχους ή της ακτίνας του στερεού.

Η μεταφορά υγρασίας μέσω του μηχανισμού των τριχοειδών είναι δύσκολο να περιγραφεί με τη μορφή εξίσωσης καθώς τα τρόφιμα 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

$$-\frac{dw}{dt} = K(w - w_e) \quad (21)$$

Όπου K η εμπειρική σταθερά ξήρανσης (1/s)

Η εξίσωση αυτή υποδηλώνει τη γραμμική μεταβολή της απομένουσας ελεύθερης υγρασίας του τροφίμου, το οποίο συμβαίνει σε πολλά πορώδη τρόφιμα. Ολοκληρώνοντας μάλιστα τη σχέση αυτή προκύπτει ο χρόνος της περιόδου μειωνόμενου ρυθμού ξήρανσης από την κρίσιμη υγρασία w_c μέχρι την υγρασία w , εάν η τιμή της σταθεράς δεν μεταβάλλεται (Ταούκης & Ωραιούπουλου, 2009; Heldman & Singh, 1981).

$$t = \frac{1}{K} \ln \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \quad (22)$$

1.6 Καμπύλες ξήρανσης-ρυθμός ξήρανσης

Οι καμπύλες ξήρανσης κατασκευάζονται με βάση πειραματικά δεδομένα υγρασίας χρόνου που λαμβάνονται κατά την ξήρανση υλικών συνήθως σε ρεύμα αέρα. Κατά την ξήρανση προσδιορίζεται η υγρασία του τροφίμου (w), εκφρασμένη συνήθως σε ξηρή βάση, σε διάφορες χρονικές στιγμές και η υγρασία ισορροπίας (w_e). Με βάση αυτά τα δεδομένα κατασκευάζεται η καμπύλη ξήρανσης με τεταγμένη την υγρασία του τροφίμου (w) ή την ελεύθερη υγρασία αυτού ($w - w_e$) και τετμημένη το χρόνο ξήρανσης. Με αριθμητική διαφόριση των πειραματικών δεδομένων προκύπτει ο ρυθμός ξήρανσης δηλαδή η μεταβολή της υγρασίας ως προς το χρόνο ξήρανσης (dw/dt) και η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης δίνει τη μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης ως συνάρτηση της υγρασίας ή της ελεύθερης υγρασίας. Στις τυπικές καμπύλες ξήρανσης φαίνεται ο αρχικός σταθερός ρυθμός ξήρανσης που ακολουθούν τα περισσότερα προϊόντα, ακολουθούμενος από μειωνόμενο ρυθμό ξήρανσης. Το σημείο στο οποίο παρατηρείται αυτή η μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης καλείται κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία (w_c). Η καμπύλη του ρυθμού ξήρανσης μπορεί να εμφανίσει ένα αρχικό τμήμα αυξανόμενου ρυθμού εάν το προϊόν

εισέρθει στον ξηραντήρα σε χαμηλή θερμοκρασία. Όσο η υγρασία πλησιάζει προς την υγρασία ισορροπίας του προϊόντος ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται περισσότερο τείνοντας στην τιμή 0 (Kerr, 2019).

1.7 Ταξινόμηση ξηραντήρων

Δεν υπάρχει απλός τρόπος κατάταξης των μηχανημάτων ξήρανσης. Κάποιοι ξηραντήρες είναι συνεχείς, ενώ κάποιοι άλλοι ασυνεχείς, κάποιοι αναδεύουν τα στερεά, κάποιοι όχι. Για να μειωθεί η θερμοκρασία ξήρανσης, μπορεί να εφαρμοστεί λειτουργία σε κενό. Ορισμένοι ξηραντήρες μπορούν να χειριστούν σχεδόν όλα τα είδη υλικών, ενώ ορισμένοι άλλοι περιορίζονται σε συγκεκριμένους τύπους τροφοδοσίας.

Μπορεί να γίνει ένας κύριος διαχωρισμός ανάμεσα σε (1) ξηραντήρες στους οποίους το στερεό εκτίθεται απευθείας σε ένα θερμό αέριο (συνήθως αέρα) και (2) ξηραντήρες στους οποίους μεταφέρεται θερμότητα στο στερεό από ένα εξωτερικό μέσο όπως συμπυκνωμένο υδρατμό, συνήθως μέσω μιας μεταλλικής επιφάνειας που βρίσκεται σε επαφή με στερεό και (3) ξηραντήρες που θερμαίνονται με διηλεκτρική ή ακτινοβολία ενέργεια ή ενέργεια μικροκυμάτων. Οι ξηραντήρες που εκθέτουν τα στερεά σε θερμό αέριο ονομάζονται αδιαβατικοί (adiabatic) ή άμεσοι (direct) ξηραντήρες. Οι ξηραντήρες στους οποίους η θερμότητα μεταφέρεται από ένα εξωτερικό μέσο ονομάζονται μη αδιαβατικοί (nonadiabatic) ή έμμεσοι (indirect). Μερικές μονάδες συνδυάζουν αδιαβατική και μη αδιαβατική ξήρανση. Οι ξηραντήρες αυτοί είναι γνωστοί ως άμεσοι-έμμεσοι ξηραντήρες (McCabe, Smith, & Harriott).

1.7.1 Ξηραντήρες για στερεά και πολτούς

Οι περισσότεροι βιομηχανικοί ξηραντήρες επεξεργάζονται μικρομερή στερεά κατά τη διάρκεια μέρους του κύκλου ξήρανσης. Κάποιοι ξηραίνουν μεμονωμένα, μεγάλα κομμάτια όπως κεραμικά ή φύλλα πολυμερούς.

Στους αδιαβατικούς ξηραντήρες τα στερεά εκτίθενται στο αέριο με τους εξής τρόπους:

1. Το αέριο διοχετεύεται στην επιφάνεια μιας κλίνης ή μιας πλάκας στερεών ή στη μία ή στις δύο όψεις ενός συνεχούς φύλλου ή υμένα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ξήρανση με εγκάρσια κυκλοφορία (cross-circulation drying).
2. Το αέριο διοχετεύεται σε μία κλίνη χονδρόκοκκων στερεών που στηρίζονται σε ένα πλέγμα. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως ξήρανση εσωτερικής κυκλοφορίας (through-

circulation drying). Όπως και στην ξήρανση με εγκάρσια κυκλοφορία, η ταχύτητα του αερίου διατηρείται χαμηλή, ώστε να μην συμπαρασυρθούν τα στερεά σωματίδια.

3. Τα στερεά ρίχνονται σε ρεύμα αερίου που κινείται αργά. Πολλές φορές η κίνηση αυτή συνοδεύεται από ανεπιθύμητο συμπαρασυρμό των λεπτόκοκκων σωματιδίων στο αέριο.

4. Το αέριο περνά μέσα από τα στερεά με τέτοια ταχύτητα, ώστε να ρευστοποιήσει την κλίνη. Στην περίπτωση αυτή είναι αναπόφευκτος κάποιος συμπαρασυρμός των λεπτόκοκκων σωματιδίων.

5. Όλα τα στερεά συμπαρασύρονται από ένα ρεύμα αερίου υψηλής ταχύτητας και μεταφέρονται πνευματικά από μία συσκευή ανάμιξης σε έναν μηχανικό διαχωριστή.

Στους μη αδιαβατικούς ξηραντήρες το μόνο αέριο που απομακρύνεται είναι οι ατμοί του νερού ή του διαλύτη, μολονότι πολλές φορές απομακρύνεται ένα μικρό μέρος του αερίου σάρωσης. Οι μη αδιαβατικοί ξηραντήρες διαφέρουν κυρίως στους τρόπους με τους οποίους εκτίθενται τα στερεά στη θερμή επιφάνεια ή σε οποιαδήποτε άλλη πηγή θερμότητας.

1. Τα στερεά απλώνονται πάνω σε μία ακίνητη ή αργά κινούμενη οριζόντια επιφάνεια και ψήνονται μέχρι να ξηρανθούν. Η επιφάνεια μπορεί να θερμανθεί ηλεκτρικά ή με τη βοήθεια ενός ρευστού μεταφοράς θερμότητας, όπως ο υδρατμός ή το ζεστό νερό. Εναλλακτικά η θερμότητα μπορεί να προέλθει από ένα θερμαντήρα ακτινοβολίας πάνω από το στερεό.

2. Τα στερεά κινούνται πάνω σε μία θερμαινόμενη επιφάνεια, συνήθως κυλινδρική, με τη βοήθεια ενός αναδευτήρα ή ενός κοχλιωτού μεταφορέα.

3. Τα στερεά γλιστρούν με την επίδραση της βαρύτητας πάνω σε μια επικλινή θερμαινόμενη επιφάνεια ή μεταφέρονται προς τα πάνω μαζί με την επιφάνεια για ένα χρονικό διάστημα και ξαναγλιστρούν σε μια νέα θέση.

Τυπικοί ξηραντήρες για δύσκαμπτα ή κοκκώδη στερεά είναι οι ξηραντήρες με δίσκους και μεταφορικές ταινίες με πλέγμα για υλικά τα οποία δεν είναι δυνατόν να αναδευτούν. Για στερεά υλικά τα οποία μπορούν να αναδευτούν χρησιμοποιείται ο περιστρεφόμενος μεταφορικός κοχλίας, ο πύργος και ο ξηραντήρας ακαριαίας δράσης. (McCabe, Smith, & Harriott)

Ξηραντήρες με Δίσκους

Αποτελείται από ένα ορθογώνιο χώρο με μεταλλικό έλασμα και μέσα περιέχει δύο τροχήλατα οχήματα τα οποία στηρίζουν τα ράφια. Κάθε ράφι φέρει έναν αριθμό δίσκων, με διαστάσεις περίπου 75×75 cm και βάθος 5 έως 15 cm, τα οποία φορτώνονται με το προς ξήρανση υλικό. Θερμός αέρας κυκλοφορεί με ταχύτητα 2-5 m/s μεταξύ των δίσκων, με

τον ανεμιστήρα και τον κινητήρα και περνάει από τους θερμαντήρες. Ανακλαστικές ροές, διανέμουν τον αέρα μέσω των δίσκων ομοιόμορφα. Ένα μέρος του υγρού αέρα εξέρχεται συνεχώς μέσω του σωλήνα εξαγωγής. Συμπληρωματικός καθαρός αέρας εισέρχεται από την είσοδο. Τα ράφια είναι τοποθετημένα σε τροχοφόρο όχημα, με τέτοιον τρόπο ώστε στο τέλος του κύκλου ξήρανσης τα οχήματα να μπορούν να συρθούν εκτός του θαλάμου και να μεταφερθούν σε μια θέση εκφόρτωσης (McCabe, Smith, & Harriott).

Οι ξηραντήρες με δίσκους είναι χρήσιμοι όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι μικρός. Είναι δυνατόν να ξηράνουν σχεδόν οτιδήποτε, αλλά η λειτουργία τους είναι δαπανηρή λόγω του φόρτου εργασίας που απαιτούν για φόρτωση και εκφόρτωση. Βρίσκουν συχνότερη εφαρμογή για προϊόντα αξίας, όπως τα χρώματα και τα φαρμακευτικά προϊόντα. Η ξήρανση με κυκλοφορία αέρα μέσω ακίνητων στοιβάδων στερεών είναι αργή και οι κύκλοι ξήρανσης παρατεταμένοι από 3 έως 48 ώρες ανά παρτίδα. Σε μερικούς ξηραντήρες δίσκων, χρησιμοποιείται ξήρανση εσωτερικής κυκλοφορίας, όμως αυτό δεν είναι οικονομικό ούτε απαραίτητο σε ασυνεχείς ξηραντήρες επειδή η μείωση του κύκλου ξήρανσης δεν ελαττώνει την εργασία που χρειάζεται για κάθε παρτίδα. Ωστόσο, η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να είναι σημαντική.

Οι ξηραντήρες με δίσκους είναι δυνατόν να λειτουργούν σε κενό, συνήθως με έμμεση θέρμανση. Οι δίσκοι αυτοί είναι δυνατό να τοποθετηθούν σε κοίλες μεταλλικές πλάκες που τροφοδοτούνται με υδρατμό ή θερμό νερό ή μπορεί να είναι δυνατόν μόνοι τους να έχουν χώρο για ένα θερμαντικό μέσο. Οι ατμοί από το στερεό απομακρύνονται με έναν εγχυτήρα ή μία αντλία κενού (McCabe, Smith, & Harriott).

Ξηραντήρες με μεταφορέα κόσκινου (screen-conveyor dryers)

Σε έναν μεταφορέα κόσκινου ένα στρώμα πάχους 25 έως 150 mm υλικού προς ξήρανση τροφοδοτείται αργά σε ένα κινούμενο μεταλλικό κόσκινο μέσω ενός μακριού θαλάμου ξήρανσης ή μιας σήραγγας. Ο θάλαμος αποτελείται από μια σειρά ξεχωριστών τμημάτων, κάθε ένα με το δικό του ανεμιστήρα και θερμαντήρα αέρα. Στο τέλος της εισόδου του ξηραντήρα ο αέρας διέρχεται συνήθως προς τα πάνω διαμέσου του κόσκινου και του στερεού. Κοντά στο τέρμα της εξόδου όπου το υλικό είναι ξηρό και μπορεί να είναι κοκκώδες, ο αέρας διέρχεται προς τα κάτω μέσω του κόσκινου. Η θερμοκρασία του αέρα και η υγρασία μπορεί να διαφέρουν στα διάφορα τμήματα, για να δώσουν άριστες συνθήκες ξήρανσης σε κάθε σημείο.

Ο ξηραντήρας με μεταφορέα κόσκινου έχουν τυπικό πλάτος 2 m και μήκος 4-50 m και δίνουν χρόνους ξήρανσης από 5 έως 120 min. Το ελάχιστο μέγεθος κόσκινου είναι περίπου

30 mesh. Τα χονδρόκοκκα υλικά με μορφή λεπιών ή τα ινώδη μπορούν να ξηραθούν με εσωτερική κυκλοφορία χωρίς καμιά προετοιμασία και χωρίς απώλειες υλικού μέσω του κόσκινου. Οι πολλοί και τα συσσωρευμένα στερεά φίλτρων λεπτόκοκκων σωματιδίων θα πρέπει να υποστούν προεπεξεργασία. Τα συσσωματώματα διατηρούν συνήθως το σχήμα τους, ενώ ξηραίνονται και δε δημιουργούν σκόνη δια μέσου του κόσκινου εκτός από μικρές ποσότητες. Κατά διαστήματα γίνεται πρόβλεψη για την ανάκτηση του λεπτόκοκκου υλικού το οποίο διέρχεται από το κόσκινο.

Οι ξηραντήρες με μεταφορέα κόσκινου κατεργάζονται ποικιλία στερεών συνεχώς και με πολύ ήρεμη δράση. Το κόστος είναι λογικό και η οικονομία υδρατμού είναι μεγάλη. Οι ξηραντήρες αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως όταν οι συνθήκες ξήρανσης πρέπει να αλλάζουν αισθητά όσο η υγρασία του στερεού ελαττώνεται (McCabe, Smith, & Harriott).

Πύργοι ξήρανσης (Tower Dryers)

Ο πύργος ξήρανσης περιλαμβάνει μία σειρά κυκλικών δίσκων, που είναι τοποθετημένοι ο ένας πάνω από τον άλλον γύρω από ένα κεντρικό περιστρεφόμενο άξονα. Το στερεό κατόπιν αποξέεται και προχωρεί στον αμέσως κατώτερο δίσκο. Με αυτόν τον τρόπο κινείται το υλικό μέσα από τον ξηραντήρα και από τον πυθμένα του πύργου λαμβάνεται το ξηρό προϊόν. Η ροή των στερεών μπορεί να είναι παράλληλη ή κατά αντιρροή.

Περιστροφικοί ξηραντήρες (Rotary Dryers)

Ένας περιστροφικός ξηραντήρας αποτελείται από ένα περιστροφικό κυλινδρικό κέλυφος, οριζόντιο ή ελαφρά κεκλιμένο προς την έξοδο. Το υγρό υλικό τροφοδοσίας εισέρχεται από το ένα άκρο του κυλίνδρου, ενώ το ξηρό υλικό απομακρύνεται από το άλλο. Καθώς το κέλυφος περιστρέφεται τα εσωτερικά πτερύγια ανυψώνουν τα στερεά και τα κατανέμουν στο εσωτερικό μέρος του κελύφους. Οι περιστροφικοί ξηραντήρες θερμαίνονται με απευθείας επαφή αέρα ή αερίου μαζί με τα στερεά, με θερμά αέρια τα οποία διέρχονται μέσω ενός εξωτερικού μανδύα, ή με υδρατμό ο οποίος συμπυκνώνεται σε σωλήνες τοποθετημένους στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους. Ο τελευταίος τύπος ονομάζεται περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς υδρατμών. Σε έναν άμεσο-έμμεσο περιστροφικό ξηραντήρα το θερμό αέριο περνά πρώτα από το μανδύα και μετά μέσα από το κέλυφος όπου έρχεται σε επαφή με τα στερεά (McCabe, Smith, & Harriott).

Ξηραντήρες κοχλιωτού μεταφορέα (Screw conveyor dryers)

Ένας ξηραντήρας κοχλιωτού μεταφορέα είναι μια συνεχής συσκευή έμμεσης θερμότητας που αποτελείται βασικά από ένα οριζόντιο κοχλιωτό μεταφορέα (ή μεταφορέα δίσκου) σε ένα κυλινδρικό κέλυφος με μανδύα. Το στερεό τροφοδοτείται στο ένα άκρο, μεταφέρεται αργά μέσω της θερμαινόμενης ζώνης και εξέρχεται από το άλλο άκρο. Ο ατμός που εκλύεται απομακρύνεται μέσω σωλήνων που βρίσκονται στην κορυφή του κελύφους. Το κέλυφος έχει διάμετρο 75-600 mm και μήκος μέχρι 6 m. Όταν απαιτείται μεγαλύτερο μήκος τοποθετούνται πολλοί μεταφορείς ο ένας πάνω στον άλλον. Πολλές φορές η μονάδα στον πυθμένα μιας τέτοιας διάταξης είναι ένας ψυκτήρας στο μανδύα του οποίου κυκλοφορεί νερό με άλλο ψυκτικό και χαμηλώνει τη θερμοκρασία των ξηρών στερεών πριν απομακρυνθούν.

Ο ρυθμός περιστροφής του μεταφορέα είναι αργός από 2 έως 30 r/min. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας βασίζονται σε όλη την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους μολονότι το κέλυφος κινείται 10-60 % πλήρες. Ο συντελεστής εξαρτάται από το φορτίο στο κέλυφος και την ταχύτητα του μεταφορέα. Για πολλά στερεά κυμαίνεται από 15 έως 60 W/m².

Οι ξηραντήρες κοχλιωτού μεταφορέα επεξεργάζονται στερεά που είναι πολύ λεπτόκοκκα και πολύ κολλώδη και δεν μπορούν να υποστούν επεξεργασία στους περιστροφικούς ξηραντήρες. Είναι τελείως κλειστοί και επιτρέπουν την ανάκτηση των ατμών του διαλύτη με λίγο ή καθόλου αραίωση από τον αέρα. Όταν εφοδιαστούν με τους κατάλληλους τροφοδότες μπορούν να λειτουργήσουν κάτω από μέτριο κενό. Έτσι είναι προσαρμοσσιμοι στη συνεχή απομάκρυνση και ανακύκλωση πτητικών διαλυτών από στερεά υγραμένα με διαλύτη, όπως στη διεργασία έκπλυσης (McCabe, Smith, & Harriott).

Ξηραντήρες Ρευστοστερεάς Κλίνης (Fluid Bed Dryers)

Πρόκειται για τους ξηραντήρες στους οποίους τα στερεά ρευστοποιούνται από το αέριο ξήρανσης. Αυτού του είδους οι ξηραντήρες βρίσκουν εφαρμογή σε διαφορετικά προβλήματα. Τα σωματίδια ρευστοποιούνται με αέρα ή αέριο σε μια μονάδα θερμής κλίνης. Η ανάμιξη και η μεταφορά θερμότητας είναι ταχύτατες. Η υγρή τροφοδοσία εισάγεται από την κορυφή της κλίνης ενώ το ξηρό προϊόν εξέρχεται από την πλευρά κοντά στον πυθμένα. Ο μέσος χρόνος παραμονής ενός σωματιδίου στον ξηραντήρα είναι τυπικά 30-120 s όταν εξατμίζεται μόνο το επιφανειακό υγρό και μέχρι 15-30 min αν υπάρχει και εσωτερική διάχυση. Τα μικρά σωματίδια θερμαίνονται ουσιαστικά στη θερμοκρασία

εξόδου ξηρού θερμομέτρου εξόδου του αερίου. Κατά συνέπεια τα θερμικά ευαίσθητα υλικά θα πρέπει να ξηραθούν σε ένα σχετικά χλιαρό μέσο αιώρησης. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το αέριο εισόδου θα πρέπει να είναι θερμό, επειδή αναμιγνύεται τόσο γρήγορα, ώστε η θερμοκρασία να είναι ουσιαστικά ομοιόμορφη στη θερμοκρασία εξόδου του αερίου μέσα σε όλη την κλίνη. Αν υπάρχουν λεπτόκοκκα σωματίδια, είτε από την τροφοδοσία είτε λόγω θραύσης των σωματιδίων στη ρευστοποιημένη κλίνη, ίσως να υπάρχει σημαντικός συμπαρασυρμός με το αέριο εξόδου και να χρειάζονται κυκλώνες και φίλτρα με σακούλες για την ανάκτηση των λεπτόκοκκων σωματιδίων.

Μερικοί ορθογώνιοι ξηραντήρες ρευστοστερεάς κλίνης έχουν ξεχωριστά ρευστωμένα τμήματα μέσα από τα οποία κινούνται διαδοχικά τα στερεά από την είσοδο στην έξοδο. Οι ξηραντήρες αυτοί είναι γνωστοί ως ξηραντήρες εμβολικής ροής (plug flow dryers). Στους ξηραντήρες αυτούς ο χρόνος παραμονής είναι σχεδόν ο ίδιος για όλα τα σωματίδια. Οι συνθήκες ξήρανσης μπορεί να αλλάζουν από το ένα τμήμα στο άλλο και πολλές φορές το τελευταίο τμήμα ρευστοποιείται με ψυχρό αέριο, ώστε να ψύξει τα στερεά πριν την αποβολή τους. (Kerr, 2019)

Ξηραντήρες Ακαριαίας Δράσης (Flash Dryers)

Στους ξηραντήρες ακαριαίας δράσης το υγρό κονιοποιημένο στερεό μεταφέρεται για λίγα δευτερόλεπτα σε ένα ρεύμα θερμού αέρα. Η ξήρανση πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της μεταφοράς. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το αέριο προς τα αιωρούμενα σωματίδια είναι μεγάλος και η ξήρανση είναι πολύ γρήγορη. Χρειάζονται 3-4 sec για να εξατμισθεί όλη η υγρασία από το στερεό. Η θερμοκρασία του αερίου είναι υψηλή -συνήα περίπου 65 °C στην είσοδο-αλλά ο χρόνος επαφής είναι τόσο μεγάλος ώστε η θερμοκρασία του στερεού κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σπάνια ξεπερνάει τους 50 °C. Επομένως, η ακαριαία ξήρανση μπορεί να εφαρμοσθεί σε προϊόντα, τα οποία σε άλλου είδους ξηραντήρα θα έπρεπε να ξηραθούν έμμεσα από ένα πολύ ψυχρότερο θερμαντικό μέσο.

Μερικές φορές χρησιμοποιείται και ένας σπαστήρας στο σύστημα ακαριαίας ξήρανσης, για να επιτευχθεί ταυτόχρονα ξήρανση και ελάττωση μεγέθους (McCabe, Smith, & Harriott).

1.7.2 Ξηραντήρες για διαλύματα και πολτούς

Κάποιοι τύποι ξηραντήρων εξατμίζουν διαλύματα και πολτούς μέχρι να γίνουν εντελώς ξηρά με θερμικά μέσα. Οι κυριότεροι τύποι είναι τα *ξηραντήρια με ψεκασμό (spray dryers)*, τα *ξηραντήρια λεπτού υμένου (thin-film-dryers)* και τα *ξηραντήρια τυμπάνου (drum dryers)*.

Ξηραντήρες με ψεκασμό (Spray Dryers)

Σε έναν ξηραντήρα ψεκασμού ένας αραιός πολτός ή ένα υγρό διάλυμα, διασκορπίζεται μέσα σε ένα ρεύμα θερμού αερίου, με μορφή νέφους μικρών σταγονιδίων. Η υγρασία εξατμίζεται γρήγορα από τα σταγονίδια και εγκαταλείπει τα τεμάχια του ξηρού στερεού, τα οποία στη συνέχεια διαχωρίζονται από το ρεύμα του αερίου. Η ροή του ρευστού και του αερίου μπορεί να είναι σε ομορροή, αντιρροή ή και συνδυασμός των δύο μέσα στην ίδια συσκευή.

Τα σταγονίδια σχηματίζονται μέσα σε κυλινδρικό θάλαμο ξήρανσης με ακροφύσια πίεσης ή με ακροφύσια δύο ρευστών ή με δίσκους ψεκασμού μεγάλης ταχύτητας (σε μεγάλους ξηραντήρες). Σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ σημαντικό να μη χτυπήσουν οι σταγόνες ή τα υγρά σωματίδια του στερεού στις στερεές επιφάνειες πριν την ξήρανση και για το λόγο αυτό οι θάλαμοι ξήρανσης είναι αναγκαστικά μεγάλοι. Οι πιο συνηθισμένες διάμετροι κυμαίνονται από 2,5 έως 9 m.

Οι μέσες διάμετροι των σταγόνων σε έναν ξηραντήρα με ψεκασμό κυμαίνονται από 20 μm όταν χρησιμοποιείται εκνεφωτής δίσκου, έως 180 μm όταν χρησιμοποιείται τραχύ ακροφύσιο ψεκασμού. Οι χρόνοι παραμονής κυμαίνονται από 3-6 sec στους ξηραντήρες ομορροής έως 25-30 sec στους ξηραντήρες αντιρροής.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ξηραντήρων με ψεκασμό είναι ο πολύ μικρός χρόνος ξήρανσης ο οποίος επιτρέπει την ξήρανση υλικών εξαιρετικά ευαίσθητων στη θερμότητα και την παραγωγή συμπαγών ή κοίλων σφαιρικών σωματιδίων. Η επιθυμητή συνεκτικότητα, η φαινόμενη πυκνότητα, η εμφάνιση και οι ιδιότητες ροής μερικών προϊόντων, όπως π.χ. τροφών ή συνθετικών απορρυπαντικών, είναι πολύ δύσκολο έως αδύνατο να επιτευχθούν σε οποιοδήποτε άλλο ξηραντήρα. Οι ξηραντήρες με ψεκασμό έχουν επίσης το πλεονέκτημα να παρέχουν από ένα διάλυμα πυκνού ή αραιού πολτού, ξηρό προϊόν σε μια βαθμίδα έτοιμο για συσκευασία. Ένας ξηραντήρας ψεκασμού μπορεί να συνδυάζει τις λειτουργίες ενός εξατμιστήρα, ενός κρυσταλλωτήρα, ενός ξηραντήρα, μιας μονάδας ελάττωσης μεγέθους και ενός ταξινομητή. Όπου είναι δυνατή η χρησιμοποίηση

ενός ξηραντήρα με ψεκασμό, μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά η διαδικασία της παραγωγής στο σύνολο της.

Εάν οι ξηραντήρες με ψεκασμό αξιολογηθούν μόνο σαν ξηραντήρες, δεν έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης. Μεγάλα ποσά θερμότητας χάνονται συνήθως με τα αποβαλλόμενα αέρια. Είναι ογκώδεις, συχνά με συνολικό ύψος 25 m ή και μεγαλύτερο και η λειτουργία τους δεν είναι πάντοτε εύκολη. Η φαινόμενη πυκνότητα του ξηρού στερεού -μια ιδιότητα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα συσκευασμένα προϊόντα είναι συνήθως δύσκολο να διατηρηθεί σταθερή, λόγω του ότι μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές της περιεκτικότητας του τροφοδοτούμενου υλικού σε στερεά, στη θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου και σε άλλες μεταβλητές.

Σε διαλύματα που ξηραίνονται με ψεκασμό, η εξάτμιση από την επιφάνεια των σταγονιδίων οδηγεί στην αρχική εναπόθεση του συστατικού που πρόκειται να διαλυθεί στην επιφάνεια του πριν το εσωτερικό των σταγονιδίων φτάσει σε κατάσταση κορεσμού. Η ταχύτητα διάχυσης του συστατικού που πρόκειται να διαλυθεί από την αρχή μέσα στα σταγονίδια, είναι μικρότερη από τη ροή του νερού στο εσωτερικό προς την επιφάνεια και όλο το διαλυμένο συστατικό συσσωρεύεται στην επιφάνεια. Τα τελικά ξηρά σωματίδια είναι συνήθως κοίλα και το προϊόν από έναν ξηραντήρα ψεκασμού είναι αρκετά πορώδες (Sabarez, 2020; McCabe, Smith, & Harriott).

Ξηραντήρες Λεπτού Υμένα (Thin Film Dryers)

Οι ξηραντήρες λεπτού υμένα είναι ανταγωνιστικοί με τους ξηραντήρες ψεκασμού σε κάποιες περιπτώσεις. Οι ξηραντήρες λεπτού υμένα μπορούν να δεχτούν ως τροφοδοσία ένα υγρό ή μια ιλύ και να παράγουν ένα ξηρό στερεό προϊόν που ρέει ελεύθερα. Συνήθως κατασκευάζονται σε δύο τμήματα, το πρώτο από τα οποία είναι ένας κατακόρυφος, αναδευόμενος ξηραντήρας-εξατμιστήρας. Στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο μέρος του υγρού απομακρύνεται από την τροφοδοσία και το μερικά υγρό στερεό απομακρύνεται και οδηγείται στο δεύτερο τμήμα, στο οποίο το υπολειπόμενο περιεχόμενο υγρού του υλικού από το πρώτο τμήμα μειώνεται στην επιθυμητή τιμή.

Η θερμική απόδοση των ξηραντήρων λεπτού υμένα είναι πολύ μεγάλη. Η απώλεια στερεού είναι μικρή, επειδή το αέριο που θα πρέπει να τραβηχτεί από τη μονάδα είναι λίγο ή και καθόλου. Οι ξηραντήρες αυτοί χρησιμεύουν ιδιαίτερα στην απομάκρυνση και την ανάκτηση των διαλυτών από στερεά προϊόντα. Είναι σχετικά ακριβοί και έχουν κάπως περιορισμένη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Ο αποδεκτός ρυθμός τροφοδοσίας όταν η

τροφοδοσία είναι διαλυμένη σε νερό ή άλλους διαλύτες, κυμαίνεται συνήθως από 100 έως 200 kg/m²h (McCabe, Smith, & Harriott; Kerr, 2019).

Ξηραντήρες Τυμπάνου (Drum Dryers)

Οι ξηραντήρες τυμπάνου αποτελούνται από έναν ή και περισσότερους θερμαινόμενους μεταλλικούς κυλίνδρους στην εξωτερική επιφάνεια των οποίων ένα λεπτό στρώμα υγρού εξατμίζεται μέχρι να ξηρανθεί. Το ξηρό στερεό αποξέεται από τους κυλίνδρους καθώς αυτοί περιστρέφονται αργά.

Σε έναν τυπικό ξηραντήρα τυμπάνου το υγρό τροφοδοτείται μέσω μιας σκάφης ή ενός διάτρητου σωλήνα σε ένα είδος δεξαμενής μεταξύ των δύο κυλίνδρων και πάνω από αυτούς. Η δεξαμενή αυτή είναι στερεωμένη με ακίνητες πλάκες. Η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή προς το υγρό, το οποίο συμπυκνώνεται εν μέρει στο χώρο μεταξύ των κυλίνδρων. Το συμπυκνωμένο υγρό φεύγει από το χώρο της δεξαμενής σαν μια ιξώδης στιβάδα και καλύπτει το υπόλοιπο της επιφάνειας των τυμπάνων. Ουσιαστικά όλο το υγρό εξατμίζεται από το στερεό καθώς τα τύμπανα περιστρέφονται, αφήνουν μια λεπτή στιβάδα ξηρού υλικού, η οποία αποξέεται με λεπίδες πάνω σε μεταφορικές ταινίες που βρίσκονται κάτω από τους κυλίνδρους. Η υγρασία που εξατμίζεται συλλέγεται και απομακρύνεται μέσω ενός απαγωγέα ατμού που βρίσκεται πάνω από τα τύμπανα.

Οι ξηραντήρες διπλού τυμπάνου είναι αποτελεσματικοί για αραιά διαλύματα, για πυκνά διαλύματα πολύ ευδιάλυτων υλικών και για μέτρια πυκνόρρευστους πολτούς. Δεν είναι κατάλληλοι για διαλύματα αλάτων περιορισμένης διαλυτότητας ή για πολτούς τραχιών στερεών, τα οποία κατακάθονται και δημιουργούν υπερβολικές πιέσεις μεταξύ των τυμπάνων.

Οι κύλινδροι ενός ξηραντήρα τυμπάνου έχουν διάμετρο 0,6 έως 3 m και μήκος 0,6 έως 4 m και περιστρέφονται με ταχύτητα 1 έως 10 rpm. Ο χρόνος κατά τον οποίο το στερεό βρίσκεται σε επαφή με το θερμό μέταλλο είναι 6 έως 15 sec, ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος για να καταλήξει σε μικρή αποσύνθεση ακόμα και για προϊόντα ευαίσθητα στη θερμότητα. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κάτω από βέλτιστες συνθήκες είναι μεγάλος από 1200 έως 2000 W/m²°C. Ωστόσο όταν οι συνθήκες είναι αντίστροφες, ο συντελεστής μπορεί να είναι ίσος με το ένα δέκατο αυτών των τιμών. Η δυναμικότητα της ξήρανσης είναι ανάλογη προς την ενεργή επιφάνεια του τυμπάνου, κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5 και 50 kg ξηρού προϊόντος ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας ξήρανσης ανά ώρα (McCabe, Smith, & Harriott; Sabarez, 2020).

Λυοφιλίωση (Ξήρανση υπό κατάψυξη)

Η ξήρανση με κατάψυξη πραγματοποιείται σε δύο στάδια: (1) το προϊόν καταψύχεται και (2) το προϊόν ξηραίνεται με την εξάχνωση του πάγου σε συνθήκες μειωμένης πίεσης. Η λυοφιλίωση έκανε την εμφάνιση της ήδη το 1940 καθώς χρησιμοποιείτο για την παραγωγή ξηρού πλάσματος και προϊόντων αίματος. Αργότερα, τόσα αντιβιοτικά όσο και βιολογικά υλικά παρήχθησαν σε βιομηχανική κλίμακα με τη χρήση αυτής της μεθόδου.

Η ξήρανση με κατάψυξη έχει αναδειχθεί ως μια ιδιαίτερα ελκυστική μέθοδος για την επέκταση της διάρκειας ζωής πολλών προϊόντων τροφίμων. Μάλιστα εμφανίζει δυο βασικά χαρακτηριστικά:

1. Η εικονική απουσία του αέρα κατά τη διεργασία: η χαμηλή θερμοκρασία και η απουσία του αέρα περιορίζουν τις αλλοιώσεις λόγω οξείδωσης και τους χημικούς μετασχηματισμούς των προϊόντων.
2. Ξήρανση σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος: τα προϊόντα που αποσυντίθενται ή υπόκεινται σε αλλαγές στη δομή, την υφή, την εμφάνιση, και/ή στη γεύση ως συνέπεια των υψηλών θερμοκρασιών μπορούν να ξηρανθούν υπό κενό με τη μικρότερη δυνατή καταστροφή.

Η διεργασία πραγματοποιείται σε δύο στάδια: την κατάψυξη και την ξήρανση. Η κατάψυξη θα πρέπει να είναι πολύ γρήγορη ώστε να λαμβάνεται ένα προϊόν με πολύ μικρούς κρυστάλλους και σε μια άμορφη κατάσταση. Ενώ η ξήρανση γίνεται με μείωση της πίεσης ώστε να επιτραπεί η εξάχνωση του πάγου.

Τρεις είναι οι σημαντικές μεταβλητές που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό κατάψυξη: (1) το κενό μέσα στο θάλαμο, (2) η ακτινοβολία που δέχεται το τρόφιμο και (3) η θερμοκρασία του συμπυκνωτήρα. Ο αρχικός ρυθμός ξήρανσης είναι ιδιαίτερα υψηλός λόγω της χαμηλής αντίστασης στις ροές θερμότητας και μάζας. Ωστόσο, η συσσώρευση ενός στρώματος στην επιφάνεια του τροφίμου μειώνει το ρυθμό ξήρανσης. Ένα ξηρό στρώμα που δημιουργείται στην επιφάνεια του τροφίμου λειτουργεί ως μονωτής και περιορίζει τη μεταφορά μάζας του πάγου στην επιφάνεια (Vega-Mercado, Gongora-Nieto, & Barbosa-Canovas, 2001).

1.8 Ωσμωτική αφυδάτωση

Η μεταβολή της συγκέντρωσης του τροφίμου λόγω της εμβάπτισης του σε ένα υπέρτονο διάλυμα είναι γνωστή ως ωσμωτική αφυδάτωση. Η απομάκρυνση του νερού κατά τη διάρκεια της διεργασίας μπορεί να υποβοηθηθεί με τη χρήση κενού. Το σύστημα της

ωσμωτικής αφυδάτωσης αποτελείται από μία δεξαμενή αποθήκευσης όπου παρασκευάζεται το διάλυμα και από μια αντλία για τον έλεγχο της τροφοδοσίας της δεξαμενής. Το προϊόν τοποθετείται στη δεξαμενή όπου το υπέρτονο διάλυμα αντλείται μένα σταθερό ρυθμό (Vega-Mercado, Gongora-Nieto, & Barbosa-Canovas, 2001).

1.9 Καινούργιες μέθοδοι ξήρανσης

Οι τεχνικές αφυδάτωσης που κάνουν χρήση υψηλού κενού, ρευστοποίησης, μικροκυμάτων, ραδιοσυχνοτήτων και της θεωρίας των εμποδίων αποτελούν τις τελευταίες προσεγγίσεις στην συντήρηση των τροφίμων. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές έχει συγκεκριμένες εφαρμογές ανάλογα με τις προδιαγραφές ποιότητας του τελικού προϊόντος αλλά και με βάση τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των πρώτων υλών που υφίστανται επεξεργασία. Οι τεχνολογίες μικροκυμάτων και ραδιοσυχνοτήτων κερδίζουν όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών καθώς εμφανίζουν πλεονεκτήματα στην εξοικονόμηση ενέργειας (Vega-Mercado, Gongora-Nieto, & Barbosa-Canovas, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΤΑΦΥΛΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑΦΙΔΕΣ: ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΞΗΡΑΝΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Προέλευση και Παραγωγή

Το αμπέλι αποτελεί μια από τις σημαντικότερες καλλιέργειες φρούτων ευρέως καθώς τα σταφύλια καταναλώνονται είτε ως φρέσκα φρούτα είτε ως μεταποιημένα προϊόντα. Η πλειονότητα των σταφυλιών που παράγονται παγκοσμίως προορίζονται για την παραγωγή κρασιού και για τη μεταποίηση τους σε προϊόντα, όπως οι μαρμελάδες, τα ζελέ και οι χυμοί (Dhekney, 2016). Τα σταφύλια (*Vitis vinifera* L.) και οι σταφίδες υπάρχουν στη διατροφή των ανθρώπων από την αρχαιότητα, δεδομένου ότι άγριες ποικιλίες σταφυλιών φύονται στη νότια Γαλλία από το 35 000 π.Χ. Οι Φοίνικες και οι Αιγύπτιοι φαίνεται να είναι εκείνοι που άρχισαν να χρησιμοποιούν τη σταφίδα, ενώ προϊστορικές τοιχογραφίες που βρέθηκαν σε περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο, επιβεβαιώνουν τη χρήση της σταφίδας τόσο στη διατροφή όσο και στη διακόσμηση (Williamson & Carughi, 2010). Το αμπέλι διαδόθηκε στην Ευρώπη από τους Ρωμαίους και τους Έλληνες και τον 19^ο ξεκίνησε η καλλιέργεια του και στην Αμερική. Το σταφύλι καλλιεργείται σήμερα σε υποτροπικές και εύκρατες περιοχές σε περισσότερες από 100 χώρες στον κόσμο. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) η παραγωγή των σταφυλιών σε όλο τον κόσμο για το 2013 άγγιξε τους $7,7 \times 10^9$ τόνους (FAO, 2013). Ενώ οι πέντε χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή είναι η Κίνα (περίπου $1,16 \times 10^9$ τόνους), η Ιταλία (περίπου $8,01 \times 10^8$ τόνους), οι ΗΠΑ (περίπου $8,01 \times 10^8$ τόνους), η Ισπανία (περίπου $7,48 \times 10^8$ τόνους) και η Γαλλία (περίπου $5,52 \times 10^8$ τόνους) (Dhekney, 2016).

Το σταφύλι ανήκει στην οικογένεια *Vitaceae* που αποτελείται από 17 γένη και περισσότερα από 1000 είδη. Το γένος *Vitis*, που περιλαμβάνει περίπου 60 είδη που προέρχεται από τη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη, έχει μεγάλη οικονομική σημασία. Αν και περισσότερες από 3000 είναι οι ποικιλίες του γένους *Vitis vinifera* που καλλιεργούνται παγκοσμίως, οι 35 από αυτές αποτελούν περισσότερο από το 50 % της συνολικής έκτασης. Η «*Thompson Seedless*» είναι η πιο δημοφιλής ποικιλία αμπέλου παγκοσμίως για φρέσκα κατανάλωση, ενώ τα «*Chardonnay*», «*Cabernet Sauvignon*», «*Merlot*» και «*Shiraz*» είναι οι πιο δημοφιλείς ποικιλίες κρασιού (Dhekney, 2016).

2.2 Σύσταση Σταφυλιών και Σταφίδων

Τα φρούτα όπως είναι γνωστό είναι πλούσια σε θρεπτικά συστατικά. Το ίδιο ισχύει και για τα αποξηραμένα φρούτα, καθώς θεωρείται ότι περιέχουν συμπυκνωμένα τα διάφορα θρεπτικά συστατικά λόγω της απομάκρυνσης του μεγαλύτερου μέρους της υγρασίας που είχαν ως φρέσκα φρούτα. Η υγρασία που περιέχεται στις σταφίδες κυμαίνεται στα 15,0 g/100g. Αναφορικά με το περιεχόμενο σε πρωτεΐνες αυτό διακυμαίνεται ως 1,25-4,08 g/100g, για τις σταφίδες. Λόγω της φύσης τους οι σταφίδες όπως και όλα τα αποξηραμένα φρούτα περιέχουν ελάχιστες ποσότητες λίπους, οι οποίες κυμαίνονται στα 0,27 g/100g στις σταφίδες ενώ περιέχουν αυξημένες ποσότητες υδατανθράκων. Τα ολικά σάκχαρα των σταφίδων υπολογίζονται περίπου στα 67,3 g/100g στις σταφίδες, αποτελούμενα κυρίως από φρουκτόζη και γλυκόζη. Παράλληλα είναι και πλούσιες σε φυτικές ίνες ενώ ανάλογα με την ποικιλία των σταφυλιών περιέχουν διάφορα ανόργανα συστατικά όπως άλατα καλίου, σιδήρου, μαγνησίου, φωσφόρου, χαλκού και ασβεστίου, βιταμίνες (υδατοδιαλυτές και λιποδιαλυτές) καθώς και άλλα βιοδραστικά μικροσυστατικά. Αποδίδουν στον οργανισμό σημαντικά ποσά ενέργειας (239-333 kcal/100 g για τα ροδάκινα-νεκταρίνια και τα κεράσια-βύσσина, αντίστοιχα).

Στον Πίνακα 1 συνοψίζεται η μέση σύσταση των φρέσκων σταφυλιών και των σταφίδων ανά 100 g προϊόντος σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του USDA (USDA, Food Data Central Search: Grapes Raw).

Περιεχόμενο φρέσκων σταφυλιών και σταφίδων σε φαινολικά συστατικά

Τα σταφύλια είναι, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, πλούσια σε φαινολικά συστατικά. Περιέχουν διάφορες τάξεις φαινολικών συστατικών με απλές δομές, μικρού μοριακού βάρους αλλά και με πολύπλοκες δομές, όπως ολιγομερή και πολυμερείς ταννίνες (Garrido & Borges, 2013). Η τάξη φαινολικών συστατικών που απαντάται περισσότερο στα σταφύλια είναι τα φλαβονοειδή. Στις ερυθρές ποικιλίες απαντώνται ανθοκυανίνες ως χρωστικές, οι οποίες υπάρχουν σε μεγάλες συγκεντρώσεις κυρίως στο φλοιό των φρούτων με εξαίρεση κάποιες ποικιλίες (*teinturier*) που έχουν και χρωματισμένη σάρκα. Οι κύριες κατηγορίες φλαβονοειδών που συμβάλλουν στο ολικό φαινολικό περιεχόμενο των σταφυλιών είναι οι φλαβανόλες (π.χ. κατεχίνη, επικατεχίνη), οι φλαβονόλες (π.χ. καμπεφερόλη, κερκετίνη, μυρισετίνη), που υπάρχουν σε ελεύθερη ή δεσμευμένη μορφή, καθώς και απλές φαινολικές δομές όπως το υδρόξυ-βενζοϊκό οξύ και υδρόξυ-κινναμωμικό οξύ.

Πίνακας 1. Σύσταση φρέσκων σταφυλιών και σταφίδας, % κ.β.

	Φρέσκα Σταφύλια	Σταφίδα
Νερό (g)	80,54	15,43
Ενέργεια (kcal)	69	299
Πρωτεΐνες (g)	0,72	3,07
Ολικά Λιπαρά (g)	0,16	0,46
Τέφρα (g)	0,5	0
Υδατάνθρακες (g)	18,1	79,18
Φυτικές ίνες (g)	0,9	3,7
Ασβέστιο (mg)	10,0	50
Σίδηρος (mg)	0,36	1,88
Μαγνήσιο (mg)	7,0	32
Φωσφόρος (mg)	20	101
Κάλιο (mg)	191	749
Νάτριο (mg)	2	11
Ψευδάργυρος (mg)	0,07	0,22
Χαλκός (mg)	0,127	0,318
Σελήνιο (mg)	0,1	0
Βιταμίνη A RAE(μg)	3	0
β-καροτένιο (μg)	39	0
α-καροτένιο (μg)	1	0
Λουτεΐνη + Ζεαξανθίνη (μg)	72	0
Βιταμίνη B1 (mg)	0,07	0
Βιταμίνη B (mg)	0,07	0,19
Βιταμίνη B (mg)	0,19	1,14
Βιταμίνη B6 (mg)	0,086	0,32
Βιταμίνη B12 (μg)	0	0
Φολλικό οξύ (μg)	2	3
Βιταμίνη C (mg)	3,2	2,3
Βιταμίνη E (mg)	0,19	0,12

Στο ολικό φαινολικό περιεχόμενο των ερυθρών ποικιλιών συμβάλλουν επίσης οι ανθοκυανίνες, οι οποίες είναι ανθοκυανιδίνες, όπως η κυανιδίνη, η δελφινιδίνη, η

πετουνιδίνη, η πεονιδίνη και η μαλβιδίνη συνδεδεμένες με σάκχαρα (συνήθως με τη μορφή 3-O- γλυκοζιτών) ή/και οργανικά οξέα (Garrido & Borges, 2013). Το περιεχόμενο σε ολικές ανθοκυανίνες στα κόκκινα σταφύλια κυμαίνεται από 30 έως 750 mg ισοδυνάμων γλυκοζίτη κυανιδίνης (CyGE) ανά 100g φρούτου (De Pascal-Teresa, Morepo, & Garcia-Viguera, 2010).

Το περιεχόμενο των σταφίδων σε φαινολικά συστατικά μπορεί να κυμαίνεται από 85 mg ισοδυνάμων γαλλικού οξέος (GAE) ανά 100 g για την ξανθιά σταφίδα Τουρκίας (*Thompson Seedless grapes, Vitis vinifera L. cv. sultanina*) έως 1180 mg GAE/100 g για τη λευκή ποικιλία (*Vitis vinifera*) από την Αλγερία (Capanoglu, 2014; Karadeniz, Durst, & Wrolstad, 2000; Meng, et al., 2011; Mishra, Dubey, Mishra, & Barik, 2010; Ouchemoukh, Hachoud, Boudraham, Mokrani, & Louaileche, 2012; Vinson, Zubik, Bose, Samman, & Proch, 2005; Williamson & Carughi, 2010), ενώ η βάση δεδομένων για τα φαινολικά συστατικά δίνει μέση τιμή 1065 mg GAE/100g .

Αναφορικά με το περιεχόμενο σε επιμέρους φαινολικά συστατικά, οι σταφίδες περιέχουν μια ποικιλία φυτοχημικών συστατικών. Τα πιο κοινά είναι οι φλαβονόλες (π.χ. κερκετίνη, καμπφερόλη ως γλυκοζυλιωμένα παράγωγα), οι φλαβανόλες (π.χ. κατεχίνη και επικατεχίνη) και δύο υδρόξυ-κινναμωμικά παράγωγα του τρυγικού οξέος (καφταρικό οξύ και κουταρικό οξύ). Επίσης, απαντώνται, από τα στιλβένια η ρεσβερατρόλη και από τα βενζοϊκά οξέα το πρωτοκατεχικό και το γαλλικό οξύ (Karadeniz, Durst, & Wrolstad, 2000; Meng, et al., 2011; Williamson & Carughi, 2010; Yilmaz & Toledo, 2004; Zhao & Hall, 2008). Οι σταφίδες που παράγονται στην Τουρκία περιέχουν 1,6-58,1 mg/100g, 4,8-10,6 mg/100g και 4,0-15,1 mg/100g φλαβανόλες, φλαβονόλες και φαινολικά οξέα, αντίστοιχα (Capanoglu, 2014; Karadeniz, Durst, & Wrolstad, 2000; Kelebek, Jourdes, Serkan, & Teissedre, 2013), ενώ το περιεχόμενό τους σε προκυανιδίνες κυμαίνεται από 3,3 έως 22,3 mg/100g (Kelebek, Jourdes, Serkan, & Teissedre, 2013). Τέλος, οι σταφίδες περιέχουν υψηλές ποσότητες ισοφλαβονών (59 mg/100g και 124,7 mg/100g δαϊσδεΐνη και γενιστεΐνη, αντίστοιχα (Liggins, et al., 2000).

Περιεχόμενο φρέσκων σταφυλιών και σταφίδων σε βιταμίνες

Τα φρούτα όπως προαναφέρθηκε αποτελούν πηγές βιταμινών αφού περιέχουν υδατοδιαλυτές και λιποδιαλυτές βιταμίνες, τόσο στη φρέσκια όσο και η αποξηραμένη τους μορφή. Το περιεχόμενο σε βιταμίνες των τροφίμων γενικότερα, και ειδικότερα των φρούτων, φαίνεται να διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος και την ποικιλία, την περιοχή

καλλιέργειας, την περίοδο συγκομιδής, την αποθήκευση και την επεξεργασία τους, δηλαδή την ακολουθούμενη πρακτική ξήρανσης (Franke, Custer, Arakaki, & Murphy, 2004).

Τα σταφύλια περιέχουν σημαντικές ποσότητες υδατοδιαλυτών βιταμινών, όπως ασκορβικό οξύ (3,2-6,5 mg/100 g), θειαμίνη (περίπου 0,069 mg/100 g), ριβοφλαβίνη (0,070-1,500 mg/100 g), νιασίνη (0,188 mg/100 g), βιταμίνη B6 (0,086 mg/100 g) και φυλλικό οξύ (2 μg/100 g) (Kervers, et al., 2007) (USDA, Database for the flavonoid content of selected foods, 2015). Επιπλέον, περιέχουν μικρότερες ποσότητες λιποδιαλυτών βιταμινών, όπως βιταμίνη A (3 μg/100 g), E (0,19 mg/100 g) και K (14,6 μg/100 g) (Booth, Sadowski, & Pennington, 1995).

Οι σταφίδες (προϊόν μετά την αποξήρανση σταφυλιών από μαύρες και λευκές ποικιλίες) περιέχουν υδατοδιαλυτές βιταμίνες, ήτοι ασκορβικό οξύ (2,3-4,7 mg/100 g), θειαμίνη (0,106-0,160 mg/100g), ριβοφλαβίνη (0,125-0,142 mg/100g), νιασίνη (0,766-1,615 mg/100g), βιταμίνη B6 (0,174-0,296 mg/100 g), φυλλικό οξύ (5-10 μg/100g) αλλά και λιποδιαλυτές, ήτοι βιταμίνη A (4 μg/100g), E (0,11-0,12 mg/100g) και K (3,3-3,5 μg/100g) (Booth, Sadowski, & Pennington, 1995). Οι τιμές που παρατίθενται από την πρωτογενή βιβλιογραφία είναι σε συμφωνία με εκείνες που δίνει η βάση δεδομένων για το περιεχόμενο των σταφίδων σε βιταμίνες (USDA, Database for the flavonoid content of selected foods, 2015).

2.3 Επιπτώσεις στην υγεία

Το σταφύλι και τα προϊόντα αυτού συμπεριλαμβανομένου του χυμού, του κρασιού και των συμπληρωμάτων διατροφής διαθέτουν μια σειρά ευεργετικών για την υγεία ενώσεων. Οι ευεργετικές ιδιότητες των προϊόντων σταφυλιών αποτελούν αντικείμενο έντονης μελέτης τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Μελέτες έδειξαν ότι οι Γάλλοι είχαν σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα στεφανιαίας νόσου παρά την κατανάλωση τροφών πλούσιων σε λίπη και του κακού τρόπου ζωής, η οποία αποδόθηκε στην τακτική κατανάλωση κόκκινου κρασιού. Η πλειονότητα των οφελών για την υγεία έχουν αποδοθεί σε φυτοχημικά που υπάρχουν στα σταφύλια, τα οποία δρουν σε μια ποικιλία μηχανισμών για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση των φλεγμονωδών αποκρίσεων, παρέχοντας έτσι καρδιο-, νευρο- και χημειοπροστατευτικές ιδιότητες.

Η μέτρια κατανάλωση σταφυλιών μπορεί να προσδώσει προστασία από νευροεκφυλιστικές ασθένειες. Η ρεσβερατρόλη μπορεί να δράσει ως αντιοξειδωτικό στα νευρωνικά κύτταρα, να μειώσει το οξειδωτικό στρες και να αποτρέψει τη δυσλειτουργία και το θάνατο των νευρικών κυττάρων, παρέχοντας τελικά νευροπροστασία. Έχει επίσης

αποδειχθεί ότι αυξάνει την έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με τη μακροζωία. Άλλα φυτοχημικά όπως η κατεχίνη και η γαλλική επικατεχίνη μπορεί να καταστέλλουν τη νευροφλεγμονή και να παρέχουν προστασία έναντι της νόσου του Parkinson, η οποία οφείλεται σε εγκεφαλικούς τραυματισμούς λόγω της παραγωγής ενδογενών νευροτοξινών. Οι ανθοκυανίνες μπορούν επίσης να βελτιώσουν τη γνωστική λειτουργία του εγκεφάλου και να παρέχουν νευροπροστατευτικές ικανότητες μειώνοντας το οξειδωτικό στρες που σχετίζεται με την ηλικία. Η καθημερινή κατανάλωση χυμού σταφυλιών έχει αποδειχθεί ότι παρέχει γνωστικά και μαθησιακά οφέλη πιθανώς λόγω αντιφλεγμονοδών ενώσεων που υπάρχουν στο χυμό. Σε πολλές μελέτες συσχετίζεται η κατανάλωση σταφίδας με ευεργετικές δράσεις για την υγεία. Η κατανάλωση σταφίδας φαίνεται να μειώνει τη μεταγευματική απόκριση ινσουλίνης, να βελτιώνει τα επίπεδα γλυκόζης στο αίμα, να επηρεάζει θετικά οξειδωτικούς βιοδείκτες και να μειώνει τον κίνδυνο εκδήλωσης καρδιαγγειακών παθήσεων. Επιπλέον, η πρόσληψη σταφίδας μειώνει την όρεξη λόγω του έντονου αισθήματος κορεσμού που ακολουθεί την κατανάλωσή της (Anderson & Waters, 2013; Williamson & Carughi, 2010). Μελέτη που έγινε σε παιδιά έδειξε ότι η πρόσληψη σταφίδας μειώνει την όρεξη σε αντίθεση με άλλα γευματίδια (snacks), όπως πατατάκια και μπισκότα, και οδηγεί σε μειωμένη πρόσληψη φαγητού κατά τη διάρκεια μιας περιόδου παρατήρησης 8 ωρών. Η κατανάλωση σταφίδας πριν από κάποιο γεύμα (περίπου 30 g, 3 φορές την ημέρα) φάνηκε να μειώνει σημαντικά τα μεταγευματικά επίπεδα γλυκόζης και αιμοσφαιρίνης A1c στο αίμα υπέρβαρων ατόμων που βρίσκονται σε προδιαβητικό στάδιο ή παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης διαβήτη, συγκρινόμενη με άλλα γευματίδια, χαμηλών θερμίδων, όπως τα μπισκότα (Bays, Weiter, & Anderson, 2015). Συγκριτική μελέτη έδειξε ότι ημερήσια πρόσληψη σταφίδας (56,5 g έως 155,4 g) μπορεί να μειώσει τα επίπεδα λιποπρωτεϊνών χαμηλής πυκνότητας LDL στον ορό (Barnes, Schramm, Keen, Painter, & Waters). Επιπλέον, η πρόσληψη σταφίδας έχει συσχετιστεί με μείωση της συστολικής πίεσης του αίματος (Bays, Weiter, & Anderson, 2015). Όλα τα παραπάνω ευρήματα αποδίδονται, εν μέρει, στο περιεχόμενο των σταφίδων σε φυτικές ίνες, οι οποίες ίσως επηρεάζουν ορμόνες που ρυθμίζουν την όρεξη. Εκχυλίσματα από σταφίδες τύπου Κορινθιακής (Zante) και Sultanas πλούσια σε φαινολικά συστατικά, αλκαλοειδή και άλλα φυτοχημικά συστατικά, επιδεικνύουν αντιβακτηριακή δράση, *in vitro*, έναντι βακτηρίων όπως *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, και *Pseudomonas aeruginosa* (Narendhirakannan, et al., 2012).

Άλλα οφέλη για την υγεία που λαμβάνονται από την κατανάλωση προϊόντων σταφυλιών περιλαμβάνουν καλύτερο έλεγχο στην ισορροπία σακχάρου στο αίμα, ρύθμιση ινσουλίνης

και αυξημένη ευαισθησία στην ινσουλίνη. όλα οδηγούν σε καλύτερη διαχείριση του διαβήτη. Τα σταφύλια ταξινομούνται ως τρόφιμα χαμηλού γλυκαιμικού δείκτη και μπορούν να καταναλωθούν από άτομα που έχουν δυσκολίες στη διατήρηση της ισορροπίας του σακχάρου στο αίμα. Η τακτική κατανάλωση σκούρου χρώματος χυμού σταφυλιών μπορεί να βελτιώσει την ανοσία βελτιώνοντας σημαντικά την κυκλοφορία των κυττάρων παρακολούθησης του ανοσοποιητικού συστήματος που είναι υπεύθυνα για την ανίχνευση παθογόνων και χρησιμεύουν ως η άμεση γραμμή άμυνας στην επίθεση των παθογόνων. Το εκχύλισμα σταφυλιού που χρησιμοποιείται σε πολλά συμπληρώματα διατροφής είναι γνωστό ότι εμφανίζει αντιβακτηριακές ιδιότητες. Η ανάπτυξη αρκετών Gram-θετικών και Gram-αρνητικών βακτηρίων παρεμποδίστηκε σε ποικίλες συγκεντρώσεις εκχυλισμάτων σπόρου, η οποία αποδόθηκε στην παρουσία γαλλικού οξέος στα εκχυλίσματα (Dhekney, 2016).

2.4 Ξήρανση Σταφυλιών

Τα φρέσκα σταφύλια έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και ζάχαρη γεγονός που τα καθιστά πολύ ευαίσθητα σε μικροβιακές αλλοιώσεις κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης ακόμη και αν πραγματοποιείται υπό συνθήκες ψύξης. (Xiao, Pang, Bai, Yang, & Gao, 2010). Η ξήρανση είναι μια ιδιαίτερα διαδεδομένη διεργασία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση της υγρασίας και για τη μείωση της μικροβιακής και ενζυμικής αλλοίωσης. (Xiao H. W., Guest Editorial: Some mitigation strategies for climate change, 2015; Mujumdar, 2014; Xiao, et al., 2009; Xiao, Law, Sun, & Gao, 2014). Επιπλέον, η ξήρανση έχει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς η μείωση του βάρους και του όγκου των προϊόντων οδηγεί στην ταυτόχρονη μείωση του κόστους συσκευασίας, μεταφοράς και αποθήκευσης (Dai, et al., 2015), για αυτό και εφαρμόζεται ευρέως στην περίπτωση των σταφυλιών. Ως μέθοδος δίνει τη δυνατότητα της επεξεργασίας των σταφυλιών σε σταφίδες για την επέκταση της διάρκειας ζωής τους καθώς και σε αφυδατωμένα σταφύλια, τα οποία μετέπειτα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή χυμού και κρασιού (χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα κρασιά Passito, Sauternes, Tokaj, Porto, Pedro Ximénez και Amarone) (Wang, et al., 2016).

Για την επεξεργασία της σταφίδας έχουν διερευνηθεί και εφαρμοστεί προκατεργασίες όπως η χημική προεπεξεργασία, η φυσική προεπεξεργασία και το ζεμάτισμα για την αφαίρεση του στρώματος κεριού από την επιφάνεια του σταφυλιού και την ενίσχυση του ρυθμού ξήρανσης. Η ξήρανση επιδρά σημαντικά στην ποιότητα των σταφίδων και πιο

συγκεκριμένα στην υφή και στα θρεπτικά συστατικά τους (Yang, et al.). Ωστόσο, η φυσική ξήρανση στον ήλιο και η ξήρανση στη σκιά εξακολουθούν να είναι οι πιο κοινές μέθοδοι ξήρανσης που χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες για την ξήρανση των σταφυλιών (Pangawhane & Sawhney, 2002). Παρά την απλή και οικονομική διάταξη της φυσικής ξήρανσης παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα, όπως ο μεγάλος χρόνος ξήρανσης (περισσότερο από δύο ή τρεις εβδομάδες). Η πιθανότητα διαβροχής λόγω κακών καιρικών συνθηκών, η μόλυνση από σκόνη και έντομα, η ανομοιομορφία του προϊόντος και η απώλεια των θρεπτικών συστατικών λόγω την υπερβολικής έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, για την παραγωγή ασφαλών και υψηλής ποιότητας σταφίδων είναι σημαντική η εφαρμογή της κατάλληλης τεχνολογίας και η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών ξήρανσης.

2.4.1 Προκατεργασία των προς ξήρανση σταφυλιών

Κατά την αφυδάτωση των σταφυλιών το πιο βασικό πρόβλημα είναι ο χαμηλός ρυθμός διάχυσης της υγρασίας. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη δομή του λεπτού στρώματος κεριού που καλύπτει την επιφάνεια του σταφυλιού και εμποδίζει το ρυθμό διάχυσης της υγρασίας (Jairaj, Singh, & Srikant, 2009). Το δέρμα του σταφυλιού αποτελείται από μια επιδερμίδα και από έξι έως δέκα στρώματα πυκνών τοιχωμάτων. Η εξωτερική επιδερμίδα καλύπτεται από μη ζώντα στρώματα, δηλαδή επιδερμίδα, κερί και κολυχυματικά υποδερμικά κύτταρα. Το κερί στο δέρμα των σταφυλιών χρησιμεύει ως προστατευτικό φράγμα έναντι παθογόνων μικροοργανισμών και προστατεύει το σταφύλι από την υπεριώδη ακτινοβολία και τους τραυματισμούς. Ωστόσο, η παρουσία κεριού στην επιδερμίδα του σταφυλιού αποτελεί εμπόδιο στην ξήρανση και κατά συνέπεια πρέπει να αφαιρεθεί προτού ξεκινήσει η διεργασία. Για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες προεπεξεργασίες συμπεριλαμβανομένων χημικών και φυσικών προκατεργασιών και του ζεματίσματος για την απομάκρυνση του στρώματος κεριού πριν από τη διαδικασία της ξήρανσης. Η προεπεξεργασία έδειξε σημαντική αύξηση του ρυθμού ξήρανσης με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση του χρόνου ξήρανσης ώστε τα σταφύλια να φτάσουν στην ασφαλή περιεκτικότητα υγρασίας που απαιτείται για αποθήκευση.

Το κύριο συστατικό της χημικής προκατεργασίας περιέχει δύο ή τρία διαλύματα όπως NaOH , K_2CO_3 , NaHCO_3 , ελαιόλαδο και ελαϊκό αιθυλεστέρα σε μια ορισμένη αναλογία. Η χημική προκατεργασία με εμβάπτιση των σταφυλιών θα μπορούσε να διαλύσει το δέρμα τους και να αυξήσει τη διαπερατότητα τους στο νερό, βελτιώνοντας έτσι τον ρυθμό ξήρανσης. Οι χημικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανική παραγωγή

(Doymaz, 2006). Ωστόσο, αυτή η μέθοδος εμφανίζει και ορισμένα μειονεκτήματα όπως τα υπολείμματα χημικών πρόσθετων στις σταφίδες, τα οποία μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση και στην ασφάλεια αυτών. Ακόμη αυτό σε πολλές περιπτώσεις οδηγεί σε υπέρβαση των ορίων των χημικών πρόσθετων, με βάση τη νομοθεσία (Wang, et al., 2016). Προκειμένου να αποφευχθούν τα χημικά υπολείμματα κατά την προεπεξεργασία, έχουν αναπτυχθεί ορισμένες φυσικές προεπεξεργασίες για την αφαίρεση του στρώματος κεριού από την επιφάνεια του σταφυλιού. Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από τους Di Mateo et al και τους Adiletta et al έδειξαν ότι η προκατεργασία της φλούδας των σταφυλιών με ήπια τριβή είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης και τη μείωση του χρόνου ξήρανσης σε σύγκριση με τα δείγματα που δεν είχαν υποστεί επεξεργασία. Άλλες έρευνες με παρόμοιες τακτικές που χρησιμοποίησαν έναν αναδευτήρα με λειαντικά φύλλα έδειξαν και πάλι αύξηση του ρυθμού ξήρανσης, μείωση του χρόνου ξήρανσης και αύξηση του χρόνου επανυδάτωσης. Παράλληλα, βέβαια αυτές οι μέθοδοι είχαν και κάποια μειονεκτήματα όπως το σκούρο καφέ χρώμα των σταφίδων. Τέλος, έγιναν και δοκιμές για την προεπεξεργασία των σταφυλιών με τη βοήθεια μικροκυμάτων και ωμική θέρμανση. Και οι δύο αυτές μέθοδοι βελτίωσαν σημαντικά την ταχύτητα ξήρανσης (Wang, et al., 2016).

Τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία (PEF) και οι υπέρηχοι είναι δύο ακόμα φυσικές μέθοδοι προκατεργασίας που έχουν δοκιμαστεί σε γεωργικά προϊόντα. Μάλιστα όταν η μέθοδος PEF εφαρμόστηκε σε δείγματα σταφυλιών φαίνεται να οδήγησε σε 20% μείωση του χρόνου ξήρανσης σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δείγματα που δεν είχαν υποστεί προκατεργασία. Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόστηκε ευρέως στην εκχύλιση συστατικών από σταφύλια και υποπροϊόντα τους.

Τέλος, μια ακόμη προκατεργασία που χρησιμοποιείται ευρέως είναι αυτή του ζεματίσματος, η οποία εφαρμόζεται για την αδρανοποίηση των ενζύμων, τη διατήρηση του χρώματος και την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης. Θεωρείται πιθανόν η πιο φθηνή μέθοδος προκατεργασίας και να ευθύνεται για απώλεια μεγάλης ποσότητας θρεπτικών συστατικών (Wang, et al., 2016).

2.4.2 Διαφορετικές μέθοδοι ξήρανσης και οι επιπτώσεις τους στην ξήρανση σταφυλιών

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επέκταση της διάρκειας ζωής των σταφυλιών και για τη μείωση των οικονομικών απωλειών είναι η ξήρανση. Σκοπός της διεργασίας της ξήρανσης είναι η βελτίωση του ρυθμού αυτής και η λήψη επιθυμητών προϊόντων. Σήμερα

τρεις είναι η κύριοι μέθοδοι ξήρανσης που χρησιμοποιούνται συχνά για την ξήρανση σταφυλιών: φυσική ξήρανση στον ήλιο, ξήρανση στη σκιά και μηχανική ξήρανση. (Wang, et al., 2016).

Ως παραδοσιακή μέθοδος η φυσική ξήρανση του σταφυλιού χρονολογείται πίσω στο 1490 π.Χ. στην Ελλάδα ενώ ακόμη και σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας (Jairaj, Singh, & Srikant, 2009).

Φυσική ξήρανση στον ήλιο

Αυτό τον είδος ξήρανσης πραγματοποιείται ανοιχτά στον ήλιο. Τα σταφύλια απλώνονται είτε στο έδαφος, είτε σε μια πλατφόρμα σε ένα λεπτό στρώμα που εκτίθεται απευθείας στον ήλιο ή σε ένα πλαστικό φύλλο. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης στον ήλιο, ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να διεισδύσει στο υλικό και να απορροφηθεί από το ίδιο το σταφύλι, παράλληλα αυξάνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του υλικού και στην επιφάνεια του με αποτέλεσμα να αυξηθεί η μεταφορά θερμότητας και να ενισχυθεί η εξάτμιση της υγρασίας. Πρακτικά δεν απαιτείται κάποιο πάγιο κεφάλαιο επένδυσης παρά μόνο κόστος εργασίας, το οποίο είναι ιδιαίτερα χαμηλό. Ωστόσο, ο χρόνος ξήρανσης είναι αρκετά μεγάλος και φτάνει τις 8-10 ημέρες, ενώ αυξάνεται ακόμα παραπάνω σε μέρες συννεφιάς. Υπάρχει παράλληλα αρκετά μεγάλη πιθανότητα φθοράς των σταφυλιών λόγω βροχής ή εντόμων. Ακόμα, η απευθείας έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και σε διαφορετικές θερμοκρασίες έχει ως απόρροια την αλλοίωση της εμφάνισης, του αρώματος και τη διαφορά στο χρώμα των σταφυλιών. Η αποδοχή των σταφίδων ως ασφαλή και ποιοτικά προϊόντα βασίζεται ιδιαίτερα στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και πιο συγκεκριμένα στο χρώμα και στο άρωμα αυτών.

Η δυσκολία ελέγχου της ξήρανσης, του χρόνου ξήρανσης, η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες, το υψηλό κόστος εργασίας, η απαίτηση μεγάλης έκτασης, η προσβολή από έντομα, σκόνη και άλλα ξένα υλικά είναι μερικά από τα μειονεκτήματα που περιόρισαν την εφαρμογή της ξήρανσης στον ήλιο (Togrul & Pehlivan, 2004).

Ξήρανση με ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια λόγω των πλεονεκτημάτων της αφθονίας και της δωρεάν διάθεσης σε πολλές χώρες χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή θερμότητας και ενέργειας. Οι διάφοροι τύποι ηλιακής ξήρανσης που χρησιμοποιούνται για την ξήρανση των σταφυλιών

είναι ο άμεσος, ο έμμεσος και ο μικτός τύπος ξήρανσης, Για κάθε τύπο η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται είτε ως η μόνη πηγή θέρμανσης είτε ως συμπληρωματική. Για την ξήρανση των σταφυλιών, η άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία είναι υπεύθυνη για την κακή ποιότητα λόγω της ευαισθησίας του ασκορβικού οξέος και των πολυφαινολών, στο φως και του ανεπιθύμητου αποχρωματισμού. Επομένως, οι ηλιακοί ξηραντήρες έμμεσου και μικτού τύπου είναι πιο κατάλληλοι για τη σταφίδα (Wang, et al., 2016).

Ξήρανση υπό σκιά

Η ξήρανση στη σκιά είναι επίσης ένα είδος φυσικής μεθόδου ξήρανσης που χρησιμοποιείται ευρέως για την ξήρανση των σταφυλιών στην Κίνα, την Αυστραλία και την Ινδία. Η ξήρανση στη σκιά είναι επίσης γνωστή ως φυσικός ξηραντήρας με ράφια, όπου ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι η κύρια πηγή θερμότητας που απαιτείται για την ξήρανση. Η σταφίδα που παράγεται με αυτόν τον τρόπο έχει καλύτερο χρώμα σε σχέση με αυτή που παράγεται με ξήρανση στον ήλιο καθώς αποφεύγεται η άμεση επαφή με τον ήλιο. Ωστόσο, δεν στερείται και αυτή μειονεκτημάτων, όπως ο μεγάλος χρόνος ξήρανσης, το κόστος εργασίας και οι κακές συνθήκες υγιεινής (Wang, et al., 2016).

Μηχανική ξήρανση

Με την ταχεία ανάπτυξη της μηχανοποίησης στη γεωργική παραγωγή, η μηχανική ξήρανση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην παραγωγή σταφίδας λόγω της ταχείας, ελεγχόμενης, χαμηλής εργασίας και της υψηλής ποιότητας των προϊόντων της. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως μέσο θέρμανσης, σε συνδυασμό με κάποιο ξηραντήριο που λειτουργεί με θερμική ενέργεια έχουν αναπτυχθεί ευρέως. Εκτός αυτού, η ξήρανση με μικροκύματα, η ξήρανση με παλμικό κενό, καθώς και ο συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης χρησιμοποιούνται επίσης για την ξήρανση σταφυλιών. Οι ξηραντήρες με αντλία θερμότητας έχουν επίσης αναπτυχθεί λόγω της βελτιωμένης απόδοσης, του ακριβούς ελέγχου των συνθηκών ξήρανσης, της καλύτερης ποιότητας του προϊόντος και της αυξημένης απόδοσης. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί για τη χρήση των ξηραντήρων με αντλία θερμότητας, όπως το υψηλό κόστος συντήρησης, η διαρροή ψυκτικού που προκαλεί ρύπανση του περιβάλλοντος και το αρχικό κόστος κεφαλαίου (Wang, et al., 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

3.1 Γενικά Στοιχεία

Ως υπολογιστική ρευστοδυναμική ή αλλιώς CFD (Computational Fluid Dynamics), ορίζεται η ανάλυση συστημάτων στα οποία γίνεται ροή ρευστού, μεταφορά θερμότητας όπως επίσης και άλλα φαινόμενα συμπεριλαμβανομένων των χημικών αντιδράσεων με τη χρήση προσομοίωσης. Η μέθοδος αυτή εμφανίζει ένα ευρύ φάσμα τόσο βιομηχανικών όσο και μη βιομηχανικών εφαρμογών. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών είναι:

- Στην αεροδυναμική των αεροσκαφών: ανύψωση και μεταφορά
- Στην υδροδυναμική των πλοίων
- Σε μονάδες παραγωγής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα για την καύση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης
- Στη μηχανική χημικών διεργασιών: ανάμιξη, διαχωρισμός και χύτευση πολυμερών.
- Στην περιβαλλοντική μηχανική: διανομή ρύπων και λυμάτων.
- Στη μετεωρολογία για την πρόγνωση του καιρού.
- Στη βιοϊατρική μηχανική: το αίμα ρέει μέσω αρτηριών και φλεβών (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Η φυσική, η ροή των ρευστών, η χρήση υπολογιστών, μαθηματικών και μηχανικής είναι τα στοιχεία που συνδυάζονται στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD). Πρόκειται για μία μέθοδο επίλυσης των Navier-Stokes εξισώσεων, όπου ικανοποιούνται η διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός συστήματος ρευστών. Το CFD είναι μία μέθοδος ικανή να συμπληρώσει ή ακόμη και να αντικαταστήσει υπάρχουσες τεχνικές ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η κλίμακα, το κόστος και οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι δρουν απαγορευτικά για την πειραματική επίλυση των προβλημάτων. Μάλιστα, η μοντελοποίηση των προβλημάτων ροής χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις επικύρωσης των αποτελεσμάτων και βελτίωσης αυτών όπως ορίζεται από τους επιχειρηματικούς και νομοθετικούς οδηγούς.

Την πρώτη εμφάνιση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής θα μπορούσαμε να τη χρονολογήσουμε ήδη στις αρχές του 1900. Πολύ ισχυρές χαρακτηρίστηκαν οι αριθμητικές τεχνικές που αναπτύχθηκαν με σκοπό την απεικόνιση της κίνησης των ρευστών, από τους Richardson και Courant το 1910 και τους Friedrichs και Lewy το 1928, καθώς κατάφεραν επιτυχώς να περιγράψουν αριθμητικά όλους τους τύπους των ροών. Μάλιστα, τη δεκαετία του 1960, η αεροδιαστημική βιομηχανία χρησιμοποίησε τεχνικές υπολογιστικής

ρευστοδυναμικής (CFD) στο σχεδιασμό, την έρευνα και ανάπτυξη και την κατασκευή αεροσκαφών και κινητήρων. Πιο πρόσφατα, η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό κινητήρων εσωτερικής καύσης, θαλάμων καύσης, αεριοστροβίλων και κλιβάνων. Στις μέρες μας το CFD καθίσταται όλο και πιο απαραίτητο εργαλείο στο σχεδιασμό βιομηχανικών προϊόντων και διαδικασιών (Versteeg & Malalasekera, 2007; Shang, 2004). Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) έχει εξελιχθεί ιδιαίτερα και πλέον αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο της μηχανικής των ρευστών. Δίνει τη δυνατότητα της λεπτομερούς ανάλυσης της ροής των ρευστών και των επιδράσεων αυτής στον βιομηχανικό εξοπλισμό. Τα περισσότερα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής αξιοποιούνται κυρίως για τη βελτίωση της απόδοσης, τη μεγαλύτερη αξιοπιστία, την εφαρμογή των διαδικασιών σε μεγαλύτερη κλίμακα και την αύξηση της παραγωγής χωρίς αυτό να έχει επίπτωση στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ορισμένοι μηχανικοί μάλιστα τη χρησιμοποιούν προκειμένου να εξετάσουν και να αναλύσουν νέα συστήματα με σκοπό να αποφασίσουν ποια και πόσα τεστ επικύρωσης πρέπει να εκτελεστούν.

3.2 Πλεονεκτήματα του CFD

Το επενδυτικό κόστος απόκτησης του λογισμικού CFD θα μπορούσε πολύ εύκολα να χαρακτηριστεί ως υψηλό, ωστόσο είναι αρκετά χαμηλό συγκρινόμενο με το κόστος μιας υψηλής ποιότητας πειραματικής εγκατάστασης. Πέραν του κόστους, υπάρχουν και άλλα πλεονεκτήματα του CFD σε σχέση με προσεγγίσεις που βασίζονται στον πειραματικό σχεδιασμό των συστημάτων ροής των ρευστών.

- Μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης και του κόστους των νέων σχεδίων.
- Δυνατότητα μελέτης συστημάτων όπου τα πειράματα είναι δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να εκτελεστούν (π.χ. πολύ μεγάλα συστήματα).
- Δυνατότητα μελέτης συστημάτων που λειτουργούν κάτω από επικίνδυνες συνθήκες ή ακόμη και εκτός των ορίων λειτουργίας (π.χ. μελέτες ασφάλειας και σενάρια ατυχημάτων).
- Υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας των αποτελεσμάτων.
- Προσφέρει την εύκολη και λεπτομερή κατανόηση της ροής, της απώλειας βάρους, της μεταφοράς μάζας και θερμότητας, του διαχωρισμού των σωματιδίων κ.α. Αυτό είναι λογικό να δίνει μια πλήρη και ορθή κατανόηση του τι συμβαίνει σε ένα σύστημα ή μια διαδικασία.

- Δίνει την ευκαιρία μελέτης διαφορετικών γεωμετριών χωρίς τη χρήση εργαστηριακών δοκιμών, γεγονός που μειώνει τόσο το χρόνο όσο και το κόστος ανάλυσης.
- Μπορεί να απαντήσει σε ανοιχτές ερωτήσεις (π.χ. τι θα συνέβαινε εάν...) σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Δίνει απαντήσεις σε προβλήματα, ανεξάρτητα της κλίμακας του εξοπλισμού, καθώς τα μοντέλα βασίζονται σε θεμελιώδεις νόμους της φυσικής που είναι ανεξάρτητα της κλίμακας.
- Είναι ιδανικό για την προσομοίωση συνθηκών, στις οποίες είναι αδύνατο να ληφθούν μετρήσεις (π.χ. πολύ υψηλές θερμοκρασίες ή επικίνδυνο περιβάλλον).
- Το γεγονός ότι είναι ένα ενεργό εργαλείο ανάλυσης μπορεί να εντοπίσει τη βασική αιτία του προβλήματος σχεδιασμού και όχι μόνο να αξιολογήσει τα αποτελέσματα (Versteeg & Malalasekera, 2007; Xia & Sun, 2002).

3.3 Μειονεκτήματα του CFD

Ωστόσο, αν και τα πλεονεκτήματα της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής είναι πολλά εντοπίζονται και ορισμένες αδυναμίες:

- Τα τρόφιμα διαφέρουν ιδιαίτερα σε ότι αφορά τις ρεολογικές και θερμοφυσικές ιδιότητες, συγκρινόμενα τόσο μεταξύ τους όσο και με τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται ως αντικείμενο μελέτης στην υπολογιστική ρευστοδυναμική. Μπορούν να χαρακτηριστούν ως μίγματα μακροθρεπτικών συστατικών (πρωτεϊνών, υδατανθράκων, λίπους και νερού) με αποτέλεσμα τα πακέτα CFD που είναι διαθέσιμα στην αγορά να μην δύνανται να προσομοιάσουν τέτοιου είδους διεργασίες με μεγάλη ακρίβεια καθώς χρειάζεται μεγαλύτερη ανάλυση των φυσικοχημικών και μικροβιολογικών δεδομένων. Η επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων αντλεί τα δεδομένα της από φυσικά μοντέλα πραγματικών διεργασιών, το οποίο καθιστά αναπόφευκτη την μεταφορά των αβεβαιοτήτων της μοντελοποίησης στην προσομοίωση. Παράλληλα αυτό φανερώνει και ακόμα μία αδυναμία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, την απαίτηση για επικύρωση των αποτελεσμάτων από πειραματικά δεδομένα.
- Η επίλυση εξισώσεων με τη χρήση υπολογιστή εισάγει αριθμητικά σφάλματα, σφάλματα περικοπής λόγω προσέγγισης στα αριθμητικά μοντέλα, σφάλματα στρογγυλοποίησης λόγω της περιορισμένης μνήμης του υπολογιστή.

- Η ακρίβεια των λύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές και οριακές συνθήκες που παρέχονται στο αριθμητικό μοντέλο από το χρήστη.
- Το κόστος αγοράς των πακέτων CFD αλλά και των κατάλληλων υπολογιστών με υψηλή ταχύτητα επεξεργαστή είναι ιδιαίτερα υψηλό (Raman, Dewang, & Raghuwanshi, 2018; Xia & Sun, 2002).

3.4 Εμπορικά Πακέτα CFD

Τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές έχουν εστιάσει ιδιαίτερα στη βελτίωση των κωδίκων της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η εξέλιξη αυτή έχει καταστήσει τα πακέτα CFD απαραίτητα εργαλεία για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη των διεργασιών (Xia & Sun, 2002; Norton & Sun, 2019).

ANSYS-CFX

Πρόκειται για μία κατηγορία λογισμικών, στην οποία υπάγονται τα CFX-4, CFX-5 (γενικής χρήσης) και τα CFX-TASCFLOW και CFX-PROMIXUS που χρησιμοποιούνται για το μηχανολογικό σχεδιασμό και για το σχεδιασμό μίξερ. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για το σχεδιασμό της επεξεργασίας τροφίμων (Xia & Sun, 2002; Norton & Sun, 2019).

ANSYS-FLUENT

Πρόκειται για ένα από τα σημαντικότερα εμπορικά λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στον κόσμο. Ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών μπορούν να μελετηθούν με τη χρήση των κωδίκων FLUENT, FIDAP και POLYFLOW. Μάλιστα το λογισμικό FLUENT έχει χρησιμοποιηθεί και από πολλούς ερευνητές σε προβλήματα όπως η βελτιστοποίηση των συνθηκών ροής αέρα κατά την ψύξη και αποθήκευση προϊόντων κρέατος (Xia & Sun, 2002; Norton & Sun, 2019).

PHOENICS

Το PHOENICS χαρακτηρίζεται ως ένα πακέτο λογισμικού με ευρεία χρήση. Έχει τη δυνατότητα να εκτελείται σε όλες τις πλατφόρμες, τους υπολογιστές και τα λειτουργικά συστήματα. Πολλές είναι οι εταιρείες που έχουν βασίσει την ερευνητική τους ανάπτυξη σε αυτό το λογισμικό. Μάλιστα, ερευνητές έχουν μελετήσει προβλήματα όπως η ροή του αέρα σε ένα ξηραντήριο και η αύξηση της θερμοκρασίας σε κατεψυγμένα τρόφιμα. Το

PHOENICS, μπορεί να επιλύσει εξισώσεις μάζας, ορμής και ενέργειας σε ένα πεπερασμένο σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε σταθερή ή μη σταθερή κατάσταση, ενώ δεν παρουσιάζει περιορισμούς σε ότι αφορά τη γεωμετρία του συστήματος (Xia & Sun, 2002; Norton & Sun, 2019).

STAR-CD

Το STAR-CD είναι ένας εμπορικός κώδικας που δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να αντιμετωπίζει βιομηχανικά προβλήματα πολύπλοκων γεωμετριών χάρη στα μη δομημένα υβριδικά πλέγματα που αξιοποιεί σε συνδυασμό με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων επίλυσης συστημάτων πεπερασμένου όγκου. Όπως και οι προηγούμενοι κώδικες και αυτός χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία (Xia & Sun, 2002; Norton & Sun, 2019).

COMSOL MULTIPHYSICS

Το Comsol Multiphysics είναι μια πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση διεργασιών στη βιομηχανία. Ακολουθεί όλα τα βήματα για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα ο χρήστης καθορίζει τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και έχει τη δυνατότητα να εξαγάγει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα όπως επίσης και να παράξει μοντέλα επίλυσης και μετα-επεξεργασίας.

3.5 Αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) είναι μία μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ρευστών, η οποία βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes), σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, σε γεωμετρία που σχεδιάζεται από το χρήστη στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την ασυμπίεστη ροή ενός ρευστού.

Αρχή Διατήρησης της μάζας

Η Αρχή διατήρησης της μάζας υποδηλώνει ότι η ροή μάζας διαμέσου ενός ροϊκού στοιχείου παραμένει σταθερή και εκφράζεται από την Εξ. 23:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(v)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

Αρχή Διατήρησης της ορμής-Εξισώσεις Navier-Stokes

Η Αρχή Διατήρησης της Ορμής (Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα) ορίζει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται στο ρευστό.

$$\text{Στη διεύθυνση } x: \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (24)$$

$$\text{Στη Διεύθυνση } y: \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (25)$$

$$\text{Στη διεύθυνση } z: \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (26)$$

(Παπαϊωάννου, 2002).

Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας

Η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας (1^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής) όπου ο ρυθμός μεταβολής της Ενέργειας ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που ανταλλάσσει το ρευστό με το περιβάλλον και του Μηχανικού Έργου που παράγει ή παραλαμβάνει το ρευστό.

$$\rho C_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \left\{ \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} + \dot{q} \quad (27)$$

Ο αριστερός όρος αντιπροσωπεύει την εκροή θερμότητας. Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά αντιπροσωπεύει την καθαρή εισροή θερμότητας λόγω αγωγής. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την απώλεια θερμότητας λόγω των ιξωδών τάσεων. Ο τρίτος όρος είναι ένας γενικός όρος της πηγής που μπορεί να αντιπροσωπεύει κάποια πηγή θερμότητας λόγω αντίδρασης, ακτινοβολίας ή άλλης διαδικασίας.

Στην παραπάνω εξίσωση, η ενέργεια E , σχετίζεται με την ενθαλπία h , μέσω της παρακάτω σχέσης που περιλαμβάνει τα μεγέθη της πίεσης p και της ταχύτητας U :

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \quad (28)$$

Για τις ασυμπίεστες ροές, στις οποίες μάλιστα γίνεται και ανάμιξη στοιχείων, η στατική ενθαλπία h εκφράζεται μέσω των κλασμάτων μάζας m_j και της ενθαλπίας h_j των επιμέρους ειδών, όπως φαίνεται στην Εξ. 29.

$$h = \sum_{j'} m_{j'} h_{j'} + \frac{p}{\rho} \quad (29)$$

Αντίστοιχα, η ενθαλπία του κάθε είδους είναι μια θερμοκρασιοεξαρτώμενη συνάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του.

$$h_{j'} = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j'} dT \quad (30)$$

Καθώς η ενθαλπία προσδιορίζεται με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων, αντίστοιχα και η θερμοκρασία μπορεί εύκολα να εξαχθεί από την τελευταία. Αυτή η διαδικασία επίλυσης ωστόσο δεν είναι απλή καθώς η θερμοκρασία είναι η μεταβλητή ολοκλήρωσης. (Marshall & Bakker, 2002)

Τέλος, για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι απαραίτητη και η χρήση της καταστατικής εξίσωσης:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (31)$$

Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης

Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα μέσω του CFD, ως πρώτο βήμα ορίζεται ο διαχωρισμός του χώρου ροής σε δίκτυο κελιών (grid), όπου διακριτοποιούνται οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο. Με τον τρόπο αυτό οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε εξισώσεις διαφορών, δηλαδή αλγεβρικές εξισώσεις, που επιλύονται διαδοχικά μέσα στα τρισδιάστατα κελιά του πλέγματος. Το σχήμα διακριτοποίησης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους, η οποία επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η επιλογή του σχήματος διακριτοποίησης εξαρτάται από τον τύπο της ροής, την πυκνότητα του πλέγματος καθώς και από την ίδια την συμπεριφορά του σχήματος. Για την επίλυση των μοντέλων χρησιμοποιούνται ευρέως οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων καθώς και μέθοδοι πεπερασμένων όγκων (Wang & Sun, 2003).

3.6 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων CFD

Οι CFD κώδικες είναι δομημένοι γύρω από τους αριθμητικούς αλγορίθμους που είναι ικανοί να αντιμετωπίσουν προβλήματα ροής ρευστού. Προκειμένου να παρέχεται εύκολη πρόσβαση στη δύναμη επίλυσης, όλα τα εμπορικά πακέτα CFD περιλαμβάνουν εξελιγμένες διεπαφές για την εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος και την εξέταση των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου όλοι οι κώδικες περιέχουν τρία κύρια στοιχεία: (i) έναν προ-επεξεργαστή, (ii) έναν επιλυτή και (iii) έναν μετα-επεξεργαστή.

Προεπεξεργασία είναι η εισαγωγή ενός προβλήματος ροής σε ένα πρόγραμμα CFD μέσω μιας φιλικής προς το χρήστη διεπαφής και της επακόλουθης μετατροπής αυτής της εισόδου σε μορφή κατάλληλη για χρήση από τον επιλυτή. Ο χρήστης σε αυτό το στάδιο:

- Ορίζει τη γεωμετρία της περιοχής ενδιαφέροντος
- Δημιουργεί το πλέγμα -η υποδιαίρεση του τομέα σε έναν αριθμό μικρότερων, μη επικαλυπτόμενων: ένα πλέγμα κελιών.
- Επιλέγει τα φυσικά και χημικά φαινόμενα που πρέπει να μοντελοποιηθούν.
- Ορίζει τις ιδιότητες των ρευστών.
- Προσδιορίζει τις κατάλληλες οριακές συνθήκες στα κελιά που συμπίπτουν ή αγγίζουν τα όρια του domain.

Η ακρίβεια της λύσης ενός προβλήματος ροής εξαρτάται τόσο από τον αριθμό όσο και από την κατανομή των κελιών του πλέγματος. Κατά συνέπεια γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αύξηση των κελιών συνεπάγεται και μεγαλύτερη ακρίβεια της λύσης. Στις περιοχές ροής όπου υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις θα πρέπει να κατασκευάζεται ένα πιο πυκνό πλέγμα. Μάλιστα μεγάλη πρόκληση αποτελεί η ανάπτυξη κωδίκων CFD που να έχουν τη δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής του πλέγματος. Αυτού του είδους τα προγράμματα θα βελτιώσουν αυτόματα το πλέγμα και κατά συνέπεια και τη λύση του προβλήματος. Μέχρι σήμερα ωστόσο η καταλληλότητα του πλέγματος βασίζονται στις γνώσεις του χρήστη και στην επιθυμητή ακρίβεια που επιθυμεί να πετύχει (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Η επίλυση του συστήματος επιτυγχάνεται με επαναληπτική μέθοδο, αφού οριστεί κατά την εκκίνηση της επίλυσης το χρονικό βήμα (time step). Στόχος της επίλυσης είναι η σύγκλιση του προβλήματος στην επιθυμητή λύση. Ως κριτήριο σύγκλισης επιλέγεται η ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων (Xia & Sun, 2002; Versteeg & Malalasekera, 2007; Ardejani, Baafi, Panahi, Singh, & Shokri, 2011).

Το τελικό στάδιο της προσομοίωσης αποτελείται από την μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σκοπός είναι η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, ώστε μέσω της ανάλυσης τους να εξαχθούν τα απαιτούμενα συμπεράσματα (Xia & Sun, 2002; Versteeg & Malalasekera, 2007; Ardejani, Baafi, Panahi, Singh, & Shokri, 2011).

3.7 Εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη Βιομηχανία Τροφίμων

Πολλές μέθοδοι επεξεργασίας τροφίμων, όπως η ψύξη, η ξήρανση, το ψήσιμο, η ανάμιξη, η κατάψυξη, το μαγείρεμα, η παστερίωση και η αποστείρωση βασίζονται στη ροή των ρευστών. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική έδωσε στους μηχανικούς τροφίμων καινούργιες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του εξοπλισμού κατά το σχεδιασμό ώστε να εξασφαλιστεί η ποιότητα και η ασφάλεια των τροφίμων. Η λειτουργία και η απόδοση στοιχείων εξοπλισμού όπως οι φούρνοι, οι εναλλάκτες θερμότητας, τα ψυγεία και τα ξηραντήρια βελτιώθηκε με τη χρήση του CFD για το σχεδιασμό τους. Το CFD αποτελεί πλέον ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη, την αντιμετώπιση προβλημάτων και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής τροφίμων (Xia & Sun, 2002).

Εγκαταστάσεις αποθήκευσης υπό ψύξη

Η καλή ποιότητα και ασφάλεια των κατεψυγμένων προϊόντων, ως απόρροια του πλεονεκτήματος της ψύξης να επιβραδύνει την ανάπτυξη των βακτηρίων οδήγησαν τους ερευνητές στην αναζήτηση νέων μεθόδων για την μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε τρόφιμα που συντηρούνται υπό ψύξη (ψύξη και κατάψυξη). Ο ρυθμός ψύξης εξαρτάται από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ψυκτικού μέσου και του προϊόντος, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα του αέρα μέσα στη συσκευασία. Η διαδικασία της αποθήκευσης κατά συνέπεια μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί με ένα μοντέλο CFD, αναπαριστώντας τα προϊόντα ως πορώδη μέσα και χρησιμοποιώντας ένα προκαθορισμένο κενό τμήμα και μέση διάμετρο του προϊόντος. Τα αποτελέσματα που μπορούν να ληφθούν με τη χρήση CFD συνδυάζουν τη μεγάλη ακρίβεια με το χαμηλό κόστος σχεδιασμού (Norton & Sun, 2019; Raman, Dewang, & Raghuwanshi, 2018).

Αποστείρωση

Το CFD εμφανίζει ευρεία εφαρμογή σε πολλές εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η αποστείρωση. Κατά τη θερμική επεξεργασία του προϊόντος, για την επίτευξη του προκαθορισμένου βαθμού στείροτητας χωρίς να καταστραφεί το χρώμα, η υφή και να μειωθούν τα θρεπτικά του συστατικά είναι απαραίτητη η ταχεία και ομοιόμορφη θέρμανση. Παραδοσιακά, για τον υπολογισμό τόσο της στείροτητας όσο και της ποιότητας των τροφίμων χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα αναλυτικές μελέτες που αξιοποιούσαν τις μέσες θερμοκρασίες. Ωστόσο, πλέον η υπολογιστική ρευστοδυναμική έχει αποδείξει ότι με τις αναλυτικές μελέτες γινόταν υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων και κατά συνέπεια έχει σημάνει την αντικατάστασή τους. Μάλιστα με τη χρήση του CFD μπορεί πλέον να γίνει προσέγγιση του χρόνου που απαιτείται για την ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας σε όλο το τρόφιμο όταν βρίσκεται σταθερό σε ένα σημείο. Τέλος, παρόμοιες μελέτες οδηγούν σε καινούργια συμπεράσματα για τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στο προϊόν, όπως είναι η μείωση του απαιτούμενου χρόνου αποστείρωσης με δεδομένο ότι το δοχείο περιστρέφεται κατά διαστήματα (Norton & Sun, 2019; Raman, Dewang, & Raghuwanshi, 2018).

Ξήρανση

Η ξήρανση των τροφίμων είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη διεργασία, γεγονός που καθιστά τον ορθό σχεδιασμό της μία μεγάλη πρόκληση για τους επιστήμονες τροφίμων. Η εξέλιξη της διεργασίας της ξήρανσης είναι μεγάλη καθώς όχι μόνο έχουν γίνει σημαντικές βελτιώσεις αλλά έχουν αναπτυχθεί και νέες μέθοδοι ξήρανσης όπως είναι η παλμική καύση. Τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε στη ξήρανση είναι η ανομοιομορφία του αέρα και η δυσκολία επίτευξης ομοιόμορφης κατανομής της υγρασίας στο τελικό προϊόν. Αυτά τα προβλήματα είναι πιο έντονα για μεγάλα συστήματα ξήρανσης που χρησιμοποιούνται για την αφυδάτωση γεωργικών προϊόντων. Η επίλυση τους προϋποθέτει τη σωστή κατανομή του αέρα στο εσωτερικό του ξηραντήρα, το οποίο επιτυγχάνεται με την χρήση ειδικών συσκευών που περιπλέκουν ακόμα περισσότερο τη γεωμετρία. Με γνώμονα αυτά τα προβλήματα, οι Margaris και Ghiaus (2006) πραγματοποίησαν υπολογιστική προσομοίωση χρησιμοποιώντας το PHOENICS προκειμένου να προβλέψουν τις παραμέτρους ροής του αέρα για να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό του ξηραντήρα με δίσκους. Για το σκοπό αυτό δοκίμασαν διαφορετικές γεωμετρίες του ξηραντήρα και της θέσης των δίσκων όπως επίσης και διαφορετικές εισόδους για τον αέρα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών με τη χρήση της

προσομοίωσης αύξησε κατά 23 % την ομοιομορφία της υγρασίας στο τελικό προϊόν της σταφίδας (Norton & Sun, 2019).

Ακόμα, οι Tzempelikos et al. (2015) χρησιμοποίησαν την υπολογιστική ρευστοδυναμική στην προσπάθεια τους να αναπτύξουν ένα αριθμητικό μοντέλο που να περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας, κατά την ξήρανση κυδωνιών υπό την επίδραση θερμού αέρα, σε μη σταθερή κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα της ξήρανσης των κυδωνιών κατασκεύασαν τις καμπύλες ξήρανσης. Στη συνέχεια θεωρώντας ότι η μεταφορά της υγρασίας από το εσωτερικό του φρούτου στο περιβάλλον του αέρα ακολουθεί το μηχανισμό της διάχυσης και περιγράφεται ικανοποιητικά από τον νόμο του Fick, χρησιμοποίησαν την υπολογιστική ρευστοδυναμική με σκοπό τον προσδιορισμό των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας και μάζας λύνοντας ένα πρόβλημα σε σταθερή κατάσταση για διαφορετικές θερμοκρασίες και ταχύτητες. Το μοντέλο που σχεδίασαν με βάση τα αποτελέσματα του CFD επικυρώθηκε με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και αποδείχτηκε υπολογιστικά αποτελεσματικό και ικανό να περιγράψει το θερμοκρασιακό προφίλ και την απώλεια της υγρασίας με ελάχιστες πειραματικές προσαρμογές.

Τέλος, σε μία ακόμα μελέτη οι Carlescu, Arsenoiaia, Rosca, & Tenu (2017) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την μεταφορά θερμότητας και μάζας, με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με σκοπό να δείξουν τις διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά την διεργασία της ξήρανσης βερίκοκων. Η προσομοίωση έγινε σε συνθήκες μη σταθερής κατάστασης, για βερίκοκα που είχαν και δεν είχαν υποστεί ζεμάτισμα αξιοποιώντας τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της υγρασίας του φρούτου. Για την ανάλυση αυτή δεν λήφθηκε υπόψη η συρρίκνωση του βερίκοκου και ο πολτός θεωρήθηκε ως ένα ομοιογενές υλικό. Τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας εισήχθησαν στην προσομοίωση ως UDF, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του αέρα και των φρούτων που ποικίλουν με το χρόνο. Τα βερίκοκα ξηράνθηκαν με ζεστό αέρα, για τον οποίο υπήρχε η δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν και στην προσομοίωση. Τα τελικά αποτελέσματα από την προσομοίωση και τα πειράματα συγκρίθηκαν με σκοπό την αξιολόγηση του μοντέλου, το οποίο αποδείχτηκε αρκετά ικανοποιητικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΤΑΦΥΛΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS FLUENT είναι απαραίτητος ο ορισμός κάποιων βασικών στοιχείων του προβλήματος μας. Αρχικά, η προσομοίωση μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια στη μεταφορά θερμότητας και στη μεταφορά μάζας. Στην παρούσα μελέτη θα γίνει προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής (από τον αέρα του ξηραντήρα σταθερής κλίνης) στην επιφάνεια του φρούτου (σταφύλι) και μέσω αγωγής από την επιφάνεια του φρούτου στο εσωτερικό αυτού.

Για το σκοπό της προσομοίωσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το προς εξέταση φρούτο είναι το σταφύλι, το οποίο τοποθετείται σε ένα σκεύος από ανοξείδωτο χάλυβα και ξηραίνεται με τη βοήθεια θερμού αέρα. Το φρούτο, έχει γίνει η παραδοχή ότι είναι σφαιρικού σχήματος και διαμέτρου 18 mm. Ακόμη, οι διαστάσεις της κλίνης για την επίλυση του προβλήματος αναζητήθηκαν βιβλιογραφικά και ορίστηκαν $L=170$ mm και $D=113$ mm (Prukwarun, Khumchooo, Seancotr, & Phupaichitkun, 2013; Pangavhane, Sawhney, & Sarsavadia, 1999).

Σε ότι αφορά την ξήρανση των σταφυλιών, όπως βρέθηκε βιβλιογραφικά πραγματοποιείται με βοήθεια αέρα θερμοκρασίας $T=60$ °C και ταχύτητας $u=0,5$ m/s, γεγονός που καθιστά τη ροή στρωτή, όπως θα δούμε στη συνέχεια, ενώ η διάρκεια αυτής υπολογίζεται στις 46 h (Wang, et al., 2016; Pangavhane, Sawhney, & Sarsavadia, 1999).

4.2 Υλικά και Μέθοδοι

4.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Σαν πρώτο στάδιο κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των επιμέρους συστατικών. Οι ιδιότητες αυτές είναι η πυκνότητα ρ (kg/m³), η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p (kJ/kg°C), η θερμική αγωγιμότητα k (W/m°C) και το ιξώδες σε ότι αφορά τα ρευστά (αέρας) και η πυκνότητα ρ (kg/m³), η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p (kJ/kg°C) και η θερμική αγωγιμότητα k (W/m°C) για τα στερεά υλικά (σταφύλι και ανοξείδωτος χάλυβας).

Αέρας

Σε ότι αφορά τον αέρα που εισάγεται στο σύστημα οι ιδιότητες του λαμβάνονται απευθείας από το πρόγραμμα για τις διαφορετικές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα ρ είναι ίση με $1,225 \text{ kg/m}^3$, η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$) είναι ίση με $1,00643 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ και το ιξώδες μ $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$. Αυτό φαίνεται και στην *Εικόνα 1* του προγράμματος.

Create/Edit Materials

Name: air

Material Type: fluid

Chemical Formula:

Fluent Fluid Materials: air

Mixture: none

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Fluent Database... User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m3): constant 1.225

Cp (Specific Heat) (j/kg-k): constant 1006.43

Thermal Conductivity (w/m-k): constant 0.0242

Viscosity (kg/m-s): constant 1.7894e-05

Change/Create Delete Close Help

Εικόνα 1. Θερμοφυσικές ιδιότητες αέρα

Σταφύλι

Το σταφύλι όπως και όλα τα τρόφιμα για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών τους ιδιοτήτων θεωρούνται ως ένα μίγμα πρωτεϊνών, λίπους, τέφρας, υδατανθράκων φυτικών ινών και νερού. Η σύσταση ως προς τα παραπάνω συστατικά για τα σταφύλια εμφανίζεται στον *Πίνακα 2*.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των σταφυλιών θα υπολογιστούν στη θερμοκρασία $T=40^\circ\text{C}$, δηλαδή στη μέση θερμοκρασία μεταξύ των σταφυλιών (ομοιόμορφη θερμοκρασία 20°C) και στη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης (60°C).

Πίνακας 2. Σύσταση του σταφυλιού % κ.β

Συστατικά	Περιεκτικότητα % κ.β.
Πρωτεΐνες	0,72
Λίπος	0,16
Υδατάνθρακες	17,20
Φυτικές ίνες	0,90
Τέφρα	0,48
Νερό	80,54

Στη θερμοκρασία αυτή η πυκνότητα των επιμέρους συστατικών και του τροφίμου υπολογίζεται με τη βοήθεια της Εξ. 32 και της Εξ. 33:

$$\text{Συστατικά:} \quad \rho_i = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 \quad (32)$$

$$\text{Σταφύλι:} \quad \rho_{\text{σταφυλιού}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{\rho_i}} \quad (33)$$

Όπου ρ : Η πυκνότητα του τροφίμου, ρ_i : Η πυκνότητα των επιμέρους συστατικών, X_i : η % κ.β. περιεκτικότητα των συστατικών.

b_0, b_1, b_2 είναι σταθεροί συντελεστές (Maroulis & Saravacos, 2003)

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις συνοψίζονται οι πυκνότητες τόσο των συστατικών όσο και του φρούτου στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Πυκνότητα επιμέρους συστατικών και σταφυλιού

	Περιεκτικότητα (g/100g)	b_0	b_1	b_2	$\rho_{\text{συστατικών}}$ (kg/m ³)	$\rho_{\text{σταφυλιού}}$ (kg/m ³)
Πρωτεΐνες	0,72	1330	-0,518		1309,28	1073,39
Λίπος	0,16	926	-0,418		909,28	
Υδατάνθρακες	17,20	1600	-0,031		1598,76	
Φυτικές ίνες	0,90	1310	-0,366		1295,36	
Τέφρα	0,48	2420	-0,281		2408,76	
Νερό	80,54	997	0,00314	-0,00376	996975	

Αντίστοιχα με την πυκνότητα η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p υπολογίζεται για τα επιμέρους με βάση τις Εξ. 34 και Εξ. 35.

$$\text{Συστατικά:} \quad c_{p_i} = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 \quad (34)$$

$$\text{Σταφύλι:} \quad c_{p_{\text{σταφυλιου}}} = \sum_i c_{p_i} \cdot X_i \quad (35)$$

Όπου c_p : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του τροφίμου, c_{p_i} : Η ειδική θερμοχωρητικότητα των επιμέρους συστατικών, X_i : η % κ.β. περιεκτικότητα των συστατικών.

b_0, b_1, b_2 είναι σταθεροί συντελεστές (Maroulis & Saravacos, 2003).

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις συνοψίζονται οι ειδικές θερμοχωρητικότητες τόσο των συστατικών όσο και του φρούτου στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Ειδική θερμοχωρητικότητα c_p (kJ/kg°C) επιμέρους συστατικών και σταφυλιού

	Περιεκτικότητα (g/100g)	b_0	b_1	b_2	$C_{p_{\text{συστατικών}}}$ (kJ/kg°C)	$C_{p_{\text{σταφυλιού}}}$ (kJ/kg°C)
Πρωτεΐνες	0,72	2,01	0,00121	-1,3E-06	2056304	3690
Λίπος	0,16	1,98	0,00147	-4,8E-06	203112	
Υδατάνθρακες	17,20	1,55	0,00196	-5,9E-06	1618896	
Φυτικές ίνες	0,90	1,85	0,00187	-4,7E-06	191736	
Τέφρα	0,48	1,09	0,00189	-3,7E-06	1159712	
Νερό	80,54	4,18	-0.00009	5,47E-06	4185116	

Η θερμική αγωγιμότητα υπολογίζεται με βάση τις Εξ. 36 και Εξ. 37

$$\text{Συστατικά:} \quad k_i = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 \quad (36)$$

$$\text{Σταφύλι:} \quad k_{\text{σταφυλιου}} = \sum_i C_{p_i} \cdot X_i \quad (37)$$

Όπου $k_{\text{σταφυλιού}}$: Η θερμική αγωγιμότητα του σταφυλιού, k_i Η θερμική αγωγιμότητα των επιμέρους συστατικών, Y_i η % κ.ο. περιεκτικότητα των συστατικών και

b_0, b_1, b_2 είναι σταθεροί συντελεστές (Maroulis & Saravacos, 2003).

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις συνοψίζονται οι θερμικές αγωγιμότητες τόσο των συστατικών όσο και του φρούτου στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Θερμική αγωγιμότητα k (W/m°C) επιμέρους συστατικών και σταφυλιού

	Περιεκτικότητα (m ³ /m ³)	b ₀	b ₁	b ₂	k _{συστατικών} (W/m°C)	k _{σταφυλιού} (W/m°C)
Πρωτεΐνες	0,00854	0,179	0,0012	-2,70E-06	0,222648	0,583
Λίπος	0,00232	0,181	-0,0028	-1,80E-07	0,070317	
Υδατάνθρακες	0,09250	0,201	0,00139	-4,30E-06	0,249672	
Φυτικές ίνες	0,01714	0,183	0,00125	-3,2E-06	0,227928	
Τέφρα	0,00211	0,33	0,0014	-2,90E-06	0,381344	
Νερό	0,87739	0,571	0,00176	-6,7E-06	0,63068	

Τέλος, ο συντελεστής θερμικής διάχυσης α (m²/s) υπολογίζεται ως:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = 1,7489 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{s} \quad (38)$$

Όπου: k η θερμική αγωγιμότητα (W/kg°C)

ρ η πυκνότητα (kg/m³)

C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα (kJ/kg°C) (Γιαννιώτης, 2011).

Ανοξείδωτος Χάλυβας

Για τον ανοξείδωτο χάλυβα όπως και για τον αέρα οι ιδιότητες δίνονται αυτόματα από το πρόγραμμα όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 2*.

Επιπλέον, σε ότι αφορά τον ανοξείδωτο χάλυβα μας ενδιαφέρει και ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αυτού και του αέρα, ο οποίος βρίσκεται βιβλιογραφικά ίσος με $h_{steel} = 7,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Toolbox, 2003).

The image shows the 'Material Properties' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field is set to 'steel'. The 'Material Type' is 'solid'. Under 'Fluent Solid Materials', 'steel' is selected. The 'Mixture' is set to 'none'. In the 'Properties' section, 'Density (kg/m3)' is set to 'constant' with a value of 8030. 'Cp (Specific Heat) (j/kg-k)' is set to 'constant' with a value of 502.48. 'Thermal Conductivity (w/m-k)' is set to 'constant' with a value of 16.27. On the right, the 'Order Mat' section has 'Name' selected, and 'Fluent' and 'User-Def' buttons are visible.

Εικόνα 2. Θερμοφυσικές ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα

4.2.2 Επίλυση του προβλήματος με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης

Η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows 10 Home Premium 64-bit, και επεξεργαστή intel core i7, 16GB RAM.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό πρόγραμμα λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής το Workbench 2019R1, της εταιρείας ANSYS, που περιλαμβάνει το DesignModeler με βάση το οποίο σχεδιάστηκε η γεωμετρία, το Meshing για το σχεδιασμό του πλέγματος και τέλος το Fluent απαραίτητο για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος.

4.2.3 Μεθοδολογία CFD

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να γίνει η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας κατά την ξήρανση του σταφυλιού για την παραγωγή της σταφίδας σε ένα ξηραντήρα σταθερής κλίνης με τη χρήση θερμού αέρα ως μέσο ξήρανσης. Οι διαστάσεις για την κλίνη, δεν διαφοροποιήθηκαν σε καμία από τις τρεις γεωμετρίες που θα σχεδιαστούν. Πρέπει να τονίσουμε ότι έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

1. Η αρχική θερμοκρασία του φρούτου είναι ομοιόμορφη και ίση 20 °C
2. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του φρούτου δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και την απομάκρυνση της υγρασίας και έχουν υπολογιστεί στους 40 °C
3. Δεν λαμβάνεται υπόψιν στην ανάλυση η συρρίκνωση του φρούτου
4. Οι ρώγες του σταφυλιού είναι σφαιρικού σχήματος

4.2.4 Σχεδιασμός Γεωμετρίας

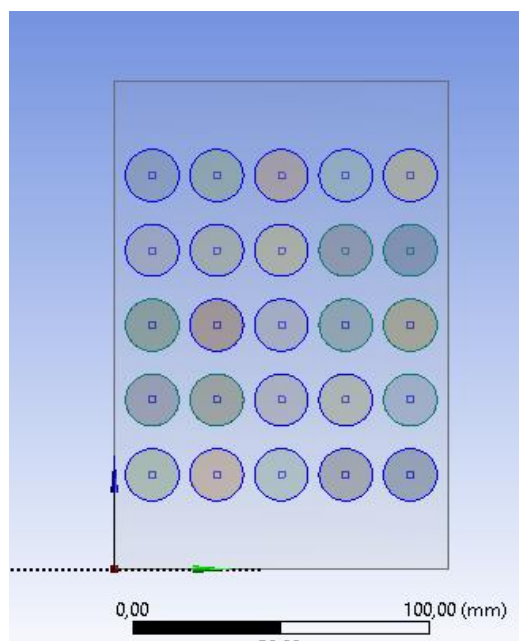
Για την επίλυση του προβλήματος σχεδιάστηκε τρεις δισδιάστατες γεωμετρίες (2D) με τη χρήση του σχεδιαστικού λογισμικού Design Modeler. Πιο συγκεκριμένα, για το σχεδιασμό της γεωμετρίας συμβουλευτήκαμε τη βιβλιογραφία (Prukwarun, Khumchooo, Seancotr, & Phupaichitkun, 2013), από την οποία αποφασίστηκε η κλίνη στην οποία θα γίνει η ξήρανση εμφανίζει ένα πορώδες ε ίσο με 0,66, και ο λόγος της διαμέτρου των σωματιδίων προς τη διάμετρο της κλίνης ($N = \frac{d_p}{D}$) να είναι ίσος με 6,26. Από αυτό και με δεδομένο ότι η διάμετρος των σωματιδίων είναι ίση με 18 mm, προκύπτει ότι η διάμετρος της κλίνης θα είναι ίση με $D=113,0$ mm. Ακόμη, το ύψος της κλίνης σχετίζεται με τη διάμετρο αυτής

μέσω της σχέσης $L = 1,5 \cdot D$, και βρίσκεται ίσο με 170,0 mm. Τέλος, θεωρήσαμε ότι για την επίτευξη του επιθυμητού πορώδους είναι αντιπροσωπευτικό να σχεδιάσουμε 25 σωματίδια (ρώγες σταφυλιού), τα οποία θα είναι κατανομημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Πιο αναλυτικά:

Σε ένα πρώτο sketch (bed) σχεδιάστηκε ένα ορθογώνιο με τις παραπάνω διαστάσεις της κλίνης το οποίο θεωρείται ως ρευστό (αέρας). Σε ένα δεύτερο sketch (particles) σχεδιάστηκαν 25 ρώγες σταφυλιών ίσης διαμέτρου (18 mm), οι οποίες θεωρούνται ως στερεό. Για τις αποστάσεις των σωματιδίων από τα τοιχώματα της κλίνης και μεταξύ τους ισχύουν τα ακόλουθα:

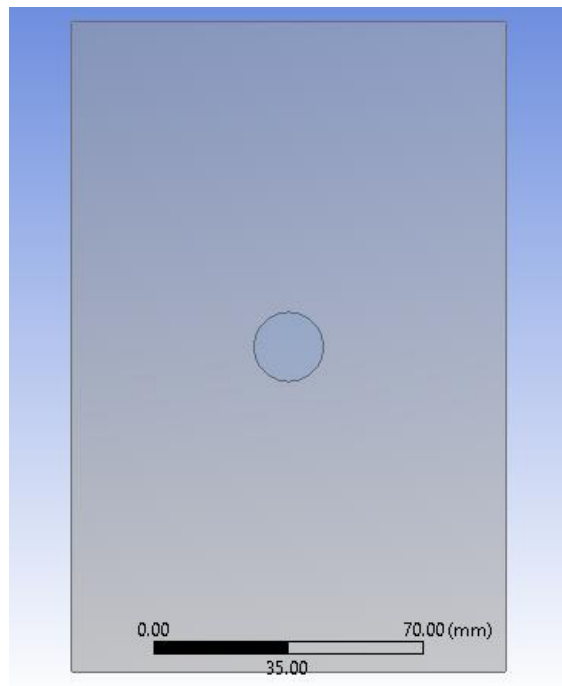
- Η απόσταση από την είσοδο μέχρι το κέντρο του πρώτου σωματιδίου είναι ίση με 32,706 mm
- Η κάθετη απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο σωματιδίων είναι ίση με 25,902 mm
- Η απόσταση από το τοίχωμα την κλίνης μέχρι το κέντρο του πρώτου κατά σειρά σωματιδίου είναι ίση με 12,78 mm
- Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο σωματιδίων είναι ίση με 21,78 mm.

Τα δύο sketches αφαιρούνται το ένα από το άλλο με τη βοήθεια την εντολής Boolean και η τελική γεωμετρία, αναπαρίσταται στην *Εικόνα 3*.



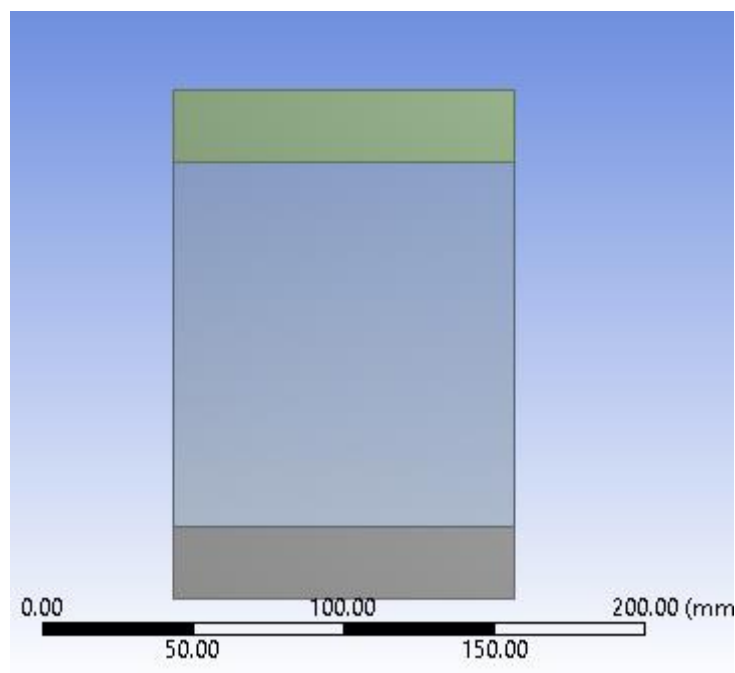
Εικόνα 3. Γεωμετρία 2D της κλίνης με 25 σωματίδια.

Για την δεύτερη γεωμετρία που φαίνεται στην *Εικόνα 4*, ακολουθήσαμε την προηγούμενη διαδικασία με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά αντί για 25 σωματίδια, σχεδιάστηκε μόλις ένα στο κέντρο της κλίνης. Αυτή, η γεωμετρία θα αξιοποιηθεί για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα από τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 4. Γεωμετρία 2D της κλίνης με 1 σωματίδιο.

Τέλος, στην τρίτη γεωμετρία της *Εικόνας 5*, τα σωματίδια θεωρούνται ως ένα ενιαίο πορώδες υλικό, το οποίο αναπαρίσταται πολύ απλά ως ένα ορθογώνιο με τις ίδιες διαστάσεις του χώρου που καταλαμβάνουν τα 25 σωματίδια της πρώτης γεωμετρίας,



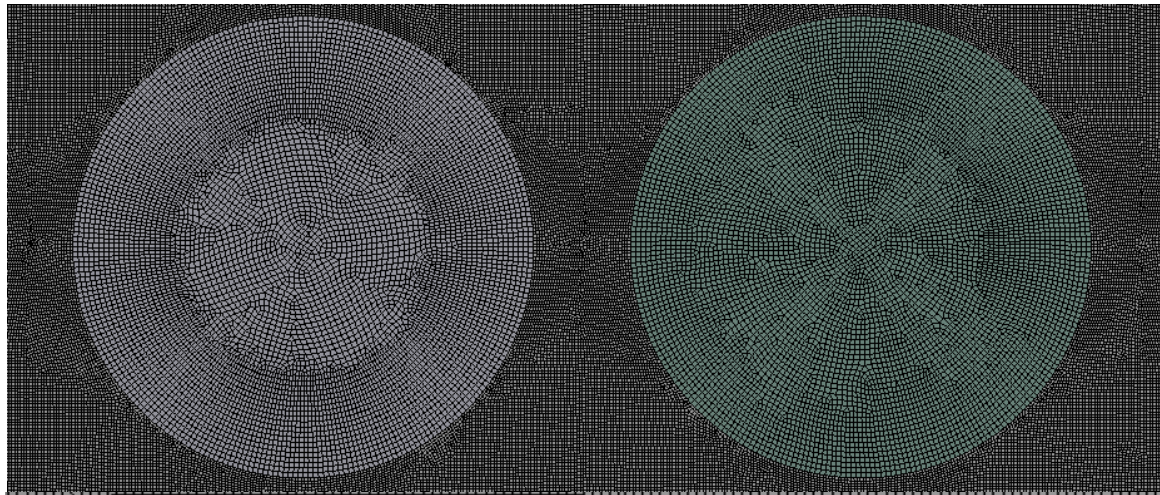
Εικόνα 5. Γεωμετρία 2D της κλίνης όπου τα σωματίδια θεωρούνται ως ένα ενιαίο υλικό

4.2.5 Δημιουργία Πλέγματος

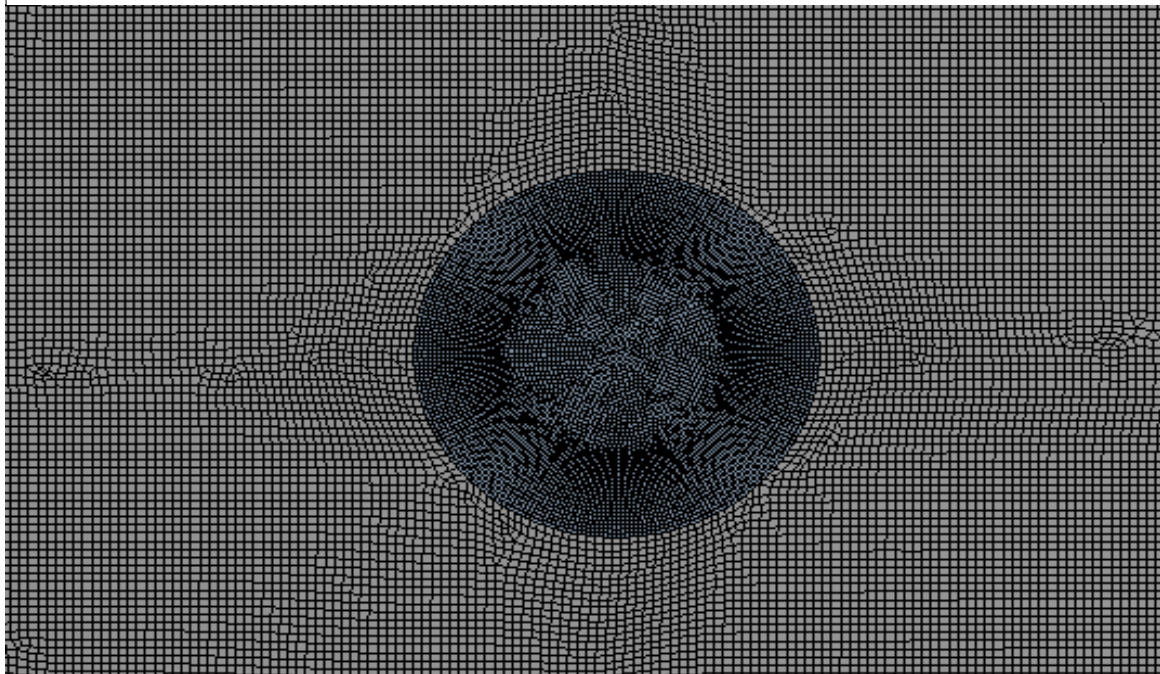
Για την επίλυση του προβλήματος με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι απαραίτητη η κατασκευή πλέγματος. Για την κατασκευή αυτού του πλέγματος χρησιμοποιείται το λογισμικό Meshing. Το πλέγμα που δημιουργείται στην ουσία χωρίζει την αρχική γεωμετρία σε αρκετά μικρότερα πεπερασμένα μέρη, τα κελιά. Κατά την επίλυση των εξισώσεων του προβλήματος, τα αποτελέσματα του πρώτου κελιού χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές για την επίλυση των εξισώσεων στο επόμενο κελί κ.ο.κ ώστε να λάβουμε το τελικό αποτέλεσμα. Το πόσο πυκνό είναι το πλέγμα όπως επίσης και το σχήμα των κελιών καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του αποτελέσματος και πιο συγκεκριμένα την ακρίβεια και τη σταθερότητα του αριθμητικού αποτελέσματος. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να καθοριστούν πολύ εύκολα από το ANSYS FLUENT συνδέεται άμεσα με το Meshing.

Το πλέγμα που θα δημιουργήσουμε θα είναι αρκετά πυκνό ιδιαίτερα σε ότι αφορά τα σωματίδια (ρώγες σταφυλιού) ώστε να αποτελέσματα μας να είναι ιδιαίτερα ακριβή και σωστά. Με γνώμονα αυτό, αρχικά επιλέγεται μία υψηλή ομαλότητα (smoothness) και μία στρέβλωση (skewness) μεγαλύτερη του 0,1. Ακόμη, τα κελιά που σχηματίζονται είναι τετράεδρα.

Για το σχεδιασμό του πλέγματος στο συγκεκριμένο πρόβλημα, αρχικά γίνεται ένα sizing στην επιφάνεια της κλίνης με μέγεθος στοιχείου (element size) ίσο με 5×10^{-4} m και στην επιφάνεια των σωματιδίων με μέγεθος στοιχείου ίσο με 4×10^{-4} m. Ακόμη, στην πάνω και στην κάτω πλευρά της κλίνης (είσοδος και έξοδος) η ακμή χωρίζεται σε 100 ίσα μέρη, αντίστοιχα γίνεται και για τα τοιχώματα της κλίνης μόνο που σε αυτή την περίπτωση χωρίζεται σε 200 μέρη. Τέλος, μεγάλη σημασία δίνεται και σε ότι αφορά την επιφάνεια του φρούτου όπου χωρίζεται σε 150 μέρη.



Εικόνα 6. Πλέγμα της κλίνης για τη γεωμετρία της κλίνης με τα 25 σωματίδια



Εικόνα 7. Πλέγμα της κλίνης για τη γεωμετρία με το 1 σωματίδιο

4.2.6 Δημιουργία Ορίων Γεωμετρίας (Named Selections)

Αφού δημιουργήθηκε το πλέγμα και πριν προχωρήσουμε στην επίλυση του προβλήματος με τη χρήση του FLUENT, είναι απαραίτητο να ορίσουμε τη λειτουργία των επιμέρους στοιχείων της γεωμετρίας, δηλαδή την είσοδο, την έξοδο και τα τοιχώματα. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τη γεωμετρία που σχεδιάστηκε όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3*, δημιουργήθηκαν τα ακόλουθα Named Selections:

- Η πάνω πλευρά της κλίνης ορίζεται ως η είσοδος του θερμού αέρα (Inlet).
- Η κάτω πλευρά ως η έξοδος της κλίνης (Outlet).
- Η δεξιά και αριστερή πλευρά αποτελούν τα τοιχώματα της κλίνης (Wall_bed)
- Τα τοιχώματα των σωματιδίων (ρώγες σταφυλιών) ως Wall_grapes
- Η επιφάνεια της κλίνης που ρέει ο αέρας ως Air_surface
- Τέλος, η επιφάνεια του φρούτου ορίζεται ως Grapes_surface.

4.2.7 Ανεξαρτησία του πλέγματος

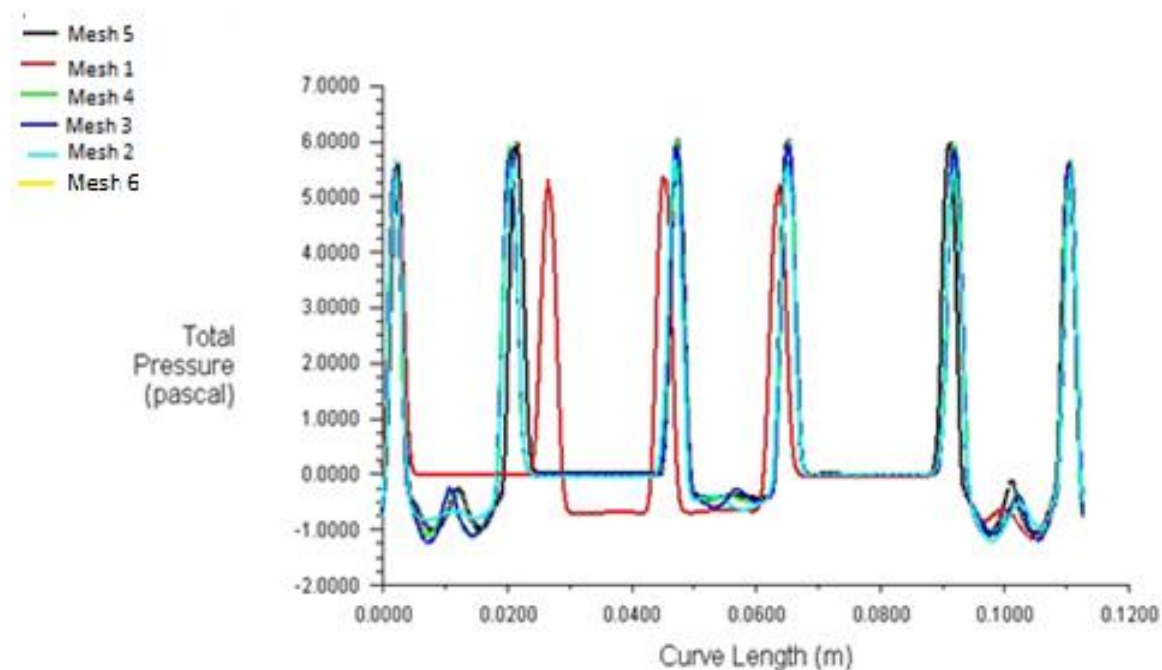
Αφού σχεδιάστηκε η γεωμετρία και πριν προχωρήσουμε στην λήψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη βοήθεια του FLUENT είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί το πλέγμα που δημιουργήθηκε προηγουμένως και να επαληθευτεί η ανεξαρτησία αυτού σε σχέση με τη λύση. Η ανεξαρτησία του πλέγματος συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα αυτού. Πιο συγκεκριμένα η δημιουργία ενός αραιού πλέγματος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μπορεί να οδηγήσει σε μη ακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα, η δημιουργία ενός πιο πυκνού πλέγματος είναι πιο πιθανό να οδηγήσει σε ακριβή αποτελέσματα, τα οποία δεν μεταβάλλονται σε περίπτωση περαιτέρω πύκνωσης αυτού. Ωστόσο, όπως είναι λογικό ένα πιο πυκνό πλέγμα αυξάνει και το χρόνο της προσομοίωσης και την απαιτούμενη μνήμη. Με βάση τα παραπάνω δοκιμάστηκαν τόσο αραιότερα όσο και πυκνότερα πλέγματα όπως αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Για να γίνει η αξιολόγηση τους μετρήθηκε η ολική πίεση σε μία οριζόντια γραμμή μετά τα σωματίδια για τα διαφορετικά πλέγματα. Το πρόβλημα επιλύθηκε σε σταθερή κατάσταση και χωρίς την ενεργοποίηση της εξίσωσης ενέργειας. Η ολική πίεση για τα διαφορετικά πλέγματα παρουσιάζεται στο *Σχήμα 1*.

Πίνακας 6. Παράμετροι Σχεδιασμού πλέγματος

	Face Sizing		Edge Sizing		Number of cells	
	Element Size (m)		Number of Divisions			
	Bed	Grapes	Inlet-Outlet	Wall_bed Wall_Grapes		
Mesh 1	0,0005	0,0004	100	200	150	105820
Mesh 2	0,00040	0,0003	100	200	150	165565
Mesh 3	0,0003	0,0002	100	200	150	260939
Mesh 4	0,00020	0,0002	100	200	150	491570
Mesh 5	0,00012	0,0002	100	200	150	1022795
Mesh 6	0,00012	0,0002	500	800	300	1136893

Το πλέγμα που επιλέχθηκε και χαρακτηρίστηκε ως καταλληλότερο για τη λήψη των αποτελεσμάτων είναι το *Mesh 5*, για το οποίο δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην ολική πίεση του μετρούμενου σημείου, συγκρινόμενο με πυκνότερα πλέγματα. Ωστόσο η καταλληλότητα του θα επαληθευτεί και σε μετέπειτα στάδιο όπου θα μελετηθεί και τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας και μάζας.



Σχήμα 1. Πίεση (Pa) κοντά στην έξοδο για τα έξι διαφορετικά πλέγματα

4.3 Μελέτη Μεταφοράς Θερμότητας

Στο σημείο αυτό και αφού έχει κατασκευαστεί ένα ανεξάρτητο πλέγμα θα γίνει η αριθμητική ανάλυση του προβλήματος μας, με τη χρήση του λογισμικού ANSYS FLUENT. Αρχικά, η μεταφορά θερμότητας χαρακτηρίζεται ως ένα πρόβλημα μη σταθερής κατάστασης (transient) και έτσι θα αντιμετωπιστεί. Ως μέσο θέρμανσης όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω χρησιμοποιείται αέρας θερμοκρασίας 60 °C. Ακόμη, για την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών της ξήρανσης σε ξηραντήρα σταθερής κλίνης, η ροή του αέρα επιλέγεται να είναι στρωτή με τον αριθμό Reynolds (Re_p) για τον οποίο να ισχύει $100 < Re_p < 1000$. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα του αέρα εισόδου όπως βρίσκεται από τη βιβλιογραφία είναι $u=0,5$ m/s (Wang, et al., 2016), η οποία θα δώσει και έναν αριθμό Reynolds:

$$Re_p = \frac{\rho u d_p}{\mu} = \frac{1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,5 \text{ m/s} \cdot 0,018 \text{ m}}{1,7894 \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 616,1 \quad (38)$$

Όπου ρ : η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3)

u : η ταχύτητα του αέρα (m/s)

d_p : η διάμετρος του σωματιδίου (m)

μ : το ιξώδες του αέρα (kg/ms)

4.3.1 Ορισμός των υλικών

Σαν πρώτο στάδιο χρειάζεται να οριστούν τα επιμέρους υλικά που απαρτίζουν το σύστημα, που θα μελετήσουμε. Σε ότι αφορά τον αέρα που αποτελεί και το μέσο μεταφοράς

θερμότητας είναι ήδη εισαγμένο στο πρόγραμμα. Για τα σταφύλια που αποτελούν το προς μελέτη φρούτο χρειάζεται να δημιουργηθεί ένα καινούργιο υλικό με την ονομασία grapes και με τις θερμοφυσικές ιδιότητες όπως αυτές έχουν υπολογιστεί στην *Παράγραφο 4.2*. Το νέο αυτό στερεό υλικό ορίζεται όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 8*.

The image shows the 'Create/Edit Materials' window in ANSYS Fluent. The 'Name' field contains 'grapes'. The 'Material Type' is set to 'solid'. Under 'Fluent Solid Materials', 'grapes' is selected. The 'Mixture' is set to 'none'. In the 'Properties' section, three properties are defined as constants: Density (kg/m³) is 1073.39, Cp (Specific Heat) (J/kg-K) is 3690, and Thermal Conductivity (W/m-K) is 0.583. On the right, 'Order Materials by' is set to 'Name'. At the bottom, there are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

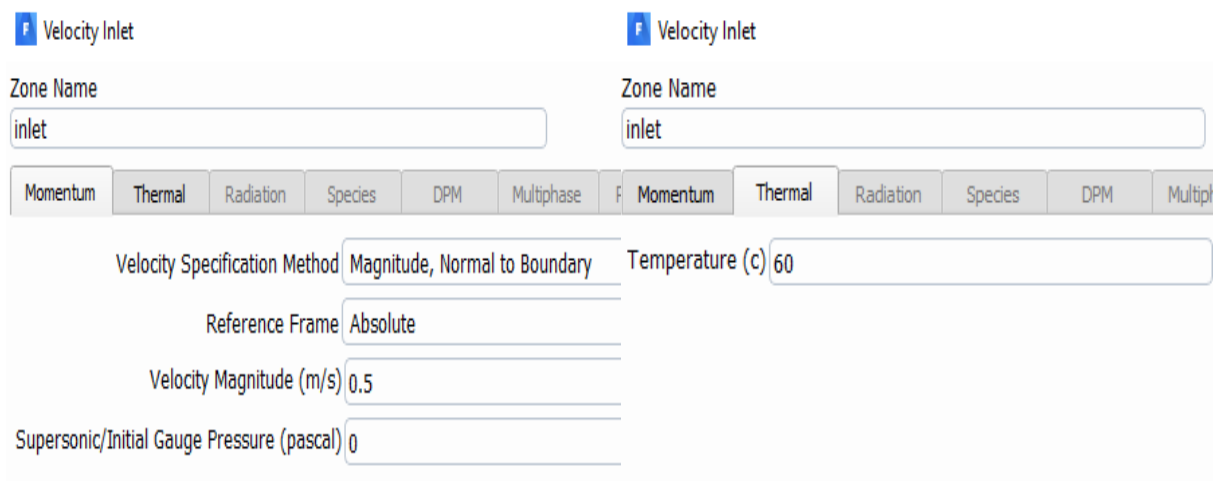
Εικόνα 8. Δημιουργία του στερεού υλικού grapes

Ένα τρίτο υλικό το οποίο εντάσσεται στο σύστημα είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας. Ως ένα από τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μηχανολογικού εξοπλισμού αρκεί να κάνουμε ανάκληση από τη βάση δεδομένων των στερεών υλικών.

4.3.2 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος είναι ο ορισμός των Boundary Conditions.

Έτσι αναλυτικότερα, για την είσοδο του αέρα (Inlet), χρειάζεται να ορίσουμε την ταχύτητα (Velocity Magnitude) και η θερμοκρασία όπως φαίνεται στην *Εικόνα 9*.



Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame Absolute

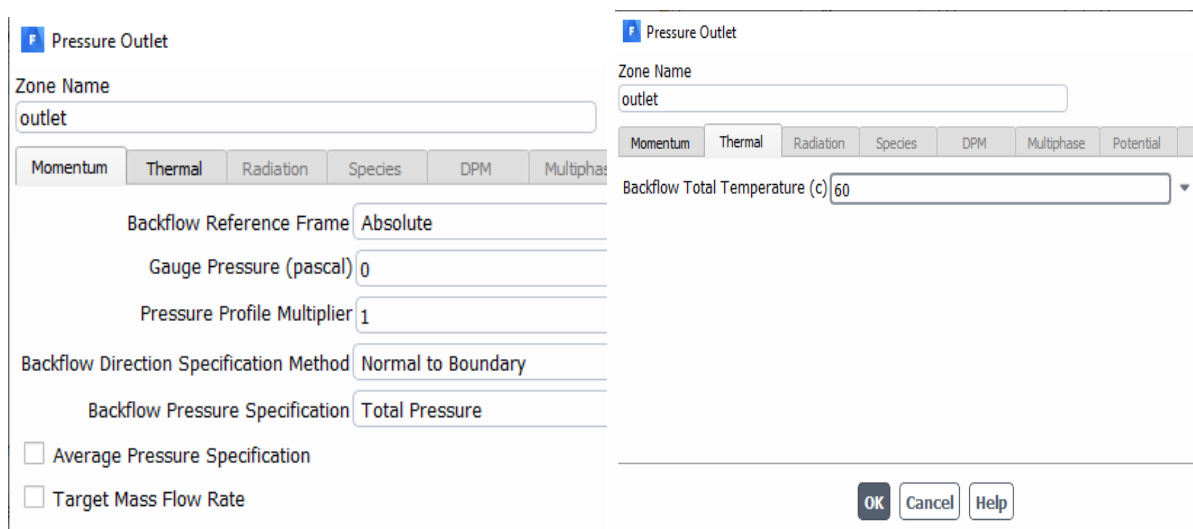
Velocity Magnitude (m/s) 0.5

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0

Temperature (c) 60

Εικόνα 9. Οριακές συνθήκες στην είσοδο (Inlet)

Σε ότι αφορά την έξοδο εισάγονται δεδομένα για την πίεση (Gauge Pressure) και για την θερμοκρασία, η οποία δεν διαφοροποιείται από αυτήν της εισόδου και τα δεδομένα παρουσιάζονται στην *Εικόνα 10*.



Pressure Outlet

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure (pascal) 0

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Backflow Total Temperature (c) 60

OK Cancel Help

Εικόνα 10. Οριακές συνθήκες στην έξοδο (Outlet)

Για τα τοιχώματα της κλίνης μας ενδιαφέρει η συνεισφορά τους στη μεταφορά θερμότητας, καθώς λόγω του θερμού αέρα γίνεται ανταλλαγή θερμότητας μέσω συναγωγής. Από αυτό διαπιστώνουμε, ότι μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h , όπως και η θερμότητα του αέρα. Ακόμη, θεωρούμε ότι ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης και τα τοιχώματα είναι ακίνητα. Τα δεδομένα αυτά φαίνονται στην *Εικόνα 11*.

The screenshot shows the 'Wall' boundary condition panel for a zone named 'wall_bed'. The adjacent cell zone is 'air_surface'. The 'Momentum' tab is selected, showing 'Stationary Wall' and 'Relative to Adjacent Cell Zone' checked. The 'Thermal' tab is also visible, showing 'Convection' selected with a heat transfer coefficient of 7.9 W/m²·K. The 'Material Name' is set to 'steel'.

Εικόνα 11. Οριακές συνθήκες για τα τοιχώματα της κλίνης (Wall_bed)

The screenshot shows the 'Wall' boundary condition panel for a zone named 'wall_grapes'. The adjacent cell zone is 'air_surface'. The 'Momentum' tab is selected, showing 'Stationary Wall' and 'Relative to Adjacent Cell Zone' checked. The 'Thermal' tab is also visible, showing 'via System Coupling' selected. The 'Material Name' is set to 'grapes'.

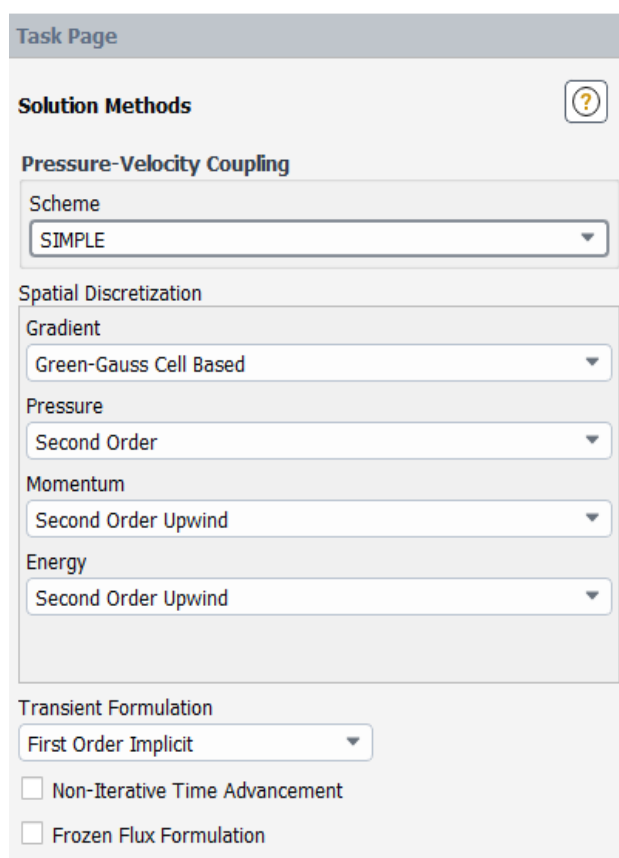
Εικόνα 12. Οριακές συνθήκες για την επιφάνεια των φρούτων

Τέλος, σε ότι αφορά το φρούτο που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης μας ενδιαφέρει η μεταφορά θερμότητας από τον αέρα στην επιφάνεια του φρούτου με συναγωγή και από

την επιφάνεια του φρούτου στο εσωτερικό αυτού με αγωγή αυτό αποτυπώνεται στις οριακές συνθήκες στην *Εικόνα 12*.

4.3.3 Μέθοδοι Επίλυσης

Για την επιλογή των μεθόδων επίλυσης ανατρέξαμε σε παραδείγματα (tutorials) μεταφοράς θερμότητας, της εταιρείας ANSYS INC. Με βάση αυτά αποφασίσαμε τις μεθόδους επίλυσης όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



The image shows the 'Task Page' in ANSYS Fluent, specifically the 'Solution Methods' section. It includes a help icon (question mark in a circle). Under 'Pressure-Velocity Coupling', the 'Scheme' is set to 'SIMPLE'. Under 'Spatial Discretization', the 'Gradient' is 'Green-Gauss Cell Based', 'Pressure' is 'Second Order', 'Momentum' is 'Second Order Upwind', and 'Energy' is 'Second Order Upwind'. Under 'Transient Formulation', it is set to 'First Order Implicit'. There are two unchecked checkboxes: 'Non-Iterative Time Advancement' and 'Frozen Flux Formulation'.

Εικόνα 13. Μέθοδοι επίλυσης προβλήματος

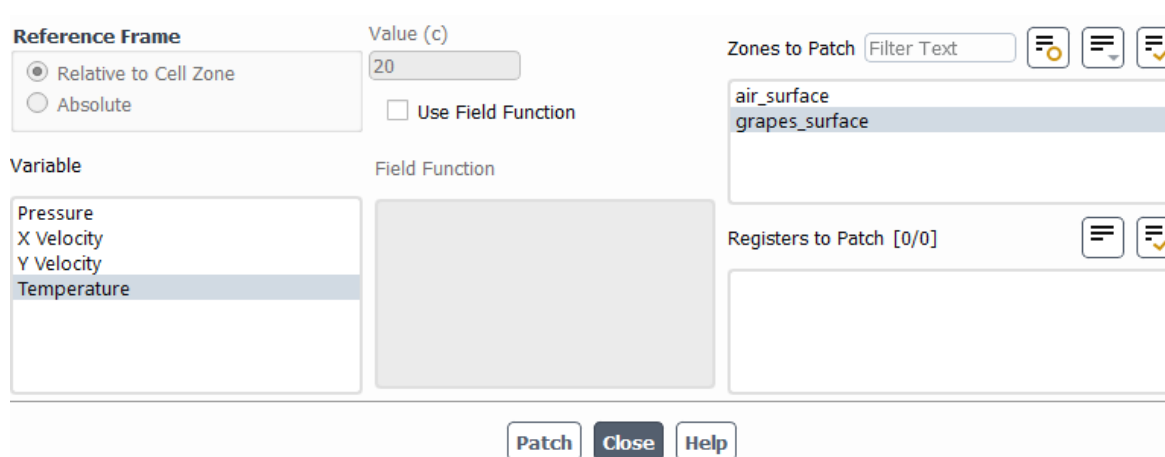
4.3.4 Αρχικοποίηση & Επιδιόρθωση των λύσεων

Αφού έχουν οριστεί όλες οι απαραίτητες παράμετροι για τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας στο σταφύλι, θα προχωρήσουμε στην λήψη των αποτελεσμάτων. Πριν όμως από αυτό είναι απαραίτητο να δώσουμε στο ANSYS FLUENT μία αρχική «πρόβλεψη» για το μελετώμενο πεδίο ροής. Θα πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη σημασία στην αρχική λύση που θα προσφέρουμε στο σύστημα έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα λάβουμε να ανταποκρίνονται στις προβλεπόμενες λύσεις. Έτσι, στην περίπτωση μας όπου γίνεται

μεταφορά θερμότητας μέσω του θερμού αέρα στο φρούτο, αυτό που αναμένουμε είναι μία σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φρούτου όπως επίσης και μια διαβάθμιση της θερμοκρασίας από την επιφάνεια αυτού μέχρι το κέντρο. Υπάρχουν γενικά δύο μέθοδοι για την προετοιμασία της λύσης:

- Ο πρώτος είναι να γίνει αρχικοποίηση σε ολόκληρο το πεδίο ροής, δηλαδή σε όλα τα κελιά.
- Ο δεύτερος τρόπος να ενημερώνουμε συνεχώς τις τιμές με τη βοήθεια κάποιου κώδικα ή ορισμένων συναρτήσεων για επιλεγμένες μεταβλητές ροής σε συγκεκριμένες ζώνες κελιών. (ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, 2009)

Στο δικό μας πρόβλημα θα χρειαστεί να ακολουθήσουμε και τους δύο παραπάνω τρόπους, καθώς με τη βοήθεια της δεύτερης θα μπορέσουμε να μελετήσουμε την εξέλιξη της θερμοκρασίας στο φρούτο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι προτού προχωρήσουμε σε υπολογισμούς προκειμένου να διορθώσουμε τις αρχικές τιμές για επιλεγμένες μεταβλητές με τη βοήθεια της εντολής Solution Initialization θα ορίσουμε τις αρχικές τιμές για τις μεταβλητές ροής και να αρχικοποιήσουμε τη λύση χρησιμοποιώντας αυτές. Οι αρχικές λύσεις μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα είτε με μη αυτόματο τρόπο, δηλαδή υπολογίζοντας τις τιμές για μία καθορισμένη ζώνη ή με αυτόματο τρόπο ως οι μέσες υπολογισμένες τιμές των λύσεων. Στο πρόβλημα μας επιλέγουμε οι αρχικές τιμές να λαμβάνονται από αυτές τις εισόδους καθώς αποτελούν και τα δεδομένα, τα οποία είμαστε βέβαιοι ότι ισχύουν και θα καθορίσουν και την εξέλιξη των υπολοίπων.



Εικόνα 14. Εντολή Patch για τη μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής

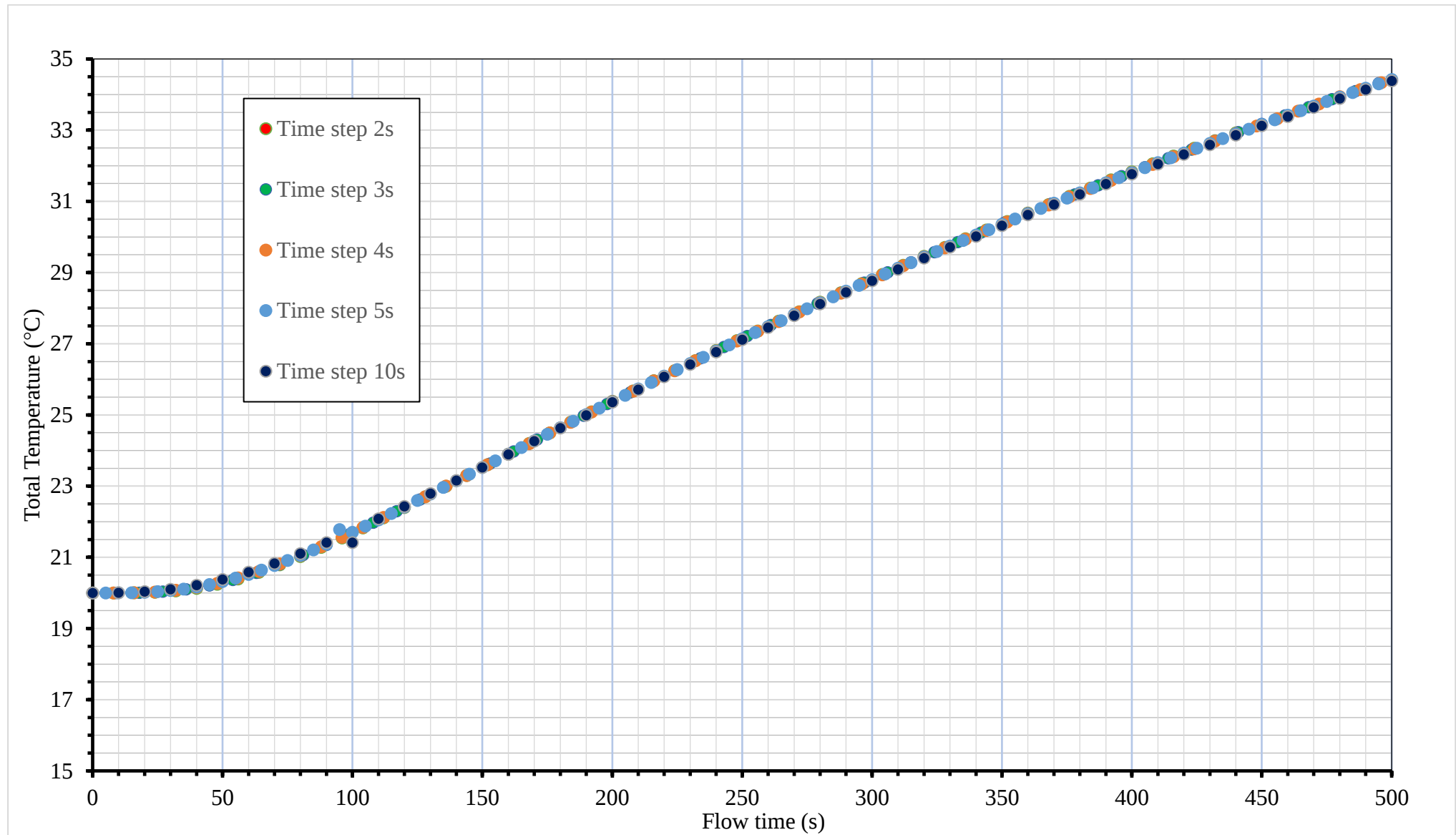
Μετά την αρχικοποίηση των λύσεων σε όλο το πεδίο ροής θα προχωρήσουμε στη διόρθωση των τιμών σε ότι αφορά τη θερμοκρασία του φρούτου. Αυτό πραγματοποιείται

μέσω του παραθύρου διαλόγου Patch, όπου αρχικά επιλέγουμε τη μεταβλητή της θερμοκρασίας από τη λίστα των μεταβλητών, στη συνέχεια επιλέγουμε τη ζώνη στην οποία θα γίνουν αυτές οι διορθώσεις (grapes_surface) και τέλος στην τιμή αυτής της μεταβλητής θέτουμε την αρχική θερμοκρασία που βρίσκονται τα φρούτα $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το παράθυρο διαλόγου για αυτή τη διαδικασία φαίνεται στην *Εικόνα 15*.

4.3.5 Επιλογή Χρονικού Βήματος

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η μεταφορά θερμότητας είναι μια διεργασία που εξαρτάται από το χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζεται και το πρόβλημα από το πρόγραμμα (transient). Προκειμένου λοιπόν να επιλυθεί σωστά το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σημαντική η επιλογή του χρονικού βήματος (time step), καθώς αποτελεί έναν από τους παράγοντες που θα οδηγήσουν σε ακριβή αποτελέσματα. Η διαδικασία για την επιλογή του time step μοιάζει ιδιαίτερα με αυτή της ανεξαρτησίας του πλέγματος. Έτσι, δοκιμάζονται διαφορετικά time steps και μετράται μία μεταβλητή σε ένα σημείο του πεδίου ροής. Ως καταλληλότερο time step χαρακτηρίζεται αυτό για το οποίο δεν παρατηρούνται διαφορές στις τιμές της μετρούμενης μεταβλητής συγκρινόμενο με ένα μικρότερο.

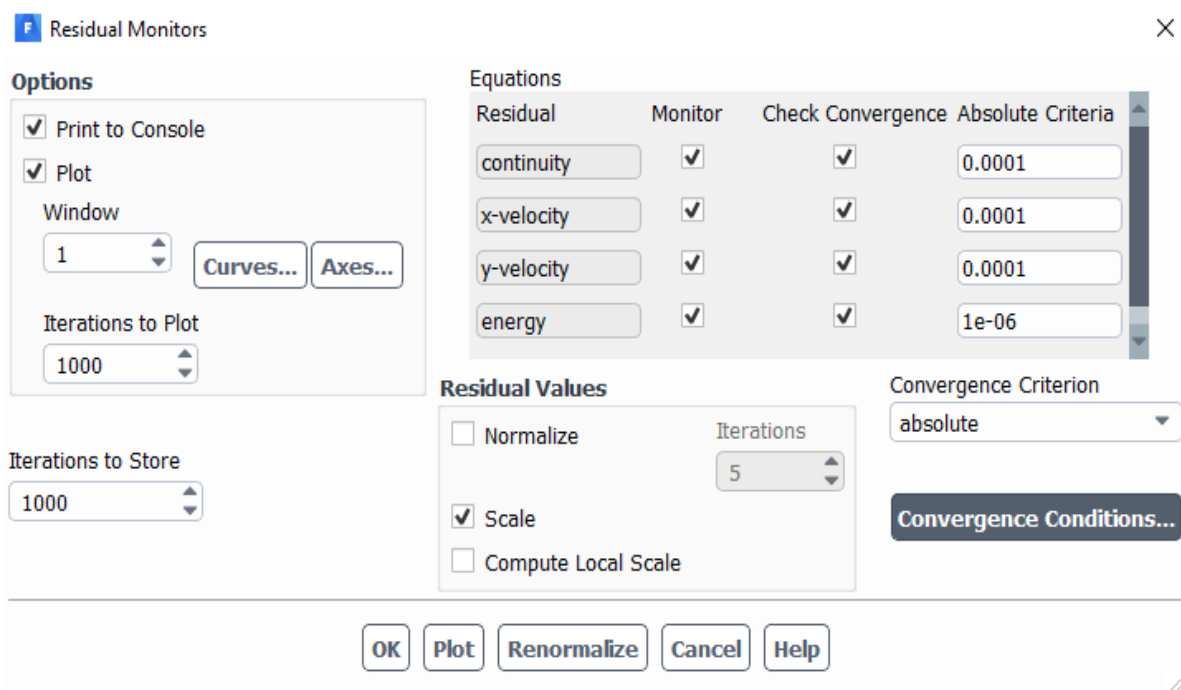
Στο πρόβλημα μας δοκιμάζονται 5 διαφορετικά χρονικά βήματα (10 sec, 5 sec, 4 sec, 3 sec, 2 sec). Για να ελέγξουμε την καταλληλότητά τους επιλέγουμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία σε ένα σημείο της γεωμετρίας που αντιστοιχεί στο κέντρο μίας ρώγας σταφυλιού. Για το σκοπό αυτό δημιουργούμε ένα σημείο (point) με συντεταγμένες $x=56,34\text{ mm}$ και $y=84,51\text{ mm}$ και πάνω σε αυτό καταγράφεται η θερμοκρασία για κάθε time step και για χρόνο ροής που αντιστοιχεί σε 500 sec. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στο *Σχήμα 2*. Παρατηρώντας, το *Σχήμα 2*, διαπιστώνουμε ότι για τα μεγάλα βήματα παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων. Όσο προχωράμε σε μικρότερα χρονικά βήματα οι διαφορές αυτές αμβλύνουν και συγκρίνοντας τα χρονικά βήματα των 3 sec και των 2 sec, αντιλαμβανόμαστε ότι οι διαφορές αυτές είναι πλέον αμελητέες. Αυτό το συμπέρασμα εξάγεται περνώντας και από τα σημεία από μία γραμμή τάσης, η οποία δεν φαίνεται να διαφέρει για τις δύο σειρές δεδομένων. Αυτό μας οδηγεί στην επιλογή των 3 sec.



Σχήμα 2. Θερμοκρασία στο σημείο $x=56,34$ mm και $y=84,51$ mm για διαφορετικά χρονικά βήματα (2, 3, 4, 5 και 10 sec)

4.3.6 Υπολογισμός Λύσεων (Run Calculation)

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω θα προχωρήσουμε στην λήψη των αποτελεσμάτων για το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας στο σταφύλι. Για το πρόβλημα της μη-σταθερής κατάστασης ορίζεται το time step των 3 sec που επιλέχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο όπως επίσης και ο αριθμός των time step και τα iterations/time step. Σαν πρώτο κριτήριο για την επιλογή τους κρίνεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων και ο χρόνος που χρειάζεται προκειμένου η θερμοκρασία στο εσωτερικό του φρούτου να είναι ομοιόμορφη και να πλησιάζει αυτή του μέσου θέρμανσης.



Εικόνα 15. Κριτήρια Σύγκλισης Λύσεων

Κατά συνέπεια η διαφορά μεταξύ διαδοχικών λύσεων για την ενέργεια, τη εξίσωση συνέχειας και την ταχύτητα ορίζονται αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 15*.

Ο χρόνος για τον οποίο θα τρέξει η προσομοίωση ορίζεται στα 4300 sec μετά από δοκιμές μέχρι να υπάρχει τόσο σύγκλιση των αποτελεσμάτων όσο και η επιθυμητή θερμοκρασία του φρούτου. Από αυτό προκύπτει ότι ο αριθμός των time steps ορίζεται ίσος με 1430, ενώ επιλέγεται ο αριθμός των iterations/time step ίσος με 30. Αυτά φαίνονται στην *Εικόνα 16*.

Run Calculation

Check Case...

Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method

Fixed

Settings...

Time Step Size (s)

3

Number of Time Steps

1430

?

Max Iterations/Time Step

30

Reporting Interval

5

Profile Update Interval

0

Data File Quantities...

Acoustic Signals...

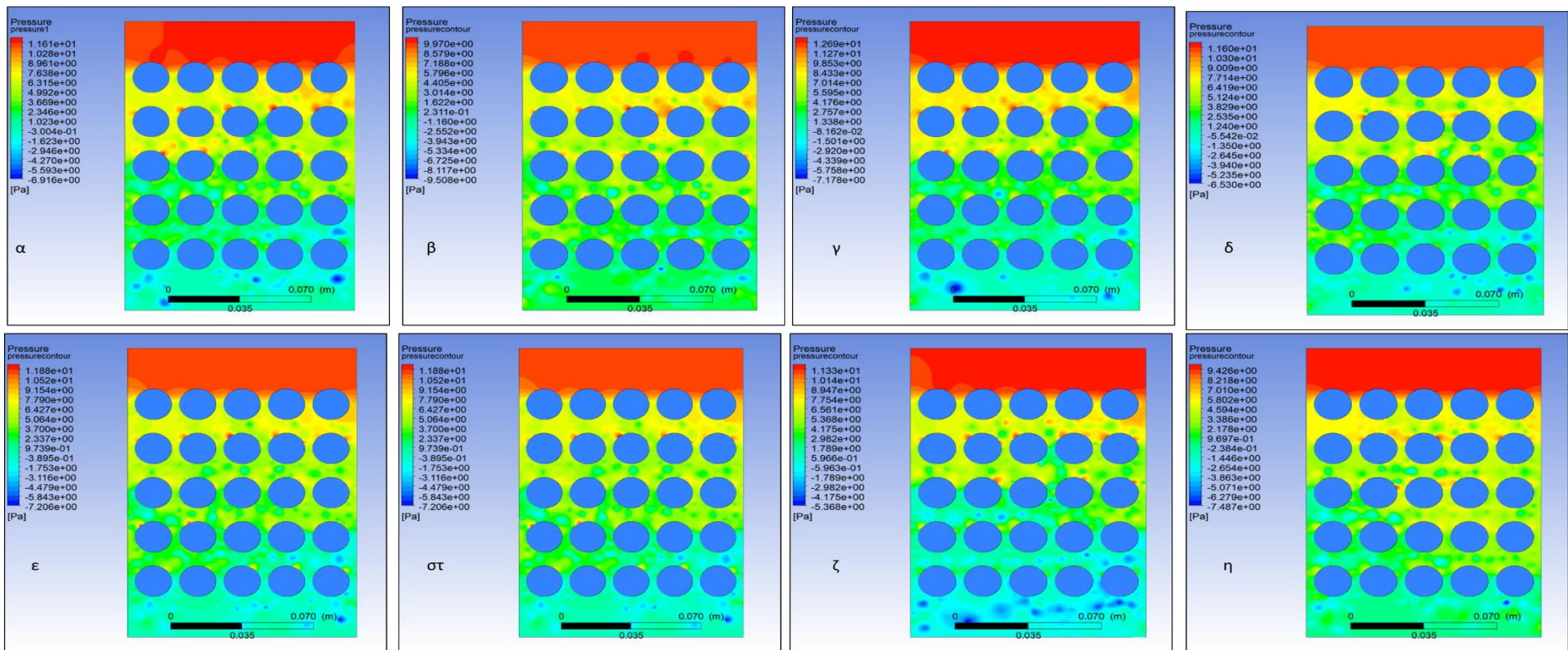
Calculate

Εικόνα 16. Παράμετροι αριθμητικής επίλυσης προσομοίωσης

4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη μεταφορά θερμότητας

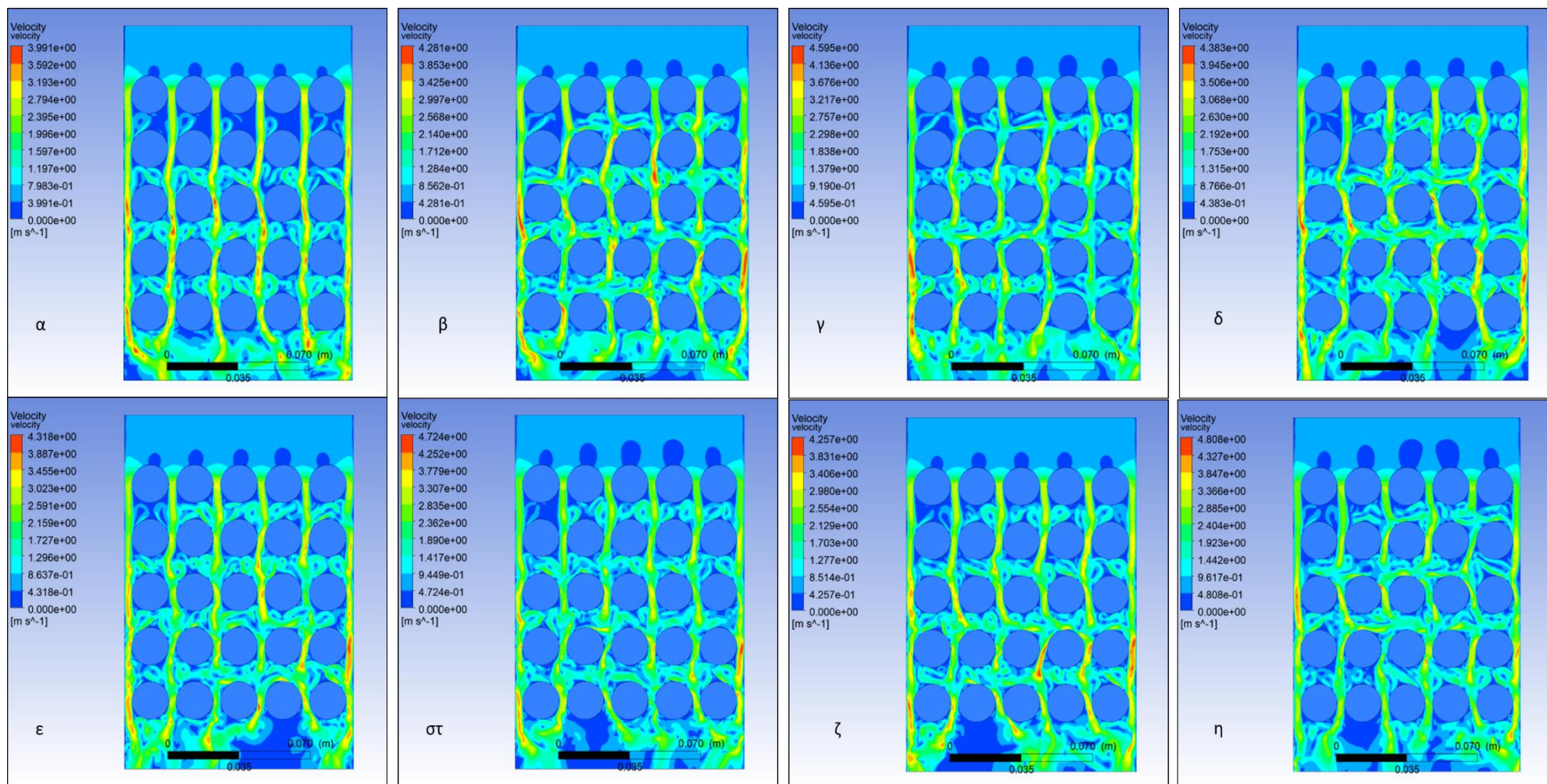
4.4.1 Contours Πίεσης

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης σε όλη τη γεωμετρία. Παρατηρείται μία πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης, το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω μεταβολής και της ταχύτητας κατά μήκος αυτής. Ακόμη, στο εσωτερικό του φρούτου φαίνεται να δημιουργείται μία υποπίεση, η οποία φαίνεται να αυξάνεται καθώς η θερμοκρασία του φρούτου πλησιάζει αυτή του αέρα.



Εικόνα 17. Κατανομή της πίεσης σε όλη τη γεωμετρία τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=1020$ sec (γ) $t=1770$ sec (δ) $t=2270$ sec (ε) $t=2770$ sec (στ) $t=3270$ sec (ζ) $t=3790$ sec και (η) $t=4290$ sec

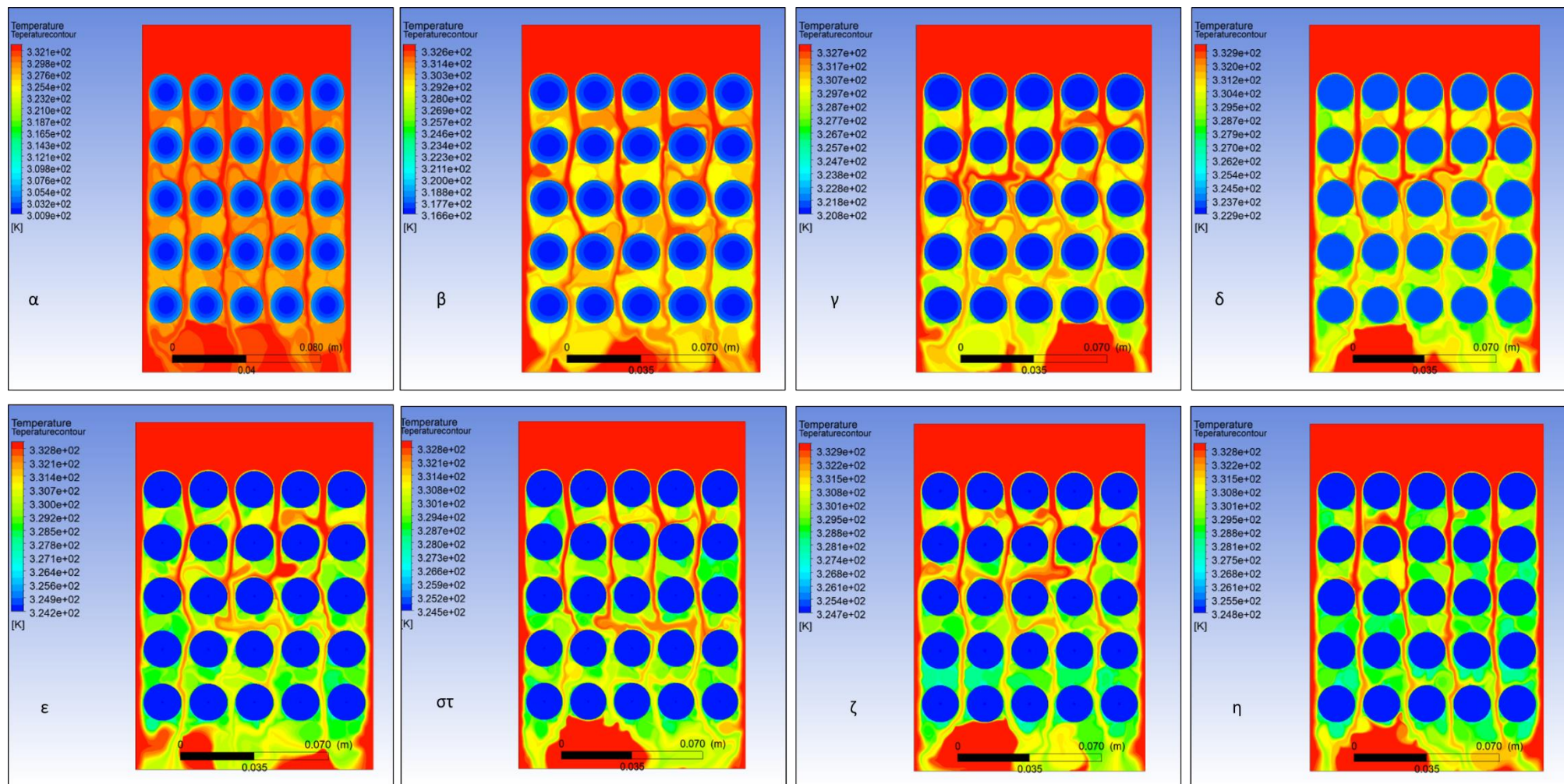
4.4.2 Contours Ταχύτητας



Εικόνα 18. Κατανομή της ταχύτητας σε όλη τη γεωμετρία τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=1020$ sec (γ) $t=1770$ sec (δ) $t=2270$ sec (ε) $t=2770$ sec (στ) $t=3270$ sec (ζ) $t=3790$ sec και (η) $t=4290$ sec

4.4.3 Contours Θερμοκρασίας

Στην Εικόνα 19. εμφανίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε όλη τη γεωμετρία της κλίνης για διαφορετικούς χρόνους ροής.

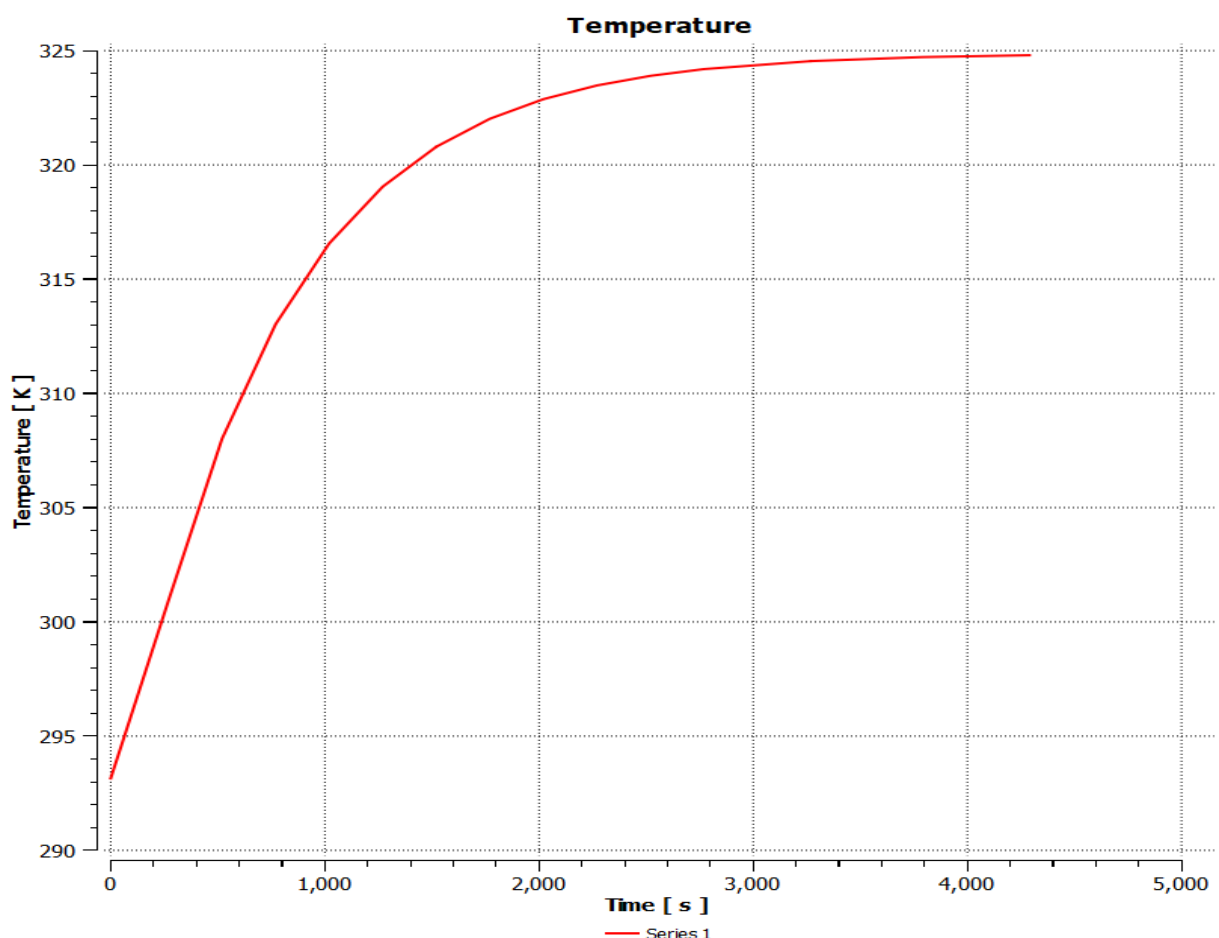


Εικόνα 19. Κατανομή της θερμοκρασίας σε όλη τη γεωμετρία τη χρονική στιγμή (α) $t=270\text{sec}$ (β) $t=1020\text{ sec}$ (γ) $t=1770\text{ sec}$ (δ) $t=2270\text{ sec}$ (ε) $t=2770\text{ sec}$ (στ) $t=3270\text{ sec}$ (ζ) $t=3790\text{ sec}$ και (η) $t=4290\text{ sec}$

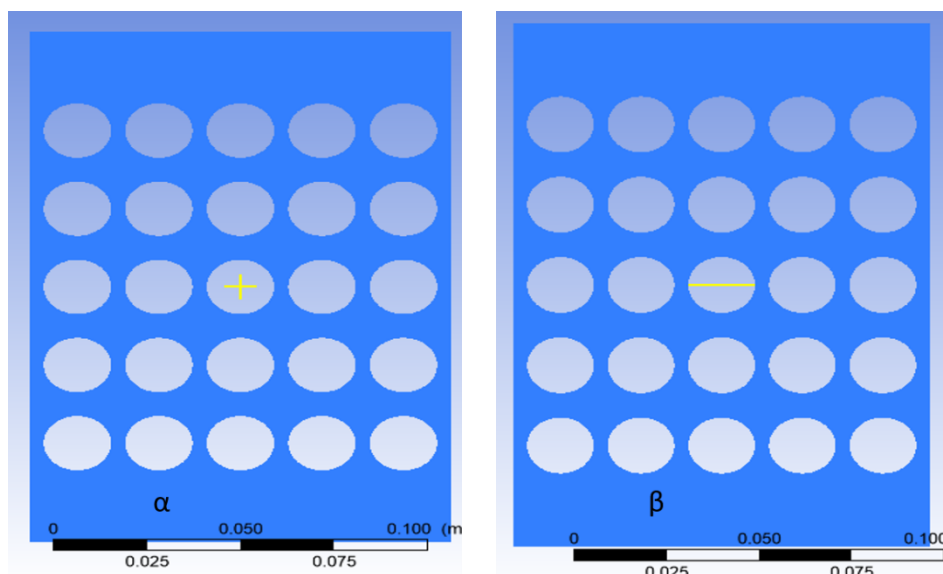
Στην αρχή της ροής η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και των φρούτων είναι αρκετά μεγάλη. Όσο αυξάνεται όμως ο χρόνος ροής η διαφορά αυτή αμβλύνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του φρούτου ενώ παράλληλα μειώνεται αυτή του αέρα λόγω ανταλλαγής θερμότητας. Παράλληλα παρατηρείται και μια χρωματική διαφορά στο εσωτερικό του φρούτου η οποία μεταφράζεται σε κατανομή της θερμοκρασίας εντός αυτού.

4.4.4 Εξέλιξη θερμοκρασίας

Η μελέτη της εξέλιξης της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου γίνεται σε ένα σημείο της γεωμετρίας που έχει συντεταγμένες $x=56,34$ mm και $y=84,51$ mm και το οποίο αντιστοιχεί στη ρωγα του σταφυλιού που βρίσκεται στο κέντρο της κλίνης (Εικόνα 20). Στο Σχήμα 3. φαίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα από $t=0$ έως $t=4290$ sec.



Σχήμα 3. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου στο μέσο της κλίνης ($x=56,34$ mm, $y=84,51$ mm) για το χρονικό διάστημα από $t=0$ έως $t=4290$ sec.

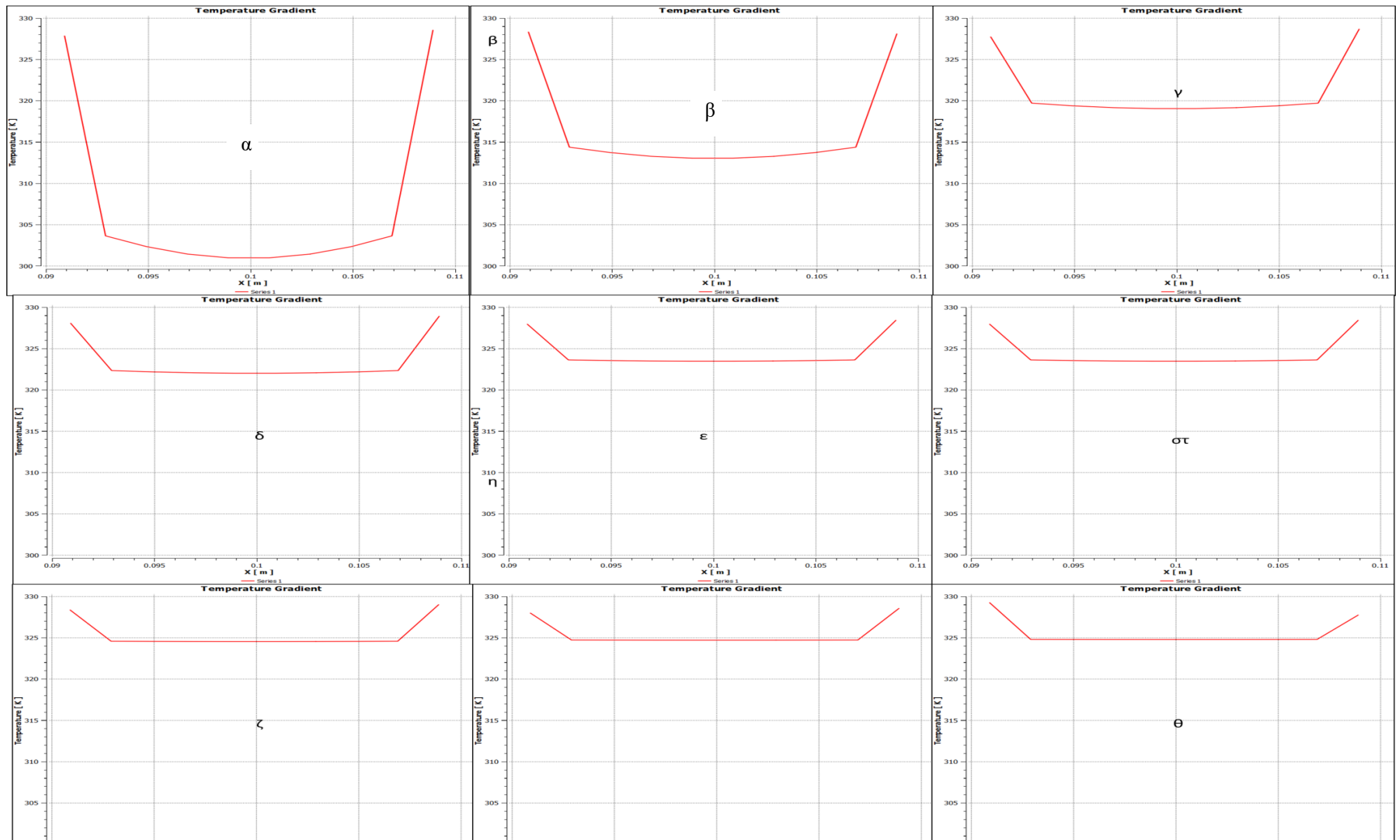


Εικόνα 20. Αναπαράσταση (α) του σημείου και (β) της ρώγας σταφυλιού, στα οποία μελετάται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα από $t=0$ έως $t=4290$ sec

Παρατηρείται ότι στην αρχή η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αρκετά υψηλό ρυθμό, ο οποίος στη συνέχεια μειώνεται μέχρι που μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει για τη θερμοκρασία του φρούτου ότι στην αρχή αυξάνεται αρκετά γρήγορα και όσο πλησιάζει αυτή του μέσου θέρμανσης τόσο μεγαλύτερη αντίσταση βρίσκει.

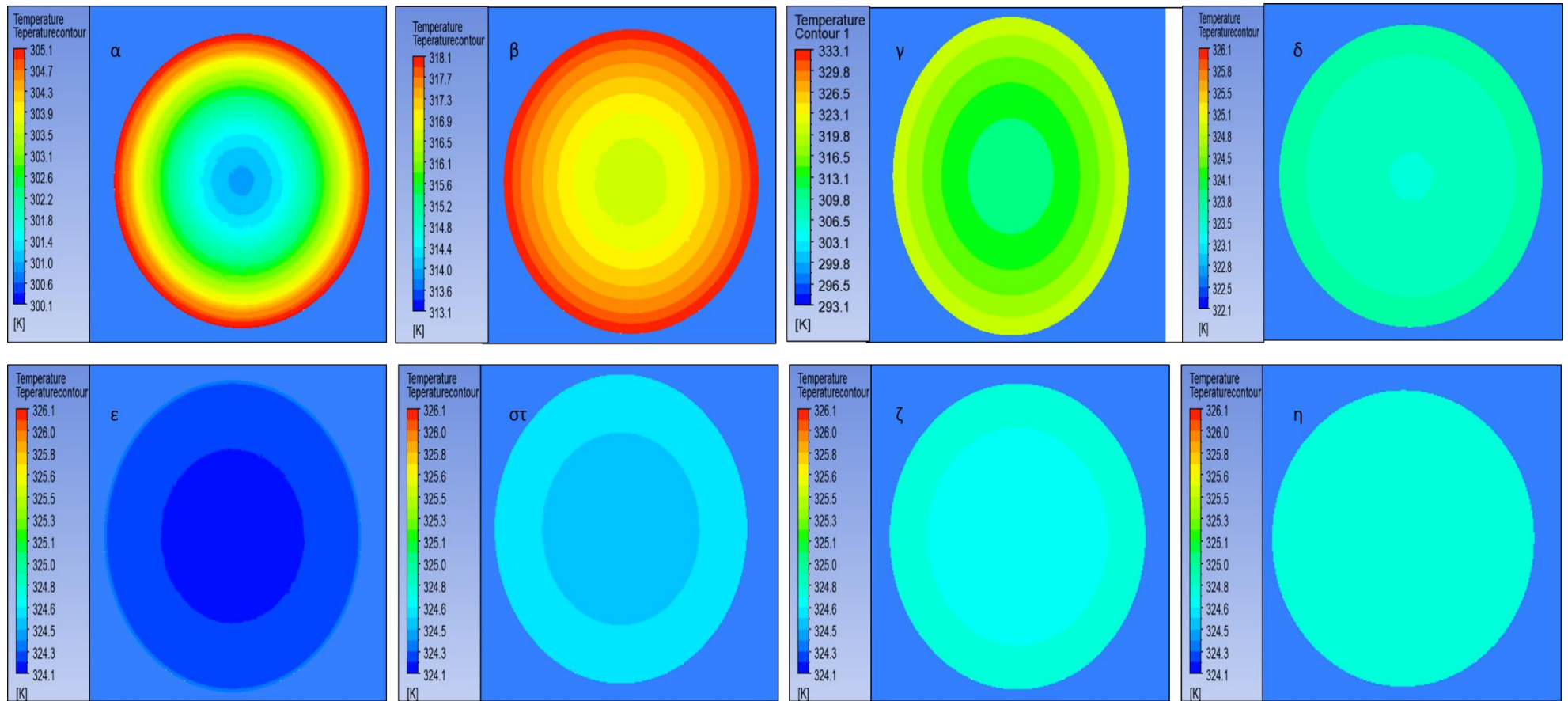
4.4.5 Κατανομή θερμοκρασίας στο φρούτο

Καθώς το πρόβλημα μας είναι μη-σταθερής κατάστασης είναι φυσικό η θερμοκρασία του στερεού να μην είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια αυτού. Παρακάτω απεικονίζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας σε διαφορετικούς χρόνους ροής. Προκειμένου να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη του φαινομένου κατασκευάζεται μία γραμμή κατά μήκος της ακτίνας του φρούτου. Επειδή παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν διαφορές σε ότι αφορά τη θέση του φρούτου στην κλίνη ενδεικτικά κατασκευάστηκε μία γραμμή μεταξύ των σημείων $x_1=47,5$ mm, $y_1=84,51$ mm και $x_2=65,5$ mm, $y_2=84,51$ mm. Τα αποτελέσματα συναρτήσει του χρόνου ροής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 και στην Εικόνα 21.



Σχήμα 4. Κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της διαμέτρου του φρούτου στο μέσο της κλίνης ($x_1=47,5$ mm, $y_1=84,51$ mm και $x_2=65,5$ mm, $y_2=84,51$ mm) τη χρονική στιγμή (α) $t=270$ sec (β) $t=770$ sec (γ) $t=1270$ sec (δ) $t=1770$ sec (ε) $t=2270$ sec (στ) $t=2770$ sec (ζ) $t=3270$ sec (η) $t=3790$ sec και (θ) $t=4290$ sec

Contours Θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φρούτου



Εικόνα 21. Κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φρούτου στο μέσο της κλίνης τη χρονική στιγμή (α) $t=270\text{ sec}$ (β) $t=770\text{ sec}$ (γ) $t=1270\text{ sec}$ (δ) $t=1770\text{ sec}$ (ε) $t=2270\text{ sec}$ (στ) $t=2770\text{ sec}$ (ζ) $t=3270\text{ sec}$ (η) $t=3790\text{ sec}$ και (θ) $t=4290\text{ sec}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα εύκολα διαπιστώνουμε ότι η εξωτερική επιφάνεια του φρούτου που έρχεται σε άμεση επαφή με τον θερμό αέρα αποκτά αμέσως τη θερμοκρασία αυτού, λόγω του φαινομένου της συναγωγής. Σε ότι αφορά το εσωτερικό του φρούτου η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή και το κέντρο αυτού αποτελεί το τελευταίο σημείο που θα θερμανθεί. Στα πρώτα sec της προσομοίωσης η αύξηση της θερμοκρασίας ακολουθεί έναν αρκετά υψηλό ρυθμό. Όσο πλησιάζουμε όμως στη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης ο ρυθμός αυτός μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του φαινομένου τόσο η εξωτερική αντίσταση όσο και η εσωτερική θεωρούνται σημαντικές. Μετά την πάροδο περίπου μίας ώρας παρατηρείται μία τάση σταθεροποίησης της και ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φρούτου.

4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με θεωρητικές τιμές

Κατά τη θέρμανση των φρούτων η κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο στερεό μεταβάλλεται με το χρόνο. Έτσι, στο φρούτο που η αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία είναι ίση με 20 °C, έκθεση του σε θερμό ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 60 °C, θα οδηγήσει στην σταδιακή αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας ενώ όπως είναι αναμενόμενο θα απαιτηθεί κάποιος χρόνος μέχρι να γίνει και πάλι ομοιόμορφη η κατανομή της.

Προκειμένου να υπολογιστεί η κατανομή της θερμοκρασίας είναι απαραίτητη η επίλυση της εξίσωσης ενέργειας, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T + \frac{q_g}{\rho c_p} \quad (39)$$

Όπου α ο συντελεστής θερμικής διάχυσης που ισούται με $k/\rho c_p$ και έχει μονάδες m^2/s .

q_g η θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό του σώματος στη μονάδα του χρόνου (W/m^3) (Γιαννιώτης, 2011)

Η θερμοκρασία υπολογίζεται ως συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και της θέσης x . Ένα χρήσιμο κριτήριο για τέτοιου είδους προβλήματα όπου γίνεται μετάδοση θερμότητας τόσο με αγωγή όσο και με συναγωγή είναι ο αριθμός Biot, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της εσωτερικής αντίστασης που παρουσιάζει ένα σώμα στη ροή θερμότητας στο εσωτερικό του με αγωγή, προς την αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από ένα ρευστό προς την επιφάνεια του στερεού (εξωτερική αντίσταση):

$$Bi = \left(\frac{x_1/k_A}{1/h_A} \right) = \frac{h x_1}{k} \quad (40)$$

Όπου h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό προς την επιφάνεια του στερεού.

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του στερεού

χ : η χαρακτηριστική διάσταση του στερεού (r για σφαίρα και κύλινδρο και $L/2$ για πλάκα) (Γιαννιώτης, 2011).

Για τη δική μας μελέτη, αρχικά για να γίνει η μελέτη χρειάζεται να βρεθεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Αρχικά, εξετάζουμε αν η ταχύτητα εισόδου του αέρα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να θεωρήσουμε ότι έχουμε βεβαιωμένη κυκλοφορία αέρα στο πρόβλημα μας. Αυτό, θα γίνει μέσω του αριθμού Αρχιμήδη (Ar), που υπολογίζεται από την Εξ. 41 ως εξής:

$$Ar = \frac{Gr}{Re_p^2} \quad (41)$$

Όπου Re_p : ο αδιάστατος αριθμός Reynolds και

Gr : ο αδιάστατος αριθμός Grashof

Οι αριθμοί Reynolds και Grashof του προβλήματος μας υπολογίζονται ως εξής:

$$Re_p = \frac{\rho u d_p}{\mu} = \frac{1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,5 \text{ m/s} \cdot 0,018 \text{ m}}{1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 616,1 \quad (42)$$

$$Gr = \frac{g \beta \rho^2}{\mu} (T_\infty - T_0) d_p^3 = \frac{9,81 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,225}{(1,7894 \cdot 10^{-5})^2} (60 - 20) \cdot 0,018^3 = 32.222,55 \quad (43)$$

Όπου g : η επιτάχυνση της βαρύτητας m/s^2

u : η ταχύτητα του ρευστού m/s

d_p : η διάμετρος του φρούτου

β : ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα $1/K$

T_∞ : η θερμοκρασία του ρευστού $^\circ\text{C}$

T_0 : η θερμοκρασία του φρούτου $^\circ\text{C}$

μ : το ιξώδες του ρευστού kg/ms

ρ : η πυκνότητα του αέρα kg/m^3

Με βάση τους αριθμούς Reynolds και Grashof, ο αριθμός Αρχιμήδης βρίσκεται ίσος με $Ar = 0,085$.

Με δεδομένο ότι $Ar < 1$, η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή γίνεται με βεβαιωμένη κυκλοφορία.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται μέσω του αριθμού Nusselt, ο οποίος αντίστοιχα εξαρτάται από τους αριθμούς Reynolds και Prandtl.

Θα εξετάσουμε τρεις περιπτώσεις, όπου στην πρώτη θεωρείται ότι αέρας ρέει γύρω από την εξωτερική επιφάνεια σφαίρας, στην δεύτερη γύρω από κύλινδρο ενώ στην Τρίτη γύρω από την εξωτερική επιφάνεια πλάκας. Η πρώτη προκύπτει από δική μας θεώρηση, ενώ η δεύτερη αποτελεί προσέγγιση των Ghiaus, Margaris και Papanikas (1997).

Ροή γύρω από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας

Ο αριθμός Reynolds έχει υπολογιστεί προηγουμένως από την Εξ. 42

Ο αδιάστατος αριθμός Prandtl βρίσκεται από την Εξ. 44, ως εξής:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{1,7894 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,43}{0,0242} = 0,7442 \quad (44)$$

Με δεδομένο ότι $1 < Re < 70000$ και $0,6 < Pr < 400$, ο αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση:

$$Nu = 2 + 0,60 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 15,496 \quad (45)$$

Και κατά συνέπεια ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d_p} = \frac{15,496 \cdot 0,0242}{0,018} = 20,833 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad (46)$$

Ροή γύρω από την εξωτερική επιφάνεια κυλίνδρου

Οι αριθμοί Reynolds και Prandtl έχουν υπολογιστεί προηγουμένως από τις Εξ. 42 και Εξ. 44.

Με δεδομένο ότι $40 < Re < 4000$, ο αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση:

$$Nu = 0,683 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 15,363 \quad (47)$$

Και κατά συνέπεια ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d_p} = \frac{15,363 \cdot 0,0242}{0,018} = 20,655 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad (48)$$

Ροή γύρω από την εξωτερική επιφάνεια της πλάκας

Για τη ροή γύρω από πλάκα, ο αριθμός Reynolds δίνεται από την Εξ. 49

$$Re_L = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,170}{1,7894 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 5818 \quad (49)$$

Και επειδή $Re_L < 300.000$, ο αριθμός Nusselt βρίσκεται από την Εξ. 50

$$Nu = 0,664 \cdot Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} = 0,664 \cdot 5818^{\frac{1}{2}} 0,7442^{\frac{1}{3}} = 45,90 \quad (50)$$

Επιπλέον, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας βρίσκεται από την Εξ. 51

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = 6,534 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad (51)$$

Από την Εξ. 40 προκύπτουν οι αριθμοί $Bi=0,32$ για τη σφαίρα και τον κύλινδρο και $Bi=0,635$ για την πλάκα, καθιστώντας σημαντική τόσο την εσωτερική όσο και την εξωτερική αντίσταση σημαντικές και υπάρχει κατανομή θερμοκρασίας τόσο μεταξύ στερεού και ρευστού όσο και στο εσωτερικό του στερεού.

Με βάση το παραπάνω, η θερμοκρασία στο κέντρο της γεωμετρίας μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$\vartheta_0 = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} K_n e^{-\delta_n^2 Fo} \leftrightarrow T = T_\infty - (T_\infty - T_0) \cdot \vartheta_0 \quad (52)$$

Όπου T η θερμοκρασία στο κέντρο του φρούτου

T_∞ η θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης (60 °C)

T_0 η αρχική θερμοκρασία του φρούτου (20 °C)

K_n και δ_n είναι σταθερές οι τιμές των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 7 για τους 4 πρώτους όρους.

Fo ο αριθμός Fourier, που δίνεται από τη σχέση $Fo = a \cdot t / R^2$ (53)

(Γιαννιώτης, 2011).

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζεται η θερμοκρασία στο κέντρο του φρούτου για χρόνους από 0 μέχρι 900 sec και με βήμα 3 sec. Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης κατασκευάστηκε μια ακόμα πιο απλή γεωμετρία, στην οποία αντί για 25 σωματίδια, σχεδιάσαμε μόλις ένα στο κέντρο ακριβώς της κλίνης. Η γεωμετρία αυτή παρουσιάστηκε στην Εικόνα 4 και θεωρείται περισσότερο αντιπροσωπευτική για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για τη μελέτη του προβλήματος επαναλήφθηκαν και όλα τα προηγούμενα στάδια, δημιουργία πλέγματος, ανεξαρτησία πλέγματος, ορισμός boundary conditions και επιλογή time step.

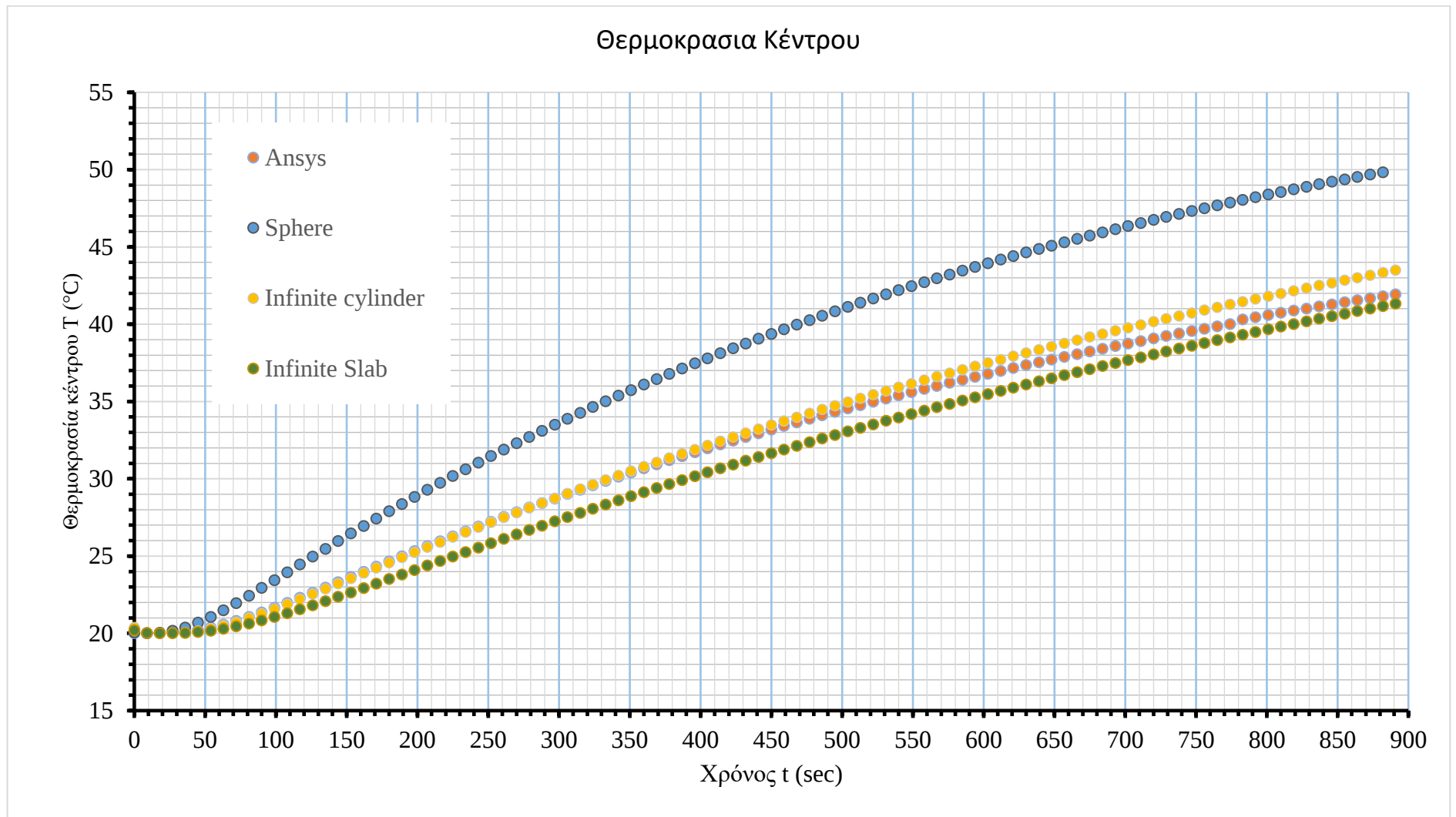
Μετά την αριθμητική επίλυση με τη χρήση της προσομοίωσης λήφθηκαν τα αποτελέσματα για την εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της θεωρητικής προσέγγισης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικές τιμές δ_n και K_n για Σφαίρα, Κύλινδρο και Πλάκα

	Σφαίρα	Κύλινδρος	Πλάκα
	Bi=0,32	Bi=0,32	Bi=0,635
δ_1	0,9491	0,7691	0,7216
δ_2	4,5645	3,9142	3,3300
δ_3	7,7667	7,0609	6,3824
δ_4	10,9335	10,2048	9,4915
K_1	1,0937	1,0756	1,0851
K_2	-0,1433	-0,1034	-0,1066
K_3	0,0831	0,0427	0,0306
K_4	-0,0588	-0,0246	-0,0140

Παρατηρώντας το Σχήμα 5 με βάση τη δική μας θεώρηση της εξωτερικής ροής γύρω από σφαίρα οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και αυτών που προκύπτουν από τις εξισώσεις είναι αρκετά μεγάλες, το ίδιο δεν ισχύει όμως στις περιπτώσεις της εξωτερικής ροής γύρω από πλάκα και κύλινδρο.

Η πρώτη προσέγγιση φαίνεται να υπερεκτιμά τα αποτελέσματα και στο τέλος των 900 sec, η διαφορά αυτή να αγγίζει τους 9 °C, ενώ στις άλλες δύο πλησιάζει πολύ τις θερμοκρασίες που προκύπτουν από την προσομοίωση, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από μία διαφορά μικρότερη του 1 °C μετά το πέρας των 900 sec. Στην πρώτη περίπτωση η αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται να γίνεται με ταχύτερο ρυθμό από αυτόν που προβλέπεται με τη χρήση της προσομοίωσης. Οι τυχόν διαφορές είναι αρκετά αναμενόμενες καθώς οι εξισώσεις αποτελούν μία απλοποιημένη προσέγγιση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας σε μη-σταθερή κατάσταση και τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται από μία συγκεκριμένη τιμή των επιμέρους παραμέτρων αλλά αποτελούν τα αποτελέσματα μιας γενικευμένης συνάρτησης των αδιάστατων αριθμών Biot και Fourier. Ακόμη, οι διαφορές αυτές σε ότι αφορά την ροή γύρω από σφαίρα πιθανόν να αμβλυνθούν στην περίπτωση που το πρόβλημα επιλυθεί με προσομοίωση σε τρισδιάστατη ροή. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την προσομοίωση προσεγγίζουν αρκετά αυτά που προκύπτουν από την χρήση εξισώσεων και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την προσέγγιση του συντελεστή μεταφοράς μάζας για την περίπτωση της ξήρανσης (Ghiaus, Margaritis, & Papanikass, 1997).



Σχήμα 5. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου στο μέσο της κλίνης μέσω της προσομοίωσης(ansys) και των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας σε μη σταθερή κατάσταση (Sphere, Infinite Cylinder, Infinite Slab)

4.6 Πτώση Πίεσης

Το ρευστό που ρέει μέσω του όγκου των σφαιρικών σωματιδίων και η πτώση πίεσης κατά μήκος της σταθερής κλίνης σχετίζεται με το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα τους, την ευθυγράμμιση των σωματιδίων και το κενό κλάσμα ε (ή πορώδες). Η συσχέτιση τη ταχύτητας του ρευστού και της πτώσης πίεσης κατά μήκος/ύψος της κλίνης περιγράφεται από την εξίσωση Ergun to 1952. Η εξίσωση Ergun ακολουθήθηκε από τις εξισώσεις των Blake-Kozery και των Burke-Plummer. Οι σταθερές των Blake-Kozery-Carman (A) και των Burke-Plummer (B) είναι 150 και 1,75 αντίστοιχα.

$$\text{Ergun:} \quad \frac{\Delta P}{L} = A \frac{\mu(1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} \cdot v_x + B \frac{\mu(1-\varepsilon)\rho}{d \varepsilon^3} \cdot v_x^2 \quad (54)$$

Όπου A η σταθερά των Blake-Kozery-Carman

L το ύψος της κλίνης (m)

B η σταθερά των Burke-Plummer

d η διάμετρος του σωματιδίου (m)

ε το πορώδες της κλίνης

μ το ιξώδες του ρευστού (kg/ms)

v_x η ταχύτητα του ρευστού (m/s) (Prukwarun, Khumchooo, Seancotr, & Phupaichitkun, 2013).

Η αντίστοιχη ανάλυση για την πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης μπορεί να γίνει και με τη βοήθεια του ANSYS. Η γεωμετρία του προβλήματος μας έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ιδιαίτερα απλή καθώς ο όγκος των σωματιδίων μπορεί να εξεταστεί ως ένα ενιαίο πορώδες υλικό. Σε αυτή την περίπτωση η πτώση πίεσης (ΔP) μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$\text{ANSYS:} \quad \frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\alpha} \cdot v + \frac{\rho C_2}{2} v^2 \quad (55)$$

Όπου μ το ιξώδες του ρευστού (kg/ms)

v η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

$1/\alpha$ η ιξώδης αντίσταση (viscous resistance) και

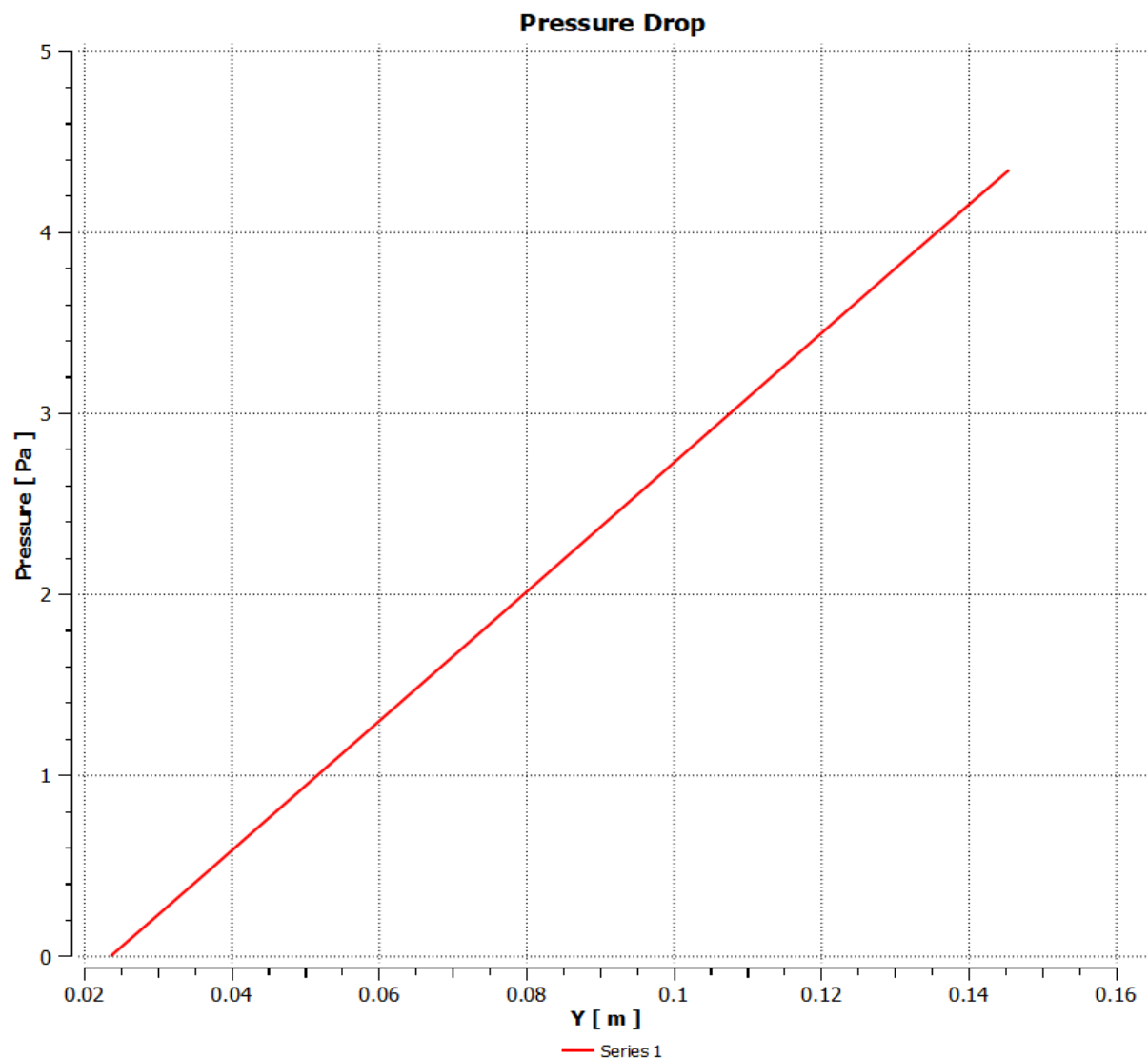
C_2 η αδρανειακή αντίσταση

Η εξίσωση αυτή είναι άμεσα συγκρίσιμη με αυτή του Ergun, και κατά συνέπεια με τη σύγκριση τους και με δεδομένη τη διάμετρο των σωματιδίων d και του πορώδους της κλίνης ε μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν οι σταθερές $1/\alpha$ και C_2 .

Πιο συγκεκριμένα στη δική μας περίπτωση η διάμετρος των σωματιδίων είναι ίση με 18 mm ενώ το πορώδες της κλίνης έχει επιλεγεί ώστε να είναι $\varepsilon=0,666$. Κατά συνέπεια συγκρίνοντας τις δύο εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$A \frac{\mu(1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} \cdot v = \frac{\mu}{\alpha} \cdot v \leftrightarrow \frac{1}{\alpha} = 150 \frac{(1-0,666)^2}{0,018^2 0,666^3} \leftrightarrow \frac{1}{\alpha} = 1,7489 \cdot 10^5 \text{ m}^{-2} \quad (56)$$

$$B \frac{\mu(1-\varepsilon)\rho}{d \varepsilon^3} v^2 = \frac{\rho C_2}{2} v^2 \leftrightarrow C_2 = 2 \cdot 1,75 \frac{1-0,666}{0,018 \cdot 0,666^3} \leftrightarrow C_2 = 219,90 \text{ m}^{-1} \quad (57)$$



Σχήμα 6. Πτώση Πίεσης κατά μήκος της πορώδους ζώνης κατά τη διάρκεια της μεταφοράς θερμότητας

Στο Σχήμα. 6 απεικονίζεται η πίεση κατά μήκος μίας γραμμής που εκτείνεται στο μέσο της πορώδους ζώνης. Παρατηρώντας, το Σχήμα 6 μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε ότι η πτώση πίεσης που συμβαίνει κατά μήκος της πορώδους ζώνης που σχηματίζουν τα σταφύλια, μετά το πέρας των 4290 sec της θέρμανσης είναι κατά προσέγγιση 4,5 Pa. Η πτώση πίεσης σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί έναν από τους σχεδιαστικούς παράγοντες για τους ξηραντήρες. Γενικότερα, όπως και στη δική μας περίπτωση είναι επιθυμητή μία μικρή πτώση πίεσης προκειμένου να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη ροή του ρευστού εντός της κλίνης, γεγονός που θα οδηγήσει αρχικά σε ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας και στη συνέχεια και σε ομοιόμορφη ξήρανση των προϊόντων.

4.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας, με χρήση εργαλείων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), που συντελείται κατά την έκθεση των σταφυλιών σε θερμό ρεύμα αέρα, με σκοπό την κατανόηση της διεργασίας της ξήρανσης και τελικά το βέλτιστο σχεδιασμό της διεργασίας. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας σε μη-σταθερή κατάσταση. Τα σταφύλια, διαμέτρου 18 mm, τοποθετήθηκαν σε μία κλίνη, μήκους $L=170$ mm και διαμέτρου $D=113$ mm, στην οποία εισέρχεται αέρας θερμοκρασίας $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ταχύτητας $u=0,5$ m/s και εξετάστηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους συναρτήσει του ροϊκού και θερμοκρασιακού πεδίου. Η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα του φρούτου ήταν οι κύριες παράμετροι που χρειάστηκαν για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας για αυτό υπολογίστηκαν με τη χρήση εξισώσεων και βρέθηκαν ίσες με $1073,39\text{ kg/m}^3$, $3,690\text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ και $0,583\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Παράλληλα, τα τοιχώματα της κλίνης ήταν κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ίσο με $7,9\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατανοούμε ότι η επιφάνεια του φρούτου αποκτάει σχεδόν αμέσως τη θερμοκρασία του αέρα, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει και στο εσωτερικό αυτού. Το κέντρο του φρούτου, αποτελεί το τελευταίο σημείο που θα θερμανθεί. Ακόμη, παρατηρούμε ότι στην αρχή η θερμοκρασία του φρούτου αυξάνεται με αρκετά μεγάλο ρυθμό, ο οποίος σταδιακά μειώνεται μέχρι που η θερμοκρασία πλησιάζει αυτή του μέσου θέρμανσης. Ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου η θερμοκρασία στο κέντρο του φρούτου να πλησιάσει αυτή του αέρα και να σταθεροποιηθεί εκτιμάται μέσω της προσομοίωσης στη μιάμιση ώρα. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από τις εξισώσεις της μεταφοράς θερμότητας σε μη σταθερή κατάσταση, με δεδομένο ότι η συναγωγή πραγματοποιείται με βεβαιωμένη κυκλοφορία αέρα, το οποίο μάλιστα επιβεβαιώθηκε και από τον μικρό αριθμό Αρχιμήδη. Παρατηρήθηκε ότι η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του φρούτου είναι αρκετά παρόμοια με αυτή που προέκυψε από την προσομοίωση. Οι διαφορές που παρατηρούνται οφείλονται στον σταθερό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται για την θεωρητική προσέγγιση, παραδοχή η οποία δεν ισχύει στην περίπτωση της προσομοίωσης καθώς εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από τη θερμοκρασία, όπως επίσης και στο γεγονός ότι το μήκος της κλίνης δεν είναι σημαντικά μεγαλύτερο από την διάμετρο αυτής. Ακόμη, η πτώση πίεσης που συμβαίνει κατά μήκος της κλίνης είναι αρκετά μικρή.

Τα παραπάνω αποτελέσματα περιορίστηκαν στην μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του φρούτου, ενώ δεν εξετάστηκε η μεταφορά μάζας λόγω της ξήρανσης του φρούτου. Η μεταφορά υγρασίας από το φρούτο στο περιβάλλον του αέρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση UDF, που να εισάγει στην προσομοίωση τους νόμους του Fick συναρτήσει και της μεταφοράς θερμότητας. Ακόμη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτή την περίπτωση έχει να ληφθεί υπόψη η συρρίκνωση που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ξήρανσης το οποίο επίσης δεν μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα δεδομένα για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη δύνανται να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς μάζας και στη συνέχεια με βάση και την ενεργότατα του φρούτου να εξαχθεί η καμπύλη ξήρανσης. Αυτό ωστόσο θα μπορούσε να αποτελέσει το αντικείμενο μίας ολόκληρης μεταπτυχιακής μελέτης ή και διδακτορικής διατριβής σε συνδυασμό με την αξιοποίηση και πειραματικών δεδομένων.

Τέλος, στη βιβλιογραφία δεν βρέθηκαν αντίστοιχα αποτελέσματα για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αυτή είναι και η βασική αδυναμία της επίλυσης τέτοιου είδους προβλημάτων με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και αποτελεί το μέλλον στον σχεδιασμό των διεργασιών στην βιομηχανία τροφίμων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson, J. W., & Waters, A. R. (2013). Raisin Consumption by Humans: Effects on Glycemia and Insulimemia and Cardiovascular Risk Factors. *Journal of Food Science*, 78(S1), σσ. A11-A17.
- ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. (2009, January 29). Ανάκτηση από https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug//main_pre.htm
- Ardejani, F. D., Baafi, E., Panahi, K. S., Singh, R. N., & Shokri, B. J. (2011). Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Simulation of Acid Mine Drainage Generation and Subsequent Pollutants Transportation through Ground water Flow Systems and Rivers.
- Barnes, J. L., Schramm, D. D., Keen, C., Painter, J. E., & Waters, A. R. (n.d.). Raisin consumption may lower circulating oxidized LDL levels, potentially decreasing the risk of coronary heart disease. *Journal of the American Dietetic Association*, 111.
- Bays, H., Weiter, K., & Anderson, J. W. (2015). A randomized study of raisins versus alternative snacks on glycemic control and other cardiovascular risk factors in patients with type 2 diabetes mellitus. *The Physician and Sport Medicine*, σσ. 1-7.
- Booth, S. L., Sadowski, J. A., & Pennington, G. T. (1995). Phylloquinone (Vitamin K) Content of Foods in the U.S. Food and Drug Administration's Total Diet Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(6), σσ. 1574-1579.
- Breslin, J. S. (2020). Drying. Στο *Breakfast Cereals And How They Are Made* (σσ. 249-269). Elsevier Inc.
- Capanoglu, E. (2014). Investigating the Antioxidant Potential of Turkish Dried Fruits. *International Journal of Food Properties*(17), pp. 690-702.
- Carlescu, P.-M., Arsenoaia, V., Rosca, R., & Tenu, I. (2017). CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying. *LWT- Food Science and Technology*(85).
- Dai, J., Rao, J., Wang, D., Xie, L., Xiao, H., Liu, Y., & Gao, Z. (2015). Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves. *Drying Technology*, 33(3), σσ. 365-376.
- Day, A. J., Canada, F. J., Diaz, J. C., Kroon, P. A., McLauchlan, W. R., & Faulds, C. B. (2000). Dietary flavonoid and isoflavone glycosides are hydrolysed by the lactase site of lactase phlorizin hydrolase. 468, σσ. 166-170.
- De Pascal-Teresa, S., Morepo, D. A., & Garcia-Viguera, C. (2010). Flavonols and anthocyanins in cardiovascular health: A review of current evidence. *International Journal of Molecular Sciences*(11), σσ. 1679-1703.
- Dhekney, S. (2016). Grapes. Στο *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier Ltd.
- Doymaz, I. (2006). Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *Journal of Food Engineering*, 76(2), σσ. 212-217.
- FAO. (2013). FaoStat Database. Ανάκτηση από <http://faostat.fao.org>.

- Franke, A. A., Custer, L. J., Arakaki, C., & Murphy, S. P. (2004). Vitamin C and flavonoid levels of fruits and vegetables consumed in Hawaii. *Journal of Food Compositional Analysis*, 17, σσ. 1-35.
- Garrido, J., & Borges, F. (2013). Wine and grape polyphenols-A chemical perspective. *Food Research International*(54), σσ. 1844-1858.
- Ghiaus, A., Margaris, D., & Papanikas, D. (1997). Mathematical Modeling on the Convective Drying. *Journal of Food Science*, 62(6), 1154-1157.
- Heldman, R. D., & Singh, P. (1981). *Food Process Engineering*. Connecticut: The AVI Publishing Co Inc.
- Hollman, P. C., Bijlsman, M. N., van Gameren, Y., Cnossen, E. P., de Vries, J. H., & Katan, M. B. (1999). The sugar moiety is a major determinant of the absorption of dietary flavonoid glycosides in man. *Free Radical Research*, 31, σσ. 569-573.
- Jairaj, K., Singh, S., & Srikant, K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy*, 83(9), σσ. 1698-1712.
- Karadeniz, F., Durst, R. W., & Wrolstad, R. E. (2000). Polyphenolic composition of raisins. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 48, pp. 5343-5350.
- Kelebek, H., Jourdes, M., Serkan, S., & Teissedre, P. (2013). Comparative evaluation of the phenolic content and antioxidant capacity of sun-dried raisins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93, pp. 2963-2972.
- Kerr, W. (2019). Food Drying and Evaporation Processing Operations. Στο *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (σσ. 353-387). Elsevier Inc.
- Kevers, C., Falkowski, M., Tabart, J., Defraigne, J.-O., Dommès, J., & Pincemail, J. (2007). Evolution of antioxidant capacity during storage of selected fruits and vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, σσ. 8596-8603.
- Lafay, S., Gil-Izquierdo, A., Manach, C., Morand, C., Besson, C., & Scalbert, A. (2006). Chlorogenic acid is absorbed in its intact form in the stomach of rats. *Journal of Nutrition*, 136, σσ. 1192-1197.
- Liggins, J., Bluck, L. J., Runswick, S., Atkinson, C., Coward, W. A., & Bingham, S. A. (2000). Daidzein and genistein content of fruits and nuts. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 11, σσ. 326-331.
- Manach, C., Williamson, G., Morand, C., Scalbert, A., & Remesy, C. (2005). Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans I. Review of 97 bioavailability studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 81, σσ. 230S-242S.
- Margaris, D., & Ghiaus, A.-G. (2006). Dried product quality improvement by air flow manipulation in tray dryers. *Journal of Food Engineering*(75), σσ. 542-550.
- Maroulis, Z., & Saravacos, G. (2003). *Food Process Design*. Athens : Marcel Dekker Inc.
- Marshall, E. M., & Bakker, A. (2002). *Computational Fluid Mixing*. USA: Fluent Inc.

- McCabe, Smith, & Harriott. (n.d.). Ξήρανση των Στερεών. Στο *Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Meng, J., Fang, Y., Zhang, A., Chen, S., Xu, T., & Ren, Z. (2011). Phenolic content and antioxidant capacity and antipogenic activity. *Journal of Food Science*, 75, pp. H5-H12.
- Mishra, N., Dubey, A., Mishra, R., & Barik, N. (2010). Study on antioxidant activity of common dry fruits. *Food and Chemical Toxicology*, 48, pp. 3316-3320.
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. USA: CRC press.
- Narendhirakannan, R. T., Nirmala, J. G., Caroline, A., Lincy, S., Saj, M., & Durai, D. (2012). Evaluation of antibacterial, antioxidant and wound healing properties of seven traditional medicinal plants from India in experimental animals. *Journal of Tropical Biomedicine*, σσ. S1245-S1253.
- Norton, T., & Sun, D.-W. (2019). An Overview of CFD Applications in the Food Industry. In *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. CRC Press.
- Ouchemoukh, S., Hachoud, S., Boudraham, H., Mokrani, A., & Louaileche, H. (2012). Antioxidant activities of some dried fruits consumed in Algeria. *LWT-Food Science and Technology*, pp. 329-332.
- Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L., & Sarsavadia, P. N. (1999). Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 211-216.
- Pangawhane, D., & Sawhney, R. (2002). Review of research and development work on solar dryers for grape drying. *Energy Conversion and Management*, 43(1), σσ. 45-61.
- Prukwarun, W., Khumchooo, W., Seancotr, W., & Phupaichitkun, S. (2013, March). CFD Simulation of fixed bed dryer by using porous media concepts: Unpeeled longan case. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, σσ. 100-110.
- Raman, R., Dewang, Y., & Raghuwanshi, J. (2018). A review on applications of computational fluid dynamics. 2(6).
- Renouf, M., Guy, P. A., Marmet, C., Fraering, A. L., Longet, K., & Moulin, J. (2009). Measurement of caffeic and ferulic acid equivalents in plasma after coffee consumption: small intestine and colon are key sites for coffee metabolism. *Molecular Nutrition and Food Research*, 54, σσ. 760-766.
- Sabarez, H. (2020). *Advances Drying Technologies of Relevance in the Food Industry*. Australia: Elsevier Inc.
- Shahrzad, S., & Bitsch, I. (1998). Determination of gallic acid and its metabolites in human plasma and urine by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography: Biomedical Sciences and Applications*, 705, σσ. 87-95.
- Shang, J. S. (2004). Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 40, σσ. 173-197.

- Togrul, I., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), σσ. 413-425.
- Toolbox, T. E. (2003). Fluid Heat Transfer Coefficients - Heat Exchanger Surface Combinations. Ανάκτηση από https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html
- Tzempelikos, D., Mitrakos, D., Vouros, A., Bardakas, A., Filios, A., & Margaritis, D. (2015). Numerical modelling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *Journal of Food Engineering*, 10-26.
- USDA. (2015). Database for the flavonoid content of selected foods. Ανάκτηση από <http://www.ars.usda.gov/nutrientdata>
- USDA. (n.d.). Food Data Central Search: Grapes Raw.
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M., & Barbosa-Canovas, G. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*(49), 271-289.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited.
- Vinson, J., Zubik, L., Bose, P., Samman, N., & Proch, J. (2005). Dried fruits: Excellent in vitro and in vivo antioxidants. *Journal of American College of Nutrition*, 24, pp. 44-50.
- Vitaglione, P., Donnarumma, G., Napolitano, A., Galvano, F., & Scalfi, L. (2007). Protocatechuic acid is the major human metabolite of cyanidin-glucosides. *Journal of Nutrition*, 137, σσ. 2043-2048.
- Wang, J., Mujumdar, A. S., Mu, W., Feng, J., Zhang, X., Zhang, Q., . . . Xiao, H.-W. (2016). Grape Drying: Current Status and Future Trends. In A. Morata (Ed.), *Grape and Wine Biotechnology*. IntechOpen.
- Wang, J., Mujumdar, A., Mu, W., Feng, J., Zhang, X., Zhang, Q., . . . Xiao, H.-W. (2016). Grape Drying: Current Status and Future Trends. In A. Morata, & I. Loira, *Grape and Wine Biotechnology*. InTech.
- Wang, Z., & Sun, S. (2003). *Handbook of Food Safety Engineering*. (D.-W. Sun, Ed.)
- Williamson, G., & Carughi, A. (2010). Polyphenol content and health benefits of raisins. 30, 511-519.
- Xia, B., & Sun, D.-W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 5-24.
- Xiao, H. W. (2015). Guest Editorial: Some mitigation strategies for climate change. *Drying Technology*, 33(14), σσ. 1679-1680.
- Xiao, H. W., Lin, H., Yao, X., Du, Z., Lou, Z., & Gao, Z. (2009). Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of sweet potato bars undergoing air impingement drying. *International Journal of Food Engineering*, 5(5).

- Xiao, H., Law, C., Sun, D., & Gao, Z. (2014). Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying. *Drying Technology*, 32(4), σσ. 581-591.
- Xiao, H., Pang, C. L., Bai, J. W., Yang, W. X., & Gao, Z. J. (2010). Drying kinetics and quality of Monukka Seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering*, 105(2), σσ. 233-240.
- Yang, W., Gao, Z., Tan, H., Yang, Y., Chen, Z., & Xiao, H. (n.d.). Drying Monnuka grapes with air-impingement jet technique and quality analysis. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25(4), σσ. 237-242.
- Yilmaz, Y., & Toledo, R. (2004). Major flavonoids in grape seeds and skins: Antioxidant capacity of catechin, epicatechin, and gallic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, σσ. 255-260.
- Zhao, B., & Hall, C. A. (2008). Composition and antioxidant activity of raisin extracts obtained from various solvents. *Food Chemistry*, 108, pp. 511-518.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γιαννιώτης, Σ. (2011). *Μηχανική Τροφίμων: Φαινόμενα Μεταφοράς στη Μηχανική Τροφίμων*. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Παπαϊωάννου, Α. (2002). *Μηχανική των Ρευστών* (Τόμ. II). Αθήνα: Εκδόσεις ΚΟΡΑΛΙ.
- Ταούκης, Π., & Ωραιοπούλου, Β. (2009). *Επιστήμη και Μηχανική Διεργασιών Τροφίμων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
X_i	% κ.β περιεκτικότητα των επιμέρους συστατικών
Y_i	% κ.ο περιεκτικότητα των επιμέρους συστατικών
Bi	Αδιάστατος αριθμός Biot
Le	Αδιάστατος αριθμός Lewis
Gr	Αδιάστατος αριθμός Grashof
Nu	Αδιάστατος αριθμός Nusselt
Pr	Αδιάστατος αριθμός Prandtl
Re_p	Αδιάστατος αριθμός Reynolds
Sc	Αδιάστατος αριθμός Schmidt
Sh	Αδιάστατος αριθμός Sherwood
C_2	Αδρανειακή αντίσταση (1/m)
Fo	Αριθμός Fourier
T_0	Αρχική θερμοκρασία σταφυλιού (°C)
θ_0	Αδιάστατη θερμοκρασία στο κέντρο του φρούτου
D	Διάμετρος της κλίνης (mm)
L	Ύψος της κλίνης (mm)
R	Ακτίνα της κλίνης (m)
R	Ακτίνα του σωματιδίου (m)
d_p	Διάμετρος των σωματιδίων (mm)
μ	Δυναμικό ιξώδες ρευστού (kg/ms)
$C_{p\text{σταφυλιού}}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα σταφυλιού (kJ/kg°C)
C_{p_i}	Ειδική θερμοχωρητικότητα σταφυλιού (kJ/kg°C)
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού (kJ/kg°C)
K	Εμπειρική σταθερά ξήρανσης
A	Επιφάνεια εξάτμισης (m ²)
α	Η ανηγμένη επιφάνεια της κλίνης (m ² /m ³)

T_{∞}	Θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης
k	Θερμική αγωγιμότητα του ρευστού (W/m°C)
$k_{\text{σταφυλιού}}$	Θερμική αγωγιμότητα του σταφυλιού (W/m°C)
T	Θερμοκρασία (°C)
T_{α}	Θερμοκρασία (ξηρού θερμομέτρου) αέρα (°C)
T_w	Θερμοκρασία επιφάνειας εξάτμισης, θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (°C)
L	Θερμότητα εξάτμισης του νερού (J/kg)
q_g	Θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό του σώματος στη μονάδα του χρόνου
l/α	Ιξώδης αντίσταση (1/m ²)
D	Ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού ροής (m)
w_c	Κρίσιμη υγρασία στην αρχή της περιόδου ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης
m_s	Μάζα του ξηρού στερεού (kg)
G	Μαζική παροχή του αέρα (kg/m ² s)
M_y	Μέσο μοριακό βάρος του αέριου μίγματος για μεταφορά ατμού στον αέρα
D_u	Ογκομετρική διαχυτότητα (m ² /h)
ε	Πορώδες της κλίνης
ΔP	Πτώση Πίεσης (Pa)
ρ_i	Πυκνότητα επιμέρους συστατικών (kg/m ³)
ρ_s	Πυκνότητα του ξηρού στερεού (kg/m ³)
ρ	Πυκνότητα του ρευστού (kg/m ³)
$\rho_{\text{σταφυλιού}}$	Πυκνότητα του σταφυλιού (kg/m ³)
$(dw/dt)_j$	Ρυθμός εξάτμισης (kg/s kg ξηρού αέρα)
dw/dt	Ρυθμός ξήρανσης ή εξάτμισης (kg νερού/s)
A	Σταθερά Blake-Kozery-Carman
B	Σταθερά Blake-Plummer
Z	Σταθερά με τιμές για πλάκα 0, για κύλινδρο 1 και για σφαίρα 2

b_0	Σταθερός συντελεστής
b_1	Σταθερός συντελεστής
b_2	Σταθερός συντελεστής
$\alpha \text{ ή } D$	Συντελεστής θερμικής διάχυσης (m^2/s)
$h_{\text{σταφυλιού}}$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σταφυλιού ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
h_{steel}	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας χάλυβα ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
k_y	Συντελεστής μεταφοράς μάζας (kg/sm^2)
y	Συντεταγμένη στον κάθετο άξονα των y
x	Συντεταγμένη στον οριζόντιο άξονα των x
$u \text{ ή } v_s$	Ταχύτητα Ρευστού (m/s)
w_e	Υγρασία ισορροπίας
W_w	Υγρασία κορεσμένου αέρα στην T_w ($\text{kg νερού}/\text{kg ξηρού αέρα}$)
W_a	Υγρασία μάζας αέρα ($\text{kg νερού}/\text{kg ξηρού αέρα}$)
w	Υγρασία μετά από χρόνο t
x_l	Χαρακτηριστική διάσταση του στερεού (m)
t	Χρόνος (sec)