

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Π.Μ.Σ. ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη μύλου άλεσης με πεπιεσμένο
αέρα με χρήση τεχνικών CFD

Χατζηδάκης Στυλιανός

Επιβλέπων καθηγητής: Γιαννιώτης Σταύρος

Αθήνα, 2015

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Π.Μ.Σ. ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη μύλου άλεσης με πεπιεσμένο
αέρα με χρήση τεχνικών CFD

Χατζηδάκης Στυλιανός
Επιβλέπων καθηγητής: Γιαννιώτης Σταύρος
Αθήνα, 2015

Περίληψη

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα είναι μια τεχνολογία μείωσης μεγέθους η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή, υψηλότερης ποιότητας, υπέρλεπτων κόνεων, η άλεση των οποίων επιτυγχάνεται με συγκρούσεις των σωματιδίων μεταξύ τους και με την επιφάνεια του μύλου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται ευρέως από την χημική, φαρμακευτική βιομηχανία και την βιομηχανία μεταλλευμάτων, αλλά η χρήσης της στην βιομηχανία τροφίμων είναι περιορισμένη. Η διφασική ροή που επικρατεί στον μύλο είναι τυρβώδης και πολύπλοκη καθώς επικρατούν συγκρούσεις υψηλών ταχυτήτων μεταξύ των σωματιδίων. Το τρισδιάστατο μοντέλο του μύλου κατασκευάστηκε μερικώς στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Autocad και εν συνεχεία οριστικοποιήθηκε στον προ-επεξεργαστή Gambit 2.4.6. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από την είσοδο των στερεών η οποία είναι ευθυγραμμισμένη με μία είσοδο αέρα, δύο ακόμα εισόδους αέρα, μια έξοδο από την οποία περνούν τα σωματίδια και ο αέρας και τα σταθερά τοιχώματα του μύλου. Συμπιεσμένος αέρας εισάγεται στον μύλο από τις τρεις εισόδους αέρα. Η πρώτη ύλη εισέρχεται με σταθερό ρυθμό.

Το πρόγραμμα ANSYS FLUENT λύνει ένα σετ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) εξισώσεων. Πρόκειται για σετ εξισώσεων που αφορούν την ορμή και την συνέχεια για κάθε φάση και η σύνδεση των δύο φάσεων γίνεται με την χρήση διαφόρων συντελεστών όπως η πίεση. Οι δύο φάσεις μεταξύ τους μπορούν να εναλλάσσουν εκτός των άλλων και μάζα, ορμή και ενέργεια. Όσον αφορά τον υπολογισμό των τροχιών των σωματιδίων, το μοντέλο DPM χρησιμοποιήθηκε. Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπ' όψιν του την τύρβη στις τροχιές των σωματιδίων, και την μοντελοποιεί χρησιμοποιώντας το stochastic tracking model, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο DPM. Αυτό γίνεται υπολογίζοντας την κάθε τροχιά αυτοτελώς μέσα στο πεδίο ροής.

Οι τροχιές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση ισοζυγίου δυνάμεων. Σε αυτή την εξίσωση περιλαμβάνονται και όροι για τον συντελεστή οπισθέλκουσας και για την βαρύτητα. Για τα στερεά σωματίδια θεωρούμε ότι έχουν σφαιρικό σχήμα.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από τρισδιάστατη προσομοίωση της λειτουργίας του μύλου με την χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η επίδραση της πίεσης του αέρα και της ταχύτητας με την οποία εισέρχεται στον μύλο ποσοτικοποιείται. Τα

σημεία μέσα στον θάλαμο κρούσης στα οποία συγκεντρώνεται ο μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων και ως αποτέλεσμα συμβαίνει και το μεγαλύτερο ποσοστό των συγκρούσεων έχουν αναγνωριστεί. Επιπλέον μοντελοποιήθηκε και η μείωση του μεγέθους σωματιδίων και η κατανομή του μεγέθους των ως συνάρτηση της παροχής πρώτης ύλης στον μύλο. Τα προβλεπόμενα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα.

Επιστημονικό πεδίο: *Μηχανική Τροφίμων*

Λέξεις-κλειδιά: *Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Μήλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα, Κατανομή μεγέθους σωματιδίων, Προσομοίωση*

Abstract

Air jet milling is a grinding technology utilized for the production of superior quality superfine powders where grinding of particles is achieved by interparticle collisions and impacts against a solid surface. . It has been used in the chemical, mineral and pharmaceutical industry for advanced applications but studies on its use in food products are limited. The multiphase flow (solid-gas) in the jet mill is highly turbulent, 3D and complex, as it incorporates high speed collisions between air streams and solid granular particles. The 3D physical meshed model of the jet mill was constructed partially in a modeling program (Autocad) and finalized in the pre-processor Gambit 2.4.6. It consists of one solid inlet aligned with one air inlet, two other air inlets, one pressure outlet and stationary solid jet mill chamber wall. Compressed air is introduced into the system through three nozzles. Flour (raw material) is supplied through one of the nozzles with a constant feed rate.

ANSYS FLUENT software solves the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations. The software solves a set of momentum and continuity equations for each phase and coupling is achieved through the pressure and interphase exchange coefficients. We can also exchange mass, momentum and energy between the two phases. As far as the particle trajectories are concerned the Discrete Phase Model (DPM) was used. There are some specific requirements that we kept in mind when we used the discrete phase model. The DPM model takes into consideration the turbulence on the particle trajectories. This turbulent dispersion can be modeled via DPM using the stochastic tracking model. The discrete random walk tracking approach works by tracking each particle injection individually through the domain.

The discrete phase particle trajectories are computed by integrating the force balance equation. This equation has terms for the drag force and the gravity force. The solids assumed to be spherical in shape.

In the present paper, results of three dimensional numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) are presented. The effect of air pressure and inlet air velocity on the flow field inside the mill is quantified. The locations within the jet mill that are most prominent for high particle concentration, leading to collisions, have been identified as a function of inlet air velocity and particle size using Lagrangian particle tracking. Furthermore, size reduction of solid granular particles injected into the mill was modeled and particle size

distribution as a function of particle feed rate was determined. The predicted results have been validated using a pilot scale jet mill.

Scientific field: *Food engineering*

Keywords: Keywords: CFD, Jet Mill, Modeling, Particle size distribution

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	vi
Εισαγωγή.....	xi
1.Υπολογιστική Ρευστοδυναμική.....	1
1.1 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία	2
1.2 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων	3
1.2.1 Ξήρανση	3
1.2.2 Αποστείρωση	4
1.3 Πλεονεκτήματα του CFD	5
1.4 Προβλήματα εφαρμογής του CFD.....	6
1.5 Εμπορικά πακέτα CFD	7
2. Άλεση	8
2.1 Ταξινόμηση μεθόδων ελάττωσης μεγέθους.....	9
2.2 Σκοπός	10
2.3 Μέγεθος σωματιδίων και κατανομή μεγέθους σωματιδίων.....	11
2.3.1 Ορισμός μεγέθους σωματιδίου	11
2.3.2 Κατανομή μεγέθους σωματιδίου σε ένα πληθυσμό σωματιδίων	11
2.4 Συστήματα άλεσης	12
2.4.1 Κυλινδρόμυλος	12
2.4.2 Σφυρόμυλος.....	13
2.4.3 Μύλος τριβής	14
2.4.4 Jet mill	15
3.Υλικά και Μέθοδοι.....	18
3.1 Εμπορικά λογισμικά προγράμματα	18
3.2 Χαρακτηριστικά Η/Υ Προσομοίωσης	18

3.3 Εργαστηριακός μύλος πεπιεσμένου αέρα	18
3.4 Οριακές Συνθήκες.....	18
3.5 Παραδοχές.....	18
3.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση του θαλάμου κρούσης	21
3.7 Meshing	23
3.8 Αριθμητική ανάλυση.....	26
3.9 Αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων όγκων.....	26
3.10 Εξισώσεις της αέριας φάσης	27
3.10.1 Η αρχή διατήρησης της μάζας σε τρεις διαστάσεις	27
3.10.2 Η αρχή διατήρησης της ορμής σε τρεις διαστάσεις.....	28
3.10.3 Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας σε τρεις διαστάσεις.....	28
3.10.4 Εξισώσεις που αφορούν την τύρβη.....	29
3.10.5 Οι εξισώσεις του μοντέλου k-ε	30
3.10.6 Οι εξισώσεις του μοντέλου k-ω	31
3.11 Discrete Phase Model.....	32
3.11.1 Δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σωματίδιο	33
3.11.2 Αλγόριθμος για τον υπολογισμό της κίνησης σωματιδίου	34
3.11.3 Stochastic Tracking.....	34
3.11.4 Spherical Drag Law.....	35
3.11.5 Discrete Element Method Collision Model.....	35
3.12 Βελτίωση της ακρίβειας και εξάλειψη του σφάλματος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική	36
3.13 Λάθη και αβεβαιότητες.....	37
3.14 Επαλήθευση (verification) και πιστοποίηση (validation).....	38
3.15 Στάδια επεξεργασίας για την επίλυση προβλήματος με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	39

4.Αποτελέσματα και Συζήτηση	40
4.1 Μοντελοποίηση της αέριας φάσης.....	40
4.2 Μοντελοποίηση τροχιάς σωματιδίου	44
4.3 Μοντελοποίηση μείωσης μεγέθους	47
5.Συμπεράσματα.....	51
6.Μελλοντική έρευνα	51
Βιβλιογραφία	53

Εισαγωγή

Η ζήτηση για ενεργές ουσίες και έκδοχα, με μέγεθος της τάξης του μικρόμετρου, αυξάνεται διαρκώς λόγω της αυξημένης τους λειτουργικότητας (Protonatariou, Mandala & Rosell, 2015). Στην διεργασία της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα ένας συμπιεστής χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τα σωματίδια σε μία ροή τύπου τυφώνα μέσα στην μύλο άλεσης. Η φυγόκεντρος δύναμη ωθεί τα σωματίδια προς το εξωτερικό μέρος του κυλίνδρου κρούσης. Τα σωματίδια ταξιδεύουν σε κυκλική τροχιά και το μέγεθος του μειώνεται λόγω τριβής και λόγω των κρούσεων που δημιουργούνται. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ένα εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση των διεργασιών της μηχανικής τροφίμων (Scott and Richardson 1997; Norton and Sun, 2006; Yanniotis and Stoforos 2014). Γίνεται επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς ορμής, μάζας και ενέργειας τα οποία συνήθως ομαδοποιούνται σε ένα γενικότερο μοντέλο για την κάθε διεργασία.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να γίνει προσομοίωση της λειτουργίας ενός μύλου που λειτουργεί με πεπιεσμένο αέρα προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η λειτουργία του έτσι ώστε σε ένα επόμενο στάδιο να μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας ενός τέτοιου μύλου.

1.Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιεί τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα εφαρμοσμένα μαθηματικά για να μοντελοποιήσει τον ροή διαφόρων ρευστών και για να προβλέψει την εξέλιξη φαινομένων μεταφοράς ενέργειας, μάζας και ορμής με σκοπό τον βέλτιστο σχεδιασμό των διαφόρων διεργασιών. Η προσομοίωση των διαφόρων διεργασιών που χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία γίνεται μέσω της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς ορμής, μάζας και ενέργειας τα οποία συνήθως ομαδοποιούνται σε ένα γενικότερο μοντέλο για την κάθε διεργασία και επιλύονται με σχετική ευκολία λόγω της προόδου που έχει συντελεστεί στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την αύξηση των υπολογισμών που μπορούν να εκτελέσουν ανά μονάδα χρόνου.

Φαινόμενα μεταφοράς ορμής, μάζας και ενέργειας λαμβάνουν χώρα σε πολλές διεργασίες που χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία τροφίμων όπως η παστερίωση, η αποστείρωση, η ψύξη, η κατάψυξη, η ξήρανση, η εξώθηση, η εξάτμιση κλπ. Παρ' όλο το μεγάλο εύρος εφαρμογής και χρήσης της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων, η χρήση της έχει ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια. Η εφαρμογή του CFD στην βιομηχανία τροφίμων έχει επιτρέψει την καλύτερη κατανόηση των σύνθετων φυσικών μηχανισμών που κυβερνούν τις θερμικές, φυσικές, χημικές και ρεολογικές ιδιότητες των υλικών και πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία τροφίμων. Οι Scott και Richardson (1977), Quarini (1995), T. Norton και Da-Wen Sun (2006), S. Yanniotis και N.G.Stoforos (2014) έχουν γράψει διάφορες ανασκοπήσεις γύρω από το θέμα της εφαρμογής της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων. Υπάρχει και άλλη βιβλιογραφία για συγκεκριμένους τομείς εφαρμογής του CFD στην βιομηχανία όπως στον σχεδιασμό στατικών μίκτων (Scott, 1977), στην βελτιστοποίηση των μεταφορών υπό κατάψυξη (Janes and Dalgly, 1996) και την μελέτη της ροής μέσα σε σωλήνες (Scott, 1996). Είναι προφανές ότι η χρήση του CFD στην βιομηχανία τροφίμων τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων, πράγμα που οδηγεί στην περεταίρω έρευνα στον τομέα αυτό.

1.1 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται συγκεντρωτικά μερικά παραδείγματα χρήσης του CFD στην βιομηχανία γενικότερα

Πίνακας 1 Εφαρμογή του CFD σε διάφορους τομείς

Βιομηχανικές εφαρμογές	Αεροναυπηγική Αρχιτεκτονική Βιομηχανία αυτοκινήτων Βιοιατρική Χημικές διεργασίες Ανάφλεξη Ηλεκτρονικά Παραγωγή υάλου HVAC Πετροχημικά Ενέργεια Ναυπηγική Μηχανική Μεταλλειολογία Πυρηνικά Σχεδιασμός Συμπιεστών
Περιβαλλοντικές εφαρμογές	Ατμοσφαιρική Μόλυνση Κλιματικοί υπολογισμοί Μοντελοποίηση φωτιάς Ωκεανογραφία Μόλυνση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων
Φυσιολογικές εφαρμογές	Καρδιαγγειακή ροή Ροή στους πνεύμονες και στις αναπνευστικές οδούς

1.2 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιείται σαν εργαλείο έρευνας για να βελτιώσει την διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής τροφίμων και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς. Παρακάτω θα αναπτυχθούν εν συντομία μερικές μόνο από τις εφαρμογές του CFD στην βιομηχανία τροφίμων.

1.2.1 Ξήρανση

Η ξήρανση βασίζεται πολλές φορές σε εμπειρικές εξισώσεις ή την εμπειρία του εκάστοτε χειριστή μηχανημάτων ξήρανσης. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση του φαινομένου της ξήρανσης και για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των ξηραντήρων. Το CFD έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της ροής αέρα και της ταχύτητας του μέσα στον ξηραντήρα.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία για το CFD, στον τομέα της ξήρανσης, κινείται γύρω από την ξήρανση με ψεκασμό, όπως για παράδειγμα Langrish, Fletcher (2001), Goula, Adamopoulos (2005), Lin, Chen (2007), Woo et al. (2008). Kuriakose, Anandharamakrishnan (2010), στην οποία αναφέρεται ότι το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της ροής αέρα, της τροχιάς του εκάστοτε σωματιδίου, της ταχύτητας του, του χρόνου παραμονής του και της θέσης πρόσκρουσης του με αντικείμενα ή σωματίδια.

Ο Keshavarz et al. (2010) χρησιμοποίησε το CFD για την προσομοίωση μεταφοράς μάζας και θερμότητας τρόφιμου υπό ξήρανση με την μέθοδο της ωμικής ξήρανσης. Στην συγκεκριμένη εργασία ερευνήθηκε η επιρροή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θέρμανση του στερεού, η αγωγιμότητα υγρού-στερεού και άλλες παράμετροι όπως ο ρυθμός ξήρανσης, το αρχικό και τελικό ποσοστό υγρασίας του προϊόντος, οι θερμοκρασιακές αλλαγές, στην διαδικασία της ξήρανσης. Στο παραπάνω μοντέλο επιτευχθεί ταυτόχρονη λύση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας, υγρασίας, και ηλεκτρικού πεδίου. Υπάρχουν και διάφορες εργασίες γύρω από ξηραντήρες βιομηχανικού τύπου οι οποίες προσπάθησαν να κατανοήσουν καλύτερα την ροή του αέρα στον ξηραντήρα (Margaris, Ghiaus 2006).

1.2.2 Αποστείρωση

Είναι ευρέως γνωστό, ότι οι απαιτήσεις των καταναλωτών για τρόφιμα ασφαλή, ποιοτικά και σε λογικό κόστος αυξάνεται μέρα με την μέρα. Σε αυτή την προσπάθεια, η αποστείρωση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που επιτρέπει την αποθήκευση και συντήρηση προϊόντων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της κατανομής θερμοκρασίας και της ροής του τροφίμου κατά την διάρκεια της αποστείρωσης, με απώτερο στόχο την βελτίωση της ποιότητας του τροφίμου. Η αποστείρωση μέσω θερμική επεξεργασίας αποτελεί τον πιο ευρέως διαδεδομένο τρόπο βιομηχανικής αποστείρωσης. Ως εκ τούτου είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί το κρίσιμο εκείνο σημείο στο οποίο το τρόφιμο υπό αποστείρωση θα δεχθεί όσο το δυνατόν μικρότερη θερμική επεξεργασία, η οποία όμως θα οδηγήσει στην πλήρη καταστροφή του μικροοργανισμού στόχου και των σπορίων του για το συγκεκριμένο τρόφιμο. Θέρμανση πέραν του απολύτως απαραίτητου ποσού θα έχει αρνητική επίδραση στην ποιότητα του τροφίμου και θα οδηγήσει στην καταστροφή μέρους θρεπτικών συστατικών τα οποία θα μπορούσαν να έχουν προσληφθεί από τον ανθρώπινο οργανισμό.

Ο απαραίτητος χρόνος θερμικής επεξεργασίας και η θερμοκρασία στην οποία θα διεξαχθεί αυτή η επεξεργασία μπορούν να υπολογισθούν μέσω αναλυτικών λύσεων της εξίσωσης της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή για απλές περιπτώσεις στερεών τροφίμων όπου το πιο αργά θερμαινόμενο σημείο συμπίπτει με το κέντρο της γεωμετρίας του δοχείου. Αντίθετα η μαθηματική ανάλυση της αποστείρωσης δοχείων με υγρά τρόφιμα είναι πιο δύσκολη γιατί σε αυτή την περίπτωση η θερμότητα μεταφέρεται με φυσική συναγωγή. Κατά την διάρκεια της θέρμανσης, σε αυτήν την διαδικασία, η άνωση δημιουργεί κίνηση μέσα στο δοχείο. Έτσι η ταχύτητα στην εξίσωση της ορμής πρέπει να συνδυαστεί με την θερμοκρασία στην εξίσωση της ενέργειας, και ως εκ τούτου οι εξισώσεις πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα για να είναι δυνατός ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού προφίλ, του προφίλ ταχυτήτων και της πιο αργά θερμαινόμενης περιοχής της εκάστοτε γεωμετρίας.

Η βιβλιογραφία στο, συγκεκριμένο θέμα, εκτείνεται από τον Yang et al. (1997), ο οποίος χρησιμοποίησε κώδικα CFD για την προσομοίωση της θέρμανσης μέσω φυσικής συναγωγής διαλυμάτων αμύλου σε κυλινδρικές κονσέρβες. Επίσης ο Abdul Ghani et al. (1999a) χρησιμοποίησε τις τεχνικές του CFD για να προβλέψει την θέρμο-υδραυλική συμπεριφορά ενός μη-Νευτώνειου υγρού τροφίμου το οποίο θερμαίνεται σε ένα κάθετο δοχείο. Υπάρχουν και άλλες εργασίες που αναλύουν την θέρμανση με φυσική συναγωγή και

την καταστροφή των βακτηρίων σε υγρά τρόφιμα σε κονσέρβα και νερό (Abdul Ghani et al., 1999a, b). Έχει μελετηθεί και ο ρυθμός καταστροφής της βιταμίνης C (Ghani et al., 2002).

Πέρα από τα παραπάνω είδη προβλημάτων, έχει μελετηθεί και η περίπτωση αποστείρωσης στερεού τροφίμου μέσα σε υγρό. Σε αυτές τις εφαρμογές σημαντικό ρόλο παίζουν το μέγεθος του στερεού, το σχήμα του, ο προσανατολισμός του, η αναλογία υγρού-στερεού στην κίνηση του ρευστού κατά την διάρκεια της θέρμανσης η οποία με την σειρά της επηρεάζει την μεταφορά θερμότητας από το υγρό στα στερεά και τον υπολογισμό του σημείου που θερμαίνεται πιο αργά μέσα στο δοχείο. Τέτοιες μελέτες έχουν διεξαχθεί από Rabiey et al., 2007 (μεγάλα σωματίδια τροφίμου σε νερό), Abdul Ghani , Farid 2006 (φέτες ανανά σε χυμό), Dimou , Yanniotis , 2011 (σπαράγγια σε άλμη), Dimou et al., 2011 (ροδάκινο σε σιρόπι), Dimou et al., 2013 (ελιές σε άλμη).

1.3 Πλεονεκτήματα του CFD

Το CFD σαν εργαλείο επιτρέπει την σε βάθος ανάλυση των μηχανισμών ροής. Η μελέτη των αποτελεσμάτων του CFD οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση, μεγαλύτερη αξιοπιστία, βελτιωμένη και σταθερότερη ποιότητα προϊόντων κ.α.

Μερικά πλεονεκτήματα της χρήσης του CFD συνοψίζονται παρακάτω:

- Παρέχει μια πιο λεπτομερή εικόνα της ροής μέσα σε ένα σύστημα, της απώλειας μάζας, της μεταφοράς θερμότητας και του θερμοκρασιακού προφίλ τα οποία οδηγούν σε καλύτερη κατανόηση της κάθε διεργασίας που εξελίσσεται μέσα σε μια βιομηχανία τροφίμων.
- Επιτρέπει την εκτίμηση αλλαγών που αφορούν την γεωμετρία ή τις συνθήκες μέσα στις οποίες εκτελείται μια διεργασία με πολύ μικρότερο κόστος σε χρόνο και οικονομικούς πόρους σε σχέση με την κλασική πειραματική μέθοδο.
- Μπορεί να λύσει απορίες του τύπου «τι θα γίνει αν...» σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.
- Μειώνει τα προβλήματα που δημιουργούνται στην φάση του scale-up σε μια βιομηχανία γιατί είναι βασισμένο σε αρχές που είναι ανεξάρτητες κλίμακας.
- Είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο στην προσομοίωση καταστάσεων στις οποίες μετρήσεις με τις κλασικές μεθόδους δεν είναι δυνατό να ληφθούν ή είναι πολύ επικίνδυνο.

- Λόγω της λεπτομερούς ανάλυσης που παρουσιάζει μπορεί να υποδείξει την ακριβή αιτία του εκάστοτε προβλήματος και όχι μόνο το αποτέλεσμα.

Το CFD έχει χρησιμοποιηθεί στην βελτίωση πάρα πολλών διεργασιών αλλά και μηχανημάτων όπως φούρνοι, ψυγεία, ξηραντήρες και έχει εξελιχθεί σε ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στην ανάπτυξη, επίλυση προβλημάτων και βελτιστοποίηση διεργασιών παραγωγής τροφίμων.

1.4 Προβλήματα εφαρμογής του CFD

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα και τις χρήσεις του CFD που αναπτύχθηκαν πιο πάνω υπάρχουν και ορισμένα προβλήματα τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω μετάδοση της χρήσης του CFD. Αρχικά τα υλικά, τα οποία λαμβάνουν μέρος στην επεξεργασία των τροφίμων, διαφέρουν από πολλές απόψεις (ρεολογικά χαρακτηριστικά, θερμοδυναμικές ιδιότητες, φυσικές ιδιότητες κ.α.). Ενώ τα πακέτα CFD που υπάρχουν στην αγορά μπορούν να προσομοιώσουν διεργασίες σε μίγματα σε αρκετά μεγάλη ακρίβεια, όταν χρειάζεται μεγαλύτερη κατανόηση σε επίπεδα φυσικο-χημικά, οργανο-χημικά και μικροβιολογικά μιας διεργασίας, τα ευρέως διαδεδομένα προγράμματα δεν έχουν τα απαραίτητα εργαλεία για να εκτελέσουν τέτοιες προσομοιώσεις.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται (κυρίως τα βιολογικά) δεν είναι ομοιόμορφα σε πολλές περιπτώσεις. Το σχήμα των προϊόντων είναι συχνά ακανόνιστο και πολλές φορές αλλάζει και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του. Πολλά προϊόντα υπόκεινται σε αλλαγές της φυσικής τους κατάστασης κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους και πολλές από τις ιδιότητες τους εξαρτώνται από παράγοντες της επεξεργασίας, όπως για παράδειγμα η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα, η πυκνότητα και το ιξώδες εξαρτώνται όλα από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και από την σύσταση του τρόφιμου τα οποία μπορεί να αλλάζουν κατά την διάρκεια μιας επεξεργασίας. Και φυσικά πολλά από τα τρόφιμα δεν παρουσιάζουν ούτε ομογενή ούτε ιστροπική συμπεριφορά (Yanniotis, Stoforos 2014).

Σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα μιας επεξεργασίας βασίζονται στον συνδυασμό χρόνου και θερμοκρασίας, γιατί εκτός από τις αλλαγές στην θερμοκρασία του προϊόντος, κατά την διάρκεια της επεξεργασίας, παρουσιάζονται και βιοχημικές και μικροβιακές αλλαγές. Επειδή λοιπόν, η μεταφορά μάζας και ενέργειας σε μια επεξεργασία εξαρτάται από τον χρόνο για τον οποίο διαρκεί αυτή η διαδικασία, είναι υποχρεωτικός ένας

υπολογισμός του χρόνου επεξεργασίας ενός προϊόντος. Εάν ένα προϊόν επεξεργαστεί για περισσότερο από ό,τι είναι απαραίτητο ή σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, η επεξεργασία αυτή θα έχει αρνητική επίδραση στα οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά, στην θρεπτική του αξία και στην γενικότερη ποιότητα του. Φυσικά εάν ένα προϊόν επεξεργαστεί λιγότερο από ό,τι είναι απαραίτητο αυτό μπορεί να οδηγήσει από μειωμένο χρόνο ζωής του προϊόντος μέχρι και να το καταστήσει επικίνδυνο προς κατανάλωση. Επιπροσθέτως η μεταφορά μάζας μέσα σε μία διεργασία συμβαίνει με παραπάνω από ένα τρόπους ταυτόχρονα ή εν σειρά, πράγμα που δυσχεραίνει οποιαδήποτε προσπάθεια αναλυτικής λύσης του προβλήματος.

Επιπλέον η βιομηχανία τροφίμων πρέπει να προσλάβει επιστήμονες εξειδικευμένους στις τεχνικές του CFD. Είναι απαραίτητο ο χειριστής του CFD να είναι επαρκώς εξοικειωμένος με την θεωρία στην οποία έχει δημιουργηθεί το ίδιο το CFD και με τις αναλυτικές τεχνικές λύσεις των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται, αλλά και με την γενικότερη επιστήμη γύρω από τον τομέα αυτό.

1.5 Εμπορικά πακέτα CFD

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια συνεχόμενη πρόοδος στην ανάπτυξη εμπορικών πακέτων CFD. Τα πακέτα αυτά πλέον, επιτρέπουν στον χρήστη να μελετήσει περίπλοκες γεωμετρίες και πιο σύνθετα είδη προβλημάτων. Παρ' όλη την πρόοδο που έχει συντελεστεί, η εφαρμογή του CFD στην επιστήμη τροφίμων είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Υπάρχουν αρκετοί τομείς στους οποίους χρειάζονται βελτίωση τα εμπορικά πακέτα που υφίστανται σε τομείς όπως η ακρίβεια, αποτελεσματικότητα και η ευκολία χρήσης. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά πακέτα που είναι διαθέσιμα αυτή την περίοδο.

CFX® (ANSYS Inc.)

Το CFX εξαγοράστηκε από την ANSYS (2003) και αυτό εμπεριέχει διάφορα πακέτα κώδικα CFD. Εμπεριέχει και διάφορα μοντέλα όπως πολυφασική ροή, πορώδη υλικά, μεταφορά θερμότητας, ανάφλεξη και ακτινοβολία. Περιλαμβάνει και εξειδικευμένα μοντέλα τύρβης καθώς επίσης και εργαλείο CAD (computer aided design).

FLUENT® (ANSYS Inc.)

Το FLUENT είναι ένα πακέτο CFD το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως από την βιομηχανία. Το FLUENT περιέχει πολλαπλά μοντέλα για την προσομοίωση διαφόρων ειδών προβλημάτων όπως μεταφορά θερμότητας και μάζας, χημικές αντιδράσεις, ακτινοβολία αλλά

και πιο σύνθετα είδη προβλημάτων όπως πολυφασική ροή, DPM (προσομοίωση τροχιάς σωματιδίου ανεξαρτήτως ή όχι του χρόνου σε τυρβώδη ή γραμμική ροή κ.α.). Το FLUENT πλέον ανήκει στο ευρύτερο WORKBENCH με το οποίο ο χειριστής αποκτά πρόσβαση σε περιβάλλον σχεδιασμού CAD, meshing, και μετ-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τα οποία είναι αμφίδρομα συνδεδεμένα μεταξύ τους.

2. Άλεση

Ο τεμαχισμός και η άλεση των προϊόντων αναφέρονται γενικότερα και ως διεργασίες ελάττωσης μεγέθους. Ως διεργασίες ελάττωσης μεγέθους νοείται η ομάδα διεργασιών κατά την διάρκεια των οποίων το μέσο μέγεθος ενός στερεού ή υγρού τρόφιμου μειώνεται με την εφαρμογή δυνάμεων διάτμησης (τριβή, συμπίεση, πρόσκρουση). Ανάλογα με το υλικό, του οποίου το μέγεθος θέλουμε να ελαττώσουμε, οι διεργασίες αυτές διακρίνονται σε διεργασίες κοπής ή άλεσης, όσον αφορά τα στερεά τρόφιμα, και ομογενοποίηση και γαλακτωματοποίηση για τα μη αναμίξιμα υγρά.

Διεργασίες ελάττωσης μεγέθους χρησιμοποιούνται συχνά στην βιομηχανία τροφίμων, ως πρωταρχική διεργασία των πρώτων υλών πριν από την χρήση τους από την βιομηχανία, ως επεξεργασία για την δημιουργία ενός προϊόντος και για την παραγωγή υλικών και προϊόντων με συγκεκριμένη κοκκομετρική σύσταση.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία για την ελάττωση του μεγέθους υλικών και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την αρχή πάνω στην οποία βασίζεται η λειτουργία τους.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις των διεργασιών ελάττωσης μεγέθους είναι αρκετά σημαντικές και περιγράφονται γενικά από διάφορα θεωρητικά μοντέλα (νόμοι των Kick, Rittinger και Bond). Η γνώση των απαιτήσεων σε ενέργεια για μια διεργασία είναι πολύ σημαντική για την εκάστοτε βιομηχανία.

Η αποτελεσματικότητα των διεργασιών μείωσης μεγέθους εκφράζεται από τον λόγο

$$RR = \frac{\text{Μέσος όρος μεγέθους σωματιδίου κατά την είσοδο του στην διεργασία}}{\text{Μέσος όρος μεγέθους σωματιδίου μετά την διεργασία}}$$

2.1 Ταξινόμηση μεθόδων ελάττωσης μεγέθους

Ο στόχος των μεθόδων ελάττωσης μεγέθους είναι η παραγωγή μικρότερων σωματιδίων, σε σχέση με τα αρχικά, με ανώτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με την επιφάνεια επαφής των σωματιδίων ή το σχήμα τους ή το μέγεθος τους ή ο αριθμός τους. Οι μέθοδοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την φύση του υλικού που του οποίου το μέγεθος ελαττώνουν.

1. Στερεά υλικά
 - α. Τεμαχισμός
 - β. Άλεση/ Λείανση σε σκόνη

2. Υγρά
 - Ομογενοποίηση

Όσον αφορά τα στερεά υλικά, το κόψιμο εφαρμόζεται για να μειωθεί το μέγεθος μεγάλων κομματιών σε κομμάτια επιθυμητού μεγέθους και σχήματος. Το μέγεθος των κομματιών που θα προέλθουν από την συγκεκριμένη επεξεργασία μπορεί να ρυθμιστεί ούτως ώστε το προϊόν αυτό να τροφοδοτηθεί απευθείας σε άλλη επεξεργασία.

Η άλεση εφαρμόζεται για να μειωθεί το μέγεθος των σωματιδίων μέσω σπασίματος. Όταν αυτό γίνεται σε ένα μηχανικό μύλο το υλικό το οποίο έχουμε εισάγει στον μύλο δέχεται δυνάμεις και το σπάσιμο δημιουργείται όταν κάποια δύναμη υπερβεί ένα κρίσιμο επίπεδο. Η ενέργεια που έχει απορροφηθεί από το υλικό καταναλώνεται κατά το σπάσιμο, ενώ ένα σημαντικό κομμάτι αυτής της ενέργειας εκλύεται ως θερμότητα. Το σπάσιμο εξαρτάται από μηχανικές ιδιότητες, όπως η σκληρότητα και η θρυπτότητα του υλικού, και από το μέγεθος της δύναμης και τον χρόνο εφαρμογής της. Γενικά σπάσιμο μπορεί να προκύψει και σε χαμηλότερα επίπεδα δυνάμεων εάν οι δυνάμεις εφαρμοστούν για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Τρεις τύποι δυνάμεων συνήθως χρησιμοποιούνται, συνήθως, από την βιομηχανία τροφίμων:

- Δυνάμεις συμπίεσης
- Δυνάμεις κρούσης
- Δυνάμεις διάτμησης

Και οι τρεις τύποι των παραπάνω δυνάμεων χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία για την ελάττωση του μεγέθους σωματιδίων. Η επιλογή του τύπου δύναμης που θα χρησιμοποιηθεί

εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος προς επεξεργασία. Γενικά για σκληρά, εύθρυπτα ή κρυσταλλικά υλικά χρησιμοποιούνται δυνάμεις συμπίεσης. Οι ίδιες αυτές δυνάμεις χρησιμοποιούνται για το σπάσιμο εξωτερικά σκληρών σπόρων και για να διευκολύνουν τον διαχωρισμό των εσωτερικών μερών, όπως για παράδειγμα ο διαχωρισμός του ενδοσπερμίου στο σιτάρι. Για ημίσκληρα υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως οι δυνάμεις κρούσης και για μαλακά υλικά οι δυνάμεις διατμήσεως, ενώ για ινώδη υλικά ο συνδυασμός κρουστικών δυνάμεων και δυνάμεων διάτμησης κρίνεται απαραίτητος. Για μεγέθη μέχρι 3mm χρησιμοποιούνται δυνάμεις συμπίεσης, ενώ για μεγέθη μικρότερα από αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως δυνάμεις κρούσης από την βιομηχανία τροφίμων. Εάν χρειάζεται να παραχθούν μεγέθη της τάξης του μm ή και μικρότερα από αυτό τότε εφαρμόζονται δυνάμεις διάτμησης. Συνήθως στις διεργασίες ελάττωσης μεγέθους παραπάνω από ένας τύπος δυνάμεων λαμβάνει χώρα αλλά το μεγαλύτερο μέρος της επίδρασης το έχει μια μόνο από τις δυνάμεις ανά διεργασία. Γι' αυτό το λόγο ο τύπος μύλου που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση μπορεί να επιλεγεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του προϊόντος.

Όσον αφορά τα υγρά τρόφιμα η μείωση μεγέθους αναφέρεται στην μείωση των σφαιριδίων ελαίων ή λιπών που είναι αναμεμιγμένα σε νερό με την χρήση δυνάμεων διάτμησης και η διαδικασία αυτή ονομάζεται ομογενοποίηση. Κατά περίπτωση μπορούν να προστεθούν και παράγοντες ομογενοποίησης και ειδικός εξοπλισμός για την παραγωγή και διατήρηση σταθερών γαλακτωμάτων.

2.2 Σκοπός

Η ελάττωση του μεγέθους μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και εξυπηρετεί συνήθως έναν από τους εξής σκοπούς:

- Πρωτογενής επεξεργασία πρώτων υλών. Πολλές φορές μια πρώτη ύλη είναι πολύ μεγάλη για να χρησιμοποιηθεί ως έχει και πρέπει το μέγεθος της να μειωθεί για να είναι πιο ευκολά διαχειρίσιμη.
- Εξαγωγή χρήσιμων υλικών από την πρώτη ύλη π.χ. αλεύρι από σιτάρι.
- Δημιουργία προϊόντος με κατάλληλη μορφή για κατανάλωση π.χ. κονιοποιημένα μπαχαρικά.
- Διευκόλυνση της ανάμειξης του προϊόντος με άλλα υλικά για τη δημιουργία ομοιογενών μειγμάτων.

- Αύξηση της επιφάνειας του προϊόντος για να διευκολύνεται η μεταφορά θερμότητας και μάζας από ή προς το προϊόν, π.χ. τεμαχισμός των ζαχαροτεύτλων για τη διευκόλυνση της εκχύλισης της ζάχαρης, τεμαχισμός διαφόρων λαχανικών για τη μείωση του χρόνου βρασμού ή ξήρανσης, άλεσμα του καφέ κλπ.
- Παραγωγή σωματιδίων με διαστάσεις εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών.

2.3 Μέγεθος σωματιδίων και κατανομή μεγέθους σωματιδίων

2.3.1 Ορισμός μεγέθους σωματιδίου

Το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να οριστεί με την βοήθεια ενός μικρού αριθμού διαστάσεων: μίας διάστασης στην περίπτωση της σφαίρας ή του κύβου, δύο στην περίπτωση του κυλίνδρου και των ελλειψοειδών σχημάτων και τρεις στην περίπτωση των πρισμάτων. Όμως οι πρώτες ύλες και τα προϊόντα σπάνια αποτελούνται από κανονικά σχήματα, όπως τα παραπάνω. Άρα για να ορισθεί το μέγεθος των ακανόνιστων σχημάτων σωματιδίων, υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκ των οποίων ο πιο διαδεδομένος, είναι ο ορισμός μιας ισοδύναμης διαμέτρου. Αυτή η ισοδύναμη διάμετρος είναι η διάμετρος μιας σφαίρας η οποία θα συμπεριφερόταν σαν το σωματίδιο που μας ενδιαφέρει κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

2.3.2 Κατανομή μεγέθους σωματιδίου σε ένα πληθυσμό σωματιδίων

Τα υλικά των τροφίμων συχνά αποτελούνται από σωματίδια διαφόρων μεγεθών. Για να χαρακτηρισθούν τα υλικά αυτά σε σχέση με το μέγεθος τους πρέπει να ορισθεί η κατανομή του μεγέθους σωματιδίων (PSD) και το μέσο μέγεθος σωματιδίων.

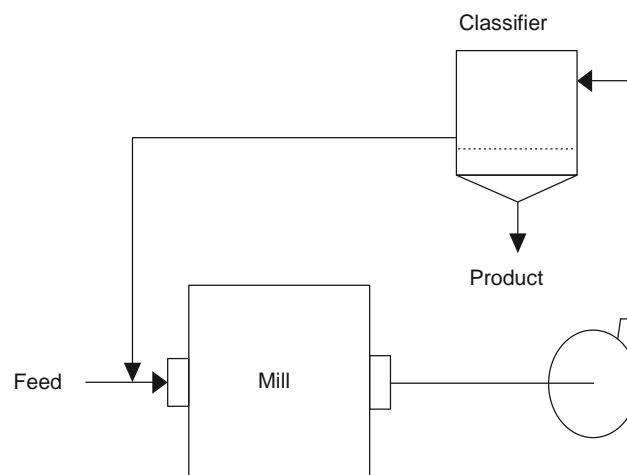
Η κατανομή του μεγέθους σωματιδίων αναφέρεται στο ποσοστό των σωματιδίων τα οποία βρίσκονται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών σε ένα πληθυσμό σωματιδίων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον προσδιορισμό του PSD, όπως το κοσκίνισμα, η μικροσκοπική εξέταση με την βοήθεια τεχνικών ανάλυσης εικόνας, τεχνικές περίθλασης laser κ.α. Η μέθοδος του κοσκινίσματος χρησιμοποιείται συχνά για την ποσοτική ανάλυση των πιο λεπτόκοκκων κόνεων, και σε αυτήν χρησιμοποιούνται κόσκινα με στανταρισμένα πλέγματα.

2.4 Συστήματα άλεσης

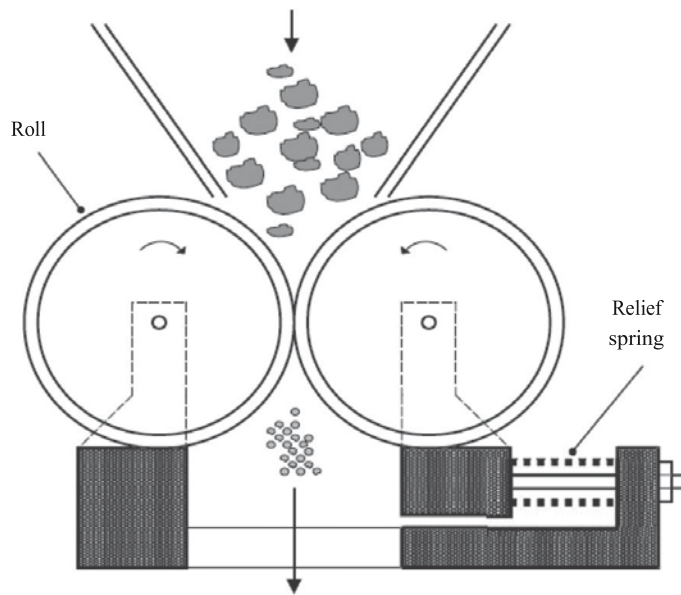
Υπάρχουν τρία συστήματα άλεσης που συνήθως χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες τροφίμων. Ο κυλινδρόμυλος, ο σφυρόμυλος και ο μύλος τριβής.

2.4.1 Κυλινδρόμυλος

Ο κυλινδρόμυλος αποτελείται από δυο οριζόντιους κυλίνδρους που συγκρατούνται σε στενή επαφή με τη βοήθεια ενός ελατηρίου. Η επιφάνεια των κυλίνδρων μπορεί να είναι λεία ή αυλακωτή. Οι κύλινδροι περιστρέφονται κατ' αντίθετη φορά και σε ορισμένες περιπτώσεις με διαφορετική ταχύτητα έτσι ώστε το προϊόν να υφίσταται συγχρόνως σύνθλιψη και διάτμηση. Το διάκενο μεταξύ των κυλίνδρων ρυθμίζεται ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό ψιλοτεμαχισμού, χρειάζεται όμως προσοχή ώστε το διάκενο αυτό να είναι το ίδιο καθ' όλο το μήκος των κυλίνδρων. Υπάρχουν και κυλινδρόμυλοι με δυο συνήθως ζεύγη κυλίνδρων. Στο πρώτο ζεύγος των κυλίνδρων γίνεται μια πρώτη θραύση του τεμαχίου π.χ. σπόρου, ενώ στο δεύτερο ζεύγος γίνεται η λειοτριβήση. Οι κυλινδρόμυλοι με δύο ζεύγη κυλίνδρων χρησιμοποιούνται στην αλευροβιομηχανία για την παραγωγή του αλευριού.



Σχήμα 1: Διάγραμμα γραμμής άλεσης.(Zeki Berg,2009)

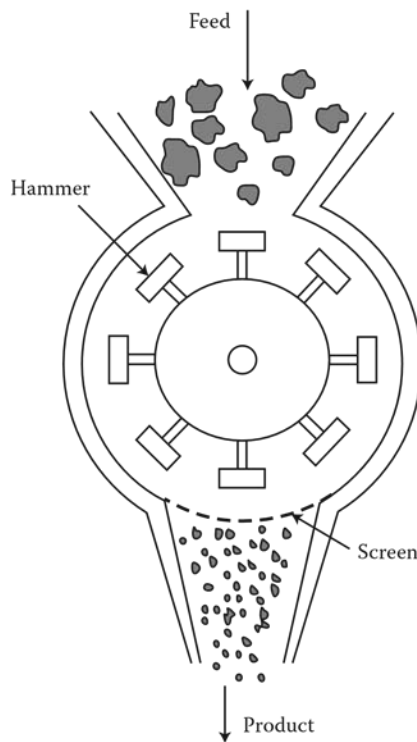


Σχήμα 2: Διάγραμμα λειτουργίας κυλινδρόμυλου. (Tzia, Giannou 2014)

2.4.2 Σφυρόμυλος

Ο σφυρόμυλος αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο άξονα με σφυριά ο οποίος περιβάλλεται από ένα κέλυφος με δυο ανοίγματα, την είσοδο και την έξοδο του προϊόντος. Μια επένδυση από σκληρό υλικό στο εσωτερικό του κελύφους, σχηματίζει την πλάκα θρυμματισμού. Ένα κόσκινο, από το οποίο μπορεί να περάσει μόνο το υλικό που έχει ψιλοτεμαχιστεί επαρκώς, είναι τοποθετημένο στην έξοδο. Συνήθως υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του κόσκινου αυτού ανάλογα με την επιθυμητή διάμετρο του αλεσμένου προϊόντος.

Κατά τη λειτουργία, το προϊόν τροφοδοτείται από το άνοιγμα τροφοδοσίας και καθώς εισέρχεται στο εσωτερικό, υφίσταται αλλεπάλληλα κτυπήματα από τα περιστρεφόμενα σφυριά. Η θραύση του προϊόντος γίνεται τόσο από τις κρούσεις των σφυριών επί του προϊόντος, όσο και από τις κρούσεις του προϊόντος επί της πλάκας θρυμματισμού. Σφυρόμυλοι χρησιμοποιούνται π.χ. σε ελαιουργεία για το άλεσμα της ελιάς.



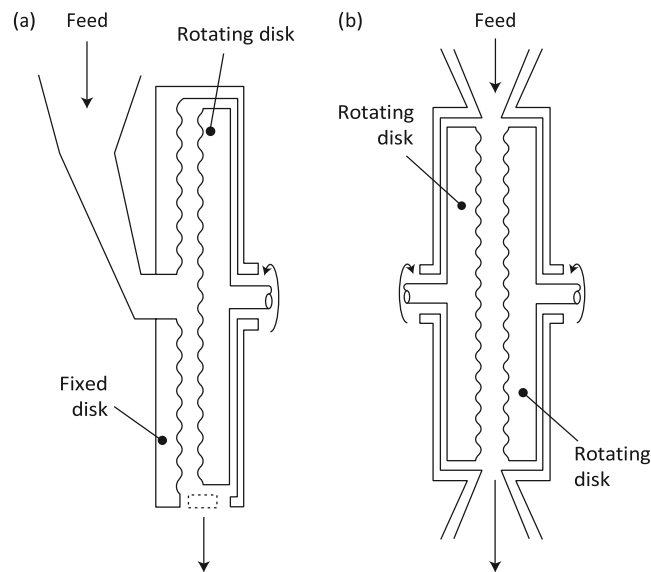
Σχήμα 3: Διάγραμμα λειτουργίας σφυρόμυλου. (Tzia, Giannou 2014)

2.4.3 Μύλος τριβής

Ο μύλος τριβής αποτελείται από δύο δίσκους κάθετους ή οριζόντιους που κρατούνται σε στενή επαφή μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ελατηρίου. Η επιφάνεια των δίσκων δεν είναι λεία αλλά έχει συνήθως αυλακώσεις, ή ακόμη και προεκτάσεις υπό μορφή καρφιών.

Κατά τη λειτουργία, είτε περιστρέφονται και οι δυο δίσκοι κατ' αντίθετη φορά, είτε περιστρέφεται μόνο ο ένας δίσκος και ο άλλος είναι ακίνητος. Το υλικό που πρόκειται να θρυμματιστεί, τροφοδοτείται στο κέντρο των δίσκων και αναγκάζεται να κινηθεί προς την περιφέρεια περνώντας ανάμεσα από τους δυο δίσκους. Η διάτμηση που υφίσταται κατά τη διέλευση του ανάμεσα από το μικρό διάκενο των δυο δίσκων, το θρυμματίζει. Το μέγεθος του τελικού προϊόντος και η δυναμικότητα του μύλου εξαρτώνται από τη μορφή της επιφάνειας των δίσκων, από την ταχύτητα περιστροφής και από το διάκενο των δίσκων.

Οι μύλοι τριβής χρησιμοποιούνται για το άλεσμα μπαχαρικών, καφέ και άλλων προϊόντων.



Σχήμα 4: Διάγραμμα λειτουργίας μύλου τριβής (Tzia, Giannou 2014)

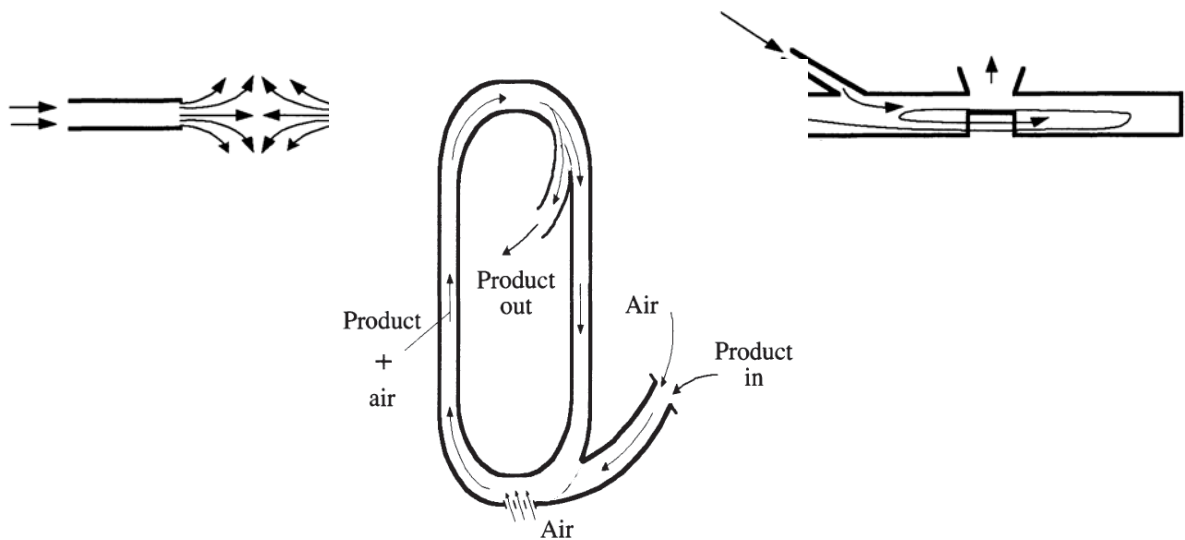
2.4.4 Jet mill

Η άλεση με πεπιεσμένο αέρα υψηλής πίεσης είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία στον τομέα την παραγωγής λεπτόκοκκων κόνεων. Η τεχνολογία άλεσης με αέρα χρησιμοποιείται για θερμοευαίσθητα και εύθρυπτα υλικά και παράγονται υπέρλεπτα σωματίδια (ultra-fine powder).

Ο μύλος άλεσης με πεπιεσμένο αέρα αποτελείται από μία πηγή ενέργειας για τον αέρα όπως ένας συμπιεστής, μια γεννήτρια ατμού ή κάποιο άλλο σύστημα παραγωγής πεπιεσμένων αερίων όπως ένας εξατμιστής υγρού αζώτου. Από ένα μέσο τροφοδοσίας, σταθερής παροχής, του συστήματος με την ύλη προς άλεση που είναι συνήθως δονούμενος ή κοχλιωτός τροφοδότης ή μια περιστροφική βαλβίδα. Ένα μέσο διαχωρισμού του αέρα από το προϊόν όπως μια ελευθέρως κρεμάμενη σακούλα φιλτραρίσματος. Άλλο εξοπλισμό που μπορεί να διευκολύνει και να βελτιώσει την διαδικασία άλεσης όπως συστήματα απομακρυσμένου ελέγχου, συστήματα φίλτρων και διαφορετικοί τρόποι διαχείρισης του προϊόντος. Και φυσικά ο ίδιος ο μύλος άλεσης (θάλαμος κρούσης). Οποιαδήποτε σκόνη η οποία είναι κρυσταλλική ή εύθρυπτη μπορεί να κονιορτοποιηθεί περαιτέρω σε ένα μύλο άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα: ο ελικοειδής τύπος, ο οβάλ και ο counter. Το εύρος παραγωγής τελικού προϊόντος διαφέρει και κυμαίνεται από 0,05 tons/h έως 10 tons/h. Στον τύπο counter τα σωματίδια αλέθονται από την σύγκρουση δύο ρευμάτων αέρα τα οποία τα μεταφέρουν, τα επιταχύνουν με κατεύθυνση ακριβώς αντίθετη το

ένα από το άλλο όποτε και προκαλούνται οι κρούσεις. Στον ελικοειδή τύπο το προϊόν εισέρχεται μαζί με τον συμπιεσμένο αέρα σε ένα άλλο ρεύμα αέρα το οποίο ήδη κινείται με μεγάλη ταχύτητα σε ένα κυκλικό κανάλι. Ενώ στον οβάλ τύπο μύλου άλεσης το κανάλι ροής είναι οβάλ αντί για το κυκλικό του προηγούμενου. Το προϊόν προς άλεσης τροφοδοτείται συνεχώς στο σύστημα από το χαμηλότερο του σημείο όπου συναντά υψηλής πίεσης αέρα ή ατμό. Τα εισερχόμενα σωματίδια μειώνονται σε μέγεθος από τον συμπιεσμένο αέρα ή ατμό στο χαμηλότερο μέρος του μύλου λόγω τριβής και λόγω συγκρούσεων των σωματιδίων μεταξύ τους αλλά και με τα τοιχώματα. Στο ψηλότερο μέρος του μύλου τα σωματίδια συνεχίζουν τον δρόμο τους μέσα στο κανάλι με κατεύθυνση προς τα κάτω ενώ τα μικρότερα σωματίδια φεύγουν από το σύστημα.



Σχήμα 5: Τύποι Jet Mill (Saravacos, 2002)

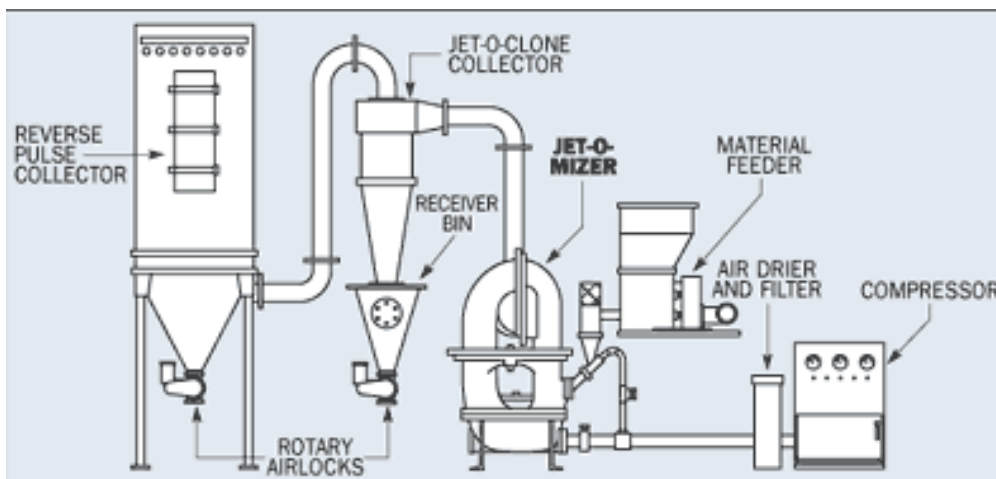
2.4.4.1 Μηχανισμός δράσης

Ένας συμπιεστής χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία με αέρα υψηλής ταχύτητας ο οποίος επιταχύνει τα σωματίδια σε μία ροή τύπου τυφώνα μέσα στην μύλο άλεσης. Η φυγόκεντρος δύναμη ωθεί τα σωματίδια προς το εξωτερικό μέρος του κυλίνδρου κρούσης. Τα σωματίδια ταξιδεύουν σε κυκλική τροχιά και το μέγεθος τους μειώνεται λόγω τριβής και λόγω

των κρούσεων που δημιουργούνται. Η πίεση του εισερχόμενου αέρα και ο ρυθμός τροφοδοσίας του προϊόντος προς άλεση επηρεάζουν το μέγεθος των παραγόμενων σωματιδίων.

Πλεονεκτήματα της χρήσης μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα είναι: η παραγωγή μικρότερου μεγέθους σωματιδίων σε σχέση με άλλες κλασικές μεθόδους άλεσης, η άλεση προϊόντων υψηλής σκληρότητας με μειωμένη φθορά του εξοπλισμού άλεσης, ο μικρός σχετικά χώρος για την εγκατάσταση του απαιτούμενου εξοπλισμού, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας του μύλου πράγμα που τον καθιστά ιδανικό για θερμοευαίσθητα προϊόντα, η μη μόλυνση του προϊόντος από το μηχάνημα και η απουσία κινούμενων μερών.

Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι: η μικρή δυναμικότητα, οι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και η καταπόνηση.



Σχήμα 6: Αναπαράσταση γραμμής άλεσης (Fluid Energy, Telford, USA)

3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1 Εμπορικά λογισμικά προγράμματα

- Σχεδιαστικό πακέτο Gambit 2.4.6
- Σχεδιαστικό πακέτο AutoCad R14
- Λογισμικό Προσομοίωσης Fluent 15.0.7
- Πακέτο Στατιστικής Ανάλυσης Excel 2013

3.2 Χαρακτηριστικά Η/Υ Προσομοίωσης

- OS: Windows 8.1
- Intel i7 3770k, 4.8GHz, 16GB RAM

3.3 Εργαστηριακός μύλος πεπιεσμένου αέρα

Ο μύλος που μελετήθηκε είναι ο Jet-o-Mizer (Jet-o-Mizer Model 0101S, Fluid Energy, Telford, USA) με διαφμιζόμενο εύρος σωματιδίων 0,5-45 μm .

3.4 Οριακές Συνθήκες

Η γεωμετρία που δημιουργήθηκε είναι τρισδιάστατη και το μέσο που χρησιμοποιήθηκε είναι ο αέρας. Μελετήθηκαν τρεις συνθήκες λειτουργίας του μύλου ως προς την ταχύτητα του αέρα ήτοι 300 m/s , 200 m/s και 100 m/s. Η ροή στο εσωτερικό του θαλάμου κρούσης είναι τυρβώδης. Το είδος του προβλήματος είναι χρονικά σταθερό ως προς το μέσο (αέρα) και χρονικά μεταβαλλόμενο ως προς τα σωματίδια. Οι διάμετροι των σωματιδίων είναι 140 μm , 100 μm , 60 μm , 30 μm . Για την προσομοίωση της μείωσης μεγέθους χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια μεγέθους 127 μm για να συμβαδίζουν με πειραματικά δεδομένα τα οποία είχαμε και να μπορεί να γίνει επικύρωση του μοντέλου.

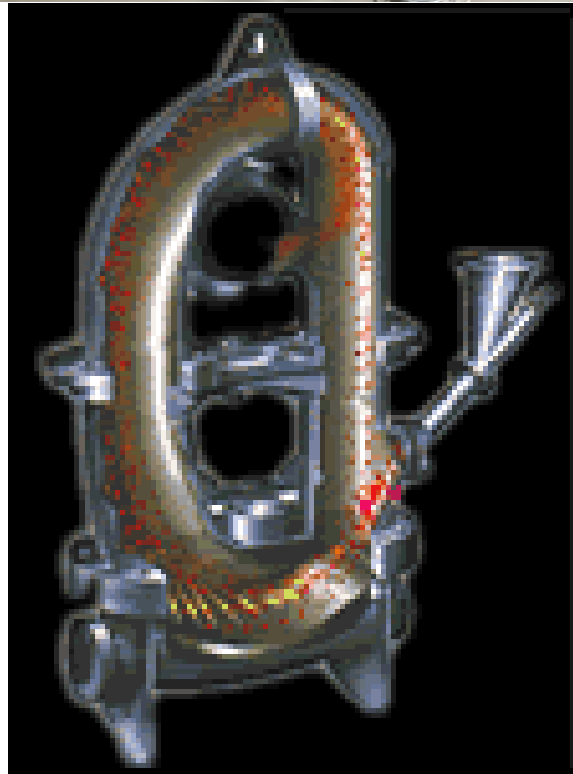
3.5 Παραδοχές

- Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του μύλου θεωρούμε ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή διότι υπάρχει λειτουργία του φαινομένου Joules-Thomson, σύμφωνα με το οποίο, το αέριο που εισέρχεται στον μύλο άλεσης ψύχεται λόγω

εκτόνωσης και έτσι η αντισταθμίζεται οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας λόγω τριβής.

- Το σχήμα των σωματιδίων θεωρήθηκε σφαιρικό, λείο και σταθερό καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του μύλου.
- Το μέγεθος των σωματιδίων κατά την είσοδο τους στον μύλο θεωρήθηκε ομοιόμορφο και ίσο με 127 μm , το οποίο αντιστοιχεί στο D_{50} το οποίο είχαμε λάβει από πειραματικά αποτελέσματα.
- Η άλεση συντελείται στο εσωτερικό του θαλάμου κρούσης και μόνο.
- Το κατ' όγκο ποσοστό των σωματιδίων σε σχέση με τον αέρα (volume fraction) παραμένει μικρότερο από 10%, πράγμα που σημαίνει ότι η αέρια φάση δεν επηρεάζεται από την είσοδο και παρουσία των σωματιδίων.

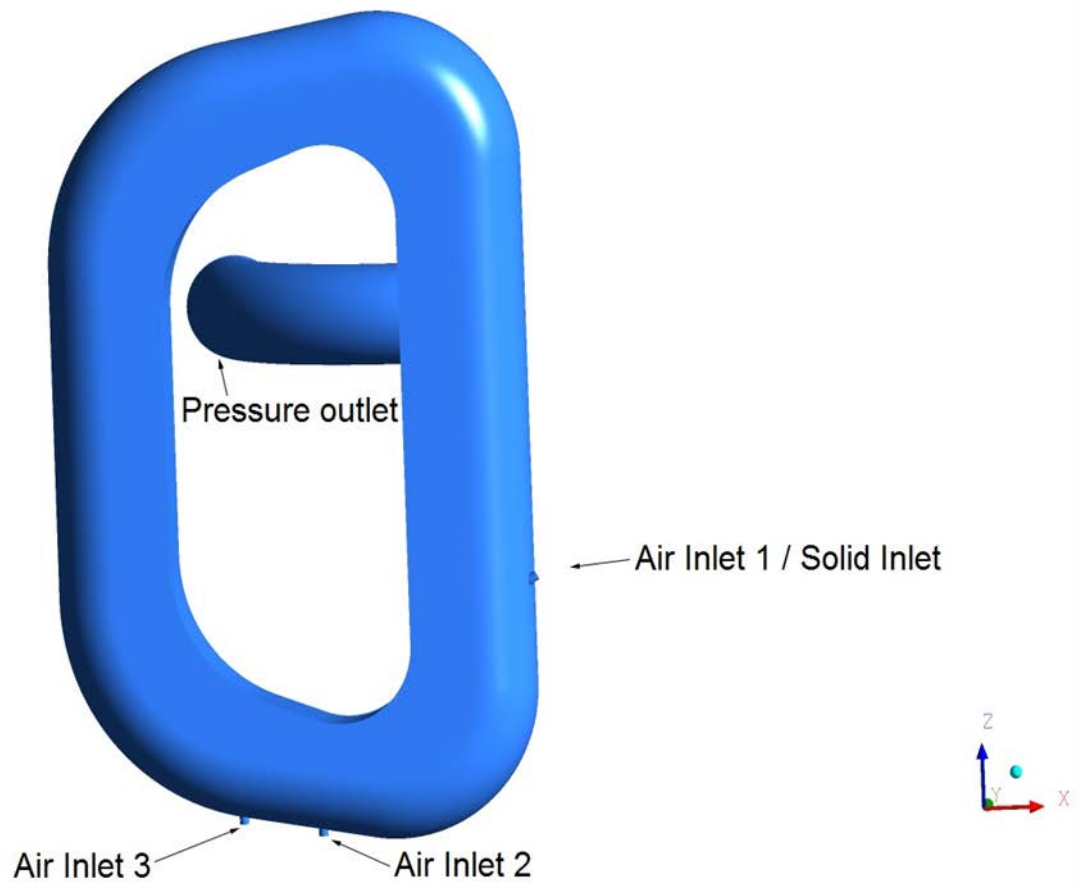
Σχήμα 7: Ο Μύλος Άλεσης του Εργαστηρίου μας



Σχήμα 8: Γραφική αναπαράσταση Θαλάμου κρούσης

3.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση του θαλάμου κρούσης

Για να γίνει η μοντελοποίηση της λειτουργίας του μύλου άλεσης πρέπει πρώτα απ' όλα να γίνει η τρισδιάστατη απεικόνιση του. Λόγω του ακανόνιστου σχήματος του θαλάμου κρούσης του μύλου αυτή η απεικόνιση παρουσίασε αρκετές δυσκολίες και χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένα προγράμματα τρισδιάστατου σχεδιασμού, πέραν του γενικότερα διαδεδομένου προγράμματος Gambit® 2.4.6 το οποίο χρησιμοποιείται συχνά για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του προς εξέταση προβλήματος. Συγκεκριμένα, μεγάλο μέρος του σχεδιασμού της γεωμετρίας του θαλάμου κρούσης του μύλου έγινε χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCad. Μεγάλη προσοχή δόθηκε στην ακρίβεια της απεικόνισης αυτής για να γίνει όσο πιο πιστό στην πραγματικότητα γίνεται το μοντέλο που σχεδιάστηκε. Λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού χρειάστηκε να γίνουν αρκετές μετρήσεις των διαστάσεων του μηχανήματος και να εφαρμοστεί η μέθοδος της «δοκιμής και λάθους» κατά τον σχεδιασμό αυτό. Η γεωμετρία που σχεδιάστηκε περιέχει τον θάλαμο κρούσης, τις τρεις εισόδους του αέρα και την είσοδο των σωματιδίων που είναι ευθυγραμμισμένη με μια από τις τρεις εισόδους αέρα καθώς και την έξοδο του αέρα και των σωματιδίων από το σύστημα.



Σχήμα 9: Τρισδιάστατη απεικόνιση Θαλάμου κρούσης

3.7 Meshing

Μετά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας ακολούθησε η δημιουργία του εσωτερικού πλέγματος στο οποίο βασίστηκαν όλες οι προσομοιώσεις που έγιναν παρακάτω. Για την δημιουργία αυτού του πλέγματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Gambit® 2.4.6, πάρα το γεγονός ότι είναι πλέον αρκετά παλιό, για διάφορους λόγους εκ των οποίων ο κυριότερος είναι η ευελιξία που προσφέρει στον χρήστη να χειριστεί τις ρυθμίσεις του πλέγματος που φτιάχνει με όποιο τρόπο θεωρεί αυτός σωστότερο και δεν βασίζεται σε κάποιους κανόνες όπως άλλα νεότερα προγράμματα (πχ. Fluent Workbench).

Μετά τις δοκιμές για την ανεξαρτησία του πλέγματος επελέγη το πλέγμα Tet/Hybrid – T-Grid ομοιόμορφο για όλη την έκταση της γεωμετρίας, χρησιμοποιώντας την επιλογή «Shortest edge %». Η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμοποιήθηκε αφού υπολογίστηκε η μικρότερη ακμή της γεωμετρίας και χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο για την δημιουργία του εσωτερικού αυτού πλέγματος που είναι απαραίτητο για τους υπολογισμούς που ακολούθησαν. Τελικά το εσωτερικό πλέγμα με την επιλογή Shortest edge % στο 154,44% δημιουργήθηκε και είχε 1173343 κελιά και 217197 κομβικά σημεία. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία όπως το Equisize Skew (QEVS) και Equiangle Skew (QEAS) του Gambit, τα οποία εκτιμούν την ποιότητα του πλέγματος. Το εργαλείο Equiangle Skew (QEAS) είναι ένα μέτρο της ποιότητας του πλέγματος το οποίο χρησιμοποιείται πολύ συχνά για να εκτιμηθεί η χρησιμότητα του υπό εξέταση πλέγματος. Ο υπολογισμός του γίνεται από τον τύπο:

$$\max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right]$$

Όπου:

θ_{\max} = η μεγαλύτερη γωνία ενός κελιού ή μιας επιφανείας

θ_{\min} = η μικρότερη γωνία ενός κελιού ή μιας επιφανείας

θ_e = η γωνία που εξαρτάται από το είδος του κελιού π.χ. 60° για τρίγωνο, και 90° για τετράγωνο.

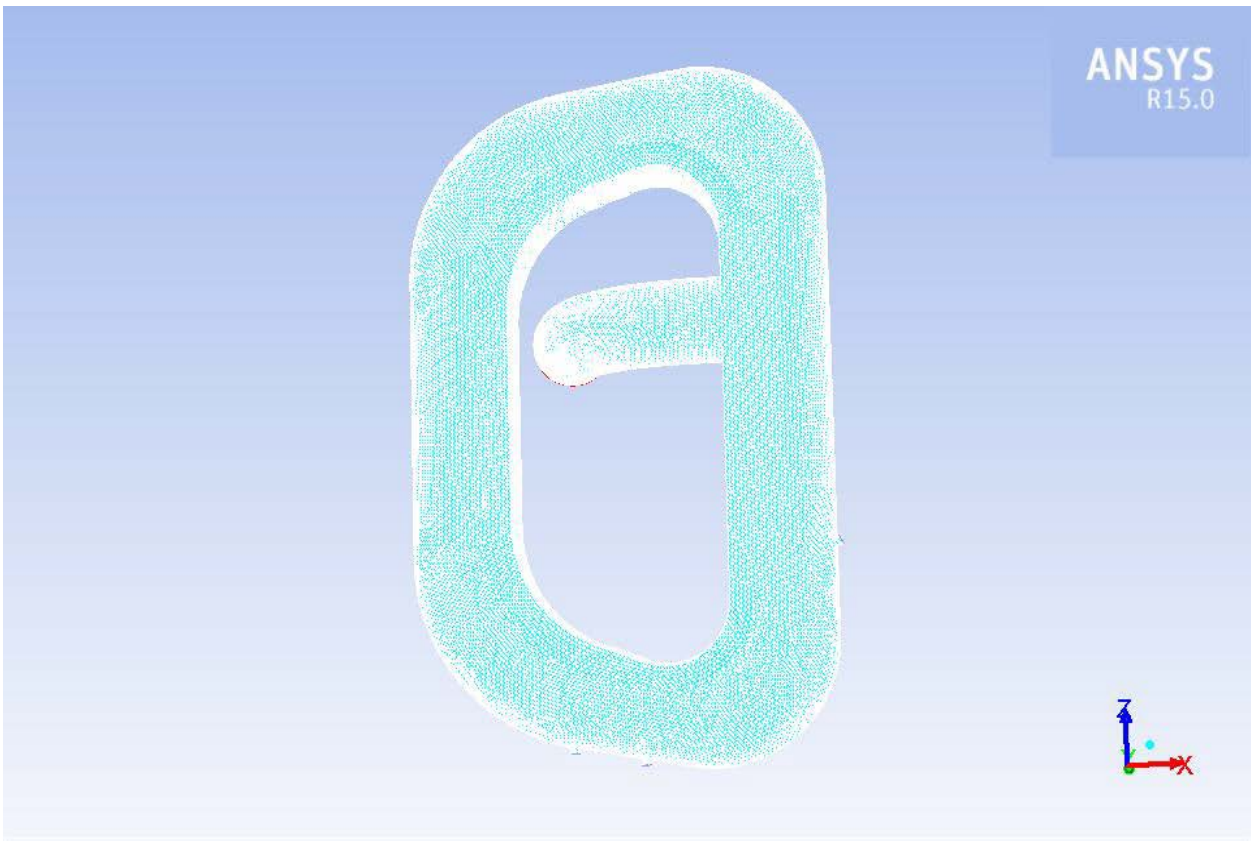
Το εύρος του συγκεκριμένου δείκτη κυμαίνεται από 0 έως 1.

Όσον αφορά τον δείκτη Equisize Skew (QEVS), ο οποίος είναι ένας δείκτης στρέβλωσης και ορίζεται ως:

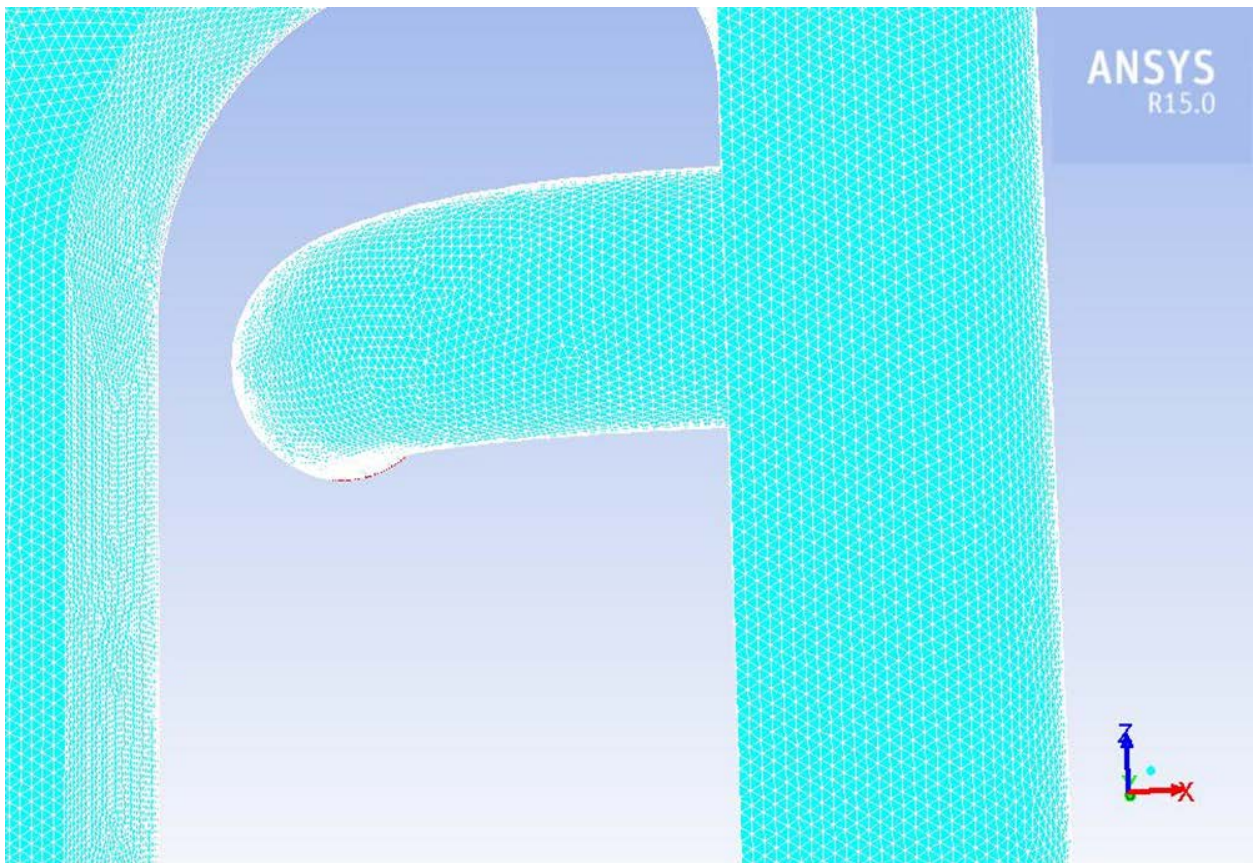
$$Q_{QEVS} = \frac{(S_{eq} - S)}{S_{eq}}$$

Όπου S η επιφάνεια ή ο όγκος ενός στοιχείου (δισδιάστατου η τρισδιάστατου αντίστοιχα) και S_{eq} η μεγαλύτερη επιφάνεια ή όγκος ενός ισόπλευρου κελιού του οποίου η οριοθετημένη ακτίνα είναι ίση με αυτή του κελιού υπό εξέταση. Εξ' ορισμού ο δείκτης αυτός μπορεί να λάβει τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 αντιστοιχεί σε ένα ισόπλευρο κελί και το 1 σε ένα εντελώς κακοσχηματισμένο κελί. Τέλος, σημαντικό κριτήριο αποτελεί και το QAR που είναι η αναλογία της μεγαλύτερης προς την μικρότερη ακμή του κελιού.

Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των συγκεκριμένων δεικτών συμφωνούν με τους γενικούς κανόνες για την δημιουργία του εσωτερικού πλέγματος ($0 < Q_{EVS} < 1$, $0 < Q_{EAS} < 1$ και $Q_{AR} > 1$). Αυτό αποδεικνύει ότι το παραχθέν πλέγμα είναι κατάλληλο για προσομοίωση και μοντελοποίηση.



Σχήμα 10: Δημιουργία εσωτερικού πλέγματος



3.8 Αριθμητική ανάλυση

Μετά την επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, πρέπει να γίνει και η σωστή επιλογή της μεθόδου διακριτοποίησης, δηλαδή μιας μεθόδου για την προσέγγιση των διαφορικών εξισώσεων μέσω ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων για τις εξεταζόμενες μεταβλητές, σε συγκεκριμένες διακριτές περιοχές στο χώρο και στο χρόνο. Από τις πολλές τεχνικές που υπάρχουν, τρεις είναι οι πιο σημαντικές και περιλαμβάνουν α) τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, β) τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και γ) τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Αν και οι τρεις τεχνικές παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα σε υψηλής ανάλυσης πλέγματα, το εύρος των κατάλληλων προβλημάτων που λύνονται με την κάθε τεχνική είναι διαφορετικό (Norton *et al.*, 2007).

Η τεχνική των πεπερασμένων διαφορών έχει περιορισμένη χρήση σε πολλά προβλήματα ροής λόγω των δυσκολιών τους στη διαχείριση πολύπλοκων γεωμετριών. Τα πεπερασμένα στοιχεία λειτουργούν καλά σε κάποιες εξισώσεις, αλλά είναι περιορισμένη η ανάπτυξη προγραμμάτων που να βασίζονται σε αυτήν την τεχνική πιθανότητα λόγω της πολυπλοκότητας τους. Η πολυπλοκότητα των πεπερασμένων στοιχείων εξαλείφεται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων. Η ευκολία, στην κατανόηση, τον προγραμματισμό, και την ευελιξία των πεπερασμένων όγκων την καθιστά την κυρίαρχη μέθοδο που χρησιμοποιείται στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Άλλες προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί και αποκτούν αυξημένο ενδιαφέρον τελευταία (Sardi and Yanniotis, 2007) περιλαμβάνουν τα οριακά στοιχεία (boundary elements) (Puri, Anantheswaran, 1993), τη μέθοδο lattice-gas cellular automata και τη lattice Boltzman (Wolf-Gladrow, 2000).

3.9 Αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Η αριθμητική λύση των πεπερασμένων όγκων για χρονικά μεταβαλλόμενες ροές βασίζεται στις εξισώσεις μεταφοράς που έχουν τη γενική μορφή (Patankar, 1980):

$$\text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_{\phi}$$

όπου

ρ η πυκνότητα του ρευστού

u η ταχύτητα του ρευστού

ϕ οποιαδήποτε μεταβλητή

Γ ο συντελεστής διάχυσης

S_ϕ ο όρος πηγής

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αναπαριστά το ρυθμό μεταβολής και είναι μηδέν για χρονικά σταθερές ροές. Για να επιλυθούν τα προβλήματα με χρονική μεταβολή πρέπει να διατηρηθεί αυτός ο όρος στη διαδικασία διακριτοποίησης. Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης για τον πεπερασμένο όγκο, γίνεται πάνω σε ένα όγκο ελέγχου (CV) και ξεκινά από την περαιτέρω ολοκλήρωση σε ένα πεπερασμένο χρονικό βήμα, Δt (Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.10 Εξισώσεις της αέριας φάσης

Γενικά για την αέρια φάση ισχύουν οι εξής νόμοι:

- Η αρχή διατήρησης της μάζας
- Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής του σωματιδίου (δύναμη) ισούται με την συνισταμένη των δυνάμεων που επιδρούν στο σωματίδιο (2ος Νόμος του Νεύτωνα)
- Το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή δαπανά το σύστημα (1ος Θερμοδυναμικός νόμος)

Το αέριο θα θεωρηθεί ως συνεχές και για την συμπεριφορά του θα ληφθούν υπ' όψιν οι μακροσκοπικές του ιδιότητες όπως η ταχύτητα, η πίεση, η πυκνότητα και η θερμοκρασία καθώς και τα χωρικά παράγωγα τους.

3.10.1 Η αρχή διατήρησης της μάζας σε τρεις διαστάσεις

Ο ρυθμός αύξησης της μάζας στο εσωτερικό ενός δεδομένου στοιχείου ισούται με τον καθαρό ρυθμό ροής μάζας προς το στοιχείο αυτό από όλες τις πλευρές του, καταλήγοντας στην εξίσωση της αρχής διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

Όπου ο αριστερά όρος είναι ο ρυθμός αλλαγής σε σχέση με τον χρόνο της πυκνότητας (μάζα ανά μονάδα όγκου) και ο δεύτερος όρος περιγράφει την καθαρή ροή μάζας από το στοιχείο από όλες τις πλευρές του.

3.10.2 Η αρχή διατήρησης της ορμής σε τρεις διαστάσεις

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ο ρυθμός μεταβολής της ορμής σωματιδίου ισούται με την συνισταμένη των δυνάμεων που επιδρούν στο σωματίδιο.

Ο ρυθμός αύξησης της ορμής ενός δεδομένου όγκου ως προς x-,y-,z- δίνεται από:

x-	Ορμή ως προς	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u})$
y-	Ορμή ως προς	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u})$
z-	Ορμή ως προς	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u})$

Διακρίνουμε δύο είδη δυνάμεων

- Επιφανειακές δυνάμεις
 - Πίεση
 - Τύρβη
 - Βαρύτητα
- Δυνάμεις του σώματος
 - Φυγόκεντρος
 - Δύναμη Coriolis
 - Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις

3.10.3 Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας σε τρεις διαστάσεις

Η εξίσωση της ενέργειας λαμβάνεται από τον 1ο θερμοδυναμικό νόμο σύμφωνα με τον οποίο το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει η δαπάνη το σύστημα.

Έτσι έχουμε:

Ενέργεια	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E \mathbf{u})$
----------	---	----------------------	---

3.10.4 Εξισώσεις που αφορούν την τύρβη

- Η επιστημονική ερμηνεία της τύρβης είναι σχεδόν αδύνατον να αποδοθεί με μια απλή πρόταση και περιγράφεται καλύτερα είτε μέσω κάποιων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της είτε με κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα. Οι προσπάθειες για τον ορισμό της τύρβης μπορούν να συνοψισθούν στις εξής:

- **Taylor & Von Karman, (1937):** Τύρβη είναι μια *ακανόνιστη κίνηση* που εμφανίζεται στα ρευστά, αέρια ή υγρά, όταν αυτά ρέουν γύρω από στέρεες επιφάνειες (τοιχώματα) ή όταν γειτονικές στοιβάδες του ίδιου ρευστού ρέουν με διαφορετική ταχύτητα.

- **Bradshaw, (1971):** Τύρβη είναι μια τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη κίνηση στην οποία η *διάταση των στροβίλων* (vortex stretching) προκαλεί διακυμάνσεις ταχύτητας (velocity fluctuations) που διαχέονται σε όλα τα μήκη κύματος. Το ελάχιστο μήκος κύματος προσδιορίζεται από το ιζώδες και το μέγιστο προσδιορίζεται από τις οριακές συνθήκες της ροής. Είναι μια συνήθης κατάσταση της κίνησης των ρευστών, σε υψηλούς αριθμούς Reynolds. **Reynolds, (1974):** Τύρβη είναι μια κίνηση ρευστού που περιλαμβάνει τυχαία μακροσκοπική ανάμειξη με διάφορες κλίμακες μήκους και χρόνου.

- **Hinze, (1975):** Τυρβώδης κίνηση ρευστού είναι μια ανώμαλη συνθήκη της ροής στην οποία οι διάφορες ποσότητες (χαρακτηριστικά) δείχνουν μια τυχαία μεταβολή με τον χρόνο και τον χώρο, έτσι ώστε μπορούν να οριστούν στατιστικά διακεκριμένες μέσες τιμές.

- **Kerstein, (2002):** Η τύρβη μπορεί να οριστεί ως μια διαδοχική *υποβάθμιση* (cascade) των ασταθειών της ροής από κλίμακες μήκους όπου η κίνηση του ρευστού επηρεάζεται από διατμητικές τάσεις, κλίσεις πίεσης (pressure gradient) και δυνάμεις από σώματα (π.χ. βαρύτητα), σε κλίμακες όπου η συνεκτικότητα μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε θερμότητα και καταστέλλει τις αστάθειες των μικρών κλιμάκων.

3.10.5 Οι εξισώσεις του μοντέλου k-ε

Το κλασσικό k-ε μοντέλο περιέχει δύο εξισώσεις μια για το k και μια για το ε, βασισμένες στην μέχρι στιγμής κατανόηση μας των διεργασιών που προκαλούν μεταβολές σε αυτές τις δύο μεταβλητές.

Εξίσωση για το κινηματικό ιξώδες (Eddy)

$$\mu_t = C\rho\vartheta\ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Όπου

$$\vartheta = k^{1/2} \quad \ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τις παρακάτω εξισώσεις μεταφοράς για τα k και ε:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

ή με λόγια

ο ρυθμός αλλαγής των k,ε + μεταφορά των k,ε λόγω συναγωγής = μεταφορά των k,ε λόγω διάχυσης + ρυθμό παραγωγής των k,ε – ρυθμό καταστροφής των k,ε.

Οι παραπάνω εξισώσεις περιέχουν πέντε τροποποιήσιμες σταθερές : $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ στις οποίες δόθηκαν οι παρακάτω τιμές:

$$C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1,00 \quad \sigma_\varepsilon = 1,30 \quad C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92$$

Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds το μοντέλο αυτό έχει το πλεονέκτημα του ότι αποφεύγει την χρήση επιπλέον εξισώσεων όσον αφορά την συμπεριφορά του ως προς τους

τοίχους κάνοντας χρήση μιας γενικευμένης συμπεριφοράς για την ροή πολύ κοντά στο τοίχωμα (κάνοντας χρήση του όρου y^+ και υπολογίζοντας Re χρησιμοποιώντας το y^+ για απόσταση αντί του ℓ).

Χρησιμοποιώντας διάφορες υποθέσεις και εφαρμόζοντας την eddy φόρμουλα για το κινηματικό ιξώδες, φτιάχνουμε την εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την τύρβη όσον αφορά το στρώμα αέρα πολύ κοντά στο τοίχωμα η οποία συσχετίζει την τοπική δύναμη διάτμησης λόγω του τοιχώματος με την μέση ταχύτητα του αέρα, την κινητική ενέργεια λόγω τύρβης και τον ρυθμό απαγωγής.

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey_p^+) \quad k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y}$$

Με σταθερές $\kappa=0,41$ και η παράμετρος της τραχύτητας του τοίχου $E=9,8$ για λείους τοίχους.

3.10.6 Οι εξισώσεις του μοντέλου k- ω

Υπάρχουν περιπτώσεις που το k- ε μοντέλο δεν επαρκεί διότι:

- Προβλέπει υπερβολικά μεγάλη δύναμη διάτμησης σε στρώματα αέρα γύρω από καμπύλες επιφάνειες
- Και πολύ μεγάλα επίπεδα τύρβης σε περιοχές στασιμότητας ή πρόσκρουσης το οποίο οδηγεί σε υπερβολική μεταφορά θερμότητας στις περιοχές αυτές

Έτσι έχουν δημιουργηθεί κάποια άλλα μοντέλα που υπερτερούν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το Wilcox k- ω το οποίο χρησιμοποιεί την συχνότητα (turbulence frequency) $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ (με μονάδες s^{-1}) ως δεύτερη μεταβλητή και ως μεταβλητή για το μήκος $\ell = \frac{\sqrt{k}}{\omega}$.

Το ιξώδες (Eddy) δίνεται από: $\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$

Κάνοντας χρήση και της εξίσωσης του Boussinesq καταλήγουμε στην εξίσωση για την μεταφορά του k και ω σε υψηλές τιμές Reynolds

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega$$

$$\text{Όπου } P_k = (2\mu S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_1 (2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij}) - \beta_1 \rho \omega^2$$

ή με λόγια

Ο ρυθμός της αλλαγής των k, ω + την μεταφορά των k, ω λόγω συναγωγής = την μεταφορά των k, ω λόγω τυρβώδους διάχυσης + τον ρυθμό παραγωγής των k, ω – τον ρυθμό απαγωγής των k, ω.

Οι σταθερές του μοντέλου είναι: $\sigma_k = 2,0$ $\sigma_\omega = 2,0$ $\gamma_1 = 0,553$ $\beta^* = 0,09$ $\beta_1 = 0,075$

3.11 Discrete Phase Model

Κατά την μελέτη του μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα για να μελετηθεί η κίνηση των σωματιδίων μέσα στο ρεύμα αέρα του μύλου χρησιμοποιήθηκε το Discrete Phase Model (DPM). Με την χρήση του DPM η φάση του ρευστού αντιμετωπίζεται ως συνεχής και λύνονται οι εξισώσεις Navier-Stokes για να διερευνηθεί το πεδίο ροής της ενώ η φάση διασποράς (τα σωματίδια) επιλύεται ανιχνεύοντας την κίνηση ενός μεγάλου αριθμού σωματιδίων μέσα στο πεδίο της συνεχούς φάσης. Η φάση διασποράς μπορεί να ανταλλάξει ορμή, μάζα και ενέργεια με την διακριτή φάση.

Το μοντέλο του DPM όπως εμφανίζεται στο FLUENT αποτελεί μία εφαρμογή της προσέγγισης Euler-Lagrange. Αυτή η προσέγγιση για να εφαρμοστεί θα πρέπει η φάση διάχυσης να είναι κατά πολύ μικρότερη από την αέρια φάση (κατ' όγκο) παρότι μπορεί να έχει αρκετά μεγάλη μάζα, δηλαδή $m_{\text{particles}} > m_{\text{fluid}}$ είναι αποδεκτό. Οι τροχιές των σωματιδίων υπολογίζονται ξεχωριστά σε δεδομένα χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια του υπολογισμού. Το μοντέλο αυτό από μόνο του δεν λαμβάνει υπ' όψη του την αλληλεπίδραση

σωματιδίου-σωματιδίου το οποίο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχει μελετηθεί ενεργοποιώντας δεύτερόν μοντέλο το οποίο αναπτύσσεται συνοπτικά παρακάτω.

3.11.1 Δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σωματίδιο

Οι δυνάμεις που επιδρούν στο σωματίδιο και υπολογίζονται από το πρόγραμμα για την κίνηση του μέσα στην αέρια φάση δίνονται από την εξίσωση:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_b + \vec{F}_{\text{therm}} + \vec{F}_s + \vec{F}_e$$

Όπου:

$F_D(\vec{U} - \vec{U}_p)$ είναι η δύναμη οπισθέλκουσας ανά μονάδα μάζας σωματιδίου

$\frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ είναι η επίδραση της βαρύτητας

\vec{F}_b είναι η δύναμη Brown

\vec{F}_{therm} είναι η Thermoforetic force

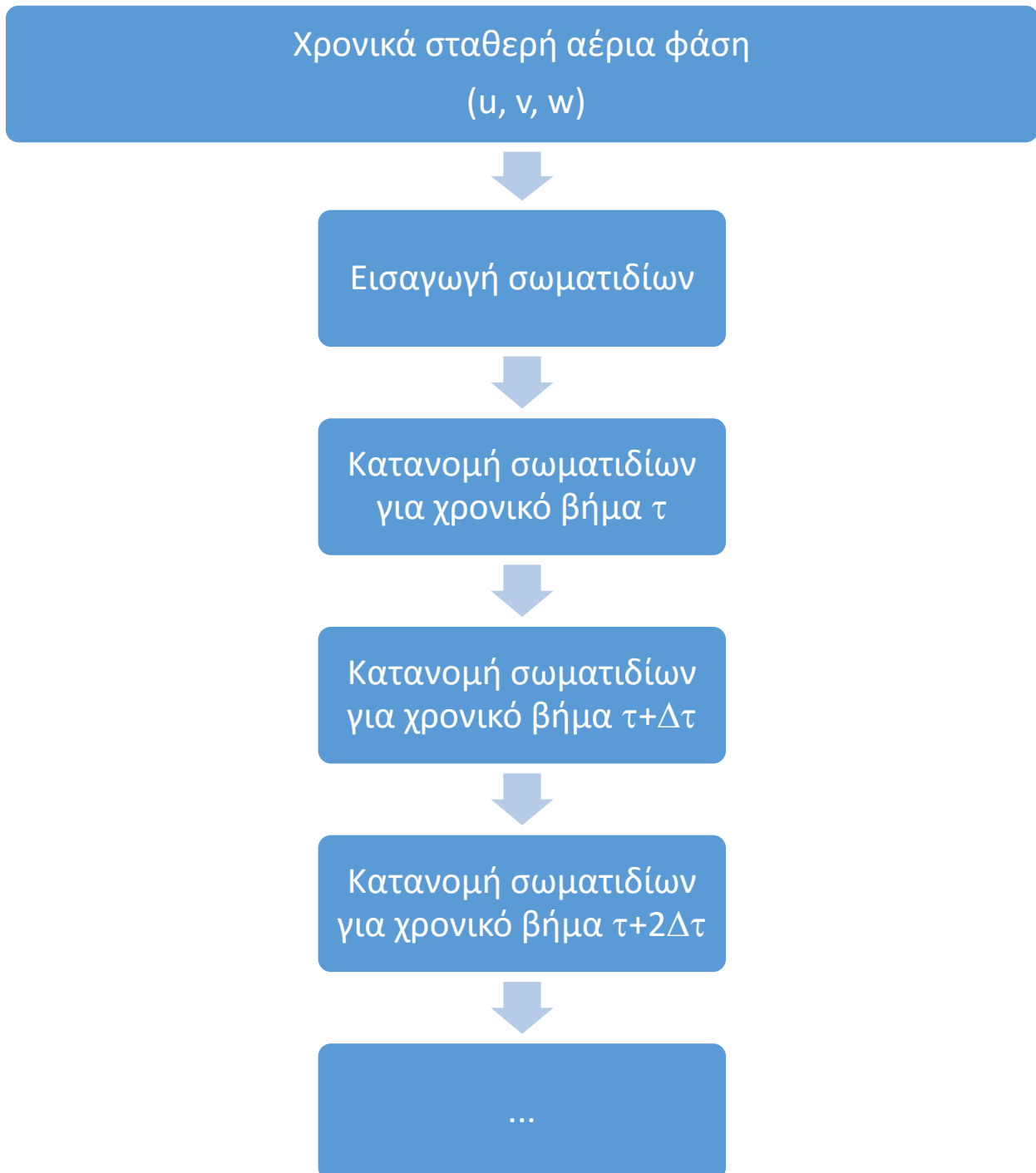
\vec{F}_s είναι η δύναμη ανύψωσης

\vec{F}_e είναι η ηλεκτροστατική δύναμη

3.11.2 Αλγόριθμος για τον υπολογισμό της κίνησης σωματιδίου

Παρατίθεται η συνοπτική απεικόνιση της αλληλουχίας των βημάτων που ακολουθείται για τον υπολογισμό της τροχιάς των σωματιδίων μέσα στην αέρια φάση.

3.11.3 Stochastic Tracking



Όταν η ροή είναι τυρβώδης το Fluent θα προβλέψει τις τροχιές των σωματιδίων χρησιμοποιώντας την μέση ταχύτητα της αέριας φάσης ως την ταχύτητα την οποία θα χρησιμοποιήσει στις εξισώσεις υπολογισμού τροχιάς. Για μεγαλύτερη ακρίβεια όμως της

πρόβλεψης της τροχιάς των σωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στιγμιαία ταχύτητα του αερίου για τον υπολογισμό της επίδρασης της τύρβης στην κίνηση των σωματιδίων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται stochastic tracking και ο τρόπος που λειτουργεί είναι: το πρόγραμμα ενσωματώνει εξισώσεις τροχιών για μεμονωμένα σωματίδια χρησιμοποιώντας την στιγμιαία ταχύτητα, στην γενικότερη διαδικασία υπολογισμού των τροχιών. Υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις τροχιές, η "τυχαία" επίδραση της τύρβης στην κίνηση των σωματιδίων μέσα στο πεδίο ροής μπορεί να ληφθεί υπ' όψη.

3.11.4 Spherical Drag Law

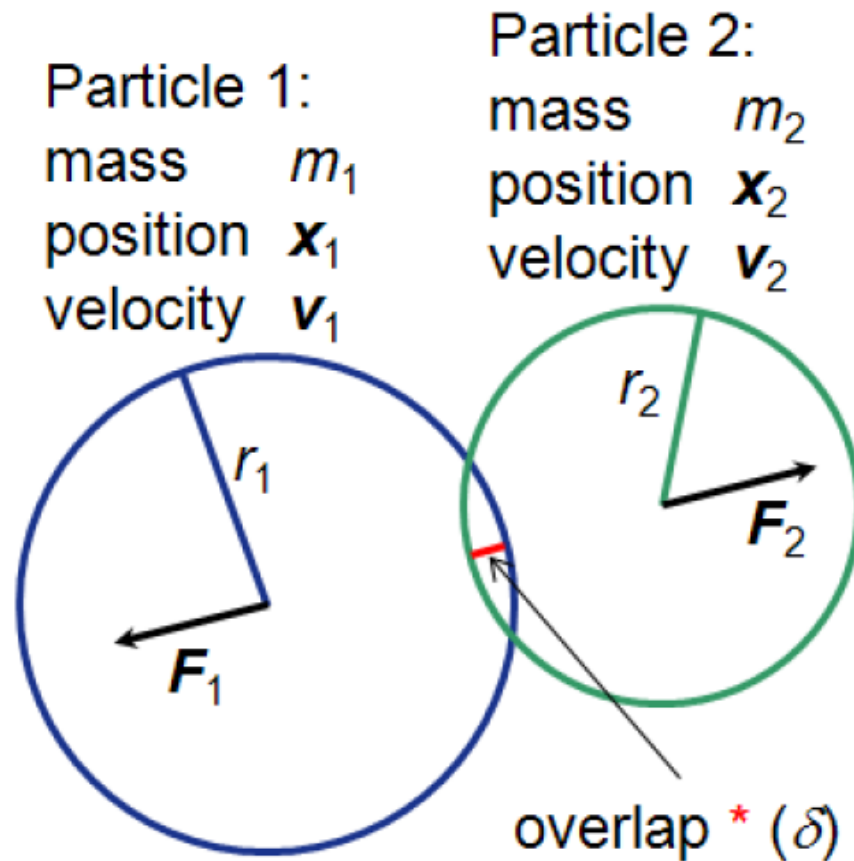
Ο συντελεστής οπισθέλκουσας για λείες επιφάνειες δίνεται από την σχέση:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$$

Όπου a_1 , a_2 , a_3 σταθερές οι οποίες εφαρμόζονται σε αρκετά μεγάλα εύρη Re και έχουν δοθεί από τους Morsi και Alexander, 1972.

3.11.5 Discrete Element Method Collision Model

Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατάλληλο για την προσομοίωση κοκκώδους ύλης. Τέτοιες προσομοιώσεις χαρακτηρίζονται από υψηλό αριθμό σωματιδίων όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Το μοντέλο αυτό είναι βασισμένο στην δουλειά των Cundall και Strack, 1979 και αποδίδει τις δυνάμεις που επιδρούν στα σωματίδια ως αποτέλεσμα των μεταξύ τους συγκρούσεων. Οι δυνάμεις αυτές καθορίζονται από την παραμόρφωση, η οποία αποδίδεται ως η επικάλυψη μεταξύ δύο σφαιρών ή μεταξύ μιας σφαίρας και του τοιχώματος.



Σχήμα 11: Αναπαράσταση σύγκρουσης σωματιδίων (μεγέθη όχι υπό κλίμακα)
(Ansys Fluent Theory Guide)

3.12 Βελτίωση της ακρίβειας και εξάλειψη του σφάλματος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Συχνά, οι λεπτομέρειες των εξισώσεων Navier-Stokes εισέρχονται με γενικές υποθέσεις και φτωχές τεχνικές μοντελοποίησης που μπορούν να καταστρέψουν την ποιότητα της προσομοίωσης. Όσο η χρήση και αποδοχή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής αυξανόταν, τόσο μεγαλύτερη έμφαση δινόταν στην βελτίωση της ακρίβειας. Σήμερα, οι κωδικοί Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής προσφέρουν πληθώρα εργαλείων που ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες της βιομηχανίας τροφίμων προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέτοια μοντέλα περιλαμβάνουν μεγάλο εύρος σχημάτων διακριτοποίησης, τυρβωδών μοντέλων, και λειτουργίες που αφορούν το σχηματισμό του πλέγματος όπως αδόμητο πλέγμα (unstructured mesh), ολισθηρό πλέγμα (sliding mesh), και πολλά καρέ αναφοράς (Norton *et al.*, 2007). Μια τυπική ανάλυση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής αποτελείται από τη δημιουργία της γεωμετρίας, διαιρώντας τη σε μικρά

στοιχεία (πλέγμα) για το σχηματισμό της υπολογιστικής γεωμετρίας, διακριτοποιώντας τις εξισώσεις και λύνοντας με τα κατάλληλα αριθμητικά σχήματα (Boz *et al.*, 2014). Μια μεταβλητή που προσδιορίζεται όπως η θερμοκρασία, σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην περιοχή υπολογισμού, προβλέπεται με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών μέχρι η λύση να φτάσει ένα προηγούμενος ορισμένο κριτήριο σύγκλισης και μέσα από το μέγεθος του χρονικού βήματος, Δt (από το t στο $t+\Delta t$). Συνεπώς, όλοι οι παράμετροι μοντελοποίησης (μέγεθος πλέγματος, χρονικό βήμα, κριτήριο σύγκλισης) συνεισφέρουν στην επιτυχία μιας λύσης με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Η ακρίβεια μιας λύσης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής γενικά βελτιώνεται με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος (Boz *et al.*, 2014). Ως γενικός κανόνας δηλαδή, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων στη γεωμετρία υπολογισμού πραγματοποιείται μέχρι να επιτευχθεί μια λύση με ανεξαρτησία πλέγματος. Αυτή η αύξηση στο τέλος θα παρέχει θεωρητικά ελάχιστες διαφορές μεταξύ των λύσεων (Boz *et al.*, 2014). Παρόλα αυτά, αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου υπολογισμού (Norton *et al.*, 2007). Λόγω των περιορισμών της υπολογιστικής δύναμης, μπορεί η αύξηση του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος στην υπολογιστική γεωμετρία να μην είναι εφικτή και η χρήση αραιότερων πλεγμάτων να δίνει επίσης ακριβή αποτέλεσμα σε αντίθεση με τον κανόνα (Boz *et al.*, 2014).

3.13 Λάθη και αβεβαιότητες

Λάθος σε μια μελέτη Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ονομάζεται μια αναγνωρισμένη έλλειψη που δεν οφείλεται σε έλλειψη γνώσης. Τέτοια είναι:

- i) Αριθμητικό (στρογγυλοποίηση, σύγκλιση, διακριτοποίηση)
- ii) Προγραμματιστικό (bugs)
- iii) Ανθρώπινο (μη σωστή χρήση του προγράμματος)

Αβεβαιότητα είναι μια πιθανή έλλειψη σε μια μελέτη που οφείλεται σε έλλειψη γνώσης:

- i) Αβεβαιότητα στις παραμέτρους εισόδου εξαιτίας έλλειψης επαρκούς πληροφόρησης ή παραδοχών ως προς τη γεωμετρία, τις αρχικές/οριακές συνθήκες, τις διάφορες ιδιότητες των υλικών κτλ.
- ii) Αβεβαιότητα στο φυσικό μοντέλο λόγω ελλείψεων στη μοντελοποίηση των διάφορων φυσικών ή χημικών διαδικασιών και λανθασμένες παραδοχές για απλούστευση του προβλήματος.

Τα παραπάνω λάθη και αβεβαιότητες σε μελέτες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής παρουσιάζουν μια σειρά ως προς τη σημασία τους κατά τη λύση ενός προβλήματος (Versteeg and Malalasekera, 2007). Η σειρά κατά φθίνουσα σημασία έχει ως εξής:

Μοντελοποίηση > διακριτοποίηση > σύγκλιση > στρογγυλοποίηση.

□ Λάθη στρογγυλοποίησης εντοπίζονται σε πλέγματα με μεγάλους λόγους πλευρών και όταν εκτελούνται πράξεις με μεγάλους αριθμούς ίδιας τάξης μεγέθους. Αυτά διορθώνονται με έλεγχο του πλέγματος και αποφυγή τέτοιων αριθμητικών πράξεων.

□ Όταν γίνεται αναφορά για σύγκλιση εννοείται ο αριθμός των επαναλήψεων που θεωρείται ανεκτός για να προσεγγίσει μια τελική λύση. Όταν μια λύση συγκλίνει η τιμή κάθε επανάληψης θα μειώνει την διαφορά της από την τιμή της προηγούμενης λύσης. Η σύγκλιση βασίζεται σε διάφορα κριτήρια που αναφέρονται ως υπόλοιπα (scaled residuals). Αυτά αποτελούνται από την συνέχεια (continuity), τις ταχύτητες στους άξονες x, y, z και την ενέργεια. Όταν πρέπει να ελεγχθεί αν υπάρχει σύγκλιση α) ελέγχεται αν αυτά τα στοιχεία παρουσιάζουν μονοτονική συμπεριφορά (πτωτική πορεία) ως προς τον αριθμό των επαναλήψεων, β) πρέπει να υπάρχει πτώση κατά τουλάχιστον 3 τάξεις μεγέθους από την αρχική λύση στην πρώτη επανάληψη γ) γίνεται έλεγχος για σύγκλιση σε συνολικά ισοζύγια δ) γίνεται πιο αυστηρό κατά 1 τάξη μεγέθους το κριτήριο σύγκλισης και ελέγχεται αν υπάρχουν διαφορές στα αποτελέσματα (Versteeg and Malalasekera, 2007).

□ Τα λάθη διακριτοποίησης οφείλονται στην παράβλεψη της συνεισφοράς των όρων υψηλότερης τάξης λόγω της αποκοπής (truncation) των εξισώσεων σειρών Taylor. Θεωρητικά αυτό το σφάλμα μπορεί να ελεγχθεί με προσεκτικό σχεδιασμό του πλέγματος, και ελαχιστοποιείται με τη χρήση προοδευτικά μικρότερου χρονικού βήματος και μεγέθους πλέγματος (Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.14 Επαλήθευση (verification) και πιστοποίηση (validation)

Είναι γενικά παραδεκτό ότι τα σφάλματα και οι αβεβαιότητες είναι αναπόφευκτα κομμάτι της αριθμητικής επεξεργασίας με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Γι' αυτό είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν αυστηρές μέθοδοι για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα. Οι όροι που έχουν εδραιωθεί και περιγράφουν καλύτερα την πρακτική που ακολουθείται είναι:

1) Η επαλήθευση (verification): Μέσω αυτής της διαδικασίας ποσοτικοποιείται το σφάλμα που οφείλεται σε λάθη στρογγυλοποίησης, σύγκλισης και διακριτοποίησης. Δηλαδή ελέγχεται αν λύνονται σωστά οι εξισώσεις.

2) Η πιστοποίηση (validation): Με τη διαδικασία αυτή ελέγχεται κατά πόσο το μοντέλο που χρησιμοποιείται ανταποκρίνεται στο μοντέλο που περιγράφει την πραγματική φύση του προβλήματος. Η διαδικασία ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα και ελέγχει αν λύνονται οι σωστές εξισώσεις (Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.15 Στάδια επεξεργασίας για την επίλυση προβλήματος με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική περιλαμβάνει 3 στάδια: α) Την προεπεξεργασία β) την μοντελοποίηση και επίλυση και γ) τη μετεπεξεργασία. Η προεπεξεργασία περιλαμβάνει την κατασκευή της γεωμετρίας του σώματος (σχήμα, μέγεθος, διαστάσεις ή τρισδιάστατη απεικόνιση ανάλογα με την περίπτωση για απλοποίηση ενός προβλήματος με χρήση συμμετρίας) που μελετάται και την κατασκευή του πλέγματος (στοιχεία πλέγματος που συνθέτουν τον όγκο της γεωμετρίας, πχ τετράεδρα, εξάεδρα, πυραμίδες, πρίσματα). Ο αριθμός και ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν είναι καθοριστικής σημασίας για την ακριβή και ορθή λύση του προβλήματος. Κατά τη μοντελοποίηση και επίλυση πρέπει να επιλεγούν τα μεγέθη που πρόκειται να υπολογιστούν (θερμοκρασία, ταχύτητα, πίεση, συγκέντρωση), να οριστούν οι φυσικές ιδιότητες των υλικών (πυκνότητα, ιξώδες, αγωγιμότητα, θερμική διαχυτότητα κλπ), οι εξισώσεις μεταφοράς, οι αρχικές και οριακές συνθήκες καθώς και επιπρόσθετα μοντέλα ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Τέλος, στη μετεπεξεργασία αφού γίνει επίλυση του προβλήματος γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τη χρήση γραφημάτων πλέγματος, ισοϋψών και ανυσμάτων, γραμμών ροής, διαγράμματα XY, και οπτικών μέσων όπως βίντεο (Norton *et al.*, 2007).

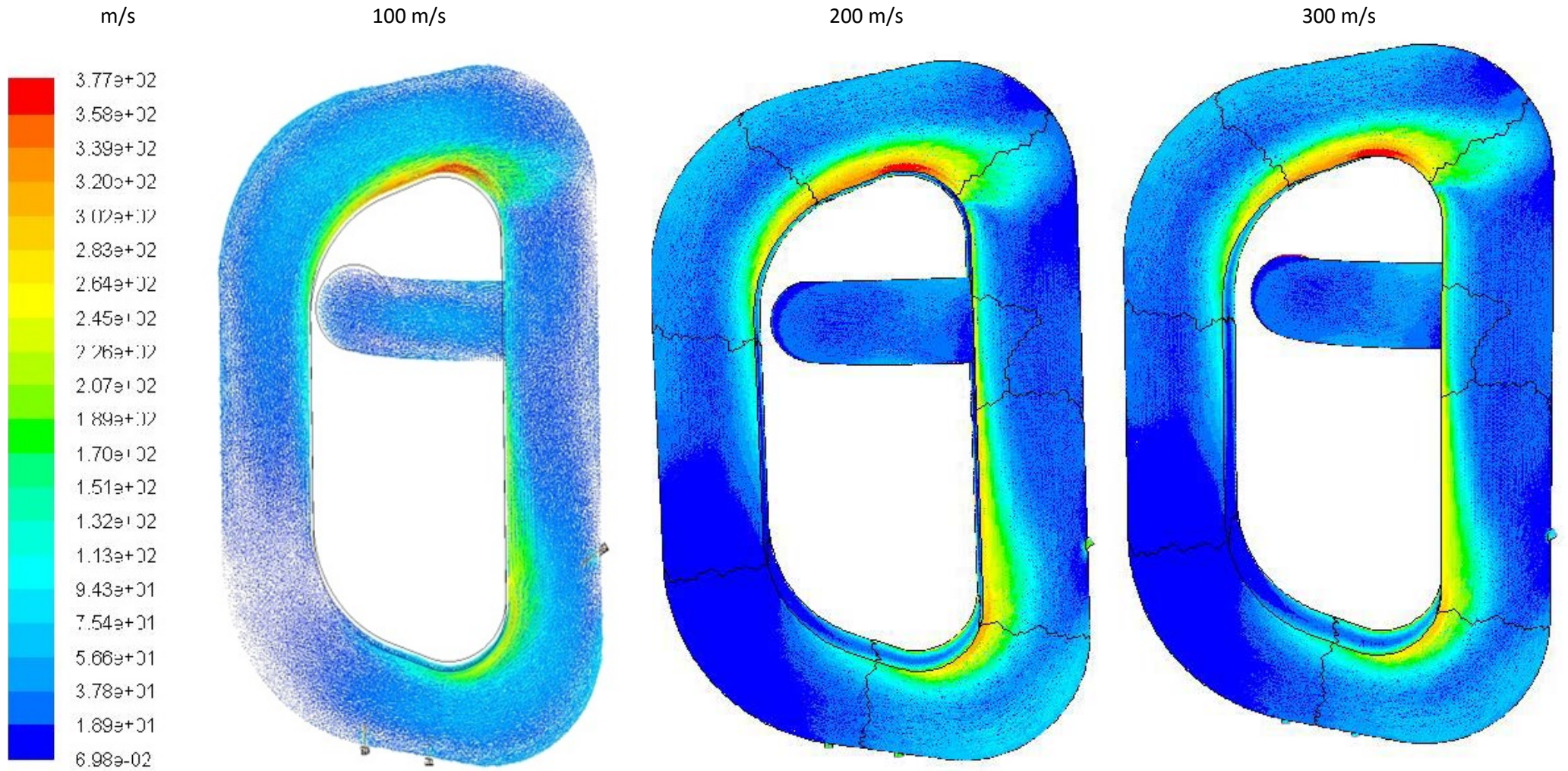
4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1 Μοντελοποίηση της αέριας φάσης

Αρχικά έγινε η προσομοίωση της λειτουργίας του μύλου μόνο με αέρα και χωρίς την παρουσία σωματιδίων για να μελετηθεί το πεδίο ροής του αέρα μέσα στον μύλο. Η ροή του αέρα μέσα στον μύλο είναι τυρβώδης και υπάρχει δημιουργία κυκλώνων. Η ταχύτητα του αέρα μέσα στον μύλο εξαρτάται από την ταχύτητα εισόδου του στον μύλο αλλά και από το σημείο στο οποίο την παρατηρούμε καθώς όπως φαίνεται από το σχήμα 12 η ταχύτητα διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό και αυτό οφείλεται στην γεωμετρία του θαλάμου κρούσης και κυρίως στην εσωτερική κυρτότητα του θαλάμου κρούσης. Μελετήθηκαν 3 συνθήκες λειτουργίας του μύλου, όσον αφορά την ταχύτητα εισόδου του αέρα, στα 300 m/s, στα 200 m/s και στα 100 m/s. Η ταχύτητα του αέρα για την περίπτωση των 300 m/s κυμαίνεται από 0.069 m/s ως 377m/s, για την περίπτωση των 200 m/s από 0.059 m/s έως 358 m/s και για την περίπτωση των 100 m/s από 0,052 m/s έως 350 m/s. Φαίνεται ότι υπάρχουν δύο σημεία στα οποία η ταχύτητα του αέρα αλλάζει πολύ και γίνεται ακόμα και μεγαλύτερη από την ταχύτητα εισόδου. Το πρώτο είναι στην πάνω πλευρά του θαλάμου κρούσης, στο εσωτερικό μέρος εφαπτομενικά στο εσωτερικό τοίχωμα, και το δεύτερο είναι στο κάτω μέρος του θαλάμου πάλι εφαπτομενικά στο εσωτερικό τοίχωμα.

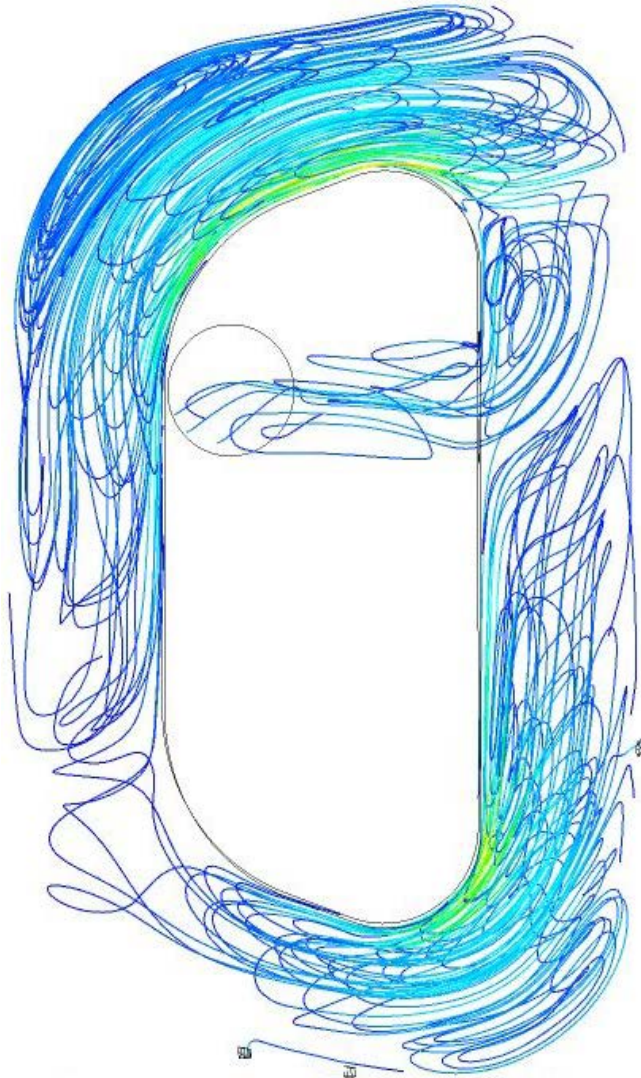
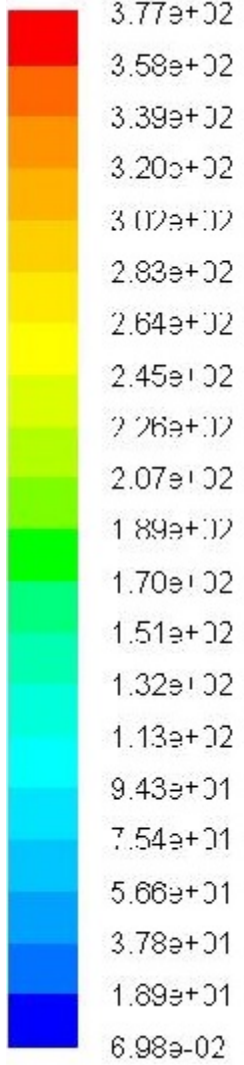
Όπως φαίνεται στο σχήμα 13 το οποίο αποτελεί απεικόνιση των streamlines με βάση την ταχύτητα, η ροή του αέρα είναι εξαιρετικά τυρβώδης και υπάρχει μια συνεχής δημιουργία κυκλώνων.

Σχήμα 12: Velocity Vectors

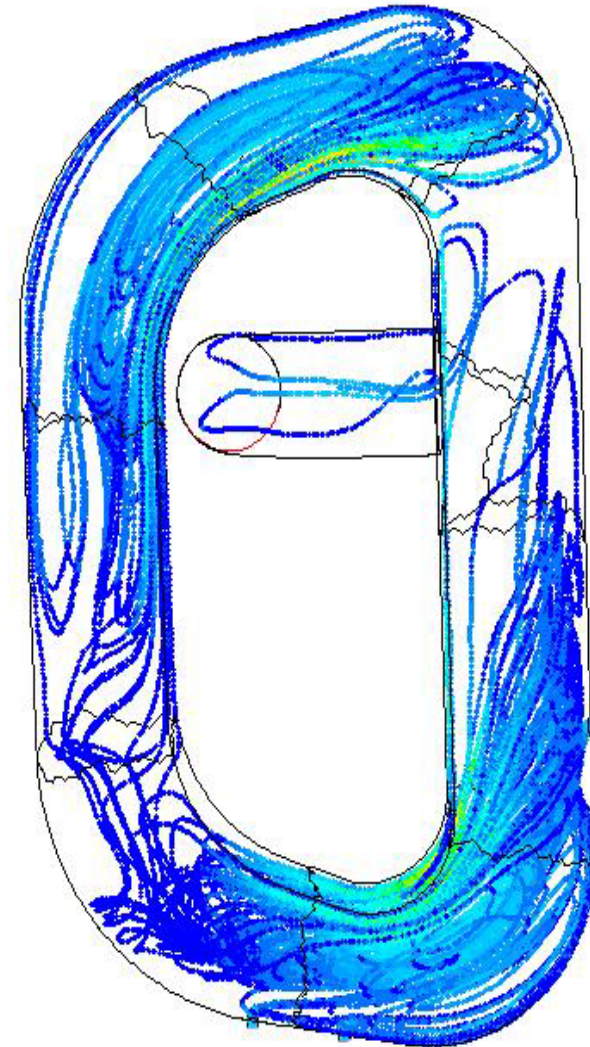
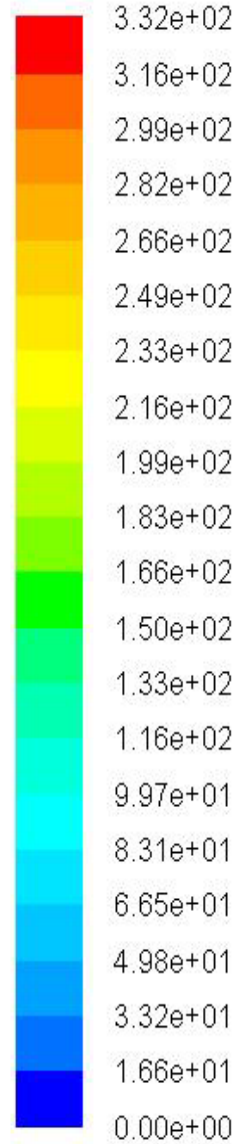


Σχήμα 13: Velocity Streamlines

m/s

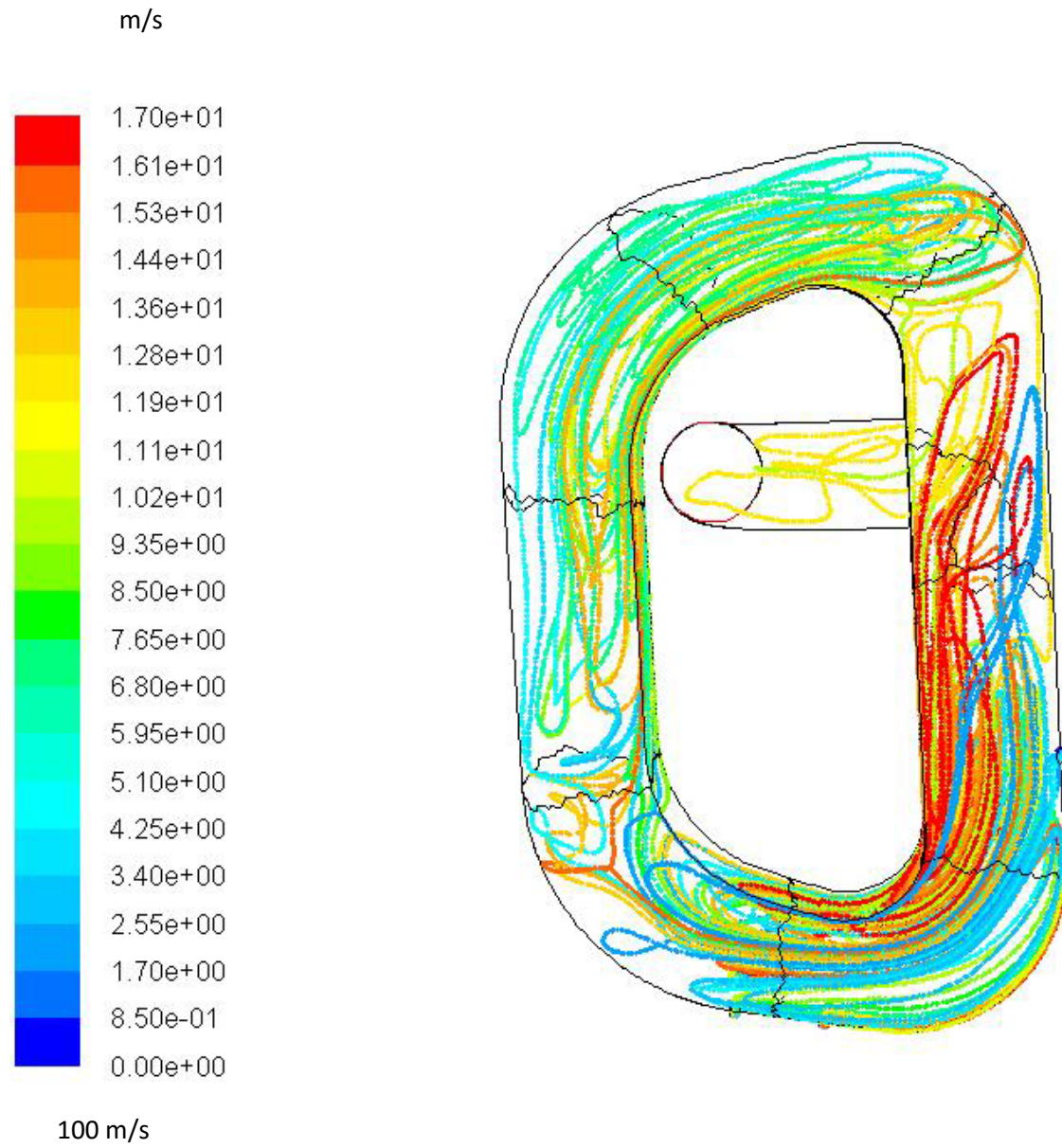


m/s



300 m/s

200 m/s

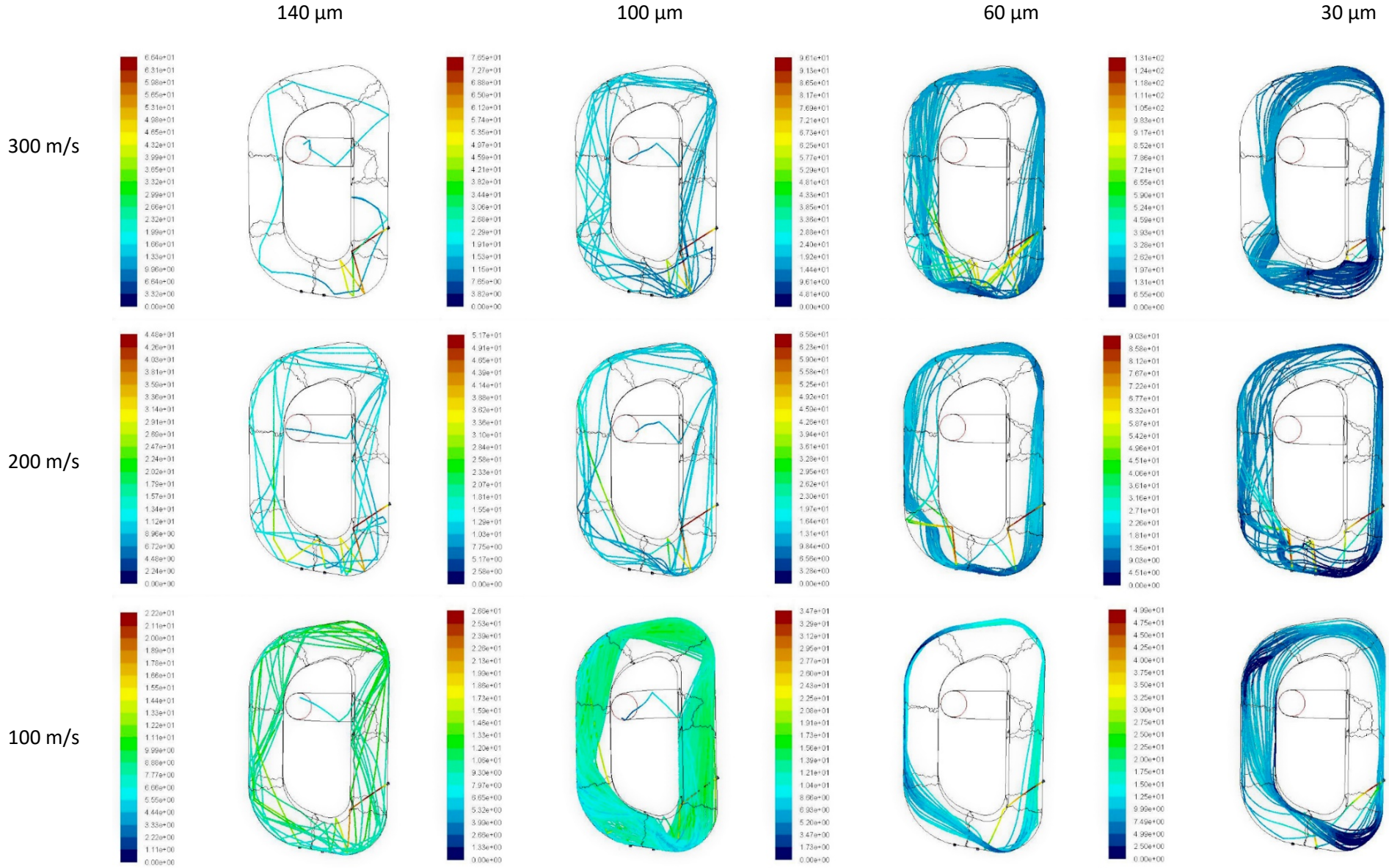


4.2 Μοντελοποίηση τροχιάς σωματιδίου

Εν συνεχεία προσομοιώθηκε η τροχιά ενός σωματιδίου το οποίο εισέρχεται στο σύστημα από την δεξιά πλευρά και επιταχύνεται από το ρεύμα αέρα ακολουθεί πορεία, διαφορετική κάθε φορά μέσα στον μύλο, και η συμπεριφορά του ως προς τον χρόνο παραμονής και τις συγκρούσεις που θα υποστεί εξαρτάται από το μέγεθος του και την ταχύτητα του αέρα μέσα στον θάλαμο. Μελετήθηκαν τέσσερα μεγέθη σωματιδίων (140 μm , 100 μm , 60 μm , 30 μm) στις τρεις ταχύτητες αέρα, στις οποίες μελετήθηκε η ροή του αέρα στον μύλο.

Το κάθε μέγεθος σωματιδίου έχει διαφορετική κίνηση μέσα στον μύλο και επομένως διαφορετικό χρόνο παραμονής στο εσωτερικό του θαλάμου κρούσης. Ακολούθως παρατίθεται διάγραμμα που αποτελείται από επιμέρους ενδεικτικές τροχιές σωματιδίων σε σχέση με το μέγεθος τους και την ταχύτητα λειτουργίας του μύλου. Παρατηρώντας το Σχήμα 14 φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του υπό εξέταση σωματιδίου τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται μέσα στον μύλο για την ίδια ταχύτητα λειτουργίας του μύλου. Όσον αφορά την ταχύτητα των 300 m/s και την διάμετρο των 140 μm το σωματίδιο εισέρχεται από την είσοδο και επιταχύνεται από το ρεύμα αέρα και ακολουθεί μια σειρά συγκρούσεων με τα τοιχώματα του μύλου και εξέρχεται από αυτόν χωρίς να συμπληρώσει μια περιστροφή μέσα στον θάλαμο κρούσης. Συνεχίζοντας προς τα δεξιά στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται το σωματίδιο των 100 μm το οποίο και αυτό εισέρχεται στον μύλο από την δεξιά πλευρά και ακολουθεί μια σειρά τυχαίων συγκρούσεων και εξέρχεται και αυτό από τον θάλαμο κρούσης αφού έχει συμπληρώσει αρκετές περιστροφές μέσα σε αυτόν. Συνεχίζοντας αμέσως δεξιότερα στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται ότι τα σωματίδια των 60 και 30 μm δεν εξέρχονται από τον θάλαμο. Αυτό συμβαίνει διότι το σωματίδιο πλέον έχει γίνει τόσο μικρό που δεν έχει αρκετή κινητική ενέργεια και έτσι δεν μπορεί να συγκρουστεί με τα τοιχώματα του μύλου και να οδηγηθεί προς την έξοδο. Αντιθέτως τα σωματίδια αυτά παρασύρονται από το στρώμα αέρα τον οποίο υπάρχει και κινείται παράλληλα με το τοίχωμα του θαλάμου κρούσης με αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται μέσα σε αυτόν.

Ανάλογη είναι και η κατάσταση και στις ταχύτητες των 200 m/s και 100 m/s. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα μεγαλύτερα σωματίδια των 140 και 100 μm βγαίνουν από το σύστημα (με αυτά των 140 μm να βγαίνουν πολύ γρηγορότερα σε σχέση με των 100 μm) και αυτά των 60 και 30 μm να εγκλωβίζονται μέσα στον θάλαμο κρούσης. Βέβαια εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι συγκρίνοντας τις ταχύτητες στο ίδιο μέγεθος, όσον αφορά τα μεγαλύτερα σωματίδια, φαίνεται

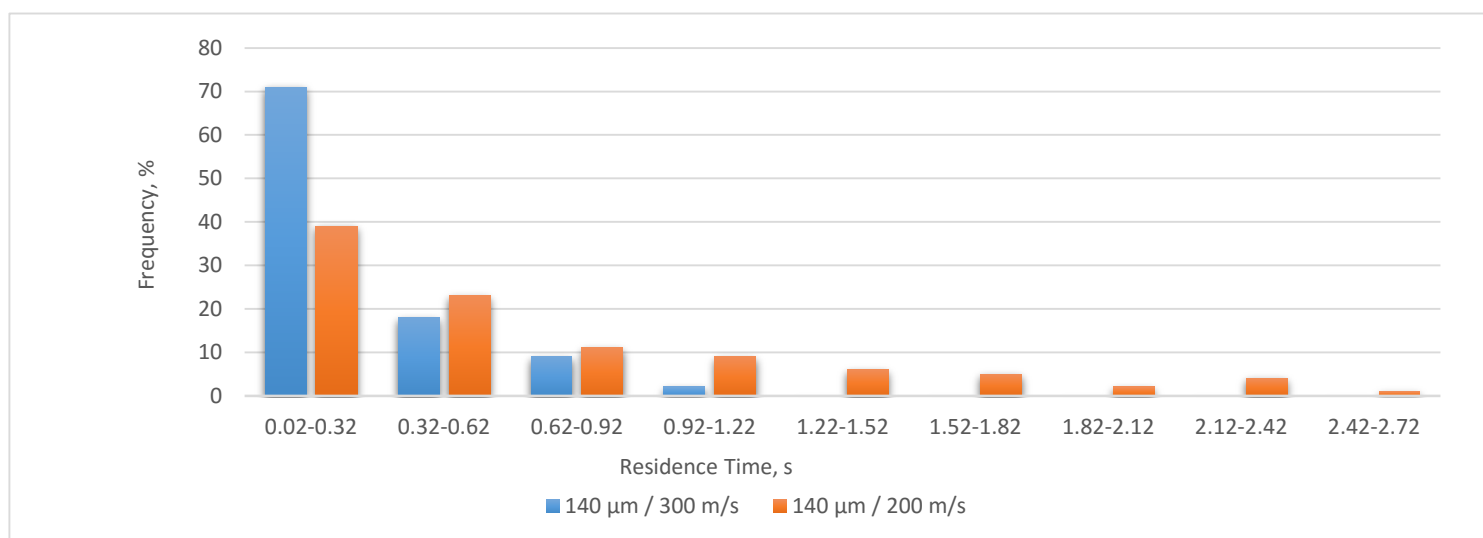


Σχήμα 14: Τροχιές σωματιδίων σε σχέση με το μέγεθος τους και την ταχύτητα λειτουργίας του μύλου

ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα λειτουργίας του μύλου τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος παραμονής του σωματιδίου στο εσωτερικό του μύλου άλεσης.

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα μπορούν και να αναγνωρισθούν και περιοχές στις οποίες μπορεί να υπάρξει αυξημένη συγκέντρωση σωματιδίων, όταν εισέρχονται πολλά ταυτοχρόνως, και επομένως αυτές θα είναι και οι περιοχές στις οποίες θα διεξάγονται και οι περισσότερες συγκρούσεις. Συγκεκριμένα παρατηρώντας τις τροχιές των σωματιδίων ξεχωρίζουν δύο περιοχές στις οποίες φαίνεται να ευνοούνται οι συγκρούσεις και η μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων. Αυτές είναι στο πάνω και δεξιά κομμάτι του μύλου και στο κάτω και κεντρικό κομμάτι του.

Εν συνεχεία μελετήθηκε ο χρόνος παραμονής των μεγαλύτερων σωματιδίων στις δύο μεγαλύτερες ταχύτητες λειτουργίας του μύλου. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε διάγραμμα συχνοτήτων χρόνου παραμονής σωματιδίων διαμέτρου 140 μm . Όπως φαίνεται στον διάγραμμα 15 υπάρχει εκθετική μείωση του ποσοστού των σωματιδίων τα οποία εξέρχονται από τον μύλο άλεσης σε σχέση με τον χρόνο παραμονής. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων εξέρχονται από τον θάλαμο κρούσης σε χρόνο που κυμαίνεται από 0.02s έως 0.32s. Αυτό ισχύει και για τις δύο ταχύτητες που μελετήθηκαν. Γίνεται φανερό ότι όσον αφορά την ταχύτητα λειτουργίας των 300m/s όλα τα σωματίδια εξέρχονται από τον μύλο μέχρι τα 1.22s, ενώ αντίθετα για την ταχύτητα των 200m/s ο μέγιστος χρόνος παραμονής στον μύλο φτάνει τα 2.72s.

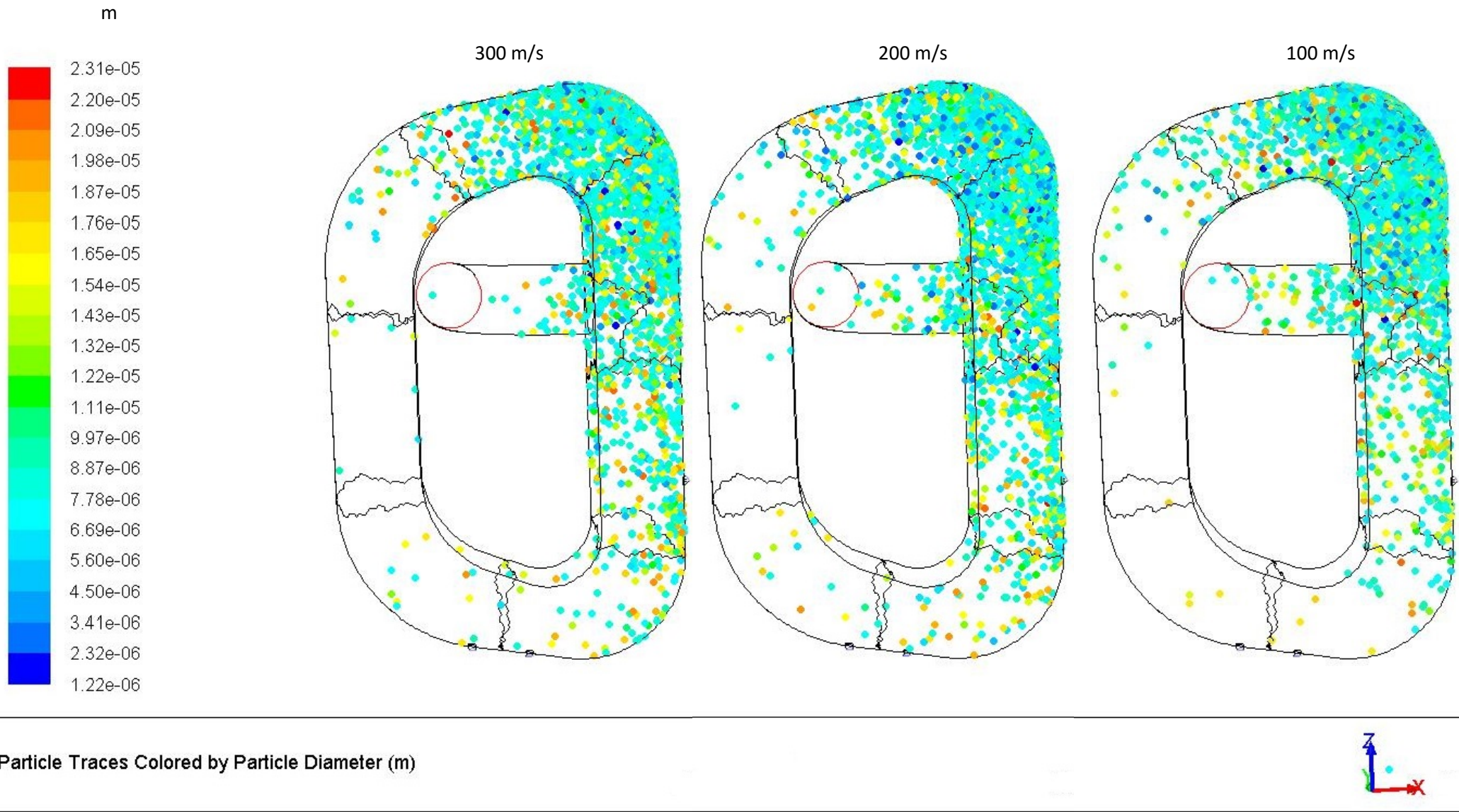


Σχήμα 15: Διάγραμμα χρόνου παραμονής σωματιδίων στον θάλαμο κρούσης

4.3 Μοντελοποίηση μείωσης μεγέθους

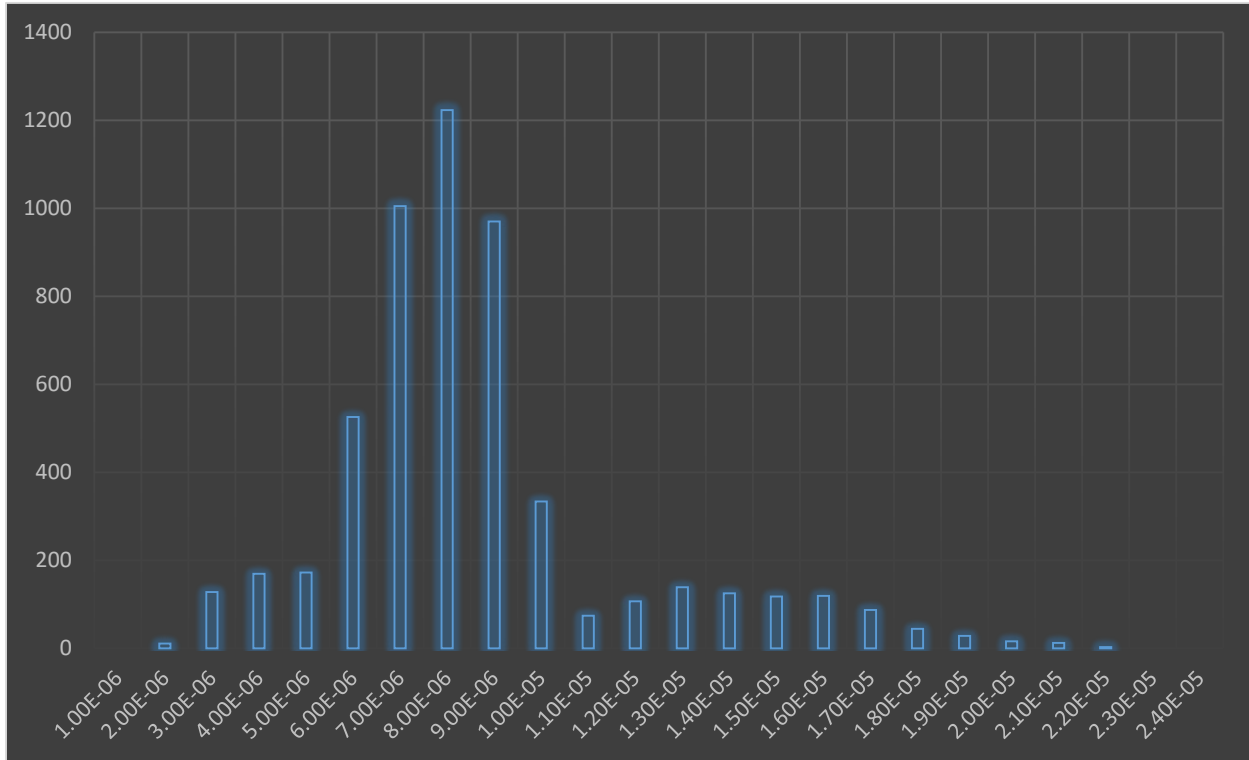
Για την μοντελοποίηση της μείωσης του μεγέθους των σωματιδίων που εισέρχονται στον μύλο χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια διαμέτρου $127\mu\text{m}$ τα οποία εισέρχονται ταυτόχρονα μέσα στον θάλαμο κρούσης. Η μελέτη έγινε για τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του μύλου όσον αφορά την ταχύτητα του αέρα. Η ταχύτητα αέρα ορίστηκε στα 300 m/s , στα 200 m/s και στα 100 m/s και αυτό έγινε για να μπορεί να συγκριθεί με πειραματικά αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 16, το οποίο είναι διάγραμμα σωματιδίων με βάση την διάμετρο τους, η μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων παρατηρείται στο πάνω και δεξιά κομμάτι του θαλάμου κρούσης και η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι και το μέσον περίπου της γεωμετρίας, από την δεξιά πλευρά πάντα. Αυτή η κατανομή των σωματιδίων οφείλεται στην γεωμετρία του θαλάμου κρούσης και κυρίως στην κυρτότητα που έχει η εσωτερική του επιφάνεια. Η κατασκευή του θαλάμου κρούσης κατά αυτόν τον τρόπο διευκολύνει την έξοδο των σωματιδίων από τον θάλαμο κρούσης ανεξαρτήτως μεγέθους σωματιδίου και έτσι αποφεύγεται η παγίδευση σωματιδίων μέσα στον μύλο όταν αυτά γίνουν αρκετά μικρά. Τα σωματίδια, όσον αφορά το μέγεθος τους, κυμαίνονται από $1.22\ \mu\text{m}$ έως $23.1\ \mu\text{m}$ σε διάμετρο, και παρουσιάζονται στο διάγραμμα 16 με βάση την χρωματική κλίμακα με το μπλε να αντιστοιχεί στις μικρότερες τιμές και το κόκκινο στις μεγαλύτερες.

Για την συγκεκριμένη προσομοίωση χρειάστηκε να γίνουν κάποιες παραδοχές. Για να συγκριθούν τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τα πειραματικά θα έπρεπε η παροχή πρώτης ύλης να ήταν της τάξεως των 0.41 kg/h . Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η προσομοίωση μιας τέτοιας παροχής με την ακρίβεια που έχουμε εμείς, το πολύ μικρό αυτό χρονικό βήμα και τα πολλά εκατομμύρια σωματίδια που συνεπάγεται αυτή η παροχή, απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ και πάρα πολύ χρόνο για να ολοκληρωθεί. Για αυτό τον λόγο κάναμε μια αναγωγή της παροχής σε πολύ μικρό χρόνο για να βρούμε τον ακριβή αριθμό σωματιδίων τα οποία θα μπορούσαμε να προσομοιώσουμε σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

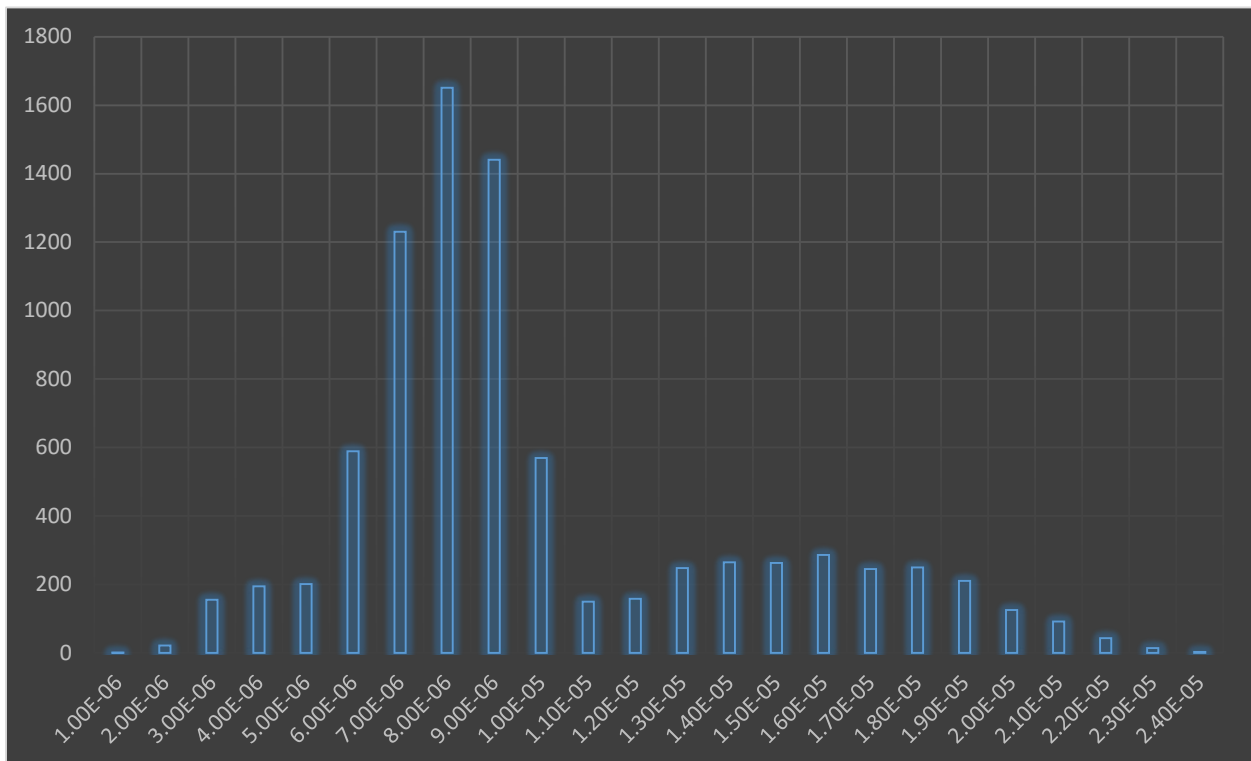


Σχήμα 16: Particle traces colored by particle diameter

Η κατανομή μεγέθους σωματιδίων του μύλου, στο μοντέλο της προσομοίωσης, υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στα διαγράμματα 17 και 18.



Σχήμα 17: Particle size distribution 200 m/s, 0.26 kg/h



Σχήμα 18: Particle-Size Distribution 300m/s, 0.41kg/h

200 m/s, 0.26 kg/h	300 m/s, 0.41 kg/h
Πειραματικό $D_{50} = 10,62 \mu\text{m}$	Πειραματικό $D_{50} = 12,22 \mu\text{m}$
Υπολογιστικό $D_{50} = 8,13 \mu\text{m}$	Υπολογιστικό $D_{50} = 8,99 \mu\text{m}$

Σχήμα 19: Σύγκριση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Από την κατανομή των μεγεθών φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η παροχή της πρώτης ύλης στο σύστημα τόσο μεγαλύτερο είναι το D_{50} και τόσο μεγαλύτερη είναι και η διάμετρος γενικότερα των σωματιδίων. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά, όπως φαίνεται στον πίνακα 19, και η προσομοίωση φαίνεται αρκετά επιτυχημένη.

5. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα με χρήση CFD και η προσομοίωση της λειτουργίας του μύλου. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία για την μοντελοποίηση του μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα με χρήση τεχνικών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ήταν αρκετά επιτυχημένη. Η ροή αέρα μέσα στον μύλο είναι τυρβώδης, υπάρχει δημιουργία κυκλώνων και μεγάλη διαφοροποίηση της ταχύτητας μέσα στον θάλαμο λόγω γεωμετρίας. Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στον θάλαμο εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα, το μέγεθος των σωματιδίων και τις συγκρούσεις που θα υποστούν. Το μεγαλύτερο μέρος των συγκρούσεων πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες περιοχές της γεωμετρίας λόγω του τρόπου κατασκευής του θαλάμου κρούσης και έτσι διευκολύνεται και η έξοδος των σωματιδίων από τον μύλο. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του μύλου άλεσης με πεπιεσμένο αέρα.

6. Μελλοντική έρευνα

Για να ερευνηθεί περαιτέρω η ακρίβεια της προσομοίωσης πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των σωματιδίων τα οποία εισέρχονται στο σύστημα. Η προσομοίωση θα πρέπει να επιλυθεί με βάση την πραγματική λειτουργία του μύλου δηλαδή για το διάστημα της μίας ώρας πραγματικού χρόνου. Επίσης θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω οι δυνάμεις που επιδρούν πάνω στα σωματίδια και να εισέλθουν στην προσομοίωση, πράγμα που αυτή την στιγμή δεν συμβαίνει. Επιπλέον θα πρέπει να μοντελοποιηθούν και οι ιδιότητες των σωματιδίων οι οποίες αυτή την στιγμή δεν λαμβάνονται υπόψιν όπως η σκληρότητα των σωματιδίων η οποία παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην διεργασία της άλεσης με πεπιεσμένο αέρα. Περαιτέρω θα μπορούσε να δοθεί μια κατανομή μεγεθών στην είσοδο που να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και όχι μια συγκεκριμένη διάμετρο σωματιδίων κατά την είσοδο τους, όπως στην συγκεκριμένη εργασία. Βέβαια για να πραγματοποιηθούν κάποια ή όλα τα παραπάνω χρειάζεται πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύς. Ειδικά όσον αφορά την αύξηση του αριθμού των σωματιδίων μέσα στο σύστημα και την προσομοίωση μιας ώρας πραγματικού χρόνου άλεσης, η υπολογιστική δύναμη που απαιτείται είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που ήταν διαθέσιμη στα πλαίσια της παρούσας

εργασίας. Ενδεικτικά ας αναφερθεί ότι όταν αυξάνεται ο αριθμός των σωματιδίων της προσομοίωσης, ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται εκθετικά.

Βιβλιογραφία

- Ansys Fluent Theory Guide 2013. Ansys Inc.
- Boz Z., Erdogdu F. and Tutar M. 2014. Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating. *Journal of Food Engineering* 123: 8-16.
- Berg Z. 2009. *Food Process Engineering and Technology*. Academic Press
- Cundall P. A. and Strack O. D. L. "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies". *Geotechnique*.29. 47–65. 1979.
- Dimou A. and Yanniotis S. 2011. 3D numerical simulation of asparagus sterilization in a still can using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 104: 394- 403.
- Dimou A, Stoforos NG, Yanniotis S 2011: CFD simulations in still cans filled with solid food items in liquid. *Procedia Food Science*, 1, 1216–1222. doi: 10.1016/j. profoo.2011.09.181
- Dimou A, Panagou E, Stoforos NG, Yanniotis S 2013: Analysis of thermal processing of table olives using computational fluid dynamics. *Journal of Food Science*, 78, E1695–E1703. doi: 10.1111/1750-3841.12277.
- Norton T, Sun D-W 2006. Computational fluid dynamics (CFD). An effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 600–620.
- Ghani A.G.A., Farid M.M., Chena X.D. and Richards P. 1999a. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 41: 55-64.
- Ghani A.G.A., Farid M.M., Chena X.D., Richards P. 1999b. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Science* 42: 207-214.
- Ghani A.G.A., Farid M.M. and Chena X.D. 2002. Theoretical and experimental investigation of the thermal destruction of vitamin C in food pouches. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 129-143.
- Ghani A.G.A. and Farid M.M. 2006. Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid-liquid food mixture in cans. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 7: 55-61

Gosman, A.D., & Ioannides, E. 1981. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustor. *AIAA Journal* 81-0323

Janes, D.A., Dalgly, E.F., 1996. How to use CFD in the food industry. Leatherhead Food Research Association Technical Report, Leatherhead, UK.

Keshavarz Moraveji M, Ghaderi E, Davarnejad R (2010): Simulation of the transport phenomena during food drying with ohmic heating in a static system. *International Journal of Food Engineering*. Published online, accessed 30 October, 2010. doi: 10.2202/1556-3758.1668.

Kuriakose R, Anandharamakrishnan C 2010: Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 383–398. doi: 10.1016/j.tifs.2010.04.009.

Morsi S. A. and Alexander A. J. "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems". *J. Fluid Mech.* 55(2). 193–208. September 26 1972.

Norton T. and Sun D. 2007. An overview of CFD applications in the food industry. In: Da-Wen Sun, editor. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. Boca Raton, London, New York CRC Press p 1-41.

Patankar S.V., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: Hemisphere Publishing Corp. 2nd Ed.

Protonatariou S., Mandala I., Rosell C. 2015. Jet Milling effect on functionality, quality and in vitro digestibility of whole wheat flour. *Food Bioprocess Technology*, 8, 1319-1329.

Quarini, J., 1995. Applications of computational fluid dynamics in food and beverage production. *Food Science and Technology Today* 9 (4), 234–237.

Rabiey L., Flick D. and Duckenoy A. 2007. 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilization of large particles in a cylindrical vertical can. *Journal of Food Engineering* 82: 409-417.

Saravacos G. D. 2002. *Handbook of Food Processing Equipment*. KIII wer I Plenum Publishers, New Vork

Scott, G.M., 1996. *Computational fluid dynamics-modelling the flow of Newtonian fluids in pipelines*, Campden & Chorleywood Food Research Association R&D Report No. 24, Chipping Campden, UK.

Scott, Richardson G.M., 1997. The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science and Technology* 8 (4), 119–124.

Yanniotis S., Stoforos N.G. 2014. Modeling food processing operations with computational fluid dynamics: a review. *Scientia agriculturae bohemia*, 45, 2014.

Yang B.B., Datta A.K., and Rao M.A. 1997. Rheological and calorimetric behavior of starch gelatinization in simulation of heat transfer. In: Jovvit R. (ed): *Proceedings 7th International Conference on Engineering and Food*. Vol 2. Sheffield Academic Press, Sheffield, K1-K4.

Varzakas T., Tzia C. 2014. *Food Engineering Handbook*. CRC Press

Versteeg H.K. and Malalasekera W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method*. England: Pearson Prentice Hall. Essex, Second Edition.