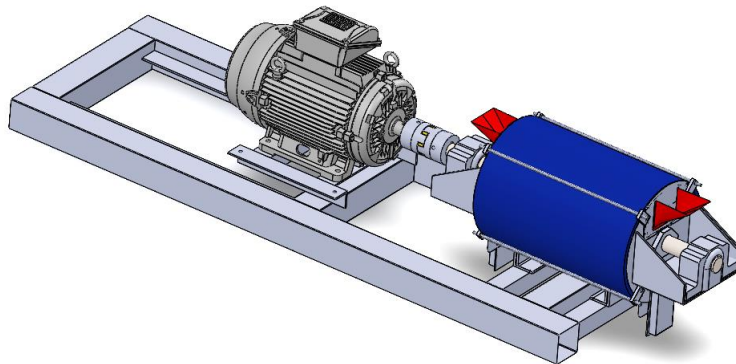


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

# Ανάλυση και σχεδιασμός συστήματος ψύξης πρωτότυπου δακτυλιόμυλου άλεσης υπέρλεπτων κόνεων



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία  
Λυδία Σφυράκη

Επιβλέπων: Αναπληρωτής καθ. Β. Σπιτάς

Αθήνα 2021



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον πρότυπο ξηρό κονιορτοποιητή του ΕΜΠ. Ο οριζόντιος αυτός δακτυλιόμυλος μελετήθηκε και κατασκευάστηκε από τον κ. Μακρή και την κα. Φούντη με στόχο την πρακτική κonioποίηση βιομηχανικών ορυκτών και συσσωματωμάτων για βιομηχανικές χρήσεις. Στην εργασία πραγματοποιήθηκε αποτύπωση 3D στο Solidworks του υπάρχοντος μύλου μαζί με το σύστημα κίνησης και τη βάση τους. Σε δεύτερη φάση σχεδιάστηκε χιτώνιο, το οποίο προτείνεται για την ψύξη του μύλου. Επέκταση του χιτωνίου αποτελεί ένα σύστημα ψύξης νερού, το οποίο σχεδιάστηκε στο Solidworks. Πέραν των σχεδιαστικών κομματιών, το απλό χιτώνιο που εμπεριέχει νερό ως ψυκτικό ρευστό εισάχθηκε στο Ansys για περαιτέρω ανάλυση. Αφού δημιουργήσαμε προσεκτικά το Mesh των όγκων, συνεχίσαμε στο Setup, όπου αρχικοποιήθηκαν τα domains και ορίστηκαν οι καταστάσεις σε κάθε περίπτωση. Η Transient Analysis που έγινε αναφέρεται σε τρεις διαφορετικούς ρυθμούς ροής νερού. Στο τέλος συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα και σχολιάστηκαν. Παράλληλα προτείνονται και θέματα για μελλοντική έρευνα.

## Abstract

The present master thesis concerns the horizontal dry pulverizer of NTUA. This ring mill was designed and built by Mr. Makris and Mrs. Founti with the aim of practical pulverization of industrial minerals and agglomerates for industrial uses. In this thesis, a 3D imprint of the existing mill was made in Solidworks. In second phase, a heat shield was designed, which is recommended for cooling the mill. The extension of the heat shield is a water cooling system designed by Solidworks. In addition to the design pieces, the simple heat shield containing water as a coolant was introduced in Ansys for further analysis. After carefully creating the Mesh of the volumes, we proceeded to Setup, where the domains were initialized and the states in each case were defined. The Transient Analysis performed refers to three different water flow rates. In the end the results were collected and commented. At the same time, topics for future research are proposed.

## Ευχαριστίες

Η απόφαση μου να εκπονήσω το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών στα Συστήματα Αυτοματισμού του Εθνικού Μετσόβιου αποδείχθηκε παραπάνω από ορθή. Σίγουρα αποτέλεσε μια πολύ σωστή κίνηση όχι μόνο από άποψη κατάρτισης γνώσεων, αλλά κι από την άποψη της συνεχούς επαγρύπνησης του μυαλού, της θέλησης να πετυχαίνεις πάντα το καλύτερο σε οποιονδήποτε τομέα. Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας συνέβαλε αποφασίστηκα προς την κατεύθυνση αυτή, καθώς το πολύ ενδιαφέρον και πολύπλευρο αντικείμενο που αφορούσε και η καθοδήγηση που έλαβα από τον επιβλέποντα Αναπληρωτή καθηγητή κ. Βασίλειο Σπιτά, μου μετέφεραν περισσότερη όρεξη για δημιουργική έρευνα και σκέψη. Ήταν ούτως ή άλλως μεγάλη μου τιμή να συνεργαστώ με τον κ. Σπιτά, με τον οποίο αποφασίσαμε να ασχοληθώ με ένα πρότυπο πρότζεκτ του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών. Σε αυτό, το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Φούντη, η οποία μου έδωσε δυσεύρετα πρακτικά από συνέδρια και βιβλιογραφία που αφορούσαν τον δακτυλιόμυλο, και τον κ. Ζαννή για την διδακτορική του διατριβή.

Πάνω από όλα θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, την αδερφή μου, το αγόρι μου και τις φίλες μου για τη διαρκή στήριξη και αγάπη τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά από το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών και ιδιαίτερα τους Υποψήφιους Διδάκτορες Χρήστο Βακουφτσή και Ανδρέα Μαυρίδη-Τουργέλη για την αλληλοβοήθεια και τις σχέσεις φιλίας που αναπτύξαμε.



# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	12
1.1  Εισαγωγή.....	12
1.2  Ορισμοί.....	12
1.2.1  Ορυκτά και βράχοι .....	12
1.2.2  Μεταλλεύματα.....	12
1.2.3  Κοιτάσματα μεταλλεύματος.....	13
1.2.4  Κύρια προϊόντα, συνδεδεμένα προϊόντα και ιχνοστοιχεία.....	14
1.2.5  Protore.....	15
1.2.6  Στείρα Ορυκτά και Τέλματα.....	15
1.2.7  Επιβλαβείς ουσίες (Deleterious Substances) .....	15
1.3  Μηχανική προπαρασκευή.....	16
1.3.1  Θραύση .....	17
1.3.2  Λειοτρίβηση .....	17
1.3.3  Ταξινόμηση κατά μέγεθος .....	18
Κεφάλαιο 2.....	19
2.1  Επεξεργασία Ορυκτών.....	19
2.2  Αποδέσμευση .....	20
2.2.1  Θραυστήρες.....	20
2.2.2  Μύλοι λειοτρίβησης-άλεσης .....	25
3  Ο πρότυπος ξηρός κονιορτοποιητής του ΕΜΠ.....	34
3.1  Γενικά .....	34
3.2  Περιγραφή και αρχές λειτουργίας.....	34
3.3  Πλεονεκτήματα και Χαρακτηριστικά .....	36
3.4  Κίνηση μύλου.....	37
3.5  Άλεση φορτίου .....	37
3.6  Πειραματικά Δεδομένα .....	37
3.7  Ανάλυση δεδομένων .....	39
4  Τρισδιάστατη αποτύπωση στο Solidworks .....	43
4.1  3D-αποτύπωση του μύλου.....	43
4.2  3D-σχεδίαση χιτωνίου.....	47
4.3  3D-σχεδίαση του συστήματος ψύξης .....	50
5  Ανάλυση χιτωνίου στο Ansys.....	56
5.1  Fluid Flow (CFX).....	56
5.2  Mesh.....	56
5.2.1  Το Mesh του νερού .....	57
5.2.2  Το Mesh του κυλίνδρου .....	59

5.2.3	To Mesh του χιτωνίου .....	59
5.3	Θερμοκρασίες στους κόμβους .....	60
5.4	Setup .....	62
5.4.1	Analysis Type .....	62
5.4.2	User Functions.....	62
5.4.3	Expressions .....	63
5.4.4	Domains .....	64
5.5	Results.....	67
5.5.1	Μεταβολή θερμοκρασίας κυλίνδρου.....	68
5.5.2	Μεταβολή θερμοκρασίας νερού .....	69
5.5.3	Μεταβολή πίεσης .....	71
5.5.4	Μεταβολή ταχύτητας.....	72
6	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	75
	Βιβλιογραφία.....	77

## Πίνακες

Πίνακας 1	Πειραματικές συνθήκες συνεχούς άλεσης.....	38
Πίνακας 2	Μέγιστες Θερμοκρασίες στην Εικόνας 26 .....	39
Πίνακας 3	Οι θερμοκρασίες κατά μήκος του κελύφους τη χρονική στιγμή 240s.....	40
Πίνακας 4	Συναρτήσεις της μεταβολής θερμοκρασίας των σημείων πάνω στο κέλυφος θεωρώντας γραμμική παρεμβολή .....	42
Πίνακας 5	Αποτελέσματα αναλύσεων .....	75
Πίνακας 6	Μέγιστες ταχύτητες ροής σε ένα σύστημα νερού .....	75

## Εικόνες

Εικόνα 1	Ορυκτά αποθέματα με σχηματικό σχήμα και στυλ: (A) υπο-οριζόντιο σώμα λιγνίτη κάτω από κάλυψη γεωργίας / άμμου στο Barsingsar, (B) τεράστιο σώμα Zn-Pb-Ag εκτεθειμένο στην επιφάνεια στο Ramपुरa- Agucha, (C) περίπλοκα διπλωμένο Pb-Cu κατάθεση στο Agnigundal, (D) Φακοί En echelon Zn-Pb κάτω από λοφώδες έδαφος στο Zawar, (E) Μοναδική υπογραφή gossans από κατάθεση θειούχου στο Rajपुरa-Dariba, (F) Κρυφή κατάθεση θειούχου κάτω από πετρώδες άγονο χαλαζίτη στο Sindesar Khurd, Ινδία.....	14
Εικόνα 2	Διεργασίες μηχανικής προπαρασκευής, εμπλουτισμού και μεταλλουργικής κατεργασίας μεταλλεύματος (Τσακαλάκης, 2018) .....	16
Εικόνα 3	Κατάτμηση (ελάττωση μεγέθους τεμαχίων) και προϊόντα κατάτμησης (orykta.gr) .	17
Εικόνα 4	Θραυστήρας σιαγόνων (Τσακαλάκης, 2018) .....	21
Εικόνα 5	Αρχή του θραυστήρα σιαγόνων που δείχνει τη διαδρομή του άλευρου τροφίμου προς το κατακερματισμένο προϊόν που συνθλίβεται υπό υψηλή πίεση σταθερών και κινούμενων σιαγόνων. (Halдар, 2013).....	21



Εικόνα 6 Μεσαίου μεγέθους θραυστήρας σιαγόνων σε λειτουργία σε υπόγειο ορυχείο για σύνθλιψη μεταλλεύματος ROM πριν μεταφερθεί στην επιφάνεια στο Zawarmala της Ινδίας. (Halдар, 2013).....	22
Εικόνα 7 Αρχή λειτουργίας του γυροσκοπικού θραυστήρα για τη θραύση του άκρου μεταλλεύματος που πιέζεται μεταξύ σταθερής σιαγόνας και περιστρεφόμενης κωνικής κεφαλής (Grewal, 2010).....	22
Εικόνα 8 Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τα βασικά στοιχεία και τη λειτουργία του κωνικού θραυστήρα (Halдар, 2013).....	23
Εικόνα 9 Ενωσιολογικό διάγραμμα που απεικονίζει τα βασικά στοιχεία του κυλινδρικού θραυστήρα (Halдар, 2013).....	24
Εικόνα 10 Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τα βασικά στοιχεία και τη λειτουργία ενός θραυστήρα κρούσης (Halдар, 2013).....	24
Εικόνα 11 Βιομηχανικός Μύλος Άλεσης (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016)	26
Εικόνα 12 Ετήσια παραγωγική ικανότητα ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας <a href="http://www.hcia.gr/el/statistical-elements/production/">http://www.hcia.gr/el/statistical-elements/production/</a> .....	27
Εικόνα 13 Εξωτερικό, εσωτερικό και μέσα άλεσης σφαιρόμυλου (Mining Mill Operator Training, n.d.).....	28
Εικόνα 14 Ραβδόμυλοι σε λειτουργία (Mining Mill Operator Training, n.d.).....	29
Εικόνα 15 Διάγραμμα τύπων ραβδόμυλων (Mining Mill Operator Training, χ.χ.).....	29
Εικόνα 16 Οι αρχές λειτουργίας των μύλων (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016).....	30
Εικόνα 17 Μύλος Σωληνών τριών διαμερισμάτων (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016).....	31
Εικόνα 18 Ο μύλος Hardinge (Conical Ball Mills Benefits & Advantages: Hardinge, 2015)..	32
Εικόνα 19 Ο μύλος Krupp (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016).....	32
Εικόνα 20 Οι μύλοι tandem-ring και το εσωτερικό τους (Takahashi T. , 2019).....	33
Εικόνα 21 Τα μέρη που απαρτίζουν το δακτυλίομυλο.....	34
Εικόνα 22 Προσαρμογή των δακτυλίων στα κοκκομετρικά κλάσματα της πρώτης ύλης.....	35
Εικόνα 23 . Δακτύλιος κατά τη λειτουργία. Φαίνεται παραστατικά το υλικό που αλέθεται ανάμεσα στο δακτύλιο και το κέλυφος.....	35
Εικόνα 24 Απευθείας σύζευξη του μύλου με τον κινητήρα. Φαίνεται το ροπόμετρο για τη μέτρηση ισχύος.....	37
Εικόνα 25 Σχηματική διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης. Φαίνεται η περιοχή μέτρησης πάνω στην επιφάνεια του μύλου καθώς και η γωνία παρατήρησης.....	38
Εικόνα 26 Κατανομή θερμοκρασιών κατά μήκος του μύλου συναρτήσει του χρόνου.....	39
Εικόνα 27 Μέγιστες πειραματικές θερμοκρασίες.....	40
Εικόνα 28 Οι θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή 240s.....	40
Εικόνα 29 Μεταβολή θερμοκρασίας 19 σημείων στο μήκος του μύλου (3 άξονες).....	41
Εικόνα 30 Μεταβολή θερμοκρασίας 19 σημείων στο μήκος του μύλου.....	41
Εικόνα 31 3D-απεικόνιση του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση. Φαίνεται η είσοδος του υλικού προς άλεση.....	43

Εικόνα 32 3D-απεικόνιση του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση. Ο μύλος βρίσκεται σε ευθυγράμμιση με τον κινητήρα .....	43
Εικόνα 33 3D-απεικόνιση του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση. Φαίνεται η έξοδος του αλεσμένου προϊόντος.....	44
Εικόνα 34 Exploded-View του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση	44
Εικόνα 35 3D-απεικόνιση του μύλου με την είσοδο του προϊόντος προς άλεση .....	45
Εικόνα 36 3D-απεικόνιση του μύλου με την έξοδο του αλεσμένου προϊόντος .....	45
Εικόνα 37 3D-απεικόνιση του μύλου σε κάθετο Selection View.....	45
Εικόνα 38 3D-απεικόνιση του μύλου σε οριζόντιο Selection View .....	46
Εικόνα 39 3D-απεικόνιση του Assembly του κόπλερ.....	46
Εικόνα 40 3D-απεικόνιση του Assembly του κόπλερ σε Exploded-View .....	46
Εικόνα 41 3D-απεικόνιση του Assembly του στροφαίου .....	47
Εικόνα 42 3D-απεικόνιση του Assembly του στροφαίου σε Exploded-View .....	47
Εικόνα 43 Προτεινόμενο χιτώνιο για υδρόψυξη του μύλου .....	48
Εικόνα 44 Το χιτώνιο που μελετήθηκε.....	48
Εικόνα 45 Κάθετο Selection View του χιτωνίου .....	49
Εικόνα 46 Οριζόντιο Selection View του χιτωνίου .....	49
Εικόνα 47 Exploded View του χιτωνίου .....	50
Εικόνα 48 3D-απεικόνιση του συστήματος ψύξης του μύλου .....	52
Εικόνα 49 3D-απεικόνιση του συστήματος ψύξης του μύλου .....	53
Εικόνα 50 3D-απεικόνιση του συστήματος ψύξης του μύλου .....	53
Εικόνα 51 Πιο κοντινή εμφάνιση της 3D-απεικόνισης του συστήματος ψύξης του μύλου.....	54
Εικόνα 52 Ο chiller του συστήματος ψύξης .....	54
Εικόνα 53 Η αντλία του συστήματος ψύξης.....	54
Εικόνα 54 Ο cooling tower του συστήματος ψύξης.....	55
Εικόνα 55 Εισαγωγή του συστήματος μύλου-χιτωνίου στο Mesh .....	56
Εικόνα 56 Ορίζοντας τα Connections μεταξύ των όγκων.....	57
Εικόνα 57 Το Mesh του συστήματος με Automatic Method .....	57
Εικόνα 58 Το Mesh του νερού.....	58
Εικόνα 59 Οι τρεις φάσεις της ροής ρευστού.....	58
Εικόνα 60 Το Mesh του κυλίνδρου με Automatic Method .....	59
Εικόνα 61 Το Mesh του κυλίνδρου με Element Size 15mm .....	59
Εικόνα 62 Το Mesh του χιτωνίου με Automatic Method.....	60
Εικόνα 63 Το Mesh του χιτωνίου με Element Size 20mm.....	60
Εικόνα 64 Τα Nodes του κυλίνδρου .....	60
Εικόνα 65 Αρχεία με τις θερμοκρασίες στους κόμβους.....	61
Εικόνα 66 Οι θερμοκρασίες των nodes του κελύφους .....	62
Εικόνα 67 User Functions .....	62

Εικόνα 68 Expressions.....	63
Εικόνα 69 Το Expression 21 .....	64
Εικόνα 70 Το Plot του Expression 21 .....	64
Εικόνα 71 Domain κύλινδρος .....	65
Εικόνα 72 Domain νερού.....	65
Εικόνα 73 Boundary inlet .....	66
Εικόνα 74 Boundary outlet .....	66
Εικόνα 75 Domain χιτώνιο .....	67
Εικόνα 76 Domain Interface: water kyliindros Interface.....	67
Εικόνα 77 Domain Interface: water xitonio Interface.....	67
Εικόνα 78 Θερμοκρασίες στο κέλυφος του μύλου τη χρονική στιγμή 0s .....	68
Εικόνα 79 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 30s για 10 <i>kgs</i> – 1, 12,5 <i>kgs</i> – 1 και 15 <i>kgs</i> – 1..	68
Εικόνα 80 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 60s για 10 <i>kgs</i> – 1, 12,5 <i>kgs</i> – 1 και 15 <i>kgs</i> – 1..	68
Εικόνα 81 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 60s για 10 <i>kgs</i> – 1, 12,5 <i>kgs</i> – 1 και 15 <i>kgs</i> – 1..	69
Εικόνα 82 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 120s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> . .....	69
Εικόνα 83 Θερμοκρασίες νερού τη χρονική στιγμή 0s .....	69
Εικόνα 84 Θερμοκρασίες νερού στα 30s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	70
Εικόνα 85 Θερμοκρασίες νερού στα 60s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	70
Εικόνα 86 Θερμοκρασίες νερού στα 90s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	70
Εικόνα 87 Θερμοκρασίες νερού στα 30s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	71
Εικόνα 88 Πιέσεις στα 30s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	71
Εικόνα 89 Πιέσεις στα 60s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	72
Εικόνα 90 Πιέσεις στα 90s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	72
Εικόνα 91 Πιέσεις στα 120s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	72
Εικόνα 92 Ταχύτητες στα 30s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	73
Εικόνα 93 Ταχύτητες στα 60s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	73
Εικόνα 94 Ταχύτητες στα 90s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	73
Εικόνα 95 Ταχύτητες στα 120s για 10 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> , 12,5 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> και 15 <i>kgs</i> <sup>(-1)</sup> .....	74

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Εισαγωγή

Τα ορυκτά και τα μέταλλα είναι βασικά συστατικά για την ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας. Η ανάγκη επιβίωσης δίδαξε στους προϊστορικούς Παλαιολιθικούς άντρες τη χρήση λίθων ως εργαλείων ήδη από 20.000 χρόνια πριν. Η ανακάλυψη των ορυκτών, η εξερεύνησή τους και η χρήση τους έγιναν πολλές φορές με την έλευση του πολιτισμού και συνεχίζεται σήμερα.

Ένα απόθεμα ορυκτών (mineral deposit) είναι πολύ μικρό σε μέγεθος σε σύγκριση με τον τεράστιο φλοιό της Γης. Τα διάφορα αποθέματα (deposits) κοντά στην επιφάνεια έχουν ανακαλυφθεί κατά τη διάρκεια των αιώνων, εξορύσσονται και εξάγονται μέταλλα. Οι μελλοντικές αναζητήσεις στοχεύουν σε φυσικούς κρυμμένους τύπους, οι οποίοι μπορεί σπάνια να εμφανίζονται σαν επιφανειακά σημάδια (weathered outcrop) και να είναι καλυμμένοι από χώμα. Η νέα αυτή ανακάλυψη δεν θα είναι εύκολη. Θα απαιτήσει υπερσύγχρονες τεχνικές εξερεύνησης, εκπαιδευμένο ανθρώπινο δυναμικό, επιστημονική γνώση, επαρκή εμπειρία, υψηλό επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων και δεξιότητα ερμηνείας. Η συνολική διαδικασία θα επιτευχθεί βήμα προς βήμα σε μια δυναμική και λογική ακολουθία (Halдар, 2013).

## 1.2 Ορισμοί

### 1.2.1 Ορυκτά και βράχοι

Το **ορυκτό (mineral)** είναι μια ομοιογενής ανόργανη ουσία που εμφανίζεται φυσικά, συνήθως σε κρυσταλλική μορφή με συγκεκριμένη χημική σύνθεση. Είναι γενικά σε στερεή μορφή, με εξαιρέσεις τον υδράργυρο, το φυσικό νερό και τα ορυκτά καύσιμα. Τα κοινά ορυκτά που σχηματίζουν πετρώματα (rock-forming minerals (RFM)) είναι ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ), το orthoclase feldspar ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), το plagioclase feldspar ( $\text{CaNaAlSi}_3\text{O}_8$ ), ο αλβίτης ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) και η ομάδα μαρμαρυγίας, όπως ο μοσχοβίτης ( $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$ ) και ο βιοτίτης ( $\text{H}_2\text{K}(\text{MgFe})_3\text{Al}(\text{SiO}_4)_3$ ). Τα κοινά ορυκτά που σχηματίζουν μεταλλεύματα είναι ο αιματίτης ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), η κασσιρίτη ( $\text{SnO}_2$ ), ο χαλκοπυρίτης ( $\text{CuFeS}_2$ ), ο σφαλερίτης ( $\text{ZnS}$ ), η γαλένα ( $\text{PbS}$ ), ο βαρύτης ( $\text{BaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ο γύψος ( $\text{CaSO}_4$ ) και ο απατίτης ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$ ), μεταξύ άλλων.

Ο **βράχος (rock)** είναι ένα σύνολο ορυκτού ή ορυκτών που σχηματίζονται υπό τη φυσική διαδικασία της πυριτικής, ιζηματογενούς και μεταμορφικής προέλευσης. Οι συνηθισμένοι βράχοι είναι ο βασάλτης, ο γρανίτης, ο χαλαζίτης, ο ψαμμίτης, ο ασβεστόλιθος, το μάρμαρο και ο μικτός σχιστόλιθος (Halдар, 2013).

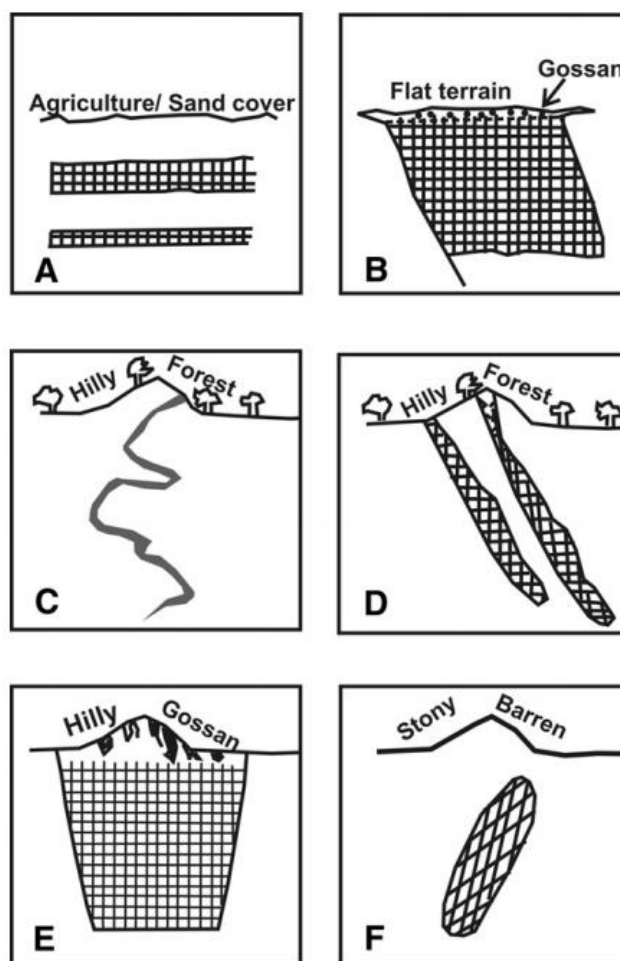
### 1.2.2 Μεταλλεύματα

Στο παρελθόν, η λέξη **μετάλλευμα (ore)** περιοριζόταν αποκλειστικά σε φυσικά υλικά από τα οποία ένας ή περισσότεροι τύποι μετάλλων θα μπορούσαν να εξορύσσονται και να εξάγονται με κέρδος. Τα οικονομικά κοιτάσματα (economic deposits) που περιλαμβάνουν βιομηχανικά ορυκτά, πετρώματα, χύδην υλικά, πολύτιμους λίθους και ορυκτά καύσιμα εξαιρέθηκαν από το μετάλλευμα. Η ιδέα αυτή έχει υποστεί ριζικές αλλαγές με την πάροδο των ετών. Το Ίδρυμα Εξόρυξης και Μεταλλουργίας του Ηνωμένου Βασιλείου, ορίζει σήμερα το μετάλλευμα ως «το στερεό φυσικό ορυκτό σύνολο οικονομικού ενδιαφέροντος από το οποίο ένα ή περισσότερα πολύτιμα συστατικά μπορούν να ανακτηθούν με επεξεργασία». Ως εκ τούτου, το μετάλλευμα και η συνδεδεμένη μάζα του μεταλλεύματος σε ορυχείο ή κατάλληλο για εξόρυξη (orebody) περιλαμβάνουν μεταλλικά κοιτάσματα, ευγενή μέταλλα, βιομηχανικά ορυκτά, πετρώματα, χύδην ή αδρανή υλικά, χαλίκι, άμμο, πολύτιμους λίθους, φυσικό νερό, πολυμεταλλικά οζίδια και ορυκτά καύσιμα από την ξηρά και τον πυθμένα του ωκεανού. Όλα τα μεταλλεύματα είναι ορυκτά ή τα αδρανή τους, αλλά το αντίθετο δεν ισχύει. Τα μεταλλεύματα μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως (Πίνακας 1.1) (Halдар, 2013):

Τύπος	Μετάλλευμα
Metallic	Native-Pt, -Au, -Ag, -Cu, chalcopyrite, sphalerite, galena, hematite, magnetite, pyrite, pyrrho-tite, bauxite
Noble	Gold, silver, platinum, palladium.
Industrial	Quartz, garnet, phosphate, asbestos, barite
Gemstones	Amethyst, aquamarine, diamond, emerald, garnet, opal, ruby, sapphire, topaz, zircon.
Rock	Granite, marble, limestone, rock salt.
Bulk/aggregate	Sand, gravel
Mineral fuel	Coal, crude oil, gas.
Strategic	Uraninite, pitchblende, thorianite, wolframite.
Life essential	Natural water.
Rare earth	Lanthanum (La), cerium (Ce), neodymium (Nd), promethium (Pm).
Ocean	Poly-metallic nodules, coral, common salt, potassium.

### 1.2.3 Κοιτάσματα μεταλλεύματος

Το **κοίτασμα μεταλλεύματος** (ore deposits) είναι μια φυσική συγκέντρωση ενός ή περισσότερων μεταλλικών, μη μεταλλικών και συνδυασμός ορυκτών εντός του ξενιστή (host rock). Έχει ένα ορισμένο τρισδιάστατο σχήμα / μέγεθος βάσει οικονομικών κριτηρίων με πεπερασμένη ποσότητα (τόνοι) και μέση ποιότητα (% βαθμός). Το σχήμα ποικίλλει ανάλογα με την περίπλοκη φύση του κοιτάσματος και μπορεί να εμφανίζεται με στρώσεις (layered), με διάδοση (disseminated), με φλέβες (veined), διπλωμένο (folded) και παραμορφωμένο (deformed). Μπορεί να διαφαίνεται στην επιφάνεια ή να βρίσκεται κάτω από πετρώδεις άγονους λόφους, γεωργικά εδάφη, άμμο, ποτάμια και δάση (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Ορυκτά αποθέματα με σχηματικό σχήμα και στυλ: (Α) υπο-οριζόντιο σώμα λιγνίτη κάτω από κάλυψη γεωργίας / άμμου στο Barsingsar, (Β) τεράστιο σώμα Zn-Pb-Ag εκτεθειμένο στην επιφάνεια στο Ramprura-Agucha, (C) περίπλοκα διπλωμένο Pb-Cu κατάθεση στο Agnigundal, (D) Φακοί En echelon Zn-Pb κάτω από λοφώδες έδαφος στο Zawar, (E) Μοναδική υπογραφή gossans από κατάθεση θειούχου στο Rajpura-Dariba, (F) Κρυφή κατάθεση θειούχου κάτω από πετρώδες άγονο χαλαζήτη στο Sindesar Khurd, Ινδία.

Δεν υπάρχει προτιμησιακή γεωγραφική θέση των κοιτασμάτων μεταλλεύματος και μπορεί να βρίσκονται σε απομακρυσμένο μέρος ή κάτω από μια πυκνοκατοικημένη πόλη. Τα κοιτάσματα μεταλλεύματος, ως εκμεταλλεύσιμο μη ανανεώσιμο περιουσιακό στοιχείο, πρέπει να χρησιμοποιούνται δίκαια, ώστε να είναι διαθέσιμα για τις μελλοντικές γενιές (Halder, 2013).

#### 1.2.4 Κύρια προϊόντα, συνδεδεμένα προϊόντα και ιχνοστοιχεία

Το **κύριο προϊόν (prime commodity)** είναι το κύριο ορυκτό μεταλλεύματος που ανακτάται από τα ορυχεία. Τα **συνδεδεμένα προϊόντα (associated commodities)** είναι τα συνδεδεμένα ορυκτά που ανακτώνται ως υποπροϊόντα μαζί με το κύριο ορυκτό. Όλα τα κοιτάσματα μεταλλεύματος περιέχουν έναν αριθμό πολύτιμων **ιχνοστοιχείων (trace elements)** που μπορούν να ανακτηθούν κατά την επεξεργασία του μεταλλεύματος. Το κύριο προϊόν ενός ορυχείου ψευδάργυρου-μόλυβδου-χαλκού-αργύρου είναι ο ψευδάργυρος, ενώ τα συνδεδεμένα προϊόντα είναι ο μόλυβδος και ο χαλκός. Τα αναμενόμενα ιχνοστοιχεία προστιθέμενης αξίας είναι το κάδμιο, το ασήμι, το κοβάλτιο και ο χρυσός. Η αξία όλων των κύριων και των δευτερευόντων προϊόντων και ιχνοστοιχείων λαμβάνονται υπόψη συλλογικά για την αποτίμηση του μεταλλεύματος / ορυχείου.

### 1.2.5 Protore

Το "**Protore**" είναι μια αλλοιωμένη μάζα βράχου ή ένα πρωταρχικό κοίτασμα ορυκτών με μη οικονομική συγκέντρωση ορυκτών (uneconomic concentration of minerals). Μπορεί να εμπλουτιστεί περαιτέρω με φυσικές διεργασίες για τη δημιουργία μεταλλεύματος. Πρόκειται για υπολειμματικά κοιτάσματα χαμηλού βαθμού που σχηματίζονται από τις καιρικές συνθήκες, την οξείδωση, την εξάτμιση (leaching) και παρόμοιες τέτοιες αλλαγές. Το protore μπορεί να μετατραπεί σε κοίτασμα με οικονομικό ενδιαφέρον με προηγμένη τεχνολογία ή / και αύξηση της τιμής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κασλίνη, σίδηρο και νικέλιο λόγω επαρκούς εμπλουτισμού των αντίστοιχων μετάλλων.

### 1.2.6 Στείρα Ορυκτά και Τέλματα

Τα κοιτάσματα μεταλλεύματος σπάνια αποτελούνται από 100% ανόργανα άλατα μεταλλεύματος (ore-bearing minerals), αλλά συνήθως σχετίζονται με RFM κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανοργανοποίησης. Αυτά τα συνδεδεμένα ορυκτά ή πετρώματα, που δεν έχουν καμία ή λιγότερο σημαντική εμπορική αξία, ονομάζονται **στείρα ορυκτά**<sup>1 2</sup> (**gangue minerals**). Ένας κατάλογος στείρων ορυκτών είναι:

Quartz	SiO <sub>2</sub>
Barite	BaSO <sub>4</sub>
Calcite	CaCO <sub>3</sub>
Clay minerals	All types
Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Feldspar	All types
Garnet	All types
Gypsum	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
Mica	All types
Pyrite	FeS
Pyrrhotite	Fe <sub>n</sub> S <sub>(n+1)</sub>

Τα **τέλματα (tailings)** ή αλλιώς απορρίμματα, ορίζονται ως τα απόβλητα της επεξεργασίας του μεταλλεύματος, από την απομάκρυνση των οικονομικής σημασίας συστατικών (Τριανταφυλλίδης, 2015). Αυτά μπορεί να βρίσκονται σε στερεή ή υγρή μορφή (πολφός). Οι πολφοί προέρχονται από τις εργοστασιακές μονάδες εμπλουτισμού και υδρομεταλλουργίας, κυρίως κατά τις διεργασίες επίπλευσης, και εκχύλισης των μεταλλευμάτων

### 1.2.7 Επιβλαβείς ουσίες (Deleterious Substances)

Τα μεταλλικά ορυκτά μεταλλεύματος συνδέονται περιστασιακά με ανεπιθύμητες ουσίες που επιφέρουν επιπλέον κόστος επεξεργασίας και κάποιο πέναλτι στο τελικό προϊόν. Τέτοια

<sup>1</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Gangue>

<sup>2</sup>

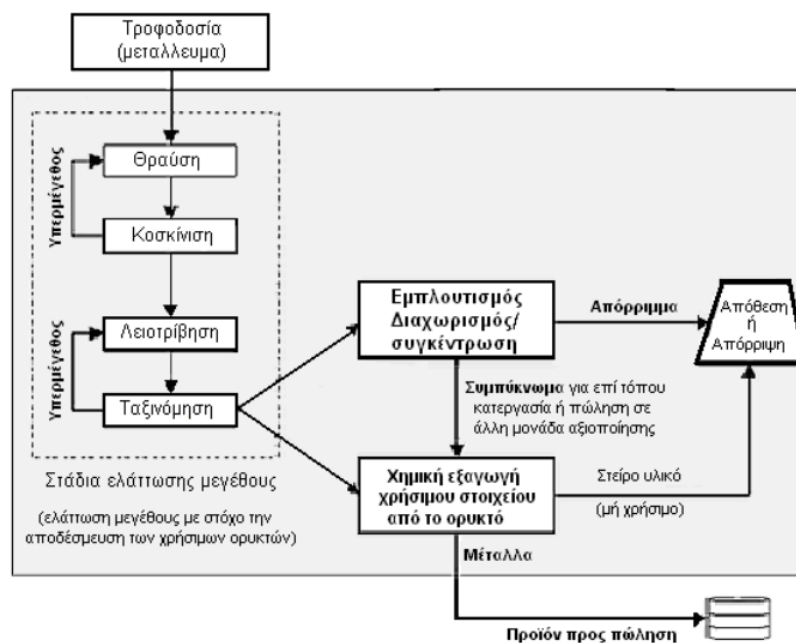
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%BF%CE%B9%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1>

παραδείγματα είναι το αρσενικό σε συμπύκνωμα νικελίου και χαλκού, ο υδράργυρος σε συμπύκνωμα ψευδαργύρου, ο φώσφορος σε συμπύκνωμα σιδήρου, ο ασβεστίτης σε συμπύκνωμα ουρανίου και, στη βιομηχανία γυαλιού, η έκπλυση οξέος για την επεξεργασία άμμου χαλαζία με επίστρωση λιμονίτη (limonite-coated quartz sand). Κατά τον εμπλουτισμό που αποτελεί το πρώτο στάδιο της εξαγωγικής μεταλλουργίας ένα εξορυγμένο μετάλλευμα διαχωρίζεται, με φυσικοχημικές μεθόδους, σε ορυκτά με οικονομικό ενδιαφέρον (**συμπύκνωμα**) και σε προϊόντα με μικρό ή κανένα οικονομικό ενδιαφέρον (**απόρριμμα**) (orykta.gr), (Βικιπαίδεια)).

### 1.3 Μηχανική προπαρασκευή

Αφού το μετάλλευμα εξορυχθεί, θα πρέπει να περάσει από ορισμένα διαδοχικά στάδια για να πραγματοποιηθεί η τελική ανάκτηση των επιθυμητών μετάλλων, δηλαδή των καθαρών μετάλλων ή συμπυκνωμάτων. Πριν από την εφαρμογή του φυσικοχημικού διαχωρισμού των ορυκτών, το μετάλλευμα πρέπει να **κατατμηθεί** (ελάττωση μεγέθους τεμαχίων του αρχικού υλικού) και να **απελευθερωθούν** (αποδέσμευση ή αποχωρισμός) τα μεταλλοφόρα ή άλλα χρήσιμα ορυκτά από τη μάζα του στείρου. Η διεργασία της κατάτμησης συνήθως αποκαλείται μηχανική προπαρασκευή ή μηχανική ελάττωση μεγέθους (προετοιμασία του μεταλλεύματος), ενώ η διεργασία του διαχωρισμού των αποδεσμευμένων ορυκτών αποτελεί τον καθαυτό εμπλουτισμό (Weiss, 1985), (Wills, 1988)).

Ουσιαστικά, σκοπός της μηχανικής προπαρασκευής είναι η ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων του εξορυσσόμενου μεταλλεύματος, έτσι τόσο ώστε τα ορυκτά με οικονομικό ενδιαφέρον να απελευθερωθούν από την μάζα των στείρων και να είναι πιο εύκολος ο διαχωρισμός τους. Ένας δεύτερος λόγος για τη μηχανική προπαρασκευή των μεταλλευμάτων είναι ότι οι πυρομεταλλουργικές ή υδρομεταλλουργικές διεργασίες συχνά απαιτούν τα μεταλλεύματα (ή τα συμπυκνώματα μεταλλευμάτων) να έχουν ορισμένη κοκκομετρία (ελάχιστο μέγεθος τεμαχίων), οπότε εφαρμόζονται κατάλληλες μέθοδοι μορφοποίησης (π.χ. συσσωμάτωση) των τεμαχίων του συμπυκνώματος (Βικιπαίδεια), (orykta.gr)).



Εικόνα 2 Διεργασίες μηχανικής προπαρασκευής, εμπλουτισμού και μεταλλουργικής κατεργασίας μεταλλεύματος (Τσακαλάκης, 2018)

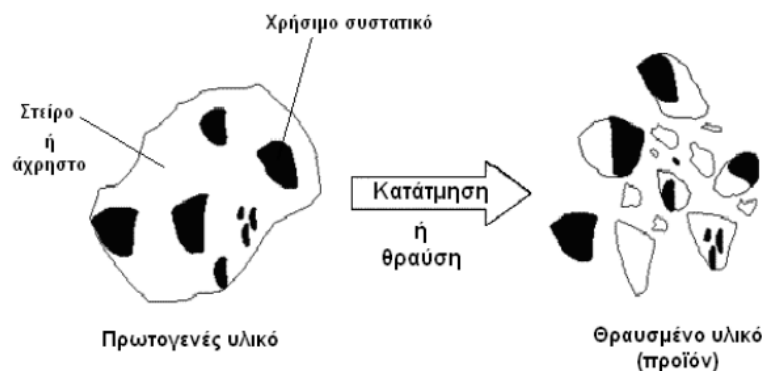
Οι διεργασίες της μηχανικής προπαρασκευής περιλαμβάνουν την **θραύση, την λειοτρίβηση και την ταξινόμηση κατά μέγεθος** (Εικόνα 2). Στη συνέχεια, στα προϊόντα της κατάτμησης διεξάγεται ο κυρίως εμπλουτισμός (διαχωρισμός χρήσιμου συστατικού και στείρου) με φυσικοχημικές μεθόδους δηλ. βαρυτομετρικός διαχωρισμός, ηλεκτροστατικός



διαχωρισμός, μαγνητικός διαχωρισμός, επίπλευση, οπτικός διαχωρισμός και παλαιότερα ακόμη χειροδιαλογή με οπτικό διαχωρισμό και κατόπιν ακολουθεί η μεταλλουργική κατεργασία με την χημική εξαγωγή χρήσιμου στοιχείου από το ορυκτό (orykta.gr).

### 1.3.1 Θραύση

Το πρώτο στάδιο της μηχανικής προπαρασκευής αποτελεί η θραύση και μάλιστα η πρωτογενής θραύση, κατά την οποία γίνεται μια πρώτη ελάττωση του μεγέθους των κόκκων της τροφοδοσίας στο τελικό επιθυμητό μέγεθος. Τα μεγάλα τεμάχια του μεταλλεύματος θρυμματίζονται σε τεμάχια μεγέθους από 0,5 έως 20 mm σε μεγάλους θραυστήρες (Εικόνα 3). Η θραύση αυτή πραγματοποιείται σε ένα ή πολλά στάδια (**πρωτογενής, δευτερογενής, τριτογενής θραύση**) και μπορεί να χαρακτηριστεί ως **απλή, πολλαπλή και επαναλαμβανόμενη απλή**. **Απλή** ονομάζεται η θραύση που προκαλείται από ένα σύστημα εξωτερικών δυνάμεων, το οποίο ενεργεί μία φορά πάνω στο τεμάχιο και απομακρύνεται αμέσως μόλις αρχίσει η θραύση. **Πολλαπλή** καλείται η θραύση όταν η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται πάνω στο ίδιο τεμάχιο περισσότερες από μία φορές, ενώ **επαναλαμβανόμενη απλή** θραύση ονομάζουμε την πολλαπλή θραύση χονδρομερούς υλικού με σχετικά μικρό λόγο κατάτμησης, όταν αυτή παρουσιάζει κατανομή μεγέθους τεμαχίων προϊόντος σε «θραύσματα» και «υπόλλειμα». Ακόμα, η θραύση γίνεται **σε ανοικτά ή σε κλειστά κυκλώματα** με ενδιάμεση ταξινόμηση (κοσκίνισμα) του θρυμματισμένου υλικού και οι θραυστήρες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι **γυροσκοπικοί, κωνικοί, σιαγονωτοί, περιστροφικοί-κρουστικοί, κ.ά.**



Εικόνα 3 Κατάτμηση (ελάττωση μεγέθους τεμαχίων) και προϊόντα κατάτμησης (orykta.gr)

Η θραύση μπορεί να προκληθεί από τα παρακάτω είδη δυνάμεων (Σταμπολιάδης, 2008):

1. Θλίψη: Οι θλιπτικές δυνάμεις προκαλούνται από τη συμπίεση ενός τεμαχιδίου μεταξύ δύο επιφανειών.
2. Κρούση: Οι κρουστικές δυνάμεις προκύπτουν από την πρόσκρουση ενός τεμαχιδίου σε κινούμενη επιφάνεια ή αντιστρόφως.
3. Τριβή: Οι δυνάμεις της τριβής προκύπτουν από την αντίθετη κίνηση, δύο παράλληλων κινούμενων επιφανειών.
4. Διάτμηση: Η διάτμηση αφορά μια εφελκυστική δύναμη, που δρα στην επιφάνεια του τεμαχίου.

### 1.3.2 Λειοτρίβηση

Η λειοτρίβηση έπεται της θραύσης και έχει ως σκοπό το μέγεθος των τεμαχίων που θα προκύψουν από αυτή να κυμαίνεται από 300 έως 10 μm. Η λειοτρίβηση γίνεται **εν ξηρώ ή εν υγρώ** (σε πολφό) μέσα σε περιστρεφόμενους μύλους σχήματος κυλινδρικού τυμπάνου. Αναλόγως του μέσου λειοτρίβησης που περιέχουν, οι μύλοι μπορεί να είναι **σφαιρόμυλοι** (με μέσο θραύσης των τεμαχίων χαλύβδινες σφαίρες), **ραβδόμυλοι** (με μέσο θραύσης χαλύβδινες ράβδους) ή **αυτογενείς μύλοι** με μέσο θραύσης το ίδιο το μέταλλευμα, διεργασία η οποία πολλές φορές ενισχύεται με προσθήκη χαλύβδινων σφαιρών ή τεχνητών σφαιρών

(π.χ. πορσελάνης ή ασβεστολιθικές κροκάλες). Οι δυνάμεις που προκαλούν τη θραύση στους μύλους είναι η κρούση, η συμπίεση, η τριβή, η απόξεση μαζί με τη δυναμική ενέργεια (βαρύτητα) στους αυτογενείς μύλους. Σήμερα χρησιμοποιούνται επίσης και μύλοι απόξεσης (attrition mills) ή κατακόρυφοι μύλοι περιστρεφόμενων κυλινδρικών τροχών για ξηρή λειοτριβήση-άλεση (κλίνκερ τσιμέντου) (orykta.gr).

Επίσης, οι μηχανισμοί ελάττωσης του μεγέθους κατά τη θραύση και τη λειοτριβήση είναι διαφορετικοί. Η βασική διαφορά τους έγκειται στις διεργασίες θραύσης, όπου οι δυνάμεις που ενεργούν για την ελάττωση του μεγέθους του τεμαχιδίου είναι κυρίως θλίψης και κρούσης και λιγότερο τριβής, ενώ στη λειοτριβήση είναι κυρίως αυτές της τριβής ( Deniz, 2013), (Σταμπολιάδης, 2008)).

Τα στάδια ελάττωσης του μεγέθους διαχωρίζονται σε φάσης, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα (Τσακαλάκης, 2018):

Πίνακας 1 Στάδια Κατάτμησης (Τσακαλάκης, 2018)

ΣΤΑΔΙΑ	ΦΑΣΕΙΣ	ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ (mm)		ΤΥΠΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ
		ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ	ΠΡΟΪΟΝ	
ΘΡΑΥΣΗ	Πρωτογενής	1200-200	300-60	Θραυστήρας σιαγόνων, Γυροσκοπικός, Κρουστικός
	Δευτερογενής	250-90	80-25	Κωνικός θραυστήρας, Κρουστικός, Σφυρόμυλος
	Τριτογενής	100-30	30-8	Κρουστικός, Σφυρόμυλος, Θραυστήρας Κυλίνδρων
ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗ	Χονδρομερής	≤25 (≤300)	1-0.5	Ραβδόμυλος, Αυτογενής λειοτριβέας
	Λεπτομερής	≤15 (≤300)	0.5-0.07	Σφαιρόμυλος, Αυτογενής λειοτριβέας
	Άλεση	≤10	≤0.04	Σφαιρόμυλος, Μύλος περιφερόμενων τροχών

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μύλων θραύσης καθώς και η περιγραφή του εξεταζόμενου οριζόντιου κονιορτοποιητή του ΕΜΠ.

### 1.3.3 Ταξινόμηση κατά μέγεθος

Μετά από το στάδιο της λειοτριβήσης, συνήθως πραγματοποιείται ένα στάδιο ταξινόμησης, το οποίο αφορά το μέγεθος των τεμαχίων. Η ταξινόμηση του πιο λεπτόκοκκου λειοτριβημένου υλικού μπορεί να γίνει με διάφορα μέσα, όπως τα κόσκινα (δονούμενα, περιστροφικά, κ.ά.), τους κοχλιωτούς υδροταξινομητές ή τους κυκλώνες (υδροκυκλώνες, αεροκυκλώνες). Μάλιστα, το ταξινομημένο μέταλλευμα συχνά υπόκειται και σε έκπλυση, ούτως ώστε να καθαριστεί από εναποθέσεις υπερβολικά λεπτόκοκκων υλικών (ιλύς) που αλλοιώνουν τις επιφανειακές ιδιότητες των κόκκων του μεταλλεύματος. (Βικιπαίδεια)

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Επεξεργασία Ορυκτών

Η «Επεξεργασία Ορυκτών» (Mineral Processing), η οποία εμφανίζεται και με τις αγγλικές ορολογίες “Mineral Benefication”<sup>3</sup>, “Mineral Engineering”, “Mineral Dressing” ή “Ore Dressing”, και έχει οριστεί ως η επιστήμη και η τέχνη του διαχωρισμού πολύτιμων μεταλλικών και μη μεταλλικών ορυκτών από ασήμαντα στείρα ορυκτά. Η δραστηριότητα μετά την εξόρυξη περιλαμβάνει τον εμπλουτισμό των ορυκτών (mineral beneficiation) και την εξορυκτική μεταλλουργία (extractive metallurgy). Ο τρόπος των λειτουργιών περνά από τη διαδικασία της αποδέσμευσης (liberation) και του διαχωρισμού των ορυκτών σε πολύτιμα προϊόντα και άχρηστα απόβλητα ως απορρίμματα. Αυτό γίνεται με την αξιοποίηση των χαρακτηριστικών διαφορών στις φυσικές και χημικές ιδιότητες διαφορετικών ορυκτών και εφαρμόζοντας ποικιλία τεχνικών. Περιγράφεται, μάλιστα, ως η επεξεργασία προστιθέμενης αξίας των πρώτων υλών (μετάλλευμα ROM) για την παραγωγή εμπορεύσιμων ενδιάμεσων προϊόντων (συμπύκνωμα χαλκού – copper concentrate) ή τελικών προϊόντων (πυριτική άμμος – silica sand) που περιέχουν περισσότερα από ένα πολύτιμα μέταλλα και διαχωρισμό των στείρων (υπόλειμμα (tailing)). Τα στοιχεία ROM αποτελούνται από τα ακόλουθα:

- i. Οικοδομικές και διακοσμητικές πέτρες όπως γρανίτης, μάρμαρο, ασβεστόλιθος,
- ii. Βιομηχανικά ορυκτά όπως ασβεστίτης, φθορίτης, απατίτης, διαμάντια και πολύτιμοι λίθοι, βαρύτης, βολλαστονίτης, βωξίτης,
- iii. Μεταλλοφόρα ορυκτά (metalliferous minerals) όπως χαλκοπυρίτης, σφαλερίτης, γαλένα, βωξίτης, αιματίτης και
- iv. Πολύτιμα μέταλλα όπως χρυσός, ασήμι, πλατίνα, παλλάδιο σε φυσική μορφή.

Η διαδικασία δεν πρέπει, σε καμία περίπτωση και ακόμη και σε οποιοδήποτε ενδιάμεσο στάδιο, να μεταβάλει τη φυσική και χημική ταυτότητα των μητρικών ορυκτών για την επακόλουθη επεξεργασία (τήξη). Το μεταλλοφόρο συμπύκνωμα υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία με εξορυκτική μεταλλουργία, είτε Υδρομεταλλουργία είτε Πυρομεταλλουργία και Ηλεκτρομεταλλουργία για εκχύλιση μετάλλων στην πιο αγνή μορφή.

Η επεξεργασία ορυκτών περιλαμβάνει τέσσερις κύριους τύπους δραστηριοτήτων (Halдар, 2013):

1. «Κατάτμηση» (comminution), «αποδέσμευση» (liberation) και / ή «μείωση μεγέθους σωματιδίων» (particle size reduction),
2. «ταξινόμηση (sizing) και διαχωρισμός» σωματιδίων με διαλογή (screening) ή κατηγοριοποίηση (classification),
3. «συγκέντρωση» (concentration) αξιοποιώντας τις φυσικές και επιφανειακές χημικές ιδιότητες και
4. «αφυδάτωση» (dewatering) ή «διαχωρισμός στερεών-υγρών» (solid-liquid separation).

Η «αποδέσμευση» (liberation) είναι η απελευθέρωση πολύτιμων ορυκτών μεταξύ των ίδιων και από τα στείρα ορυκτά στο πιο χοντρό πιθανό μέγεθος σωματιδίων. Το βέλτιστο μέγεθος σωματιδίων για καλύτερη αποδέσμευση σπάνια επιτυγχάνεται λόγω της πολυπλοκότητας των συνδυασμένων φυσικών χαρακτηριστικών. Όταν τα πολύτιμα μέταλλα και τα στείρα ορυκτά αλληλοσυνδέονται σε ένα σωματίδιο, είναι γνωστό ως «μέτρια» (middling). Η «Ταξινόμηση» (Sizing) είναι ο διαχωρισμός των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός τους. Η «Συγκέντρωση» (Concentration) είναι ο διαχωρισμός των ορυκτών σε δύο ή περισσότερα προϊόντα, όπως πολύτιμα μέταλλα σε συμπυκνώματα, στείρα ορυκτά στα υπολείμματα και κλειδωμένα σωματίδια στη μέση. Τα μεσαία κλάσματα είναι σωστά τοποθετημένα σωματίδια και συχνά συνδέονται είτε με συμπύκνωμα είτε με υπολείμματα. Η «Αφυδάτωση» (Dewatering), σταδιακά, παράγει σχετικά ξηρό συμπύκνωμα στην επιθυμητή περιεκτικότητα υγρασίας. Η

<sup>3</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Beneficiation>

μείωση της υγρασίας μειώνει το κόστος αποστολής μεγάλων αποστάσεων και αποτρέπει τους κινδύνους κατά τη μεταφορά.

Η τεχνική ωφέλειας ορυκτών (Mineral beneficiation technique) προσανατολίζεται στη διατήρηση της μάζας (ισορροπία υλικού - material balance) και δέχεται τον καλύτερο δυνατό βαθμό συμπυκνώματος με την υψηλότερη δυνατή απόδοση ανάκτησης κάθε ορυκτού (ισορροπία ορυκτών - mineral balance).

## 2.2 Αποδέσμευση

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, τα αποθέματα των ορυκτών αποτελούνται από μεταλλεύματα και στείρα ορυκτά που συνδέονται στενά σαν ένα περίπλοκο μωσαϊκό. Τα ορυκτά συναρμολογούνται σε διάφορες αναλογίες με μορφές που κυμαίνονται μεταξύ πολύ λεπτού έως εξαιρετικά χονδροειδούς μεγέθους κόκκων που απεικονίζουν στρώσεις, φλέβες, χορδές, έως πολύπλοκη δομή.

Ένα μεμονωμένο ορυκτό μπορεί να εμφανιστεί ως ένταξη σε άλλον τύπο και συχνά με αλληλοσυνδεόμενα όρια. Μέχρι και εκτός εάν τα μεμονωμένα ορυκτά αποδεσμευτούν εντελώς το ένα από το άλλο, η διαδικασία συγκέντρωσης των ορυκτών πλούσιων σε αξία δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποδέσμευση (μείωση μεγέθους σωματίδιου). Το μέγεθος των σωματιδίων του μεταλλεύματος μειώνεται σταδιακά στο βέλτιστο κλάσμα για διαχωρισμό με μια μέθοδο κατάλληλη για τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ορυκτών. Η αρχική διαδικασία αποδέσμευσης ξεκινά κατά την επιχείρηση της εξόρυξης μέσω επί τόπου ανατίναξης σώματος του ορυκτού, που έχει αντληθεί από εκσκαφείς (excavators) ή ξύστρες (scrapers) και μετακινηθεί στην αποθήκη των μεταλλευμάτων ως ROM. Το μέγεθος του θραύσματος σε αυτό το στάδιο είναι ετερογενές και ποικίλλει οπουδήποτε μεταξύ 1,50 μ. και λεπτόκοκκο. Οι μεγάλοι ογκόλιθοι μειώνονται με τη βοήθεια θραυστήρα βράχου (rock breaker) στην αυλή μεταλλευμάτων (ore dump yard) και με επιτόπιο θραυστήρα (onsite crusher). Η απόλυτη μείωση μεγέθους σε μια διαδοχική ακολουθία σύνθλιψης (crushing), άλεσης (grinding) και κονιοποίησης (pulverizing) αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της επεξεργασίας εγκατάστασης. Οι μεμονωμένοι κόκκοι ορυκτών αποδεσμεύονται στον υψηλότερο βαθμό και είναι έτοιμοι για επίπλευση αφρού ή οποιοσδήποτε κατάλληλες τεχνικές ωφέλειας.

### 2.2.1 Θραυστήρες

Η θραύση (crushing) επιτυγχάνεται με **συμπίεση (compression)** του μεταλλεύματος έναντι άκαμπτης επιφάνειας ή με **πρόσκρουση (impact)** στην επιφάνεια σε άκαμπτα περιορισμένη διαδρομή κίνησης. Η θραύση είναι συνήθως μια **ξηρή διαδικασία** και πραγματοποιείται σε μετάλλευμα ROM διαδοχικά σε δύο ή τρία στάδια, δηλαδή με **(α) πρωτογενή, (β) δευτερεύοντα και (γ) τριτογενή θραυστήρα.**

#### (α) Πρωτογενείς θραυστήρες

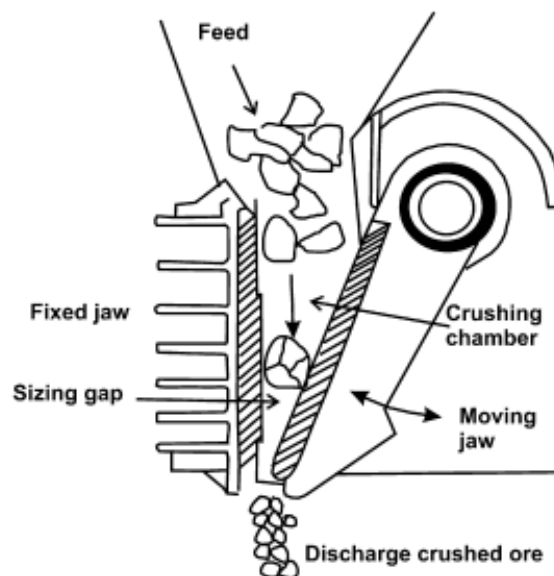
Οι πρωτογενείς θραυστήρες (primary crushers) είναι ανθεκτικά μηχανήματα βαρέως τύπου που χρησιμοποιούνται για τη συντριβή μεταλλεύματος ROM διαμέτρου 1,5μ. Αυτά τα μεταλλεύματα μεγάλου μεγέθους μειώνονται στο αρχικό στάδιο θραύσης για διάσταση προϊόντος εξόδου 10-20 cm. Οι συνηθισμένοι πρωταρχικοί θραυστήρες είναι τύπου **θραυστήρα σιαγόνων (Jaw crusher)** και **γυροσκοπικού θραυστήρα (Gyratory crusher).**

Ο **θραυστήρας σιαγόνων** (Εικόνα 4) μειώνει το μέγεθος των μεγάλων πετρωμάτων ρίχνοντάς τα στο στόμιό του σε σχήμα "V" στην κορυφή του θαλάμου του θραυστήρα (crushing chamber). Το στόμιο αυτό δημιουργείται μεταξύ μιας σταθερής άκαμπτης σιαγόνας (fixed jaw) και μιας περιστρεφόμενης αιωρούμενης σιαγόνας (moving jaw) σε οξεία γωνία μεταξύ τους. Η συμπίεση δημιουργείται πιέζοντας το βράχο πάνω στη σταθερή πλάκα στον θάλαμο θραύσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Το άνοιγμα στο κάτω μέρος των πλακών της σιαγόνας μπορεί να ρυθμιστεί στο επιθυμητό άνοιγμα για το μέγεθος του προϊόντος. Τα βράχια παραμένουν μεταξύ των σιαγόνων έως ότου είναι αρκετά μικρά ώστε να απελευθερωθούν μέσω αυτού του

κενού για περαιτέρω μείωση μεγέθους τροφοδοτώντας τον δευτερεύοντα θραυστήρα (secondary crusher).



Εικόνα 4 Θραυστήρας σιαγόνων (Τσακαλάκης, 2018)



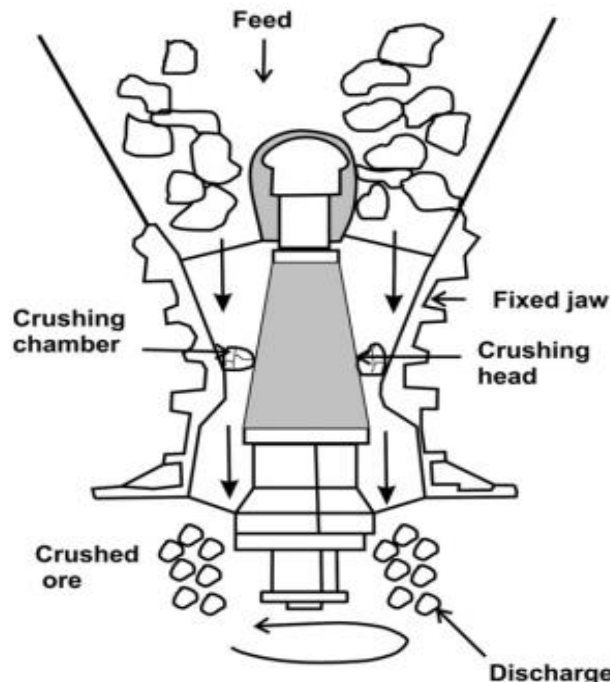
Εικόνα 5 Αρχή του θραυστήρα σιαγόνων που δείχνει τη διαδρομή του άλευρου τροφίμου προς το κατακερματισμένο προϊόν που συνθλίβεται υπό υψηλή πίεση σταθερών και κινούμενων σιαγόνων. (Haldar, 2013)

Ο τύπος του θραυστήρα σιαγόνων εξαρτάται από την τροφοδοσία εισόδου (input feed) και το μέγεθος του προϊόντος εξόδου, τη δύναμη βράχου / μεταλλεύματος, τον όγκο λειτουργίας, το κόστος και άλλες σχετικές παραμέτρους. Οι πρωτογενείς θραυστήρες σιαγόνων βαρέως τύπου εγκαθίστανται στο υπόγειο για ομοιόμορφη μείωση μεγέθους πριν από τη μεταφορά του μεταλλεύματος στο κύριο κεντρικό σύστημα ανύψωσης. Οι θραυστήρες σιαγόνων μεσαίας χρήσης είναι χρήσιμοι σε υπόγεια ορυχεία με χαμηλή παραγωγή (Εικόνα 6) και στο εργοστάσιο επεξεργασίας. Μικροί θραυστήρες σιαγόνων εγκαθίστανται στο εργαστήριο για την προετοιμασία αντιπροσωπευτικών δειγμάτων για χημική ανάλυση.



Εικόνα 6 Μεσαίου μεγέθους θραυστήρας σιαγόνων σε λειτουργία σε υπόγειο ορυχείο για σύνθλιψη μεταλλεύματος ROM πριν μεταφερθεί στην επιφάνεια στο Zawarhala της Ινδίας. (Haldar, 2013)

Οι **περιστροφικοί θραυστήρες** αποτελούνται ουσιαστικά από ένα μακρύ κωνικό στοιχείο θραύσης από σκληρό ατσάλι που αιωρείται από την κορυφή. Περιστρέφεται σε κωνική διαδρομή μέσα στον στρογγυλό σκληρό σταθερό θάλαμο σύνθλιψης (crushing chamber) (Εικόνα 7). Η μέγιστη δράση σύνθλιψης δημιουργείται κλείνοντας το διάκενο μεταξύ της σκληρής επιφάνειας σύνθλιψης που συνδέεται με τον άξονα και των κοίλων σταθερών επενδύσεων που είναι τοποθετημένες στο κύριο πλαίσιο του θραυστήρα. Το κενό ανοίγει και κλείνει με έναν έκκεντρο δίσκο στο κάτω μέρος του άξονα που προκαλεί την περιστροφή του κεντρικού κατακόρυφου άξονα.



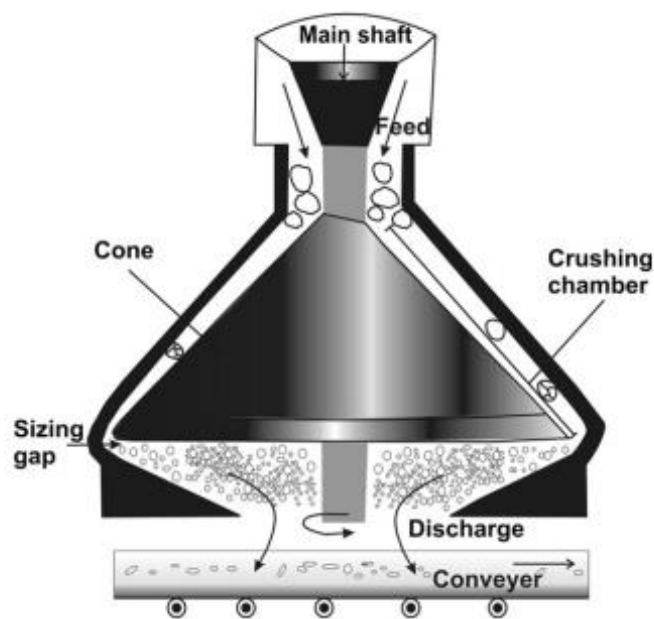
Εικόνα 7 Αρχή λειτουργίας του γυροσκοπικού θραυστήρα για τη θραύση του άκρου μεταλλεύματος που πιέζεται μεταξύ σταθερής σιαγόνας και περιστρεφόμενης κωνικής κεφαλής (Grewal, 2010)

### (β) Δευτερογενείς θραυστήρες

Ο δευτερεύων θραυστήρας (secondary crusher) χρησιμοποιείται κυρίως για την αναμόρφωση του προϊόντος του πρωτογενούς θραυστήρα. Το θρυμματισμένο υλικό διαμέτρου περίπου 15

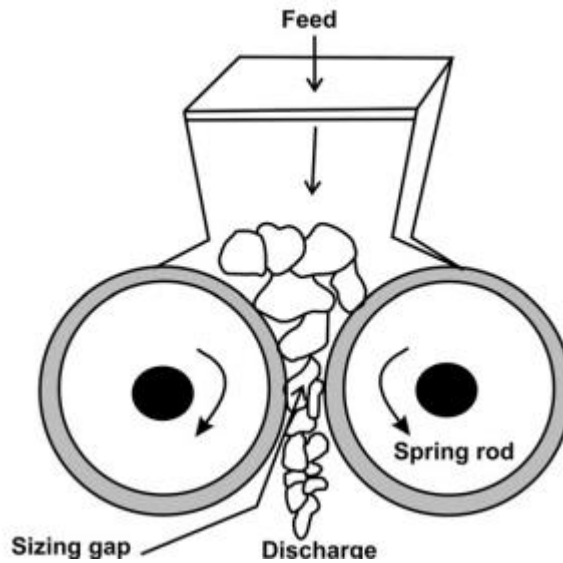
εκ., που λαμβάνεται από την αποθήκευση του μεταλλεύματος, διατίθεται ως το τελικό προϊόν θραύσης. Το μέγεθος είναι συνήθως μεταξύ 0,5 και 2 εκ. σε διάμετρο έτσι ώστε να είναι κατάλληλο για άλεση (grinding). Οι δευτερεύοντες θραυστήρες είναι σχετικά ελαφρύτεροι σε βάρος και μικρότεροι σε μέγεθος. Λειτουργούν γενικά με ξηρή τροφοδοσία χωρίς βλαβερά στοιχεία όπως μεταλλικά θραύσματα, ξύλο, πηλό κ.λπ. που διαχωρίζονται κατά την αρχική σύνθλιψη. Οι συνηθισμένοι δευτερεύοντες θραυστήρες είναι τύπου **κωνικός (cone crusher)**, **κυλινδρικός (roll crusher)** και **περιστροφικός-κρουστικός (impact crusher)**.

Ο **κωνικός θραυστήρας** (Εικόνα 8) είναι πολύ παρόμοιος με τον περιστροφικό, εκτός του ότι έχει πολύ μικρότερο άξονα με επιφάνεια θραύσης μεγαλύτερης διαμέτρου σε σχέση με την κάθετη διάστασή του. Ο άξονας του δεν αναρτάται όπως στον περιστροφικό θραυστήρα, ενώ η εκκεντρική κίνηση του εσωτερικού κώνου σύνθλιψης είναι παρόμοια με αυτή του περιστροφικού. Ένας κωνικός θραυστήρας μπορεί μάλιστα να λειτουργήσει ως τριτογενής θραυστήρας, όταν εγκατασταθεί σε στενό κύκλωμα μεταξύ του δευτερεύοντος θραυστήρα και του σφαιρόμυλου για να συνθλίψει οποιοδήποτε υλικό υπερχειλίσης του δονητικού ελέγχου.



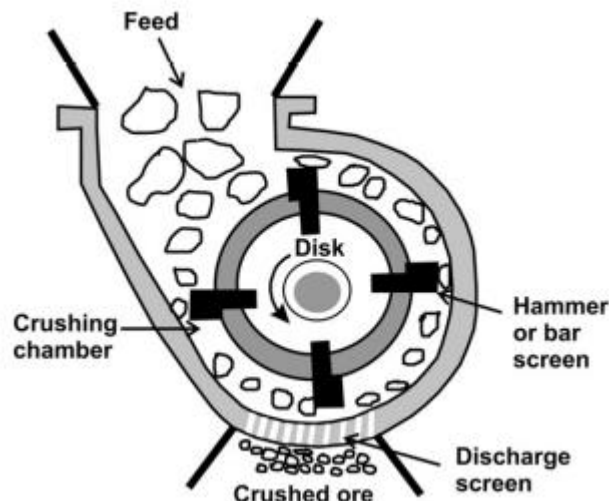
Εικόνα 8 Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τα βασικά στοιχεία και τη λειτουργία του κωνικού θραυστήρα (Halder, 2013)

Οι **θραυστήρες μονού κυλίνδρου (single-roll crushers)** αποτελούνται από ένα ζεύγος οριζόντιων κυλινδρικών ελατηρίων από μαγγάνιο (Εικόνα 9) που περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Το υλικό τροφοδοσίας που πέφτει πιέζεται και συνθλίβεται μεταξύ των κυλίνδρων. Το τελικό προϊόν διέρχεται από το σημείο εκκένωσης. Αυτός ο τύπος θραυστήρα χρησιμοποιείται σε δευτερεύουσα ή τριτογενή εφαρμογή σύνθλιψης. Οι **ανώτεροι κυλινδρικοί θραυστήρες (advance roll crushers)** έχουν σχεδιαστεί με έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο που περιστρέφεται προς μια πλάκα στερέωσης ή κυλίνδρους με διαφορετική διάμετρο (multiple-roll crushers) και ταχύτητα. Οι θραυστήρες αυτοί βελτιώνουν την αποδέσμευση των ορυκτών στο θρυμματισμένο προϊόν. Οι θραυστήρες κυλίνδρου χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε ασβεστόλιθο, άνθρακα, φωσφορικό άλας, κιμωλία και άλλα εύθραυστα μαλακά μεταλλεύματα.



Εικόνα 9 Εννοιολογικό διάγραμμα που απεικονίζει τα βασικά στοιχεία του κυλινδρικού θραυστήρα (Haldar, 2013)

Οι **περιστροφικοί-κρουστικοί θραυστήρες (impact crushers)** (Εικόνα 10) χρησιμοποιούν κρούση υψηλής ταχύτητας ή έντονα χτυπήματα στην ελεύθερη τροφοδοσία πτώσης αντί για συμπίεση ή τριβή. Χρησιμοποιούν αρθρωτά ή σταθερά σφυριά βαρέων μετάλλων (σφυρόμυλος (hammer mill)) ή ράβδους που συνδέονται με τις άκρες των οριζόντιων περιστρεφόμενων δίσκων. Τα σφυριά, οι ράβδοι και οι δίσκοι είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα μαγγανίου ή χυτοσίδηρο που περιέχει καρβίδιο χρωμίου. Τα σφυριά επανειλημμένα χτυπούν το υλικό που θρυμματίζεται σε μια τραχιά στερεή επιφάνεια του θαλάμου θραύσης που σπάζει το σωματίδιο σε ομοιόμορφο μέγεθος. Τα τελικά λεπτά προϊόντα πέφτουν μέσω της πύλης εκκένωσης (discharge gate), ενώ τα υπερμεγέθη σωματίδια σαρώνονται για έναν άλλο κύκλο σύνθλιψης έως ότου είναι αρκετά λεπτά για να πέσουν μέσα από την πύλη εκκένωσης. Οι περιστροφικοί-κρουστικοί θραυστήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία λατομείων για τσιπ δρόμων<sup>4</sup> και κτιρίων. Αυτοί οι θραυστήρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε δευτερογενή ή τριτογενή θραύση.



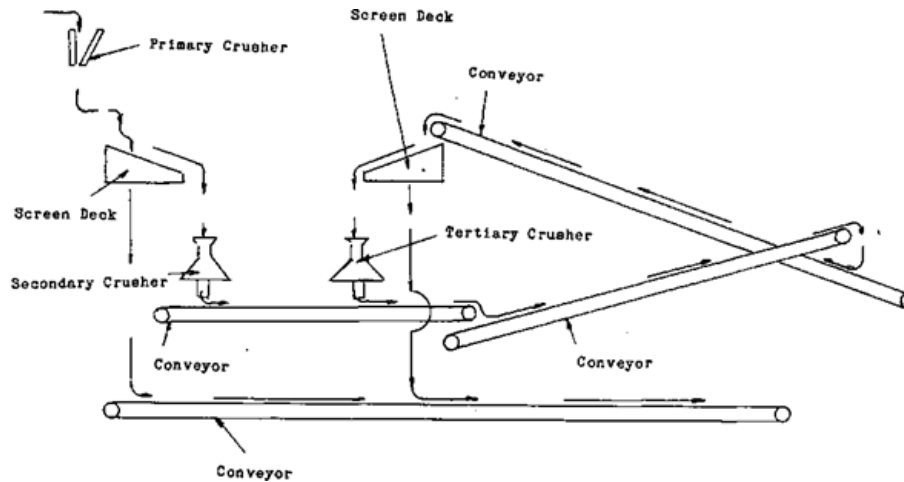
Εικόνα 10 Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τα βασικά στοιχεία και τη λειτουργία ενός θραυστήρα κρούσης (Haldar, 2013)

### (γ) Τριτογενείς θραυστήρες (Tertiary Crushers)

<sup>4</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Chipseal>



Εάν η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων του μεταλλεύματος δεν ολοκληρωθεί μετά τη δευτερεύουσα σύνθλιψη λόγω υπερβολικά σκληρού μεταλλεύματος ή σε ειδικές περιπτώσεις, όπου είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθούν τα πρόστιμα, συνιστάται η τριτοβάθμια επαναχρησιμοποίηση (tertiary recrushing) χρησιμοποιώντας δευτερεύοντες θραυστήρες σε στενό κύκλωμα. Η υπερχειλίση του δευτερεύοντος θραυστήρα συλλέγεται σε κάδο και μεταφέρεται στον τριτογενή θραυστήρα μέσω μεταφορικής ταινίας σε στενό κύκλωμα.



Εικόνα 1 Διάγραμμα ροής ανοιχτού κυκλώματος δευτεροβάθμιου και κλειστού κυκλώματος τριτοβάθμιου θραυστήρα (Michaud, 911metallurgist, 2015)

## 2.2.2 Μύλοι λειοτρίβησης-άλεσης

Σε πολλές βιομηχανίες το τελικό προϊόν ή η πρώτη ύλη σε κάποιο στάδιο της διαδικασίας παρασκευής, είναι σε μορφή σκόνης και κατά συνέπεια η ταχεία και φθηνή προετοιμασία των κονιοποιημένων υλικών είναι θέμα σημαντικής οικονομικής σημασίας (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016).

Σε ορισμένες περιπτώσεις το υλικό με μορφή πεπάλης μπορεί να παρασκευαστεί άμεσα, όπως για παράδειγμα με **καθίζηση από διάλυμα** (precipitation from solution), μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παρασκευή ορισμένων τύπων χρωμάτων και φαρμάκων, ή με την **ξηράνση υπό κενό** ενός λεπτού σπρέυ του υλικού (vacuum drying of a fine spray of the material), μια διαδικασία η οποία υιοθετείται ευρέως για την παρασκευή σκόνης γάλακτος, διαλυτών εκχυλισμάτων καφέ και παρόμοιων προϊόντων. Τέτοιες διεργασίες είναι, ωστόσο, περιορισμένης εφαρμογής και στον, κατά πολύ, μεγαλύτερο αριθμό βιομηχανικών εφαρμογών, τα κονιοποιημένα υλικά παρασκευάζονται με τη **μείωση** (reduction), σε κάποια μορφή μύλου (mill), **του μεγέθους κόκκων του υλικού** που έχει αρχικό μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται στο τελικό προϊόν. Αυτές οι διαδικασίες για τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων ενός κοκκώδους υλικού είναι γνωστές ως **«κονιορτοποίηση» (milling) ή «άλεση» (grinding)** και φαίνεται ότι αυτά τα ονόματα χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, δεν υπάρχει αποδεκτή τεχνική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016).

Η άλεση συνήθως εκτελείται σε περιστρεφόμενα κυλινδρικά δοχεία από χάλυβα βαρέως τύπου είτε σε ξηρή μορφή είτε ως εναιώρημα στο νερό. Τα χαλαρά προϊόντα του θραυστήρα πέφτουν ελεύθερα μέσα στον περιστρεφόμενο μύλο παρουσία αναδευόμενου μέσου άλεσης. Η άλεση πραγματοποιείται από διάφορους μηχανισμούς, όπως ο συνδυασμός πρόσκρουσης ή συμπίεσης λόγω δυνάμεων που ασκούνται σχεδόν κανονικά στην επιφάνεια των σωματιδίων, σπάσιμο λόγω γωνιακών δυνάμεων και τριβής λόγω δυνάμεων που δρουν παράλληλα προς τις επιφάνειες. Η άλεση μέσα σε έναν μύλο επηρεάζεται από το μέγεθος, την ποσότητα, τον τύπο κίνησης και το διάστημα μεταξύ των μεμονωμένων κομματιών του μέσου εντός του μύλου. Οι πρωταρχικές διαφορές μεταξύ αυτών των μύλων είναι στην αναλογία διαμέτρου προς το μήκος του κυλίνδρου και στον τύπο του χρησιμοποιούμενου

μέσου άλεσης. Τα μέσα άλεσης μπορεί να είναι χαλύβδινες μπάλες, χαλύβδινες ράβδοι, σκληρά βράχια ή το ίδιο το μέταλλευμα και έτσι ο μύλος ταξινομείται ανάλογα. Ο μύλος άλεσης μειώνει τα σωματίδια τροφοδοσίας 5-20 mm στο βέλτιστο αποδεσμευμένο μέγεθος μεταξύ 40 και 300 mm, όπως απαιτείται για ωφέλεια (Haldar, 2013).

Οι λόγοι για την άλεση βιομηχανικών υλικών είναι πολυάριθμοι, αλλά οι κύριοι λόγοι μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες επικεφαλίδες (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016):

- Η αποδέσμευση ενός οικονομικά σημαντικού υλικού από τα μη απαιτούμενα συστατικά ενός μείγματος.
- Η έκθεση μιας μεγάλης επιφάνειας ανά μονάδα μάζας υλικού προκειμένου να διευκολυνθεί κάποια χημική διαδικασία.
- Η μείωση του υλικού στην επιθυμητή μορφή του τελικού προϊόντος.
- Η ικανοποίηση των απαιτήσεων της αγοράς.

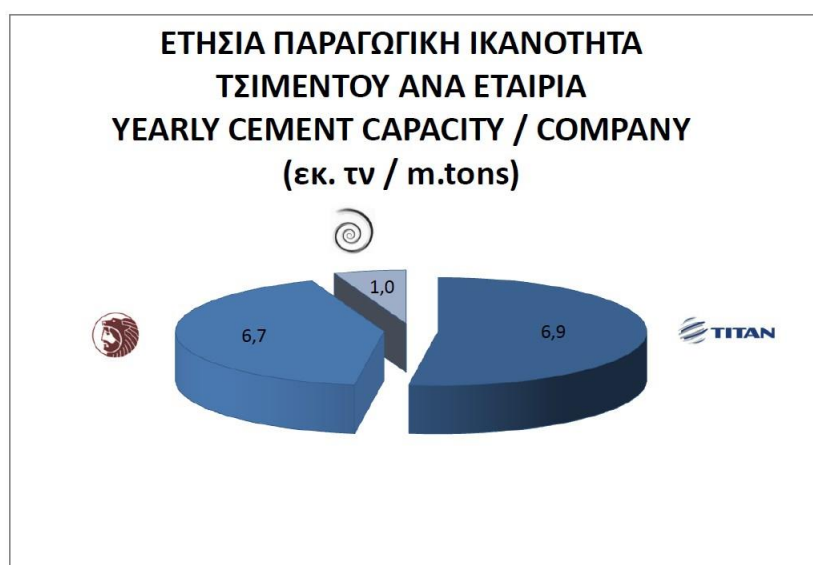
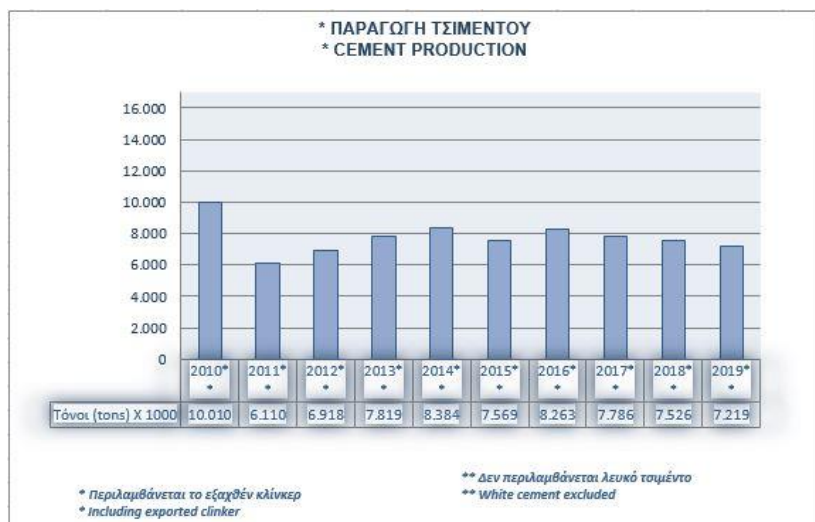
Παραδείγματα των δύο πρώτων επικεφαλίδων εμφανίζονται στην επεξεργασία ορυκτών (mineral dressing) (Wikipedia, 2021), όπου η μείωση του μεγέθους χρησιμοποιείται για την αποδέσμευση του επιθυμητού μεταλλεύματος από το μη επιθυμητό υλικό (gangue) και επίσης για τη μείωση του μεταλλεύματος σε μια μορφή, στην οποία παρουσιάζει μια μεγάλη επιφάνεια στα αντιδραστήρια διήθησης (leaching reagents).

Στην τρίτη επικεφαλίδα μπορούν να ταξινομηθούν πολλά φάρμακα και φαρμακευτικά προϊόντα, τρόφιμα, λιπάσματα, εντομοκτόνα κ.λπ. Η τέταρτη επικεφαλίδα αναφέρεται κι αυτή στη μείωση του μεγέθους των μεταλλευμάτων. Στην περίπτωση, όμως, αυτή, τα υλικά μειώνονται σε σωματίδια μέτριου μεγέθους για ευκολία στο χειρισμό, την αποθήκευση και τη φόρτωση σε φορτηγά και στα αμπάρια πλοίων.



Εικόνα 11 Βιομηχανικός Μύλος Άλεσης (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016)

Η ποσότητα πούδρας που θα υποβληθεί σε τέτοιες διαδικασίες μείωσης μεγέθους ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τις βιομηχανίες που εμπλέκονται, για παράδειγμα στις φαρμακευτικές βιομηχανίες οι ποσότητες που εμπλέκονται ετησίως μπορούν να μετρηθούν σε λίγους τόνους ή στην περίπτωση ορισμένων φαρμάκων, πιθανώς μερικά κιλά. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στη βιομηχανία τσιμέντου οι σχετικές ποσότητες ανέρχονται σε δεκάδες εκατομμύρια τόνους. Η ετήσια παραγωγική δυναμικότητα των ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου ανέρχεται σε 16 εκατ. τόνους περίπου (orykta.gr, n.d.).



Εικόνα 12 Ετήσια παραγωγική ικανότητα ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (<http://www.hcia.gr/el/statistical-elements/production/>)

Για την παρασκευή μικρών ποσοτήτων πούδρας διατίθενται πολλοί τύποι μύλων, αλλά, παρά όλα αυτά, χρησιμοποιείται ο σφαιρόμυλος (ball mill). Ωστόσο, για τη άλεση μεγαλύτερων ποσοτήτων υλικού, ο σφαιρόμυλος (ball mill), ο μύλος σωλήνας (tube mill) (Michaud, Tube Mills, 2016) ή ο μύλος ράβδων (rod mill) χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά, καθώς αυτοί είναι οι μόνοι τύποι μύλων που διαθέτουν ικανότητα απόδοσης (throughput capacity) του απαιτούμενου μεγέθους. Έτσι, εξηγείται το εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών, και η μεγάλη βιομηχανική σημασία των κονιοροτοποιητών. Οι δυο αυτοί λόγοι αποτελούν και την αιτιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Οι πιο συνήθεις, λοιπόν, τύποι μύλων άλεσης φαίνεται να είναι:

- Σφαιρόμυλος (Ball Mills).
- Μύλοι σωλήνων (Tube Mills).
- Μύλοι ράβδων (Rod Mills).
- Μύλοι με βότσαλα (Pebble Mills) (Michaud, Pebble Mill Grinding, 2016)
- Αυτογενής Μύλος (Autogenous mill)
- Ημι-αυτογενής Μύλος (Semi-autogenous mill)

**Σφαιρόμυλος (Ball Mill):** Ο όρος «σφαιρόμυλος» εφαρμόζεται συνήθως σε ένα κυλινδρικό δοχείο, στο οποίο τα μέσα άλεσης είναι σώματα σφαιρικής μορφής («σφαίρες» (balls)) από χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή χυτοσιδήρου. Το μέγεθος σωματιδίων της

τροφοδοσίας συνήθως δεν υπερβαίνει τα 20-25 mm. Η άλεση προκαλείται από τις μπάλες που κινούνται προς τα πάνω στην πλευρά του μύλου με τέτοιο τρόπο ώστε να απελευθερώνονται και να πέφτουν στο σημείο όπου προσκρούουν τα σωματίδια μεταλλεύματος στην πίσω περιοχή του πολτού. Οι σφαιρόμυλοι λειτουργούν με υψηλή ταχύτητα, έτσι ώστε οι μπάλες να μπορούν να ρίχνονται προς τα πάνω και να επιστρέφουν στον άλλο τοίχο με αυξημένη ταχύτητα χτυπήματος των σωματιδίων μεταλλεύματος. Είναι κατάλληλοι για λεπτότερη άλεση σκληρούς και χονδροειδούς προϊόντος εισόδου (feed) και πιο ιδανικοί για άλεση βασικών μετάλλων, φωσφορικών και λειτουργούν σε στενό κύκλωμα με τα κελιά επίπλευσης (Halдар, 2013).



Εικόνα 13 Εξωτερικό, εσωτερικό και μέσα άλεσης σφαιρόμυλου (Mining Mill Operator Training, n.d.)

Το μήκος ενός σφαιρόμυλου είναι της ίδιας τάξης με τη διάμετρο του σώματος του μύλου. Για παράδειγμα, το μήκος τους είναι μία έως τρεις φορές η διάμετρος του μύλου (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016). Τυπικά η αναλογία του μήκος του κελύφους προς τη διάμετρο του είναι μιάνιση (1,5) προς ένα (1) και μικρότερη (Halдар, 2013). Όταν ο λόγος του μήκους του τυμπάνου προς τη διάμετρό του κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5, τότε αναφερόμαστε σε ένα διαφορετικό τύπο μύλου, τον μύλο σωλήνα (tube mill) που αναφέρεται παρακάτω (<https://www.youtube.com/watch?v=aVQ9B3LtCPk>).

Υπάρχει ακόμα μια κατηγοριοποίηση της άλεσης του εν λόγω τύπου μύλου αναλόγως με το μέγεθος των σωματιδίων που προκύπτουν από την άλεση, όπως αναφέρονται παρακάτω (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016):

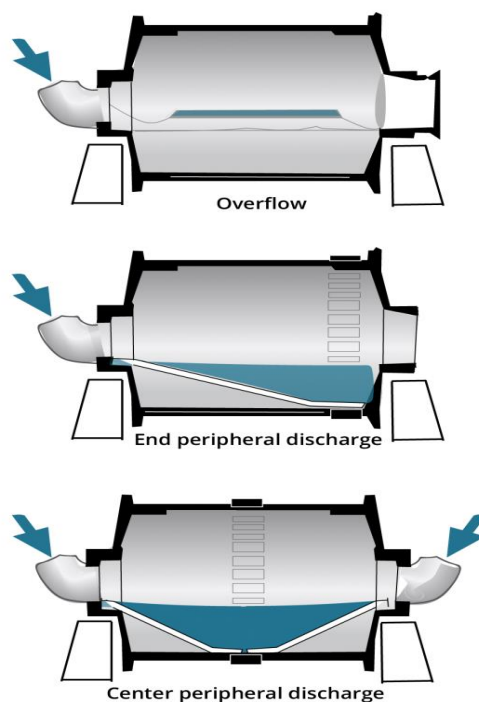
- Coarse Grind όταν προκύπτουν από τον σφαιρόμυλο μεγάλα μεγέθη σωματιδίων (large particle sizes), και
- Fine Grind όταν προκύπτουν από τον σφαιρόμυλο μικρά μεγέθη σωματιδίων (small particle sizes).

**Μύλος σωλήνας (Tube Mill):** Ο «μύλος σωλήνας» είναι ένας μύλος στον οποίο τα σώματα άλεσης είναι σφαιρικά, αλλά το μήκος του σώματος του είναι μεγαλύτερο σε αναλογία με τη διάμετρο από ότι στην περίπτωση του σφαιρόμυλου. Στην πραγματικότητα ο λόγος μήκους προς διάμετρο είναι συχνά της τάξης του δέκα (10) προς ένα (1).

**Ραβδόμυλος (Rod Mill):** Ο «ραβδόμυλος» είναι ένα μακρύ κυλινδρικό δοχείο, παρόμοιο με τον σφαιρόμυλο, στον οποίο όμως το μέσο θραύσης είναι χαλύβδινες ράβδοι αντί για σφαίρες. Το μήκος του κελύφους κυμαίνεται από 1,5 έως 2,5 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του. Το περιστρεφόμενο τύμπανο προκαλεί τριβή και φθορά μεταξύ των χαλύβδινων ράβδων και των σωματιδίων του μεταλλεύματος. Καθώς ο μύλος περιστρέφεται, οι ράβδοι κινούνται μεταξύ τους σε σχετικά παράλληλο τρόπο και αυτό αποτρέπει την υπερβολική άλεση μαλακών σωματιδίων. Η απόρριψη του προϊόντος γίνεται είτε μέσω κεντρικού (center peripheral) ή γωνιακού περιφερειακού (end peripheral) τύπου ή υπερχειλίσης (overflow) (Εικόνα 14). Οι ραβδόμυλοι μπορούν να πάρουν σωματίδια εισόδου τόσο χονδροειδή όσο 50 mm για να παράγουν τόσο λεπτόκοκκο όσο 300 μm. Οι ραβδόμυλοι είναι κατάλληλοι για την προετοιμασία της τροφοδοσίας σε βαρυτική και μαγνητική συγκέντρωση.



Εικόνα 14 Ραβδόμυλοι σε λειτουργία (Mining Mill Operator Training, n.d.)



Εικόνα 15 Διάγραμμα τύπων ραβδόμυλων (Mining Mill Operator Training, χ.χ.)

Ο συγκεκριμένος τύπος μύλου κατατάσσεται μάλιστα στους δευτερογενείς μύλους (secondary mills), αφού “τροφοδοτείται” από άλλους κονιορτοποιητές (grinders). (<https://www.youtube.com/watch?v=aVQ9B3LtCPk>). Οι πρωτογενείς μύλοι (primary mills) “τροφοδοτούνται” από θραυστήρες (crushers), όπως είναι ένας θραυστήρας σιαγόνων.

**Μύλος με βότσαλα (Pebble Mill):** Ο «μύλος με βότσαλα» είναι το όνομα που σχετίζεται με έναν μύλο, στον οποίο τα σώματα άλεσης είναι φυσικά βότσαλα ή πιθανώς κεραμικά σώματα. Ο τύπος αυτού του μύλου είναι παρόμοιος με τον σφαιρόμυλο, όπως και οι γενικές αναλογίες του. Αν αντικαταστήσουμε τις χαλύβδινες μπάλες με σκληρά βότσαλα, τότε έχουμε έναν μύλο με βότσαλα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαφοροποίηση μεταξύ του σφαιρόμυλου και του μύλου σωλήνα προκύπτει μόνο από τις διαφορετικές αναλογίες μήκους προς διάμετρο που εμπλέκονται και όχι από οποιαδήποτε διαφορά στις θεμελιώδεις αρχές. Ο ραβδόμυλος, ωστόσο, διαφέρει καταρχήν στο ότι τα σώματα άλεσης είναι ράβδοι αντί σφαιρών, ενώ ο μύλος με βότσαλα είναι μύλος σφαιρών, στον οποίο τα σώματα άλεσης είναι από φυσική πέτρα ή από κεραμικό υλικό.



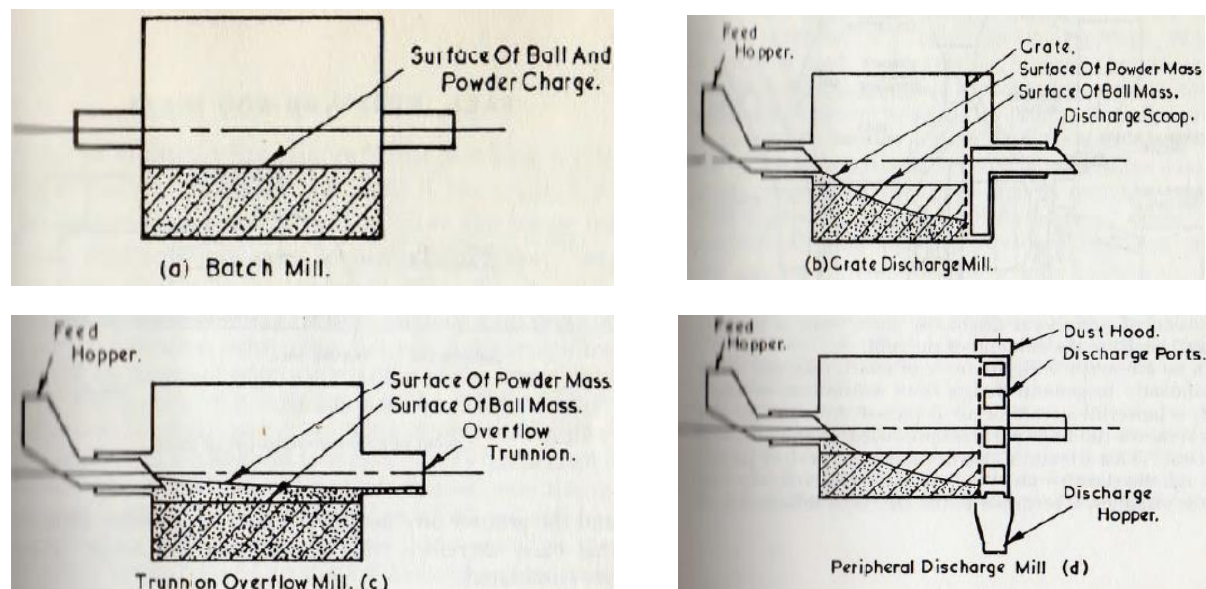
**Αυτογενής μύλος:** Οι αυτογενείς μύλοι (AG) κονιορτοποιούν λόγω της αυτό-άλεσης (self grinding) του μετάλλου χωρίς κανένα πρόσθετο μέσο θραύσης. Το τύμπανο είναι τυπικά μεγάλης διαμέτρου ως προς το μήκος του, γενικά, σε αναλογία δύο (2) ή δυόμιση (2,5) προς ένα (1). Το περιστρεφόμενο τύμπανο ρίχνει μεγαλύτερα σωματίδια μεταλλεύματος σε μια διαδοχική κίνηση που προκαλεί θραύση κρούσης μεγαλύτερης και συμπιεστικής άλεσης περισσότερο λεπτόκοκκου μεγέθους. Λειτουργεί επίσης και με χαμηλότερο κόστος. Οι AG συχνά ενσωματώνονται σε μεγάλες εργασίες επεξεργασίας ορυκτών. Ωστόσο, εάν η σκληρότητα και η λειαντικότητα (abrasiveness) του μεταλλεύματος ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, τότε μπορεί να οδηγήσει σε ασυνεπή απόδοση άλεσης.

**Ημι-αυτογενής μύλος:** Οι ημι-αυτογενείς μύλοι (SAG) είναι ουσιαστικά παραλλαγή των AG με προσθήκη χαλύβδινων σφαιρών μαζί με τα φυσικά μέσα άλεσης διορθώνοντας το πρόβλημα της ασυνέπειας στην άλεση. Η συνολική ποσότητα σφαιρών σε αυτούς τους μύλους κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15% του όγκου. Πολλά από τα σημερινά εργοστάσια εγκαθιστούν μύλους SAG ως κύριες ή πρώτες φάσεις άλεσης σε συνδυασμό με σφαιρόμυλους, κάτι που μειώνει το κόστος των μέσων και την αντικατάσταση των ράβδων. Το κόστος συντήρησης είναι γενικά χαμηλό. Οι μύλοι SAG χρησιμοποιούνται κυρίως στις βιομηχανίες χρυσού, χαλκού, πλατίνας, μολύβδου, ψευδαργύρου, αργύρου, αλουμίνιας και νικελίου.

Οι τύποι μύλων που συναντώνται συνήθως μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σύμφωνα με τη μέθοδο τροφοδοσίας της πρώτης ύλης και την απομάκρυνση του τελικού προϊόντος από τον μύλο. Αυτές οι κατηγορίες είναι (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016):

- a) Μύλοι παρτίδας (Batch Mills).
- b) Μύλοι εκκένωσης κιγκλιδώματος (Grate Discharge Mills).
- c) Μύλοι υπερχείλισης άκρου (Trunnion Overflow Mills).
- d) Μύλοι περιφερειακής εκκένωσης (Peripheral Discharge Mills).

Οι αρχές αυτών των μύλων απεικονίζονται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16 Οι αρχές λειτουργίας των μύλων (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016)

**Μύλος παρτίδας (Batch Mill):** Όπως υποδηλώνει το όνομα, στους μύλους παρτίδας το φορτίο της πούδρας που πρόκειται να αλεσθεί φορτώνεται στον μύλο σε παρτίδα και, αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία άλεσης, αφαιρείται σε παρτίδα. Είναι σαφές ότι ένας τέτοιος τρόπος λειτουργίας μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μύλους μικρού ή μέτριου μεγέθους. Για παράδειγμα, σε μύλους με διάμετρο έως περίπου 7 πόδια με μήκος περίπου 7 πόδια.

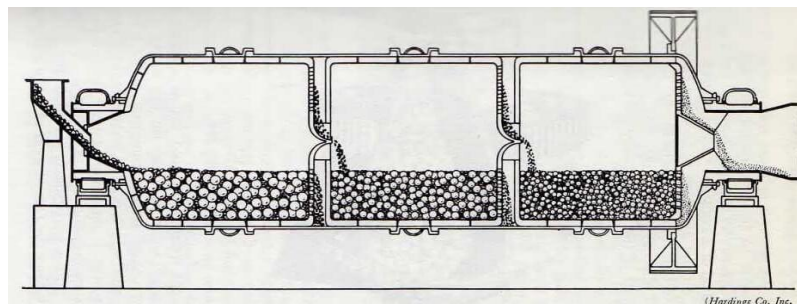
Στους τρεις άλλους τύπους μύλου υπάρχει συνεχής παροχή και αφαίρεση της πούδρας. Αυτές οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε μύλους μεγαλύτερων μεγεθών.

**Μύλος εκκένωσης κιγκλιδώματος (Grate Discharge Mill):** Στον μύλο εκκένωσης κιγκλιδώματος, ένα διάφραγμα με τη μορφή μιας σχάρας (grating) περιορίζει το φορτίο σφαιρών στο ένα άκρο του μύλου και ο χώρος μεταξύ του διαφράγματος και του άλλου άκρου του μύλου στεγάζει μια σέσουλα (scoop) για την αφαίρεση του αλεσμένου υλικού. Η πρώτη ύλη τροφοδοτείται μέσω κοίλου στρογγυλού άκρου (hollow trunnion) στην είσοδο του μύλου και κατά τη διάρκεια της άλεσης „διασχίζει“ το φορτίο των σφαιρών, μετά το οποίο περνά μέσα από το κιγκλιδώμα, παραλαμβάνεται και αφαιρείται με τη σέσουλα εκφόρτισης ή εκκενώνεται μέσω περιφερειακών θυρών (peripheral ports). Σε αυτό το πλαίσιο, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι μερικές φορές Οι σέσουλες αναφέρονται ως «ανυψωτικά» (lifters) στη βιβλιογραφία.

**Μύλος υπερχείλισης άκρου (Trunnion Overflow Mills):** Στον μύλο υπερχείλισης άκρου, η πρώτη ύλη τροφοδοτείται μέσω ενός κοίλου στρογγυλού άκρου στο ένα άκρο του μύλου και στο άλλο άκρο πραγματοποιείται „υπερχείλιση“ του αλεσμένου προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση, επομένως, η σέσουλα κιγκλιδώματος και εκφόρτωσης εξαλείφεται.

**Μύλοι περιφερειακής εκκένωσης (Peripheral Discharge Mills):** Μια παραλλαγή του μύλου εκκένωσης κιγκλιδώματος φαίνεται στο Σχ. 1.4d, στην οποία η σέσουλα εκκένωσης εξαλείφεται με την παροχή περιφερειακών θυρίδων εκκένωσης, με κατάλληλη κουκούλα "σκόνης", στο άκρο εξόδου του μύλου.

**Μύλοι Ανεμογεννήτριες (Air-Swept Mills):** Στις κατηγορίες των μύλων που απαριθμούνται παραπάνω υπάρχουν διάφορες παραλλαγές. Για παράδειγμα, υπάρχουν μύλοι στους οποίους το κέλυφος (shell) χωρίζεται σε έναν αριθμό θαλάμων (chambers) με διάτρητα διαφράγματα και η μέση διάμετρος των σφαιρών στους διάφορους θαλάμους μειώνεται προς το άκρο εκροής του μύλου. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 17. Ο λόγος για αυτήν την κατανομή του μεγέθους των σφαιρών είναι ότι, για βέλτιστες συνθήκες άλεσης, η αναλογία της διαμέτρου της σφαίρας προς τη διάμετρο των σωματιδίων πρέπει να είναι περίπου σταθερή. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μικρότερες μπάλες για τα μεταγενέστερα στάδια της διαδικασίας άλεσης, όπου η πούδρα είναι λεπτότερη (finer), και με την υιοθέτηση ενός αριθμού θαλάμων σε καθέναν από τους οποίους η μέση διάμετρος της σφαίρας επιλέγεται κατάλληλα γίνεται μια προσέγγιση προς την επιθυμητή σταθερότητα στην αναλογία του μεγέθους της μπάλας προς το μέγεθος των σωματιδίων.

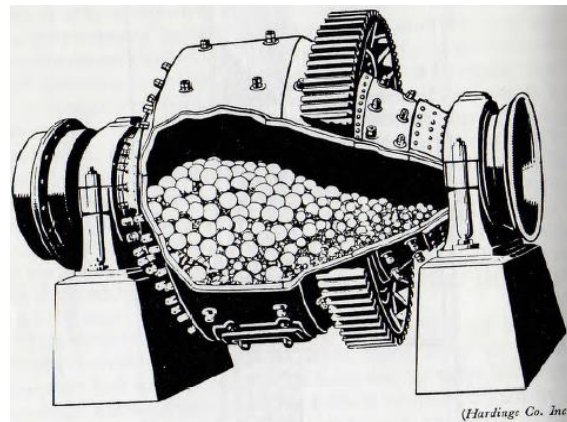


Εικόνα 17 Μύλος Σωληνών τριών διαμερισμάτων (Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016)

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ένας μύλος, στον οποίο ο διαχωρισμός των σφαιρών επιτυγχάνεται με μια έξυπνη μέθοδο. Ειδικά, καθώς ο μύλος φέρει ένα ξεχωριστό όνομα, παρόλο που δεν εμπλέκονται αρχές που τον τοποθετούν εκτός της ταξινόμησης που δόθηκε προηγουμένως.

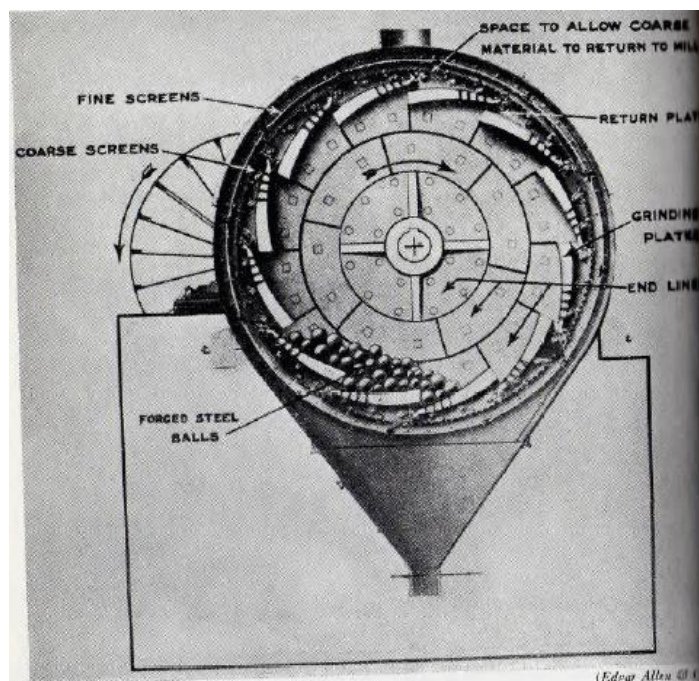
Ο **μύλος Hardinge** (Εικόνα 18) χρησιμοποιεί σφαίρες ως παράγοντα άλεσης (grinding agent), αλλά το σώμα έχει κυλινδρική κωνική μορφή και συνήθως έχει αναλογία μήκους προς διάμετρο ενδιάμεση μεταξύ εκείνων που σχετίζονται με τον μύλο σφαιρών και τον μύλο σωληνών. Ο λόγος για αυτή τη μορφή κατασκευής είναι ότι κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του μύλου, οι μεγαλύτερες μπάλες συσσωρεύονται στο μεγάλο άκρο του κώνου και οι μικρότερες μπάλες στο μικρό άκρο. Φυσικά, υπάρχει συνεχής διαβάθμιση μεγέθους κατά

μήκος του κώνου. Εάν τότε η πρώτη ύλη τροφοδοτείται στο μεγάλο άκρο του μύλου και το αλεσμένο προϊόν αφαιρείται από το μικρότερο άκρο, η πούδρα, κατά την εξέλιξή της μέσω του μύλου, αλέθεται από προοδευτικά μικρές μπάλες και κατά συνέπεια το θεωρητικό ιδανικό μιας σταθερής αναλογίας μεταξύ του μέγεθος της σφαίρας και του μεγέθους των σωματιδίων κατά τη άλεση επιτυγχάνεται, σε κάποιο βαθμό.



Εικόνα 18 Ο μύλος Hardinge (*Conical Ball Mills Benefits & Advantages: Hardinge, 2015*)

Ο τύπος μύλου σφαιρών που απεικονίζεται στην Εικόνα 19, ενσωματώνει μια περιφερειακή εκφόρτιση μέσω γραμμικών κοσκίνων (line screens) που επενδύουν το κυλινδρικό τμήμα του μύλου. Οι βαριές διάτρητες πλάκες (perforated plates) προστατεύουν τα κόσκινα (screens) από ζημιές και λειτουργούν ως επένδυση για την ανατροπή. Μερικές φορές επίσης το λεπτό κόσκινο (fine screen) προστατεύεται περαιτέρω από χονδροειδείς κόσκινα (coarse screens) τοποθετημένα απευθείας μέσα σε αυτό. Αυτός ο τύπος μύλου, ο οποίος είναι συχνά γνωστός ως **μύλος Krupp**, παρουσιάζει ενδιαφέρον αφού αντιπροσωπεύει έναν πολύ πρώιμο τύπο μύλου ο οποίος, με τροποποιήσεις, διατηρεί τη δημοτικότητά του. Ο μύλος Krupp είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για τη άλεση μαλακών υλικών, αφού ο ρυθμός φθοράς των διάτρητων επενδύσεων δεν είναι υπερβολικός.

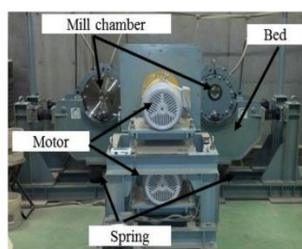


Εικόνα 19 Ο μύλος Krupp (*Michaud, Grinding Mills – Common Types, 2016*)

Ένας ακόμη ενδιαφέρον μύλος παρουσιάστηκε από τον (Takahashi, 2019). Ο ίδιος μαζί με άλλους ερευνητές σε προηγούμενη έρευνα τους (Takahashi, Ito, Enda, Ito, & Kobayashi,



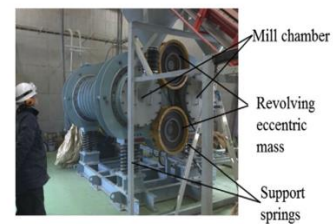
2010), (Takahashi, Ito, Enda, Ito, & Kobayashi, Research and Development of the Vibration Mill Using Cog-Ring Mediums for Improvement in Efficiency of Lignocellulosic Biomass Pulverization, 2012)) είχαν αναπτύξει έναν δονούμενο μύλο που χρησιμοποιεί μέσα οδοντωτών δακτυλίων (cog-ring) και ονομάζεται μύλος διαδοχικών δακτυλίων (tandem-ring mill). Οι ερευνητές είχαν αντικαταστήσει τις σφαίρες με οδοντωτούς δακτυλίους σε έναν συμβατικό δονούμενο μύλο για να επιτευχθεί κονιοποίηση υψηλής πρόσκρουσης με ικανότητα κονιοποίησης sub-kilogram scale με σκοπό την αποτελεσματική προεπεξεργασία λιγνοκυτταρινικής βιομάζας. Η απόδοση της κονιοποίησης αυξήθηκε με την αποθήκευση της πούδρας μέσα στους δακτυλίους και την παροχή του για κονιοποίηση. Ο μύλος διαδοχικών δακτυλίων μείωσε το χρόνο κονιοποίησης κατά ένα πέμπτο για να επιτύχει παρόμοια αποτελεσματικότητα σακχαροποίησης (Takahashi, Ito, Enda, Ito, & Kobayashi, Research and development of the vibration mill using cog-disk mediums for lignocellulosic biomass pulverization, 2010) με αυτή ενός συμβατικού μύλου δόνησης με σφαιρίδια (Ito, et al., 2007). Στην έρευνα του ο (Takahashi T. , 2019) συγκρίνει τα χαρακτηριστικά κονιοποίησης ιαπωνικού κέδρου σε τρεις μύλους (HV30, TR3000 και HV70).



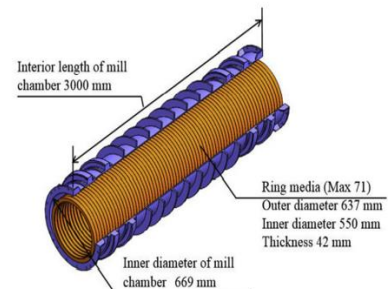
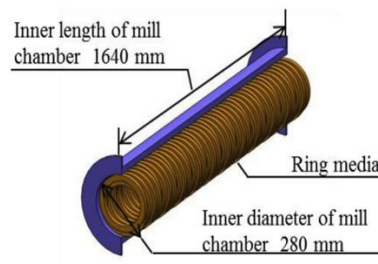
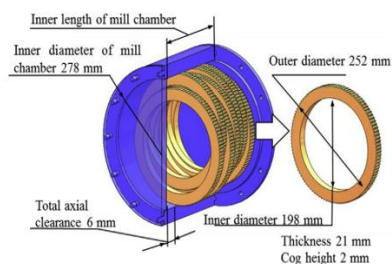
(a) HV30 type tandem-ring mill



(a) TR3000 type tandem-ring mill



(a) HV70 type tandem-ring mill



Εικόνα 20 Οι μύλοι tandem-ring και το εσωτερικό τους (Takahashi T. , 2019)

Ο ίδιος μύλος χρησιμοποιήθηκε μάλιστα και στην έρευνα των (Fu, et al., 2018). Ο στόχος αυτής της έρευνας ήταν να διερευνήσει τη σκοπιμότητα διεργασιών πιλοτικής κλίμακας για μηχανικές προεπεξεργασίες ως στρατηγική κονιοποίησης για τον μικρονισμό της ξυλώδους βιομάζας σε υποστρώματα υψηλής υδρόλυσης. Διαφορετικοί μηχανισμοί και πιο συγκεκριμένα ένας σφυρόμυλος, ένας περιστροφικός-κρουστικός μύλος και μύλος διαδοχικών δακτυλίων χρησιμοποιήθηκαν για να διασπάσουν τις λιγνοκυτταρινικές δομές και να μειώσουν το μέγεθος των σωματιδίων με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορετικών επιπέδων κατανάλωσης ενέργειας.

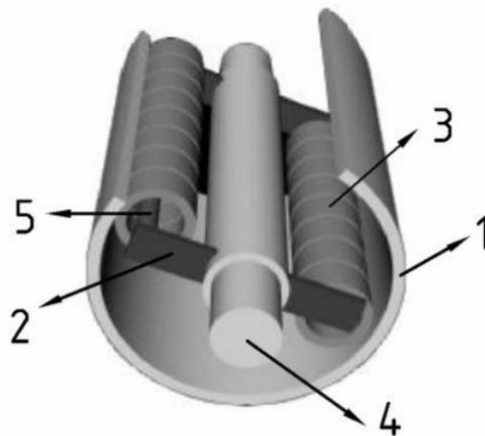
## 3 Ο πρότυπος ξηρός κονιορτοποιητής του ΕΜΠ

### 3.1 Γενικά

Ο πρωτότυπος ξηρός κονιορτοποιητής αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Μακρής & Φούντη, 1994), με στόχο την πρακτική κονιοποίηση βιομηχανικών ορυκτών και συσσωματωμάτων για βιομηχανικές χρήσεις. Είναι κατάλληλος για βιομηχανικές εφαρμογές (βιομηχανική παραγωγή λεπτών κόνεων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά πληρώσεως ή επικάλυψης, π.χ. στο χαρτί, στη βαφή, στον γύψο, στη φαρμακευτική βιομηχανία) και δοκιμές απόδοσης. Προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις κοινώς χρησιμοποιούμενες διεργασίες κονιορτοποίησης (comminution processes), ειδικά για λεπτή και υπέρλεπτη άλεση (milling) ορυκτών με το χαρακτηριστικό της υψηλής συγκέντρωσης ισχύος, ενώ σε μία βιομηχανική εγκατάσταση προορίζεται για εγκατάσταση στο τελευταίο στάδιο του κυκλώματος άλεσης.

Η πρωτοτυπία του έγκειται κυρίως στο ότι επιτρέπει την μεταβολή της αναλογίας των ορθών και διαμηθικών δυνάμεων που επενεργούν σε ένα σωματίδιο μέσω μεταβολής σχεδιαστικής παραμέτρου. Ο λόγος ρυθμίζεται σύμφωνα με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Στην περίπτωση μας, η αναλογία αυτή έχει ρυθμιστεί (Makris & Founti, 1996) στον μύλο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στις μηχανικές απαιτήσεις του προς κονιοποίηση υλικού. Αντί ενός μόνο κυλίνδρου ή σφαιρών, ο κονιορτοποιητής χρησιμοποιεί διάφορους δακτυλιοειδείς δακτυλίους, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη λείανση των λεπτότερων κλασμάτων του αρχικού υλικού. Το υλικό αλέθεται μέσω της συνδυασμένης δράσης κανονικών και διαμηθικών δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια του υλικού κυρίως από τα μεταλλικά μέρη του κονιορτοποιητή (στοιχεία άλεσης) και εν μέρει από τα γειτονικά σωματίδια. Λόγω της κατασκευής του τα στοιχεία άλεσης προσαρμόζονται αυτόματα στο μέγεθος των κόκκων του υλικού.

### 3.2 Περιγραφή και αρχές λειτουργίας

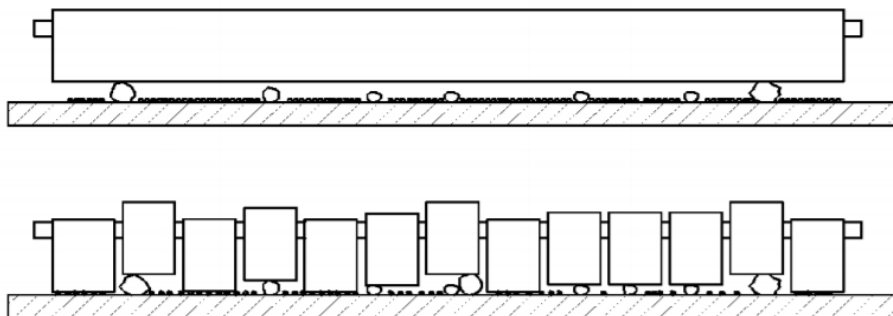


Εικόνα 21 Τα μέρη που απαρτίζουν το δακτυλιόμυλο

Ο πρότυπος μύλος αποτελείται από τον κύλινδρο ή κέλυφος (1) που αποτελεί το κύριο σώμα του και ο άξονας του κελύφους είναι οριζόντιος. Η οριζόντιά του διάταξη έχει ως αποτέλεσμα την ομαλή κατανομή του βάρους των δακτυλίων στις ράβδους. Μέσα στον κύλινδρο, ένα ορθογωνικό μεταλλικό πλαίσιο είναι τοποθετημένο κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου και είναι προσαρτημένο στον κύριο άξονα (4). Ο κύριος άξονας μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον κύριο άξονα με τη βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα είτε μέσω συστήματος μετάδοσης κίνησης (ιμαντοκίνηση, αλυσοκίνηση κλπ) είτε απευθείας. Το στροφείο αποτελείται από δύο βραχίονες (2) στους οποίους στερεώνονται 2 ράβδοι (5) κυκλικής διατομής. Σε κάθε ράβδο είναι περασμένος ένας αριθμός μεταλλικών δακτυλιοειδών δακτυλίων (3). Κάθε δακτύλιος επιτρέπεται να κινείται ελεύθερα κατά μήκος και γύρω από κάθε ράβδο (ακτινική μετακίνηση).

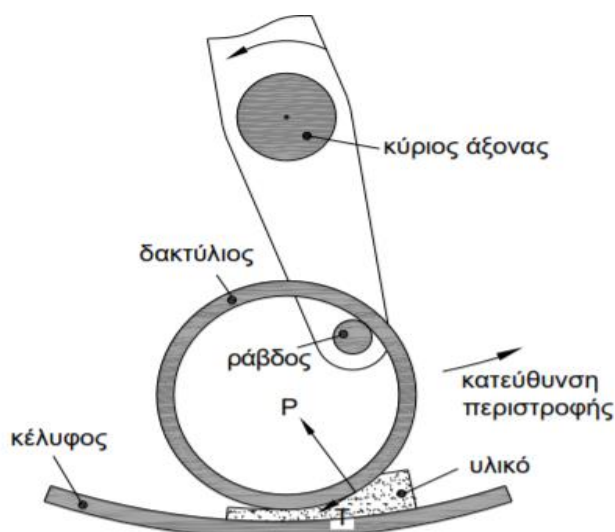
Το μήκος της ράβδου είναι κατά μερικά χιλιοστά μεγαλύτερο ώστε να επιτυγχάνεται η ανεξάρτητη κίνηση του κάθε δακτυλίου σε σχέση με τους γειτονικούς του. Τέλος υπάρχουν δύο πλευρικά καλύμματα (καθρέπτες) εκατέρωθεν του κελύφους τα οποία στεγανοποιούν το μύλο και πάνω στα οποία εδράζεται ο κύριος άξονας.

Η ύπαρξη των δακτυλίων με τη δυνατότητα ανεξάρτητης ακτινικής κίνησης παρουσιάζει πλεονέκτημα έναντι της ράβδου, καθώς προσαρμόζονται τα στοιχεία άλεσης στην κοκκομετρία της πρώτης ύλης επιτρέποντας την άλεση όλων των κοκκομετρικών κλασμάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Αν ο μύλος έφερε ένα στοιχείο άλεσης, θα θρυμματίζονταν μόνο τα μεγαλύτερα από τα κλάσματα της πρώτης ύλης, αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό το θρυμματισμό των λεπτότερων κλασμάτων. Η περίπτωση αυτή πρακτικά αντιστοιχεί σε ένα δακτύλιο. Η ύπαρξη πολλών δακτυλίων, επιτρέπει την προσαρμογή τους σε όλο το φάσμα κοκκομετρίας της πρώτης ύλης με αποτέλεσμα τον ταυτόχρονο θρυμματισμό τους.



Εικόνα 22 Προσαρμογή των δακτυλίων στα κοκκομετρικά κλάσματα της πρώτης ύλης

Οι δακτύλιοι, όπως αναφέρθηκε, μπορούν να κινηθούν ελεύθερα κατά τον άξονα και την ακτίνα. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής του πλαισίου, οι δακτύλιοι λόγω της φυγόκεντρης δύναμης πιέζουν την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου του μύλου ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής ανάμεσα στους δακτυλίους και την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι δακτύλιοι περιστρέφονται ελεύθερα γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους και ταυτόχρονα ολισθαίνουν κατά μήκος των βραχιόνων του πλαισίου και κυλινθών στην εσωτερική επιφάνεια του μύλου. Οι δακτύλιοι κυρίως ολισθαίνουν πάνω στο στρώμα του υλικού παρά κυλινθών. Το υλικό κονιοποιείται στο διάκενο ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια του μύλου και τους δακτυλίους. Επομένως, το υλικό βρίσκεται υπό την επίδραση ορθών και διατμητικών δυνάμεων συνδυάζοντας θραύση με εκτριβή.



Εικόνα 23 . Δακτύλιος κατά τη λειτουργία. Φαίνεται παραστατικά το υλικό που αλέθεται ανάμεσα στο δακτύλιο και το κέλυφος

### 3.3 Πλεονεκτήματα και Χαρακτηριστικά

Ο μύλος παρουσιάζει αξιόλογα πλεονεκτήματα συγκρινόμενος με τις συνήθεις μηχανές άλεσης ιδιαίτερα στην λεπτή και υπέρλεπτη άλεση βιομηχανικών ορυκτών. Η πρωτοπορία του μύλου έγκειται κυρίως στη δυνατότητα μεταβολής του λόγου των δυνάμεων συμπίεσης προς τις διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται κατά την κονιοποίηση. Ο λόγος ρυθμίζεται σύμφωνα με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Η χρήση δακτυλίων έναντι ράβδου, επιτρέπει την καλύτερη άλεση των λεπτότερων κλασμάτων του αρχικού υλικού. Ένα άλλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μύλου είναι το μικρό κόστος κατασκευής, το οποίο οφείλεται στο μικρό κόστος των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή του, τα οποία είναι τυπικά υλικά εμπορίου, καθώς επίσης και στην έλλειψη περίπλοκων μηχανουργικών κατεργασιών των διαφόρων εξαρτημάτων του. Τα διάφορα μέρη του μύλου κατασκευάζονται από τα εξής υλικά:

Κύλινδρος (κέλυφος):	χαλυβδοσωλήνα
Δακτύλιοι:	χαλυβδοσωλήνα
Ράβδοι:	άξονας
Πλαίσιο:	έλασμα

Οι κυριότερες μηχανουργικές κατεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μερών του μύλου είναι η κοπή με πριόνι για τον τεμαχισμό της ράβδου και την κατασκευή των δακτυλίων και η τόννευση για την κατεργασία του κελύφους, του άξονα και των ράβδων. Κατ' αυτήν την έννοια, ο μύλος παρουσιάζει μικρό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Όσον αφορά τη φθορά, παρουσιάζεται αυξημένη στις επιφάνειες των ράβδων που εφάπτονται με τους δακτυλίους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύπανση του προϊόντος με σίδηρο και οξειδία του σιδήρου. Αυτό δεν είναι επιθυμητό στην περίπτωση που το παραγόμενο υλικό χρησιμοποιείται σε κάποια κρίσιμη εφαρμογή π.χ. φαρμακοποιία, όπου τα ποσοστά σιδήρου ελέγχονται αυστηρά. Στην περίπτωση του ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) που χρησιμοποιείται στην παρασκευή ασπιρίνης το ποσοστό του σιδήρου δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 200 ppm σύμφωνα με τις προδιαγραφές που θέτει η ευρωπαϊκή φαρμακοποιία και το 0.05% για την αμερικάνικη φαρμακοποιία (Bolger, 1995)

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του παρόντος μύλου είναι η μεγάλη συγκέντρωση ισχύος που μπορεί να επιτύχει. Στον αναφερόμενο μύλο, όγκου ~ 60 L, μετρήθηκε μέγιστη ισχύς 14 kW που αντιστοιχεί σε ογκομετρική πυκνότητα ισχύος  $245 \text{ kW/m}^3$ . Οι συνήθεις τιμές μηχανικής ισχύος είναι 8 kW ήτοι  $140 \text{ kW/m}^3$ . Παρόμοιες τιμές έχουν μετρηθεί και σε μικρότερου μεγέθους δακτυλιόμυλους. Ένας σφαιρόμυλος, παραδείγματος χάριν, ίδιου μεγέθους καταναλώνει μηχανική ισχύ της τάξης των 200 W που αντιστοιχεί σε  $3.5 \text{ kW/m}^3$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο δακτυλιόμυλος μπορεί να παράγει πολλαπλάσιο προϊόν από ότι ένας σφαιρόμυλος ίδιου όγκου. Από συγκρίσεις που έχουν γίνει εκτιμάται ότι ο δακτυλιόμυλος έχει μέχρι 50 φορές μεγαλύτερη παραγωγή από ένα σφαιρόμυλο του ίδιου όγκου με ανάλογη όμως κατανάλωση ενέργειας.

Οι κύριες διαστάσεις του δακτυλιόμυλου, οι οποίες τον χαρακτηρίζουν, είναι οι εξής:

- διάμετρος κελύφους
- διάμετροι δακτυλίων (εσωτερικές και εξωτερικές)
- μήκος δακτυλίων (συνολικό)

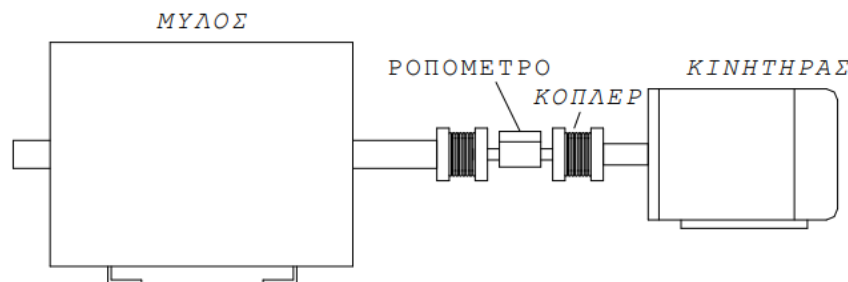
Από τις παραπάνω διαστάσεις προκύπτουν τα εξής μεγέθη:

- όγκος μύλου
- επιφάνεια μύλου

Η επιφάνεια του μύλου είναι η επιφάνεια που σαρώνουν οι δακτύλιοι. Ο κύλινδρος έχει μεγαλύτερο μήκος από τους δακτυλίους. Το ποσοστό του όγκου του μύλου που αντιστοιχεί στους δακτυλίους και στον οποίο πραγματοποιείται η άλεση είναι 85%.

### 3.4 Κίνηση μύλου

Η ευχερέστερη κινητήρια μηχανή του μύλου είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας αν και δύναται να χρησιμοποιηθούν και κινητήριες μηχανές άλλων τύπων π.χ. εσωτερικής καύσης. Εργαστηριακά έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία τριφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, οι οποίοι συνεργάζονται με μετατροπείς συχνότητας (frequency inverters) για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του μύλου. Η σύζευξη με τον κινητήρα μπορεί να γίνει είτε απευθείας στον άξονα του μύλου, είτε μέσω διάταξης μετάδοσης κίνησης, όπως ιμαντοκίνηση ή γραναζοκίνηση. Η δεύτερη περίπτωση προτιμάται στην πράξη καθώς επιτρέπει εκμετάλλευση της ροπής του ηλεκτρικού κινητήρα η οποία παρουσιάζεται σε υψηλές στροφές. Με τον τρόπο αυτό γίνεται επιτυχής συνδυασμός των σημείων λειτουργίας του μύλου και του κινητήρα. Η απευθείας ζεύξη χρησιμοποιείται εργαστηριακά για την προσαρμογή αισθητήρα ροπής (ροπόμετρου) ανάμεσα στους άξονες του μύλου και του κινητήρα για τη μέτρηση της μηχανικής ισχύος που απορροφά ο μύλος όπως φαίνεται στην Εικόνα. Επίσης, ο κινητήρας επιλέγεται σε συνδυασμό με τη σχέση μετάδοσης ώστε να επαρκεί η ροπή του στις επιθυμητές ταχύτητες λειτουργίας.



Εικόνα 24 Απευθείας σύζευξη του μύλου με τον κινητήρα. Φαίνεται το ροπόμετρο για τη μέτρηση ισχύος

### 3.5 Άλεση φορτίου

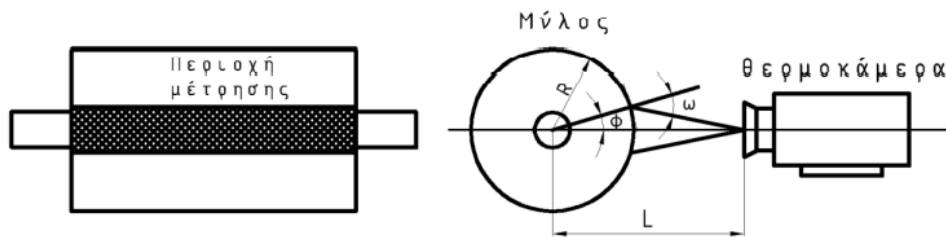
Αν και ο μύλος μπορεί να αλέσει με δύο τρόπους με άλεση καθορισμένης ποσότητας πρώτης ύλης (batch) για προκαθορισμένο χρόνο και άλεση με συνεχή ροή της πρώτης ύλης μέσα από το μύλο επιλέχθηκε η δεύτερη περίπτωση. Για την πραγματοποίηση άλεσης συνεχούς ροής, η πρώτη ύλη εισέρχεται μέσω κατάλληλης χοάνης τροφοδοσίας η οποία βρίσκεται στο επάνω μέρος του ενός πλευρικού καπακιού. Η τροφοδοσία μπορεί να γίνει π.χ. μέσω μεταφορικού κοχλία η έξοδος του οποίου είναι προσαρμοσμένη στον καθρέπτη του μύλου. Το υλικό αλέθεται και ταυτόχρονα πιεζόμενο από τους δακτυλίους ωθείται προς την άλλη πλευρά του μύλου στο καπάκι της οποίας στο κάτω μέρος υπάρχει η αντίστοιχη χοάνη εξαγωγής από την οποία παραλαμβάνεται το προϊόν.

Ο οριζόντιος δακτυλιόμυλος χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία για άλεση ξηρών υλικών. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι δεν έχει τη δυνατότητα να αλέσει υλικά σε υδαρή μορφή (εναιώρημα). Τα συγκεκριμένα πειράματα έγιναν με μείγμα ανθρακικού ασβεστίου και νερού σε διάφορες αναλογίες σε batch. Το μείγμα λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων εξωθείται προς τους καθρέπτες με αποτέλεσμα να μην αλέθεται.

### 3.6 Πειραματικά Δεδομένα

Στην διδακτορική διατριβή του (Ζαννής, 2008) για την διερεύνηση της κατανομής της μηχανικής ισχύος για συνεχή άλεση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ενέργειας θερμότητας των επιμέρους στοιχείων του μύλου κυρίως με τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε θερμογραφική κάμερα, με την οποία έγιναν οι μετρήσεις θερμοκρασίας στην επιφάνεια του μύλου. Για την ορθότητα μάλιστα των τιμών της θερμοκρασίας που μετράει η κάμερα ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  της επιφάνειας καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της θερμοκρασίας. Στην Εικόνα 25 παριστάνεται η σχηματική διάταξη της πειραματικής

εγκατάστασης. Η γωνία παρατήρησης σε συγκεκριμένο σημείο είναι η γωνία που περιέχεται ανάμεσα στην κάθετη στην επιφάνεια που διέρχεται από το σημείο και την ευθεία παρατήρησης από την κάμερα στο εξεταζόμενο σημείο. Στην Εικόνα 25 συμβολίζεται με  $\omega$ .



Εικόνα 25 Σχηματική διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης. Φαίνεται η περιοχή μέτρησης πάνω στην επιφάνεια του μύλου καθώς και η γωνία παρατήρησης

Η τιμή της γωνίας παρατήρησης εξαρτάται από την απόσταση της κάμερας από το κέντρο του μύλου  $L$ , την ακτίνα της εξωτερικής επιφάνειας  $R$  και τη γωνία  $\phi$  που αντιστοιχεί στο παρατηρούμενο σημείο. Ο τύπος που δίνει την τιμή της  $\omega$  είναι:

$$\omega = \alpha \sin \frac{L \sin \phi}{\sqrt{L^2 + R^2 - 2RL \cos \phi}}$$

Στην πραγματικότητα, η τιμή της  $\omega$  είναι μικρότερη από αυτήν που προκύπτει από την εξ. (28) αφού ο φακός της κάμερας δεν είναι σημείο. Στα πειράματα οι τιμές της γωνίας  $\phi$  επιλέγονται τέτοιες ώστε η γωνία πρόσπτωσης να κυμαίνεται στις  $\pm 15^\circ$ .

Για τη διερεύνηση, λοιπόν, της κατανομής μηχανικής ισχύος χρησιμοποιήθηκε ο δακτυλιόμυλος με τις εξής συνθήκες:

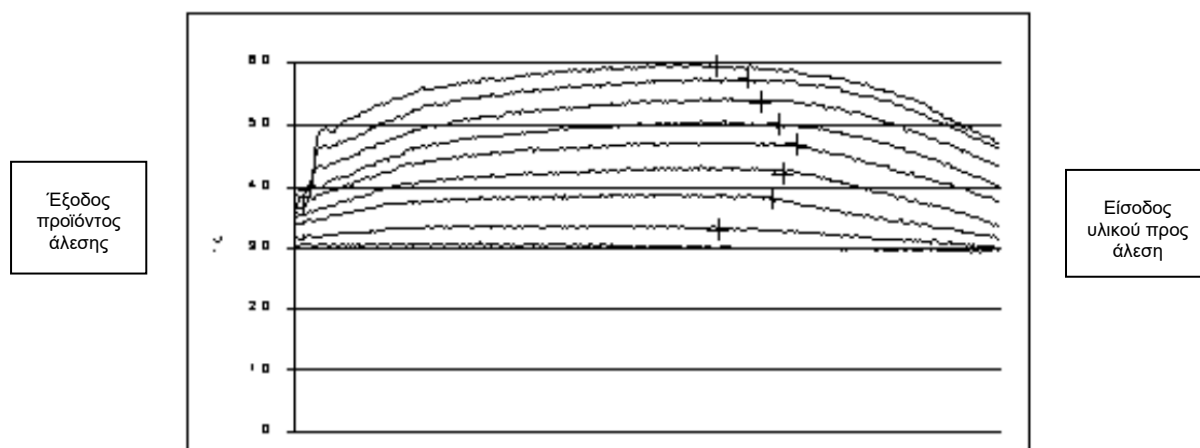
<b>Υλικό</b>	Ολιβίνης - 0,75mm
<b>Γωνιακή ταχύτητα</b>	800RPM
<b>Τροφοδοσία</b>	30kg/h
<b>Απόσταση μύλου -κάμερας</b>	2m
<b>Αρχική θερμοκρασία</b>	30°C
<b>Τελική θερμοκρασία</b>	62°C
<b>Διάρκεια</b>	270s (4.5min)

Πίνακας 1 Πειραματικές συνθήκες συνεχούς άλεσης

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασιών κατά μήκος του μύλου συναρτήσει του χρόνου. Ο άξονας των τεταγμένων είναι η θερμοκρασία σε °C. Η χρονική διαφορά κάθε καμπύλης από την επόμενη είναι 30 s. Από την κατανομή των θερμοκρασιών γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η κατανομή της θερμοκρασίας δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του μύλου όπως συμβαίνει στην άλεση batch. Τα σημεία (+) στις καμπύλες των θερμοκρασιών αντιστοιχούν στη μέγιστη θερμοκρασία, η οποία εμφανίζεται περίπου στο 1/3 του μύλου από την είσοδο. Δεδομένου ότι η ευθυγράμμιση του στροφείου σε σχέση με τον άξονα του κελύφους είναι μέσα στα προβλεπόμενα όρια, η ανομοιομορφία της κατανομής της θερμοκρασίας οφείλεται αποκλειστικά στο φαινόμενο της άλεσης. Στην Εικόνα 26 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στην είσοδο είναι χαμηλή καθώς η πρώτη ύλη που εισέρχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ψύχει το κέλυφος του μύλου. Εξετάζοντας προσεκτικά

τις καμπύλες παρατηρείται ότι το σημείο μέγιστης θερμοκρασίας μετακινείται προς τα αριστερά. Αυτό οφείλεται στην αγωγή της θερμότητας στο μεταλλικό κέλυφος.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το αρχικά χονδρόκοκκο υλικό ανθίσταται στην κίνηση των δακτυλίων προκαλώντας τη μέγιστη παραγωγή θερμότητας. Στη συνέχεια το λεπτοαλεσμένο υλικό δρα ως λιπαντικό ανάμεσα στους δακτυλίους και το κέλυφος όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Beke, 1964). Οι μικροί κόκκοι αποσβένουν με συμπεριφορά σπόγγου τις δυνάμεις από τους δακτυλίους αποτρέποντας την άλεση των μεγαλύτερων κόκκων με αποτέλεσμα τη μείωση της αλεστικότητας. Σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές μεταβολής μήκους προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο μύλος με την παρούσα διάταξη ολοκληρώνει την άλεση του υλικού πριν τη μέση του μύλου. Αυτό δε σημαίνει ότι η άλεση σταματάει αλλά ότι ο ρυθμός θραύσης μειώνεται. Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του μήκους του μύλου για την εύρεση του βέλτιστου μήκους άλεσης.



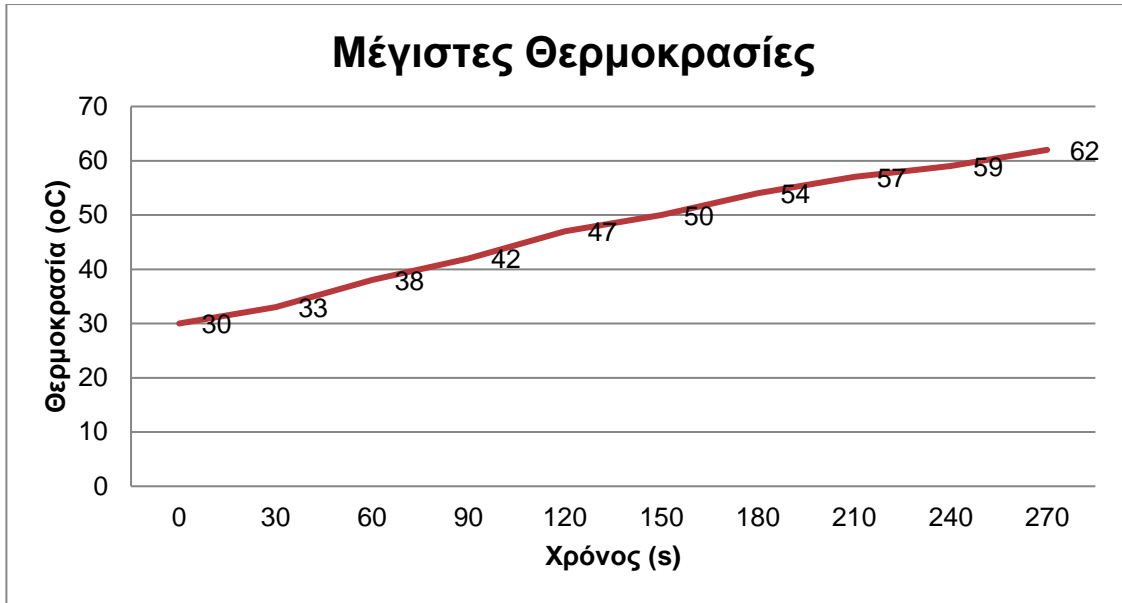
Εικόνα 26 Κατανομή θερμοκρασιών κατά μήκος του μύλου συναρτήσει του χρόνου

### 3.7 Ανάλυση δεδομένων

Οι μέγιστες θερμοκρασίες που παρατηρούνται στην Εικόνα 26 βρέθηκαν και συνοψίστηκαν στον Πίνακα 2 και αποτυπώθηκαν σε διάγραμμα συναρτήσει του χρόνου στην Εικόνα 27.

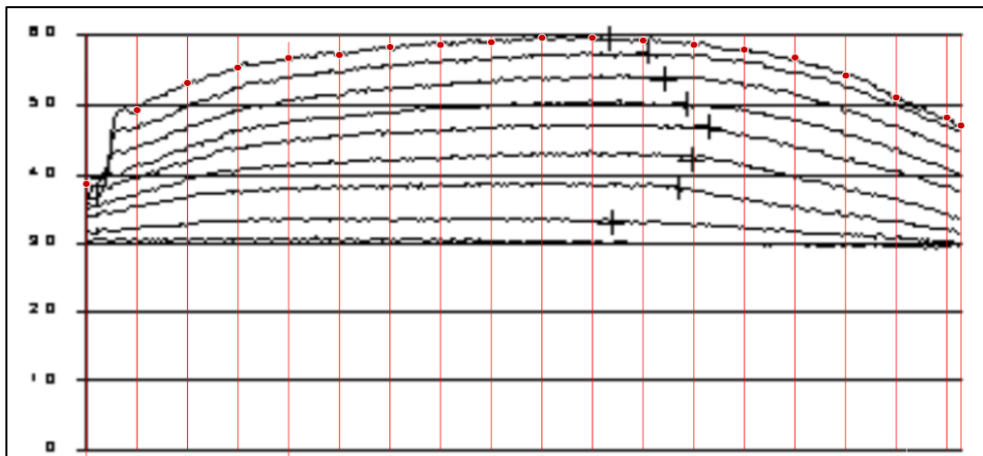
Χρόνος (s)	Θερμοκρασία (°C)
0	30
30	33
60	38
90	42
120	47
150	50
180	54
210	57
240	59
270	62

Πίνακας 2 Μέγιστες Θερμοκρασίες στην Εικόνας 26



*Εικόνα 27 Μέγιστες πειραματικές θερμοκρασίες*

Πέραν των μέγιστων θερμοκρασιών που παρατηρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία έγινε ψηφιοποίηση των θερμοκρασιών σε 19 σημεία κατά το μήκος του μύλου στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, δηλαδή μετά από 30s, 60s, 90s, κτλ. Παραδείγματος χάριν, οι θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή 240s που εμφανίζονται στο διάγραμμα με κόκκινα bullets παρουσιάζονται παρακάτω και οι τιμές αυτών έχουν καταχωρηθεί στον Πίνακα 3.



*Εικόνα 28 Οι θερμοκρασίες τη χρονική στιγμή 240s*

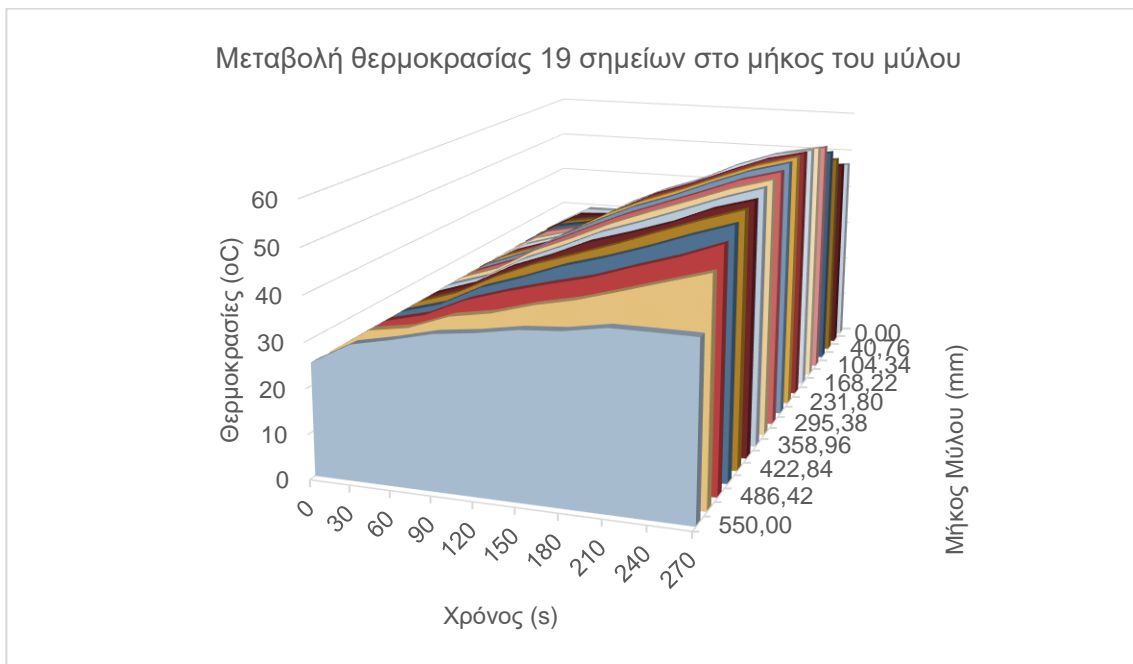
Μήκος (mm)	Θερμοκρασία(°C)
550	38,44
518,0586	49,06
486,4215	52,98
454,7843	55,19
422,8429	56,59
390,9015	57,03
358,9602	58,17
327,323	58,48
295,3816	58,86
263,4403	59,49

231,8031	59,49
199,8617	59,11
167,9204	58,48
136,2832	57,79
104,3418	56,65
72,40044	54,06
40,76327	50,90
8,821903	47,99
1,14E-13	46,85

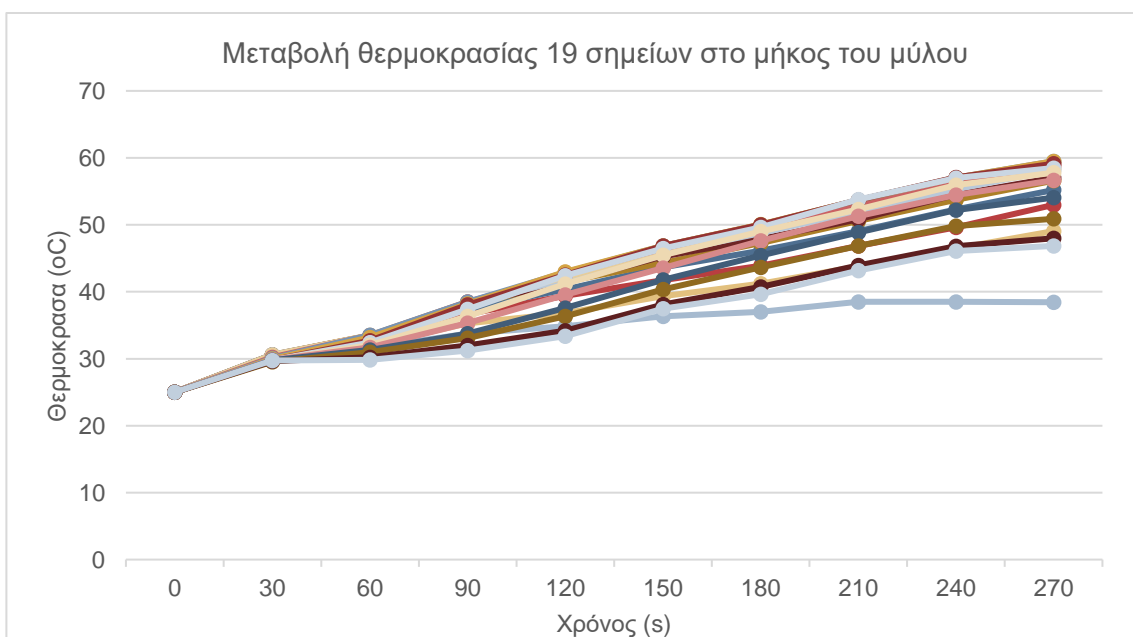
*Πίνακας 3 Οι θερμοκρασίες κατά μήκος του κελύφους τη χρονική στιγμή 240s*



Παρακάτω εμφανίζονται κι άλλα διαγράμματα που αφορούν το θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος του κελύφους.



Εικόνα 29 Μεταβολή θερμοκρασίας 19 σημείων στο μήκος του μύλου (3 άξονες)



Εικόνα 30 Μεταβολή θερμοκρασίας 19 σημείων στο μήκος του μύλου

Μάλιστα από το παραπάνω γράφημα θεωρώντας γραμμική παρεμβολή της θερμοκρασίας στο χρόνο προέκυψαν οι εξής συναρτήσεις των 19 σημείων του μήκους του κελύφους. Οι συναρτήσεις αυτές προστέθηκαν στη συνέχεια της εργασίας στην ανάλυση του χιτωνίου στο Ansys.

A/A	Συναρτήσεις
1	$y = 1,3799x + 26,788$
2	$y = 2,4674x + 24,386$
3	$y = 2,9107x + 23,926$
4	$y = 3,2349x + 23,471$
5	$y = 3,4123x + 23,323$
6	$y = 3,492x + 23,201$
7	$y = 3,6372x + 22,889$
8	$y = 3,7093x + 22,847$
9	$y = 3,7825x + 22,628$
10	$y = 3,8687x + 22,426$

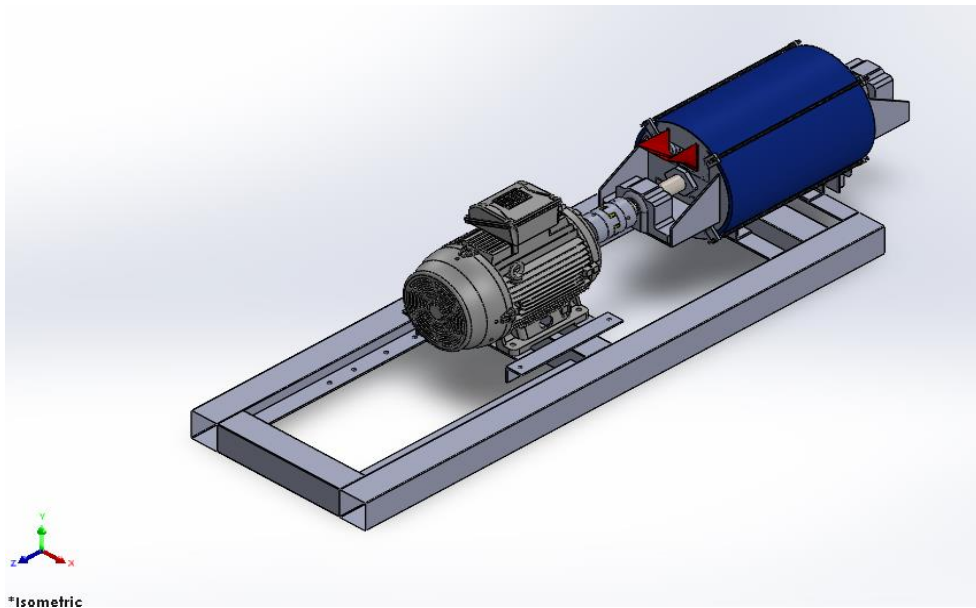
11	$y = 3,8897x + 22,253$
12	$y = 3,8993x + 22,03$
13	$y = 3,8748x + 21,924$
14	$y = 3,7679x + 21,76$
15	$y = 3,6112x + 21,629$
16	$y = 3,3069x + 21,785$
17	$y = 2,9705x + 22,308$
18	$y = 2,5789x + 22,679$
19	$y = 2,4685x + 22,666$

Πίνακας 4 Συναρτήσεις της μεταβολής θερμοκρασίας των σημείων πάνω στο κέλυφος θεωρώντας γραμμική παρεμβολή

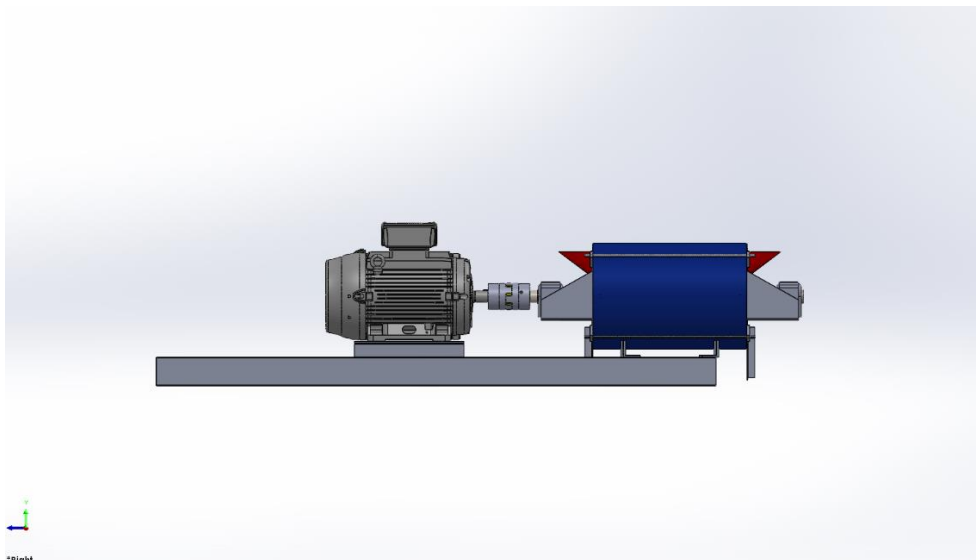
## 4 Τρισδιάστατη αποτύπωση στο Solidworks

### 4.1 3D-αποτύπωση του μύλου

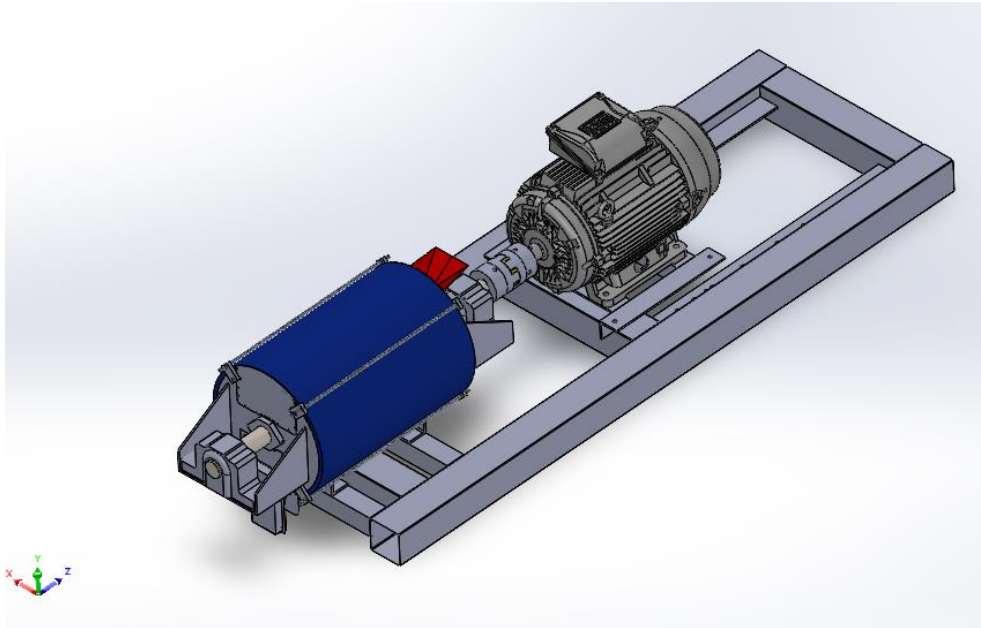
Για την αποτύπωση της ακριβής κατάστασης του μύλου χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks 2021. Λόγω αυτού χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις, καθώς και αποσυναρμολόγηση των μερών του δακτυλιόμυλου. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα διάφορα Assemblies και τα Parts στο Solidworks από διάφορες οπτικές γωνίες.



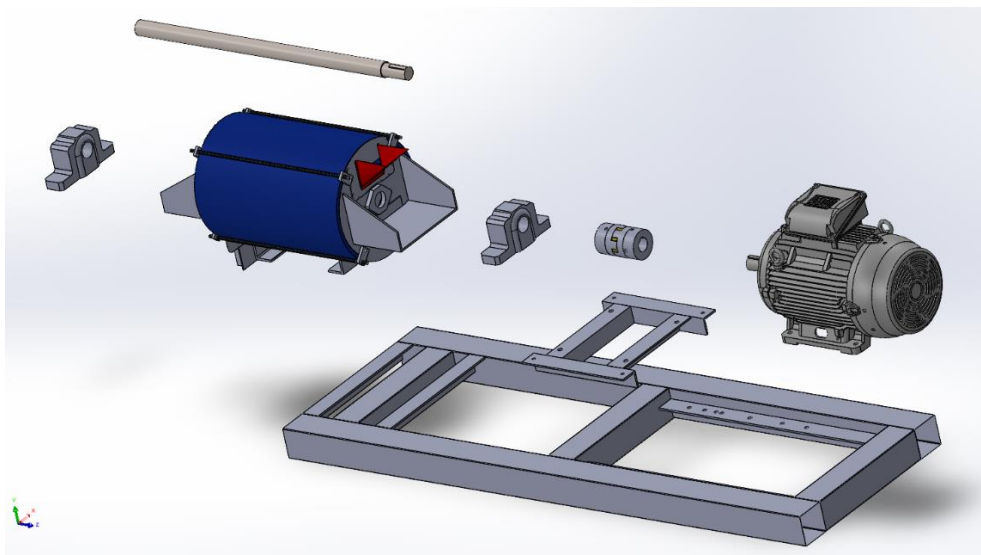
Εικόνα 31 3D-απεικόνιση του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση. Φαίνεται η είσοδος του υλικού προς άλεση.



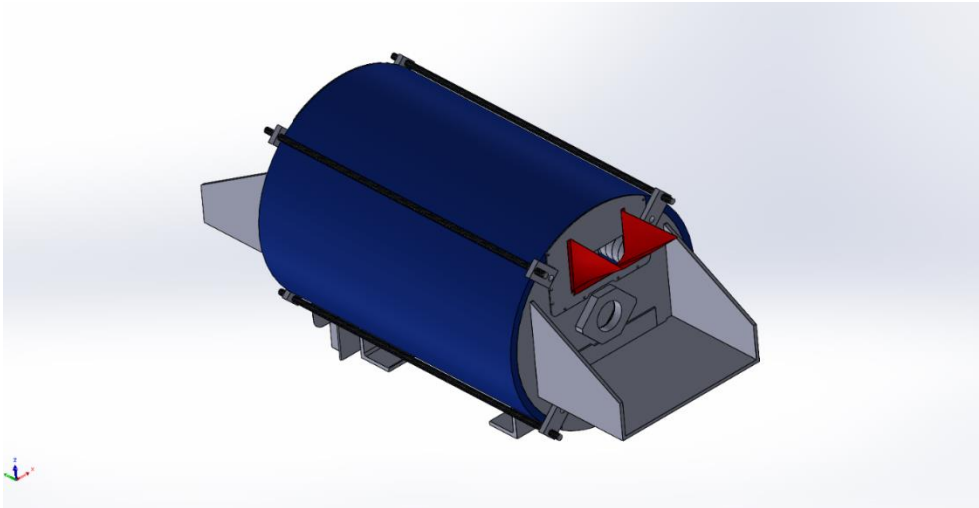
Εικόνα 32 3D-απεικόνιση του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση. Ο μύλος βρίσκεται σε ευθυγράμμιση με τον κινητήρα



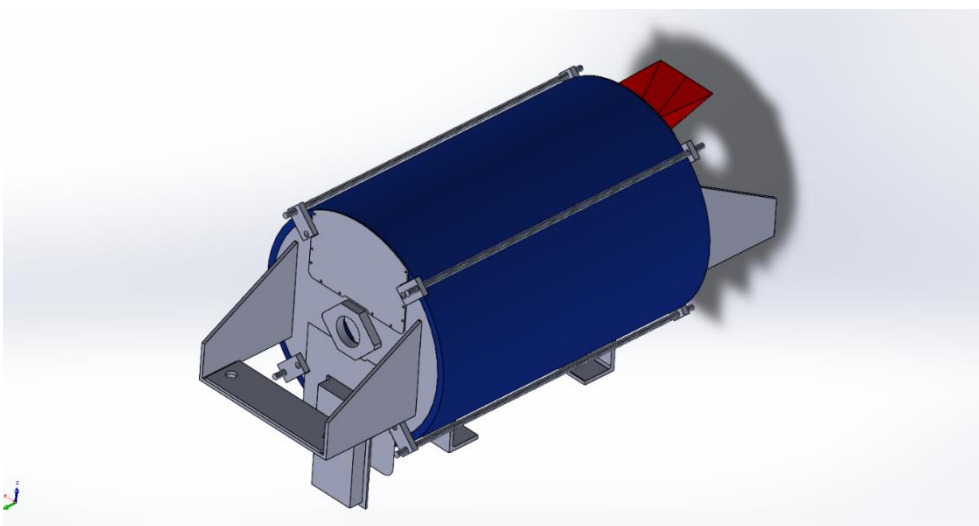
Εικόνα 33 3D-απεικόνιση του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση. Φαίνεται η έξοδος του αλεσμένου προϊόντος.



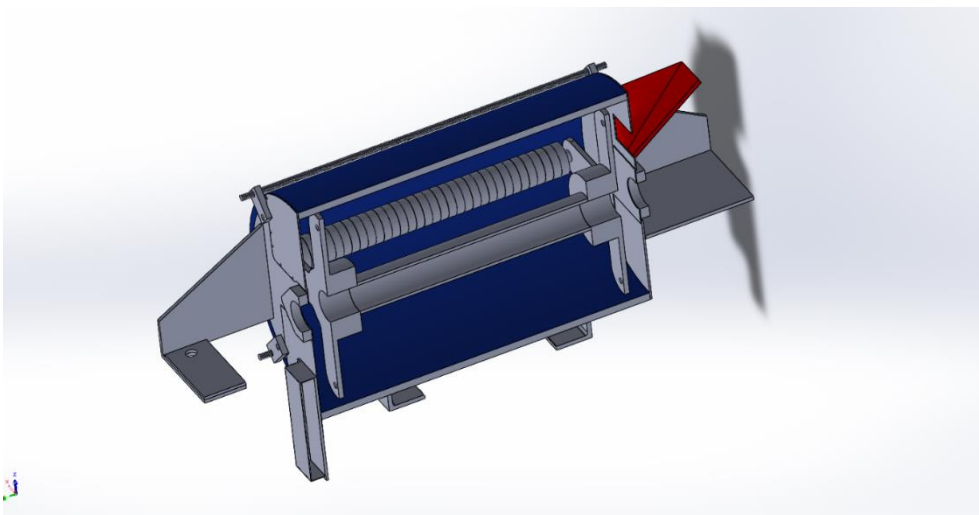
Εικόνα 34 Exploded-View του συνολικού Assembly με τον μύλο, τον κινητήρα και τη βάση



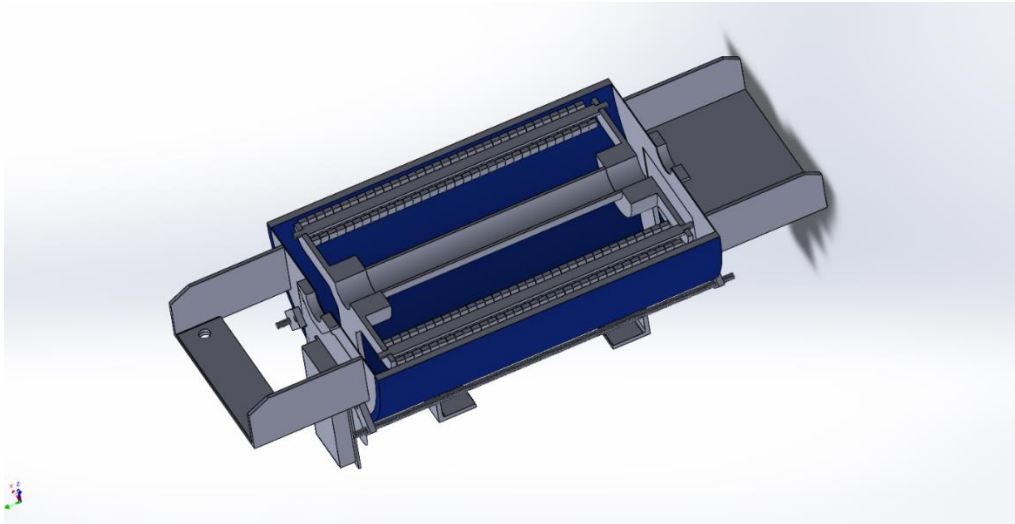
Εικόνα 35 3D-απεικόνιση του μύλου με την είσοδο του προϊόντος προς άλεση



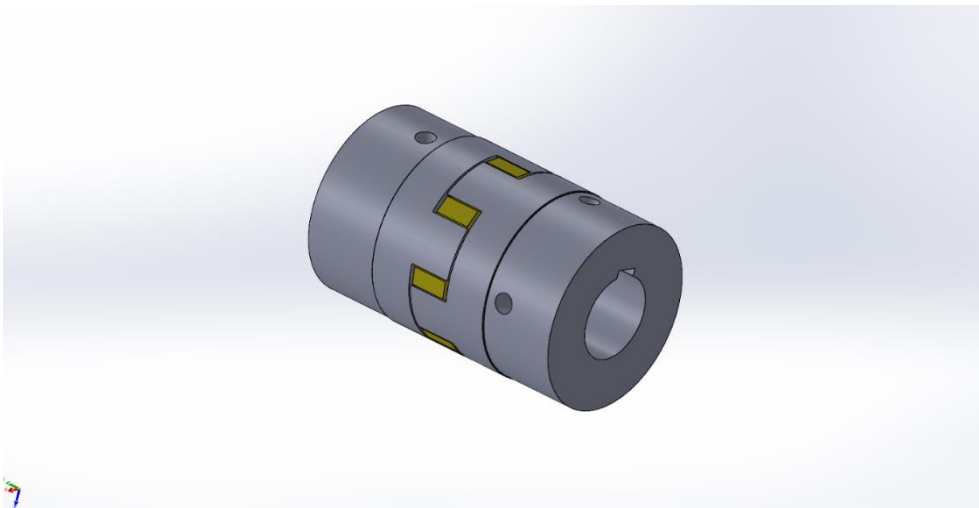
Εικόνα 36 3D-απεικόνιση του μύλου με την έξοδο του αλεσμένου προϊόντος



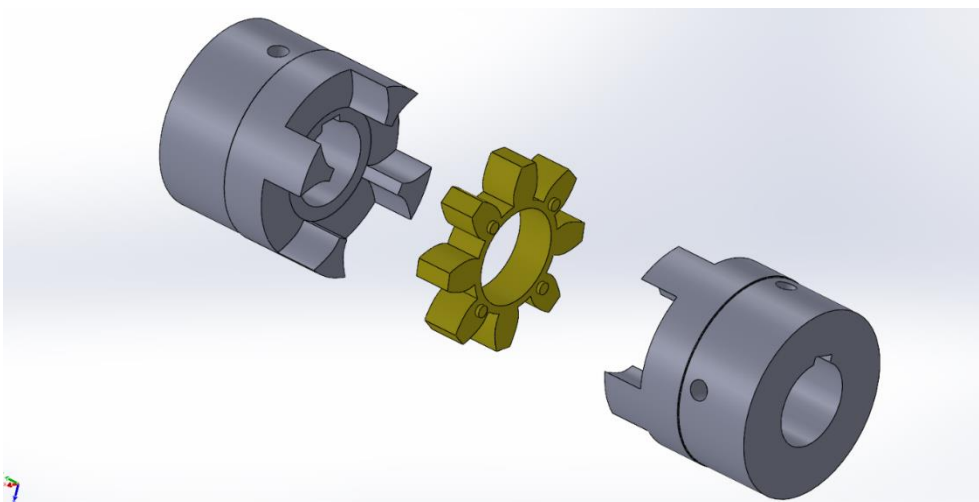
Εικόνα 37 3D-απεικόνιση του μύλου σε κάθετο Selection View



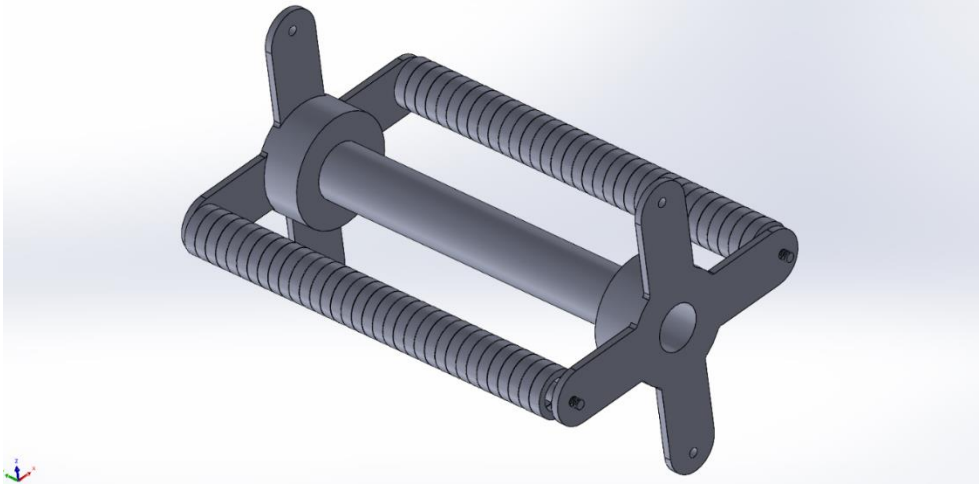
Εικόνα 38 3D-απεικόνιση του μύλου σε οριζόντιο Selection View



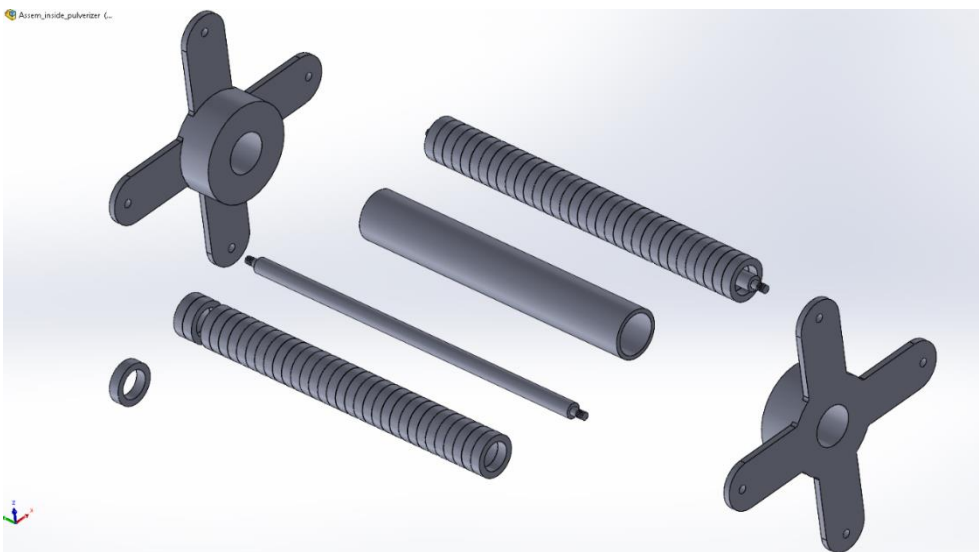
Εικόνα 39 3D-απεικόνιση του Assembly του κόπλερ



Εικόνα 40 3D-απεικόνιση του Assembly του κόπλερ σε Exploded-View



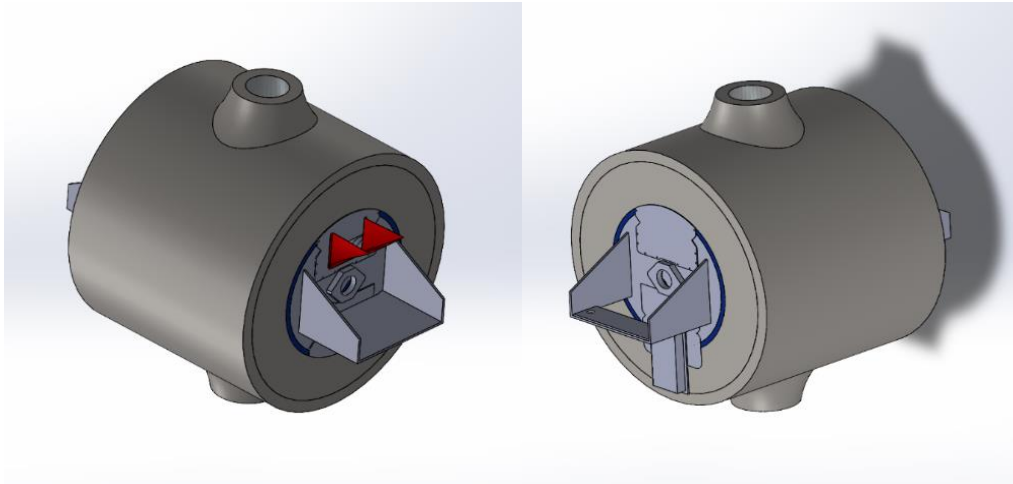
Εικόνα 41 3D-απεικόνιση του Assembly του στροφείου



Εικόνα 42 3D-απεικόνιση του Assembly του στροφείου σε Exploded-View

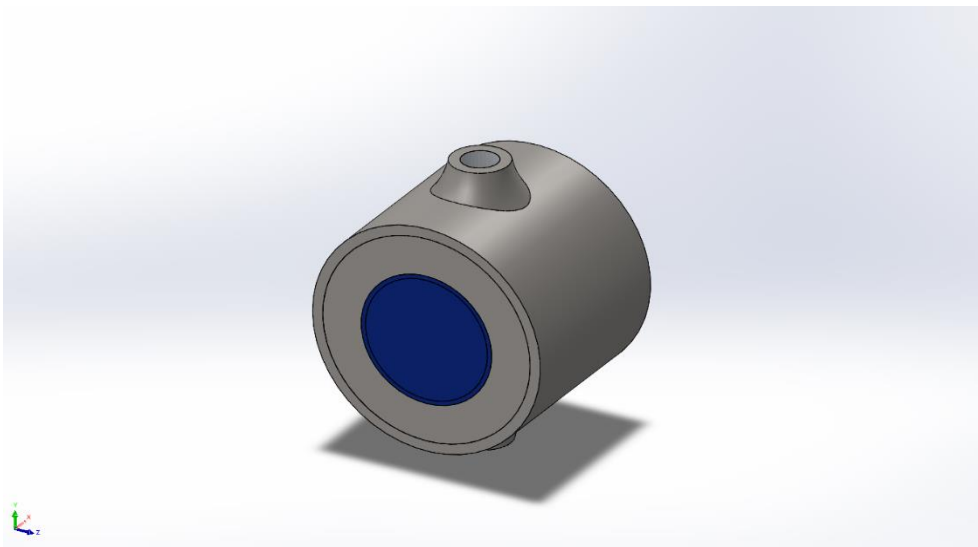
## 4.2 3D-σχεδίαση χιτωνίου

Κατά τη διάρκεια της άλεσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο κέλυφος, είναι σκόπιμη η ψύξη του μύλου για απορρόφηση της θερμότητας που εκλύεται, ιδιαίτερα όταν οι ιδιότητες του υλικού επηρεάζονται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να γίνει με υδρόψυξη μέσω τοποθέτησης χιτωνίου γύρω από το κέλυφος και στον ενδιάμεσο χώρο να κυκλοφορεί νερό. Επίσης η χαμηλότερη θερμοκρασία μειώνει το ρυθμό φθοράς. Ένα παράδειγμα του μύλου με χιτώνιο για υδρόψυξη προτείνεται στην εργασία, όπου το νερό ψύξης εισέρχεται από πάνω και εξέρχεται από κάτω. Η σχεδίαση του χιτωνίου πραγματοποιήθηκε στο Solidworks 2021 και φαίνεται στην Εικόνα



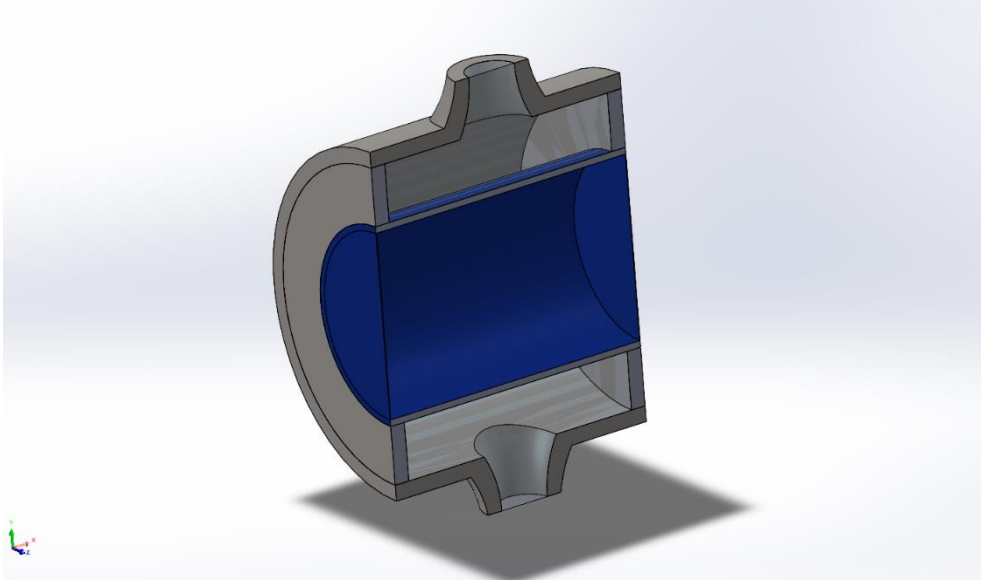
*Εικόνα 43 Προτεινόμενο χιτώνιο για υδρόψυξη του μύλου*

Λόγω των πολλών Parts που υπάρχουν στο Assembly του μύλου με το χιτώνιο σχεδιάστηκε μια πιο απλή αποτύπωση του συστήματος για εισαγωγή στο Ansys. Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, το σύστημα προς μελέτη αποτελείται από το κέλυφος του μύλου μαζί με τα καπάκια του, το νερό που το περιβάλλει και το χιτώνιο μαζί με τα καπάκια του. Το πάχος του χιτωνίου καθώς και ο όγκος του νερού σχεδιάστηκαν τυχαία και προφανώς μετά τα αποτελέσματα μπορεί να προταθούν αλλαγές.

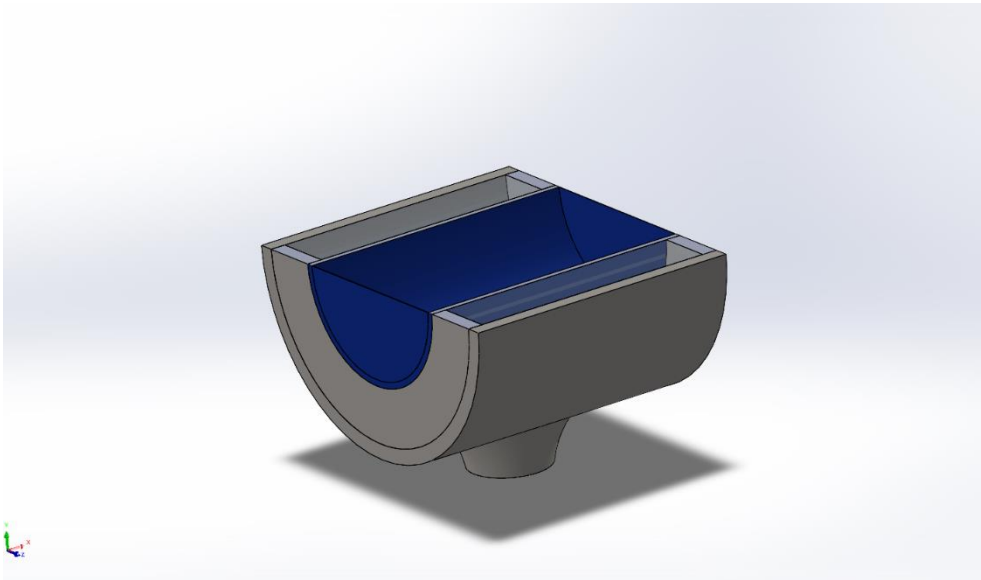


*Εικόνα 44 Το χιτώνιο που μελετήθηκε*

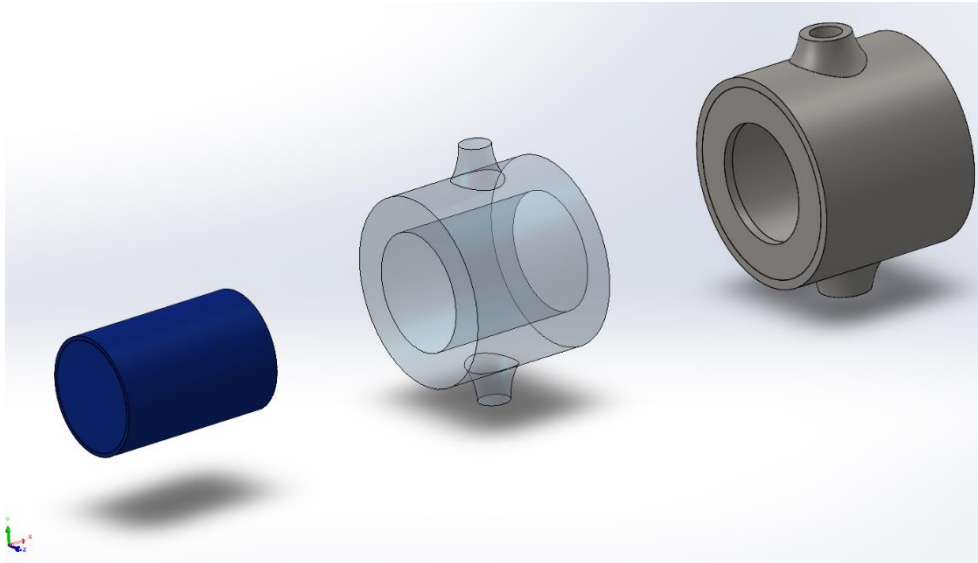




*Εικόνα 45 Κάθετο Selection View του χιτωνίου*



*Εικόνα 46 Οριζόντιο Selection View του χιτωνίου*



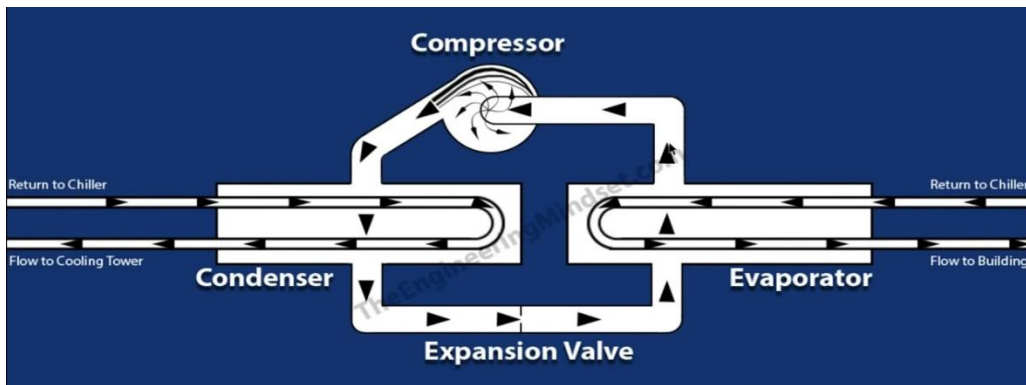
Εικόνα 47 Exploded View του χιτωνίου

### 4.3 3D-σχεδίαση του συστήματος ψύξης

Το παραπάνω προτεινόμενο χιτωνίο αποτελεί μέρος ενός συστήματος ψύξης. Το σύστημα ψύξης αποτελείται από έναν ψύκτη (chiller), δύο αντλίες και έναν πύργο ψύξης (Colling tower). Λόγω μελλοντικών σκέψεων για χρήση του συστήματος αυτού ψύξης σε μεγαλύτερους παρόμοιους μύλους για βιομηχανική χρήση επιλέχθηκε η χρήση του cooling tower.

Γενικά, ο ψύκτης (chiller) είναι ένα μηχάνημα που αφαιρεί τη θερμότητα από ένα υγρό ψυκτικό μέσο μέσω των κύκλων ψύξης συμπίεσης ατμών (vapor-compression circle), προσρόφησης ψύξης (adsorption refrigeration circle) ή απορρόφησης ψύξης (absorption refrigeration circle). Αυτό το υγρό μπορεί στη συνέχεια να κυκλοφορήσει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger) για την ψύξη του εξοπλισμού ή άλλη ροή διεργασίας (όπως αέρας ή νερό). Ως απαραίτητο υποπροϊόν, η ψύξη δημιουργεί «σπατάλη θερμότητας» (waste heat) που πρέπει να μεταφερθεί στην ατμόσφαιρα ή για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, να ανακτηθεί για σκοπούς θέρμανσης (Wikipedia, 2021). Οι chillers συμπίεσης ατμών μπορούν να χρησιμοποιούν οποιονδήποτε από διάφορους τύπους συμπιεστών (compressors). Οι πιο συνήθεις σήμερα είναι οι ερμητικοί κύλινδροι (hermetic scroll), οι ημιερμητικοί κοχλίες (semi-hermetic screw) ή οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές (centrifugal compressors). Η πλευρά συμπύκνωσης του chiller μπορεί να είναι είτε αέρα είτε με νερό. Ακόμη και όταν ψύχεται με υγρό, ο chiller ψύχεται συχνά από έναν πύργο ψύξης με επαγωγή ή εξαναγκασμένο ρεύμα. Οι chillers απορρόφησης και προσρόφησης απαιτούν μια πηγή θερμότητας για να λειτουργήσουν ((Evans, 2017), (Thomas Publishing Company, 2021)).

Το κρύο νερό (chilled water) χρησιμοποιείται για την ψύξη και την αφύγρανση του αέρα σε εμπορικές, βιομηχανικές και εγκαταστάσεις ιδρυμάτων μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους. Οι ψύκτες νερού ή υγρών (water or liquid chillers) μπορούν να είναι υγρόψυκτοι (liquid-cooled), αερόψυκτοι (air-cooled) ή ψυχόμενοι από ατμούς (evaporatively cooled). Τα συστήματα με νερό ή υγρόψυκτα συστήματα μπορούν να παρέχουν πλεονεκτήματα απόδοσης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με τα αερόψυκτα συστήματα (Stanford, 2016).



Το σύστημα chiller απαρτίζεται από 4 εξαρτήματα:

1. τον αποστακτήρα (evaporator),
2. τον συμπιεστή (compressor),
3. τον συμπυκνωτή (condenser) και
4. την βαλβίδα εκτόνωσης (expansion valve)

1. Αποστακτήρας: Το νερό που εισέρχεται στον αποστακτήρα, ουσιαστικά που ρέει στις σωληνώσεις του και εκεί κρατάται εντελώς απομονωμένο από το ψυκτικό (refrigerant), προέρχεται από το outlet του χιτωνίου. Το νερό με το ψυκτικό του αποστακτήρα δεν αναμειγνύονται καθόλου, καθώς το νερό δεν εξέρχεται καθόλου από τις σωληνώσεις. Το ψυκτικό διέρχεται των σωληνώσεων, απορροφά την ενέργεια (θερμότητα) και μεταφέρει την θερμότητα από τα τοιχώματα των σωληνώσεων (tube walls) στον συμπιεστή. Αφού πραγματοποιηθεί αυτή η μεταφορά ενέργειας, το νερό με χαμηλότερη θερμοκρασία οδεύει προς την είσοδο του χιτωνίου.
2. Συμπιεστής: Ο συμπιεστής βρίσκεται συνήθως πάνω από τον chiller και αποτελεί την κινητήρια δύναμη του ψυκτικού υγρού. Το ψυκτικό υγρό ερχόμενο από τον αποστακτήρα περνά στον συμπιεστή. Εκεί, ο συμπιεστής δημιουργεί στατική πίεση και σπρώχνει το ψυκτικό υγρό μέσα στο κύκλωμα ψύξης. Δίπλα στον συμπιεστή υπάρχει ένας ηλεκτρικός κινητήρας
3. Συμπυκνωτής: το ψυκτικό υγρό αφού περάσει από τον συμπιεστή, εισέρχεται στον συμπυκνωτή. Μέσω του ψυκτικού, το νερό στις σωληνώσεις του συμπυκνωτή προσλαμβάνει περισσότερη θερμότητα και οδηγείται στους πύργους ψύξης. Πάλι το νερό στις σωληνώσεις και το ψυκτικό δεν έρχονται σε άμεση επαφή. Το ψυκτικό εισέρχεται στον συμπυκνωτή, συμπυκνώνεται κατά μήκος των τοιχωμάτων των σωληνών και συνεχίζει να ρέει ορμώμενο από τη στατική πίεση μέχρι να φτάσει την βαλβίδα εκτόνωσης. Μέσω του κυκλώματος του συμπυκνωτή το νερό επιστρέφει σε χαμηλότερη θερμοκρασία και συνεχίζεται η ίδια διαδικασία.
4. Βαλβίδα εκτόνωσης: Η βαλβίδα εκτόνωσης απλά διαστέλλει το ψυκτικό δίνοντας του μια μεγαλύτερη δυνατότητα να λαμβάνει θερμοκρασία όταν εισέρχεται στον αποστακτήρα.

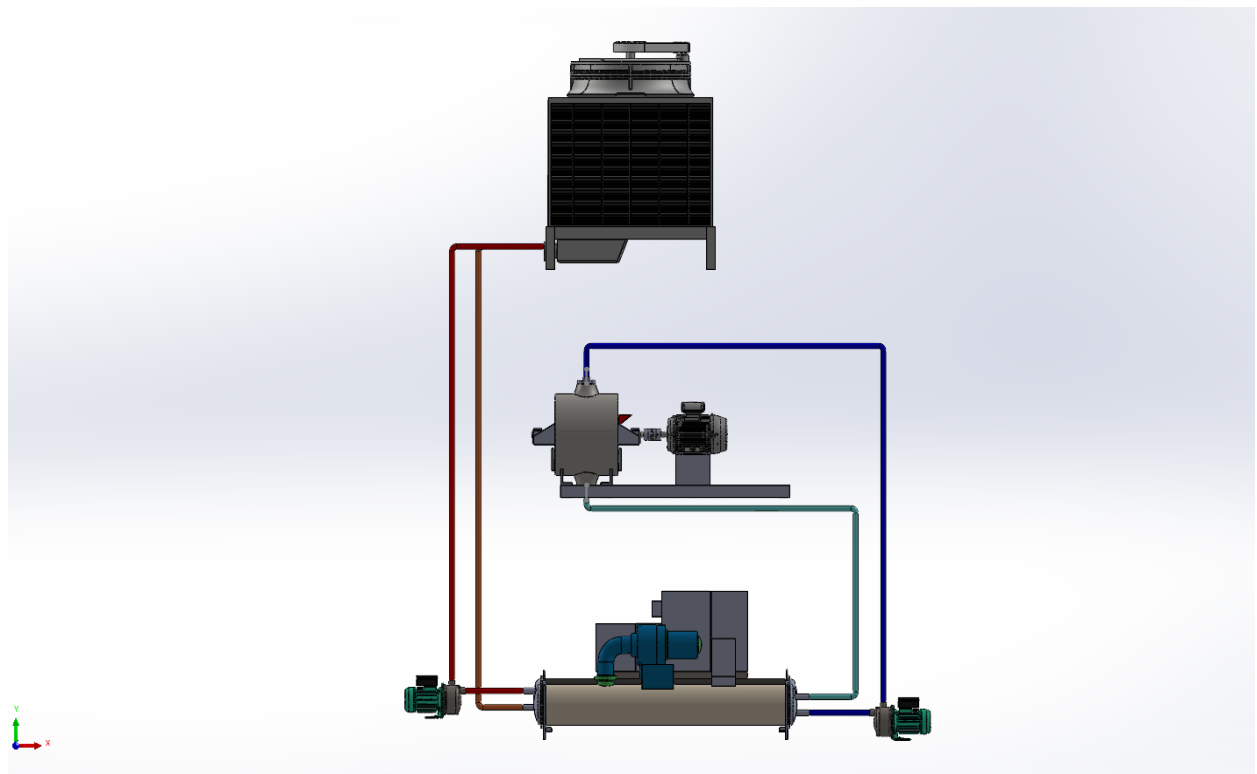
Πέραν τούτων υπάρχει και ο πύργος ή οι πύργοι ψύξης, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τη βιομηχανική εγκατάσταση. Το νερό από το συμπυκνωτή ωθείται μέσω αντλίας στον πύργο ψύξης, όπου ο αέρας περνά από έναν ανεμιστήρα μέσα και ουσιαστικά διαχέει και αποβάλλει την θερμότητα. Έτσι το νερό επιστρέφει σε χαμηλότερη θερμοκρασία στον συμπυκνωτή και είναι έτοιμο να προσλάβει περισσότερη θερμότητα από το σύστημα του chiller.

Επίσης υπάρχουν στο σύστημα αυτό τρία κυκλώματα:

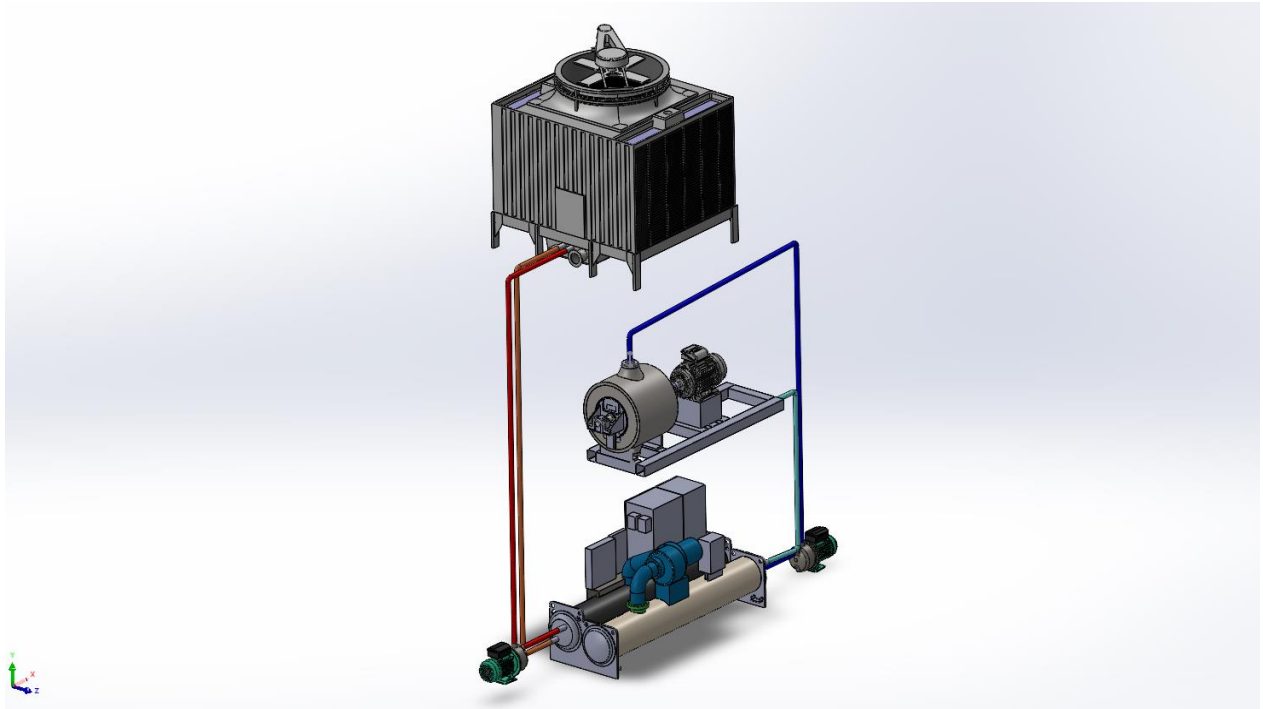
1. το κύκλωμα ψύξης (refrigeration circuit/loop),
2. ο βρόχος κρύου νερού (chilled water loop) και
3. το κύκλωμα του συμπυκνωτή (condenser circuit)

1. Κύκλωμα ψύξης (refrigeration circuit/loop)  
Το ψυκτικό υγρό περνά μέσα από κάθε εξάρτημα και μεταφέρει την θερμότητα από τον αποστακτήρα στον συμπυκνωτή και πάλι πίσω. Αυτός είναι ένα συνεχής βρόχος που απάγει τη θερμότητα από το σύστημα του χιτωνίου και την μεταφέρει στον συμπυκνωτή, από όπου μπορεί να σταλεί στους πύργους ψύξης (cooling towers).
2. Βρόχος κρύου νερού (chilled water loop)  
Η θερμότητα που συλλέγεται από το χιτωνίο μεταφέρεται στον chiller και πάλι πίσω στο χιτωνίο.
3. Κύκλωμα του συμπυκνωτή (condenser circuit)  
Η θερμότητα που μεταφέρεται στους πύργους ψύξης και επιστρέφει για να απάγει περισσότερη θερμότητα.

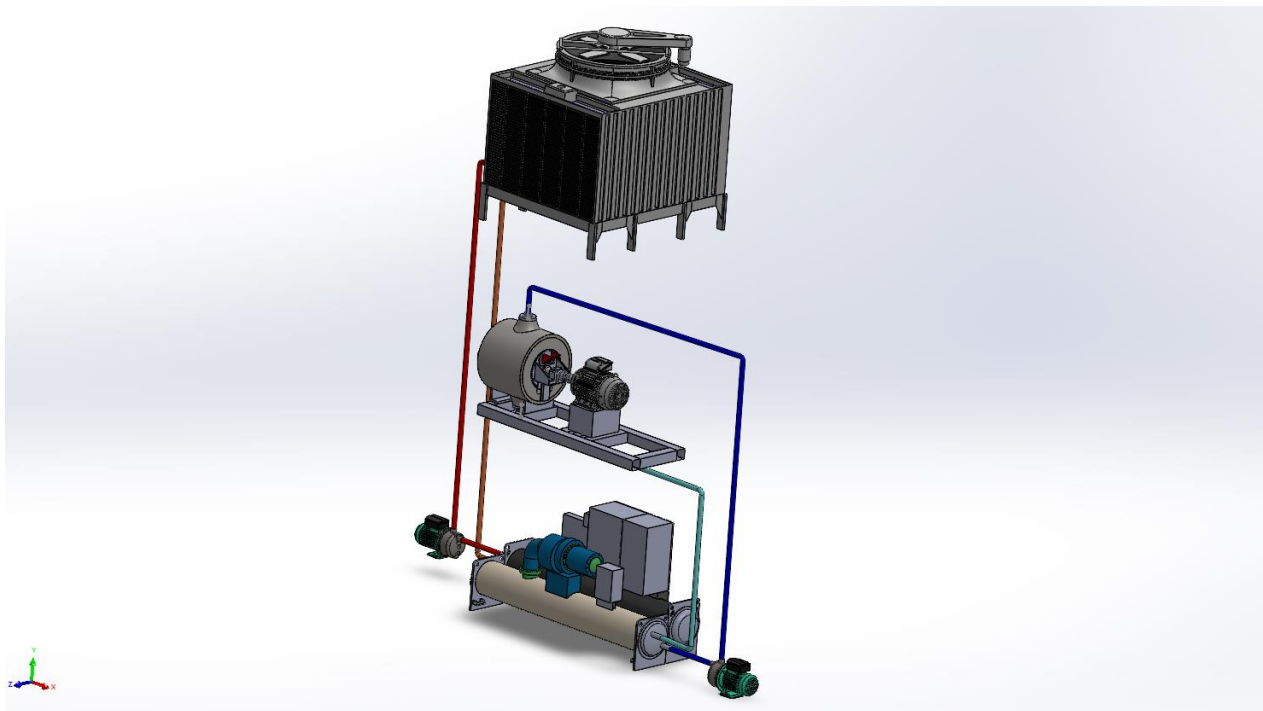
Το προτεινόμενο σύστημα ψύξης καθώς και τα επιμέρους μέρη του φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



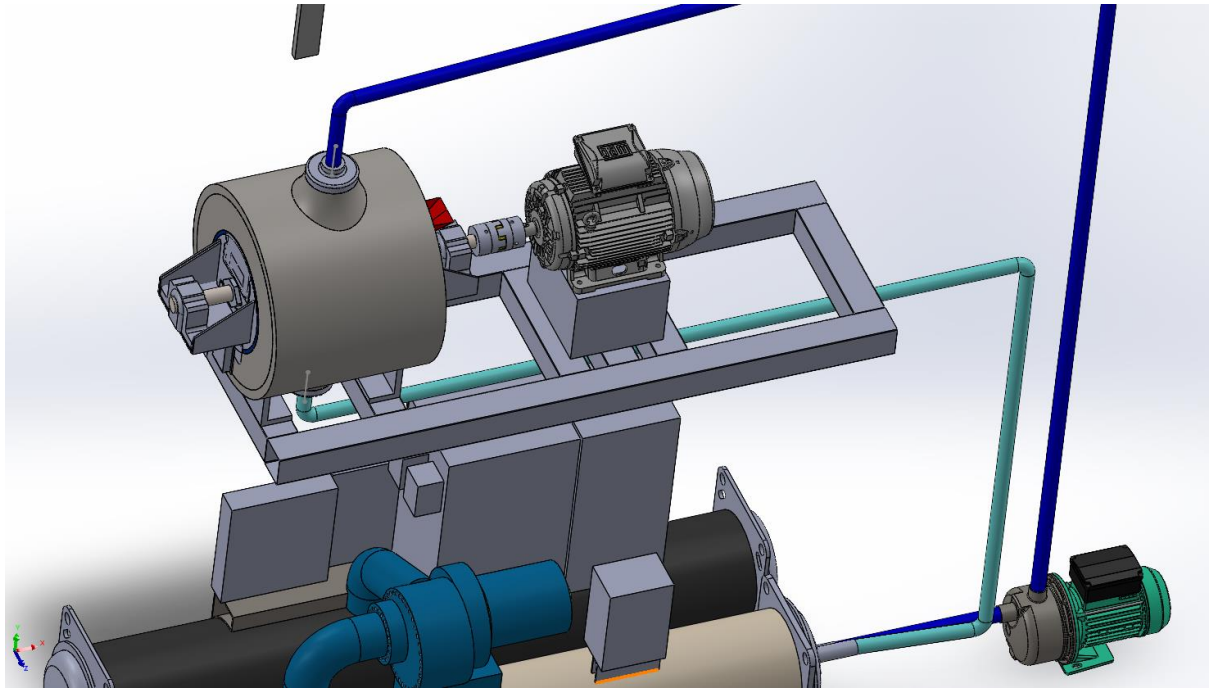
Εικόνα 48 3D-απεικόνιση του συστήματος ψύξης του μύλου



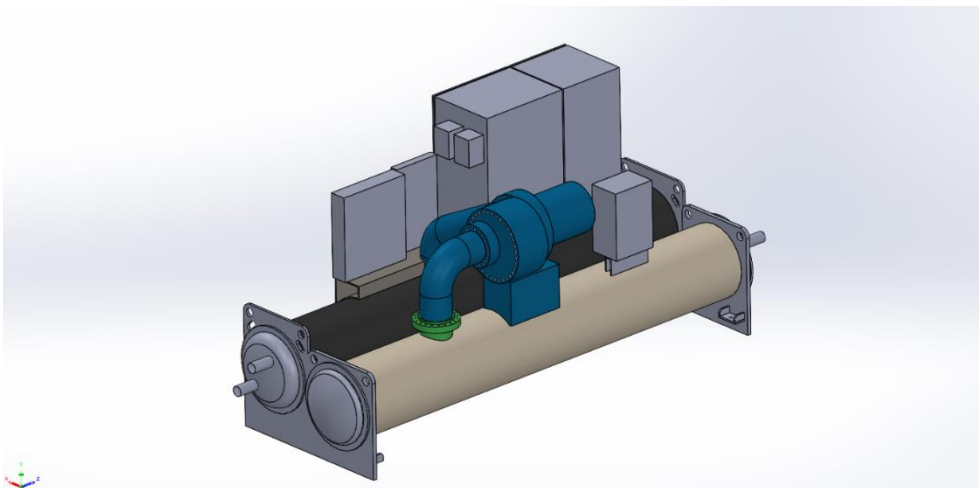
Εικόνα 49 3D-απεικόνιση του συστήματος ψύξης του μύλου



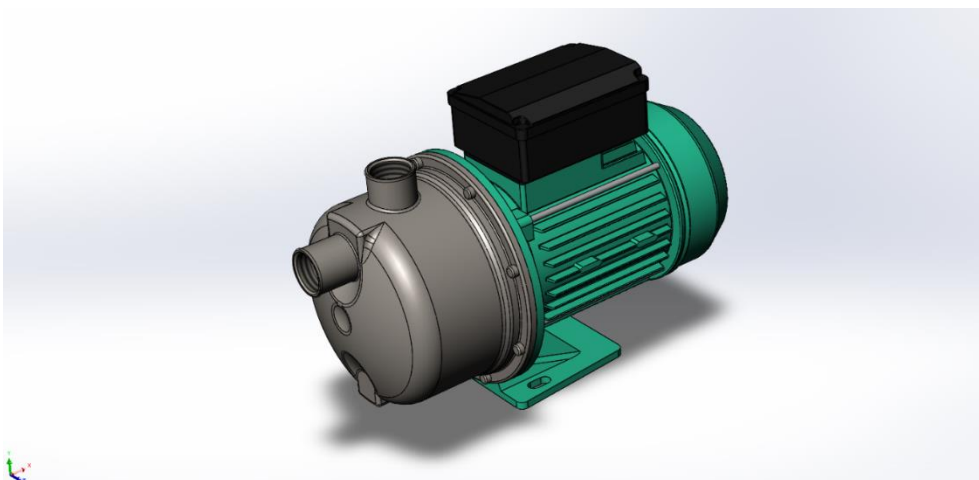
Εικόνα 50 3D-απεικόνιση του συστήματος ψύξης του μύλου



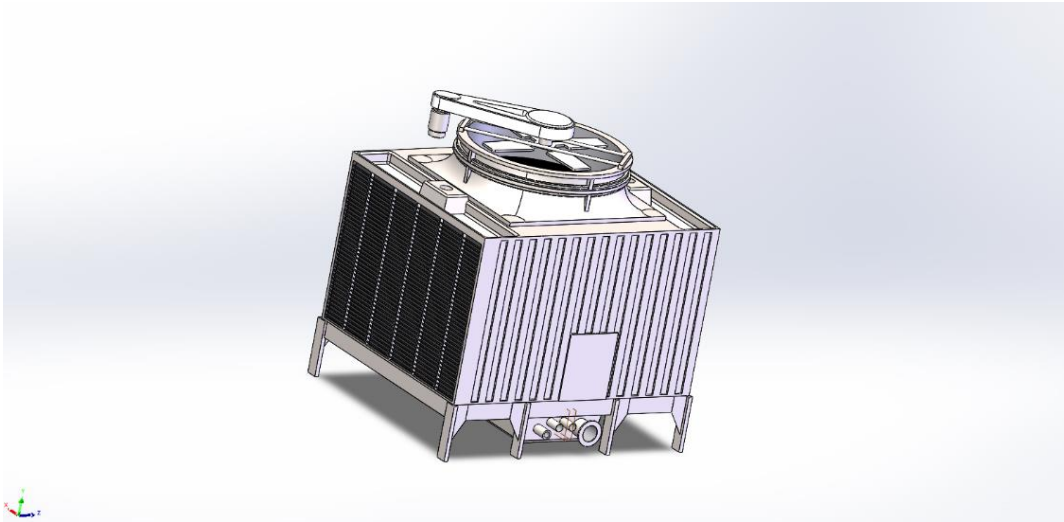
Εικόνα 51 Πιο κοντινή εμφάνιση της 3D-απεικόνισης του συστήματος ψύξης του μύλου



Εικόνα 52 Ο chiller του συστήματος ψύξης



Εικόνα 53 Η αντλία του συστήματος ψύξης



Εικόνα 54 Ο cooling tower του συστήματος ψύξης



## 5 Ανάλυση χιτωνίου στο Ansys

### 5.1 Fluid Flow (CFX)

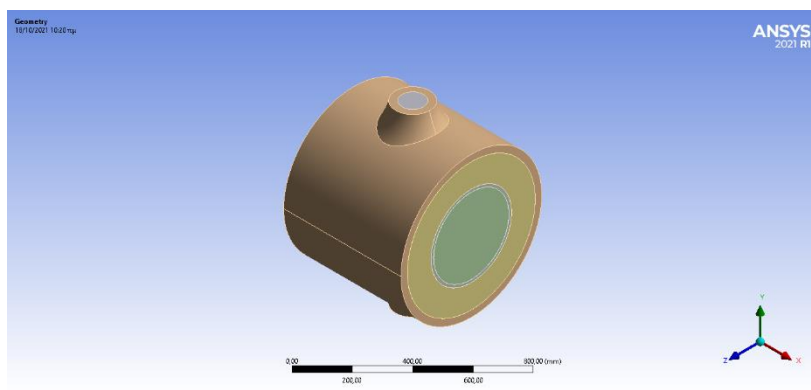
Το Ansys CFX είναι ένα πρόγραμμα CFD (Computational Fluid Dynamics) υψηλής απόδοσης γενικού σκοπού που εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων ροής ρευστού μεγάλου εύρους. Στην καρδιά του Ansys CFX βρίσκεται η προηγμένη τεχνολογία επίλυσης του, το κλειδί για την επίτευξη αξιόπιστων και ακριβών λύσεων. Ο σύγχρονος, εξαιρετικά παραλληλισμένος λύτης είναι το θεμέλιο για μια άφθονη επιλογή φυσικών μοντέλων για την καταγραφή σχεδόν κάθε είδους φαινομένων που σχετίζονται με τη ροή ρευστού: στρωτό έως τυρβώδες (συμπεριλαμβανομένης της μετάβασης), ασυμπιεστο έως πλήρως συμπιεστό, υποχηητικό σε υπερχηητικό, ισοθερμικό ή με μεταφορά θερμότητας με συναγωγή ή/και ακτινοβολία, μη αντιδρώντας σε καύση, σταθερές ή/και περιστρεφόμενες συσκευές, μεμονωμένα υγρά και μείγματα υγρών σε μία ή περισσότερες φάσεις (συμπεριλαμβανομένων των ελεύθερων επιφανειών) και πολλά, πολλά άλλα. Ο λύτης και τα πολλά φυσικά του μοντέλα είναι συνδεδεμένα σε ένα σύγχρονο, διαισθητικό και ευέλικτο περιβάλλον GUI και χρήστη, με εκτεταμένες δυνατότητες προσαρμογής και αυτοματισμού χρησιμοποιώντας session files, scripting και μια ισχυρή γλώσσα έκφρασης.

Αλλά το Ansys CFX είναι κάτι περισσότερο από «απλώς» ένας ισχυρός κώδικας CFD: με την ενσωμάτωσή του στην πλατφόρμα Ansys Workbench, οι χρήστες επωφελούνται από ανώτερες αμφίδρομες συνδέσεις σε όλα τα μεγάλα συστήματα CAD, ισχυρή τροποποίηση γεωμετρίας και δημιουργία με το Ansys DesignModeler, προηγμένες τεχνολογίες πλέγματος στο Ansys Meshing και εύκολη μεταφορά δεδομένων και αποτελεσμάτων με μεταφορά και απόθεση για κοινή χρήση μεταξύ εφαρμογών. Επιπλέον, η σύνδεση με προϊόντα Ansys structural mechanics επιτρέπει στους χρήστες να καταγράφουν ακόμη και τα πιο σύνθετα προβλήματα αλληλεπίδρασης δομής ρευστού (fluid-structure interaction - FSI), στο ίδιο εύχρηστο περιβάλλον, εξοικονομώντας την ανάγκη αγοράς, διαχείρισης ή εκτέλεσης Λογισμικό ζεύξης τρίτου κατασκευαστή.

Λόγω των παραπάνω επιλέχθηκε στην εργασία η ανάλυση του συστήματος κυλίνδρου-χιτωνίου να υλοποιηθεί με το Fluid Flow (CFX). Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ansys 2021 R1.

### 5.2 Mesh

Στο Geometry κάναμε εισαγωγή της επιθυμητής γεωμετρίας (.igs).

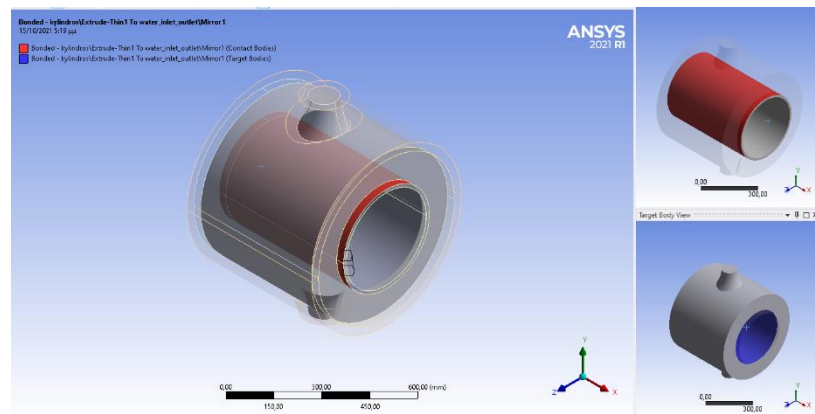


Εικόνα 55 Εισαγωγή του συστήματος μύλου-χιτωνίου στο Mesh

Στο Geometry έχουμε επτά (7) όγκους, εκ των οποίων το water\_inlet\_outlet είναι ρευστό (fluid) και τα υπόλοιπα στερεά (solid) και μάλιστα από χάλυβα (steel). Τα σώματα αυτά βρίσκονται σε επαφή το ένα με το άλλο. Επομένως ορίσαμε τα Connections. Στο μοντέλο μας υπάρχουν δέκα επαφές (Contacts). Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα σώματα που είναι συνδεδεμένα

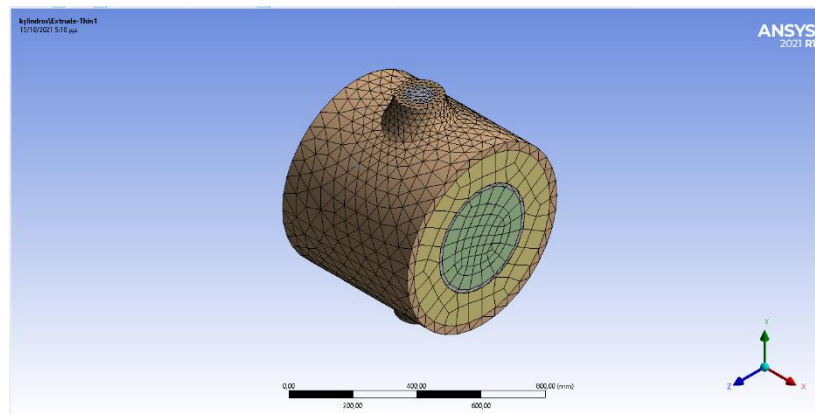


(bonded) στη στήλη με τα Contacts καθώς και ένα παράδειγμα, όπου δύο (2) Faces του κυλινδros (contact body) είναι bonded με δύο (2) Faces του water\_inlet\_outlet (target body).



Εικόνα 56 Ορίζοντας τα Connections μεταξύ των όγκων

Στο Mesh επιλέξαμε σε πρώτη φάση όλο το σώμα (Body) και τη μέθοδο “Automatic Method” με τις Default ρυθμίσεις. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

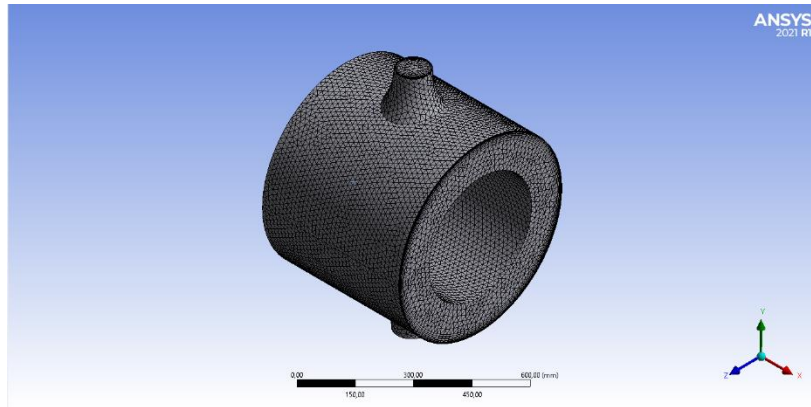


Εικόνα 57 Το Mesh του συστήματος με Automatic Method

Σε δεύτερη φάση ασχοληθήκαμε με τους επιμέρους όγκους.

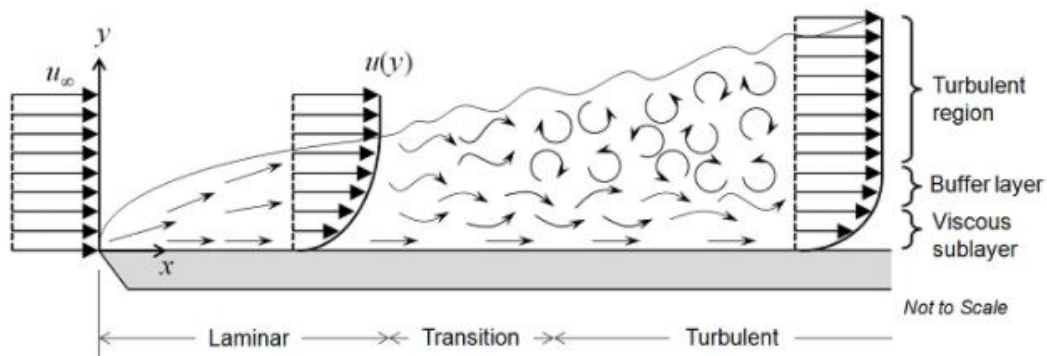
### 5.2.1 Το Mesh του νερού

Πρώτα ασχοληθήκαμε με τον όγκο του νερού. Στην επιλογή Automatic Method επιλέξαμε Insert και Inflation. Στο Details of “Inflation” – Inflation στο Geometry επιλέξαμε ως Body όλο τον όγκο νερού και στο Boundary τα 6 Faces, ουσιαστικά όλες τις επιφάνειες του ρευστού που βρίσκονται σε επαφή με το χιτώνιο. Στις επιφάνειες αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται αυτές που εφάπτονται των καπακίων του χιτωνίου, καθώς και η είσοδος (inlet) και έξοδος (outlet) του ρευστού. Κατόπιν στο Automatic Method του Mesh επιλέξαμε στο Method αντί για Automatic το Tetrahedrons. Πέραν τούτου μπορούμε να επιλέξουμε Hex Dominant, Sweep, MultiZone Cartesian και Layered Tetrahedrons. Στο Inflation στο Inflation Option επιλέξαμε First Layer Thickness το οποίο θα ισούται με 0,77mm αντί για Smooth Transition. Οι άλλες επιλογές που έχουμε είναι: Total Thickness, First και Last Aspect Ratio. Στο Patch Conforming Method επιλέξαμε Insert και Sizing. Ως Geometry επιλέξαμε όλο τον όγκο του νερού που θα πρέπει να μας εμφανιστεί ως 1 Body και στο Element Size τοποθετήσαμε την τιμή 15mm.



Εικόνα 58 Το Mesh του νερού

Ο λόγος που επιλέξαμε να δημιουργηθούν Layers είναι η τυρβώδης ροή που αναπτύσσεται στα οριακά τοιχώματα. Γενικά, η ροή ρευστού σε έναν σωλήνα συναντά αντίσταση τριβής λόγω της εσωτερικής τραχύτητας ( $e$ ) του τοιχώματος του σωλήνα, η οποία μπορεί να δημιουργήσει τοπικά ρεύματα στροβιλισμού μέσα στο ρευστό. Σε πρώτη φάση, η ροή είναι πολύ προβλέψιμη. Μετά από κάποια απόσταση, μικρές χαστικές ταλαντώσεις αρχίζουν να αναπτύσσονται στο οριακό στρώμα και η ροή αρχίζει να μεταβαίνει σε αναταράξεις και τελικά γίνεται πλήρως τυρβώδης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διάφορες περιοχές της ροής, όταν ρευστό ρέει σε επίπεδη πλάκα.



Εικόνα 59 Οι τρεις φάσεις της ροής ρευστού

Η μετάβαση μεταξύ αυτών των τριών περιοχών μπορεί να οριστεί με βάση τον αριθμό Reynolds,

$$Re = \rho u L / \mu$$

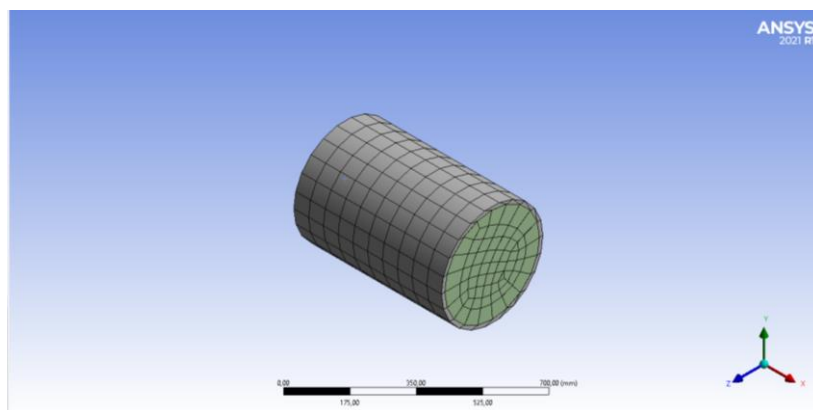
όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $u$  είναι η ταχύτητα,  $L$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος (σε αυτή την περίπτωση, η απόσταση από το μπροστινό άκρο) και  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Στη στρωτή περιοχή, η ροή του ρευστού μπορεί να προβλεφθεί πλήρως με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes (COMSOL, 2017), η οποία δίνει την ταχύτητα και τα πεδία πίεσης. Ας υποθέσουμε πρώτα ότι το πεδίο ταχύτητας δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Καθώς η ροή αρχίζει να μεταβαίνει στη τυρβώδη περιοχή, εμφανίζονται ταλαντώσεις στη ροή, παρά το γεγονός ότι ο ρυθμός ροής εισόδου δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Δεν είναι πλέον δυνατό να υποθέσουμε ότι η ροή είναι αμετάβλητη με το χρόνο. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι απαραίτητο να λυθούν οι εξαρτώμενες από το χρόνο εξισώσεις Navier-Stokes και το χρησιμοποιούμενο πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά λεπτό για να επιλύσει το μέγεθος των μικρότερων στροβιλισμών στη ροή.

Καθώς ο ρυθμός ροής-και επομένως και ο αριθμός Reynolds-αυξάνεται, το πεδίο ροής εμφανίζει μικρές στροβιλώσεις και οι χωρικές και χρονικές κλίμακες των ταλαντώσεων γίνονται τόσο μικρές που είναι υπολογιστικά αδύνατο να επιλυθούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Navier-Stokes, τουλάχιστον για πιο πρακτικές περιπτώσεις. Σε αυτό το καθεστώς ροής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια διατύπωση με Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS), η οποία βασίζεται στην παρατήρηση ότι το πεδίο ροής ( $u$ ) με την πάροδο του χρόνου περιέχει μικρές, τοπικές ταλαντώσεις ( $u'$ ) και μπορεί να αντιμετωπιστεί σε μέσος όρος χρόνου ( $U$ ). Για μοντέλα μίας και δύο εξισώσεων, εισάγονται πρόσθετες εξισώσεις μεταφοράς για μεταβλητές στροβιλισμού, όπως η κινητική ενέργεια στροβιλισμού ( $k$  σε  $k-\epsilon$  και  $k-\omega$ ).

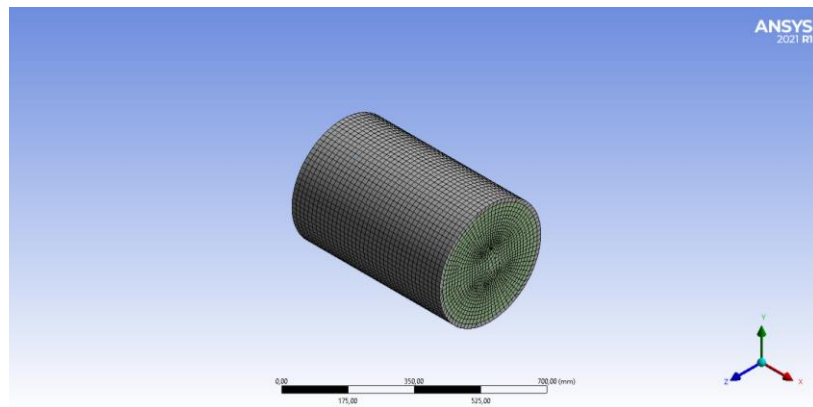
### 5.2.2 Το Mesh του κυλίνδρου

Αφού ολοκληρώσαμε με το Mesh του νερού, ασχοληθήκαμε με το Mesh του κυλίνδρου και των καπακιών του. Στο Mesh επιλέξαμε τα τρία Bodies (kylindros, kapaki\_kylindros, kapaki\_kylindros[2]) και διαλέξαμε αρχικά Automatic Method.



Εικόνα 60 Το Mesh του κυλίνδρου με Automatic Method

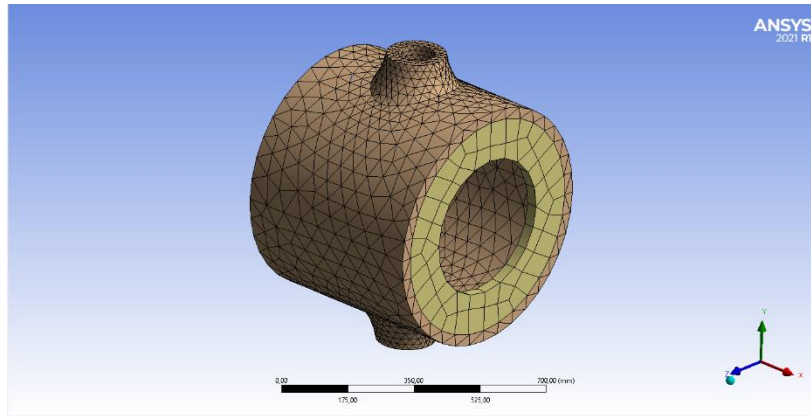
Στη συνέχεια επιλέξαμε Sizing των 3 σωμάτων με Element Size ίσο με 15mm.



Εικόνα 61 Το Mesh του κυλίνδρου με Element Size 15mm

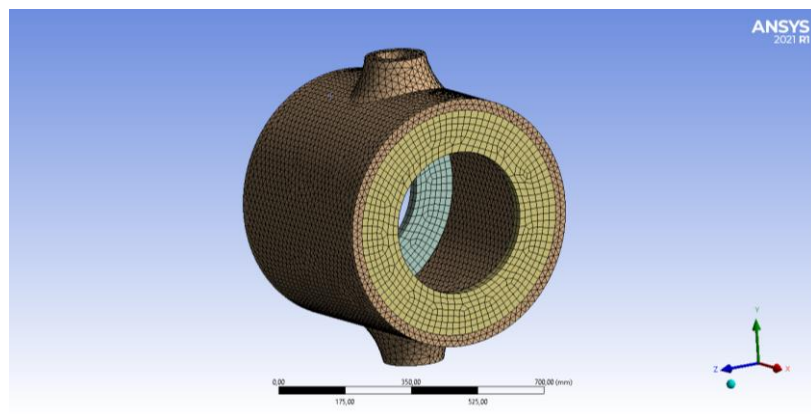
### 5.2.3 Το Mesh του χιτωνίου

Αφού ολοκληρώσαμε με το Mesh του κυλίνδρου και των καπακιών του, ασχοληθήκαμε με το Mesh του χιτωνίου και των καπακιών του. Στο Mesh επιλέξαμε στο Geometry τα τρία Bodies (xytonio, kapaki\_xytoniou, kapaki\_xytoniou [2]) πατήσαμε Generate Mesh χωρίς να αλλάξουμε το Method από Automatic.



Εικόνα 62 Το Mesh του χιτωνίου με Automatic Method

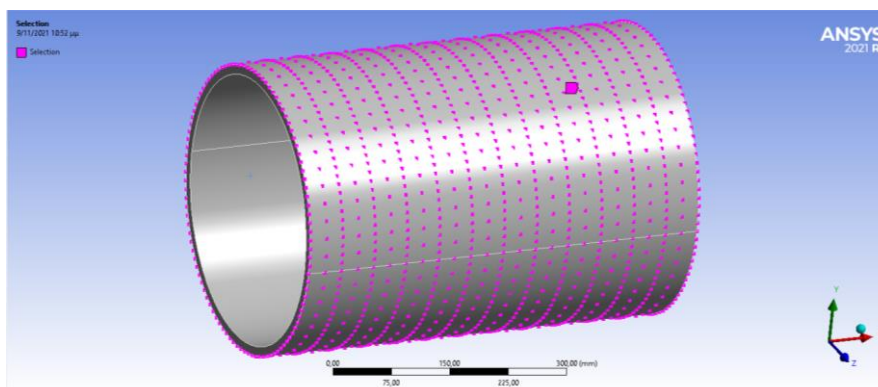
Στο Automatic Method επιλέξαμε Insert και Sizing. Στο Geometry επιλέξαμε τα 3 σώματα, όπως και παραπάνω, και αλλάζουμε το Element Size από Default (59,88 mm) σε 20mm.



Εικόνα 63 Το Mesh του χιτωνίου με Element Size 20mm

### 5.3 Θερμοκρασίες στους κόμβους

Στο σημείο αυτό σύραμε το Mechanical Model στο Project Schematic και από το CFX συνδέουμε το Geometry στο νέο μας σύστημα. Από την επιλογή Model πραγματοποιήσαμε εξαγωγή των συντεταγμένων των Nodes στους τρεις άξονες, όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 64.



Εικόνα 64 Τα Nodes του κυλίνδρου

Με τη βοήθεια του Excel και με βάση το διάγραμμα των θερμοκρασιών (Εικόνα 26) δημιουργήσαμε αρχεία, όπως αναφέραμε και στην Ενότητα 3.7, σύμφωνα με το θερμοκρασιακό προφίλ του κελύφους κάθε χρονική στιγμή. Τα αρχεία αυτά εισήχθησαν σαν αρχικοποίηση κάθε κατάστασης στο Setup. Επειδή έχουμε εννέα γραφικές παραστάσεις οι

οποίες αφορούν μεν συνεχόμενη άλεση αλλά διατυπώνουν τη μεταβαλλόμενη θερμοκρασία κατά μήκος του κελύφους κάθε 30sec, έχουμε εννέα διαφορετικά αρχεία. Για την ανάλυσή μας χρησιμοποιήσαμε για αρχικοποίηση τις θερμοκρασίες των κόμβων από το τελευταίο αρχείο, καθώς αυτό συμπεριλαμβάνει τις υψηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με τα υπόλοιπα αρχεία. Πέρα από το αρχείο που διαθέτει αποτυπωμένες τις θερμοκρασίες όλων των κόμβων, δημιουργήσαμε και επιμέρους ξεχωριστά αρχεία για ορισμένους κόμβους στο εύρος του μήκους του κελύφους. Παραδείγματα αυτών φαίνονται στην Εικόνα 65. Η διαδικασία αυτή ουσιαστικά έπρεπε να πραγματοποιηθεί λόγω του διαφορετικού ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας κατά το μήκος του κυλίνδρου. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς άλλωστε (Πίνακας 4), ο ρυθμός αύξησης των συναρτήσεων 11 και 12 είναι πιο υψηλός συγκριτικά με τις λοιπές συναρτήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συναρτήσεις αυτές αφορούν στοιχεία που βρίσκονται στο 1/3 από την είσοδο του προϊόντος προς άλεση, όπου και παρατηρούνται οι υψηλότερες θερμοκρασίες.

[Name],,, cylidertemp92,, [Spatial Fields],,, x,y,z, ,, [Data],,, x[mm],y[mm],z[mm],Temperature[C] 504.17,-22.781,187.62,51.30 504.17,-45.231,183.51,51.30 504.17,-67.02,176.72,51.30 504.17,-87.833,167.35,51.30 504.17,-107.36,155.54,51.30 504.17,-125.33,141.47,51.30 504.17,-141.47,125.33,51.30 504.17,-155.54,107.36,51.30 504.17,-167.35,87.833,51.30 504.17,-176.72,67.02,51.30 504.17,-183.51,45.231,51.30 504.17,-187.62,22.781,51.30 504.17,-189,-3.39E-12,51.30 504.17,-187.62,-22.781,51.30 504.17,-183.51,-45.231,51.30 504.17,-176.72,-67.02,51.30 504.17,-167.35,-87.833,51.30 504.17,-155.54,-107.36,51.30 504.17,-141.47,-125.33,51.30 504.17,-125.33,-141.47,51.30 504.17,-107.36,-155.54,51.30	[Name],,, cylidertemp93,, [Spatial Fields],,, x,y,z, ,, [Data],,, x[mm],y[mm],z[mm],Temperature[C] 481.25,-22.781,187.62,52.98 481.25,-45.231,183.51,52.98 481.25,-67.02,176.72,52.98 481.25,-87.833,167.35,52.98 481.25,-107.36,155.54,52.98 481.25,-125.33,141.47,52.98 481.25,-141.47,125.33,52.98 481.25,-155.54,107.36,52.98 481.25,-167.35,87.833,52.98 481.25,-176.72,67.02,52.98 481.25,-183.51,45.231,52.98 481.25,-187.62,22.781,52.98 481.25,-189,-3.32E-12,52.98 481.25,-187.62,-22.781,52.98 481.25,-183.51,-45.231,52.98 481.25,-176.72,-67.02,52.98 481.25,-167.35,-87.833,52.98 481.25,-155.54,-107.36,52.98 481.25,-141.47,-125.33,52.98 481.25,-125.33,-141.47,52.98 481.25,-107.36,-155.54,52.98
--	--

Εικόνα 65 Αρχεία με τις θερμοκρασίες στους κόμβους

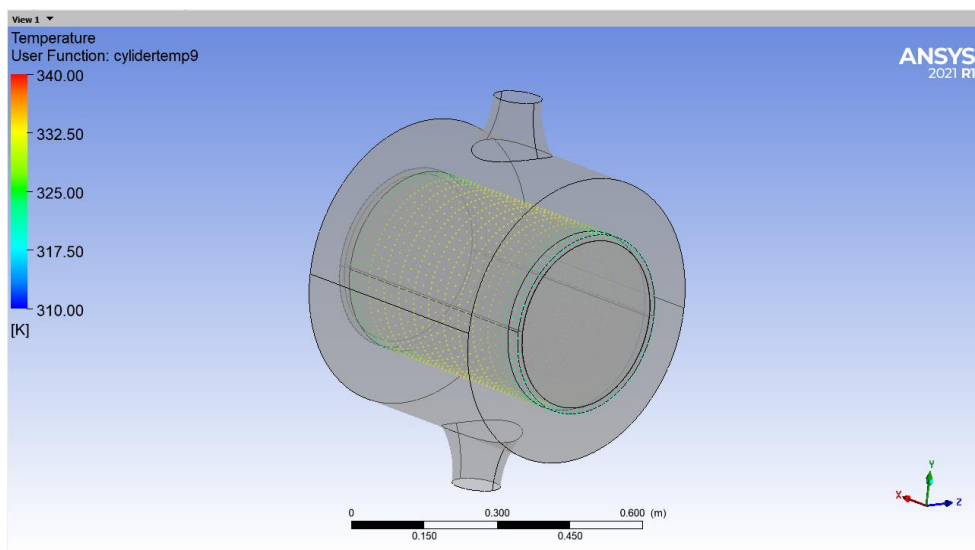
## 5.4 Setup

### 5.4.1 Analysis Type

Στο Analysis Type επιλέξαμε Transient, καθώς έχουμε μεταβολή της θερμοκρασίας του κελύφους στο χρόνο. Ως Time Duration ορίστηκε το Total Time 120s, ως Time Steps 1s και ως Initial Time η επιλογή Automatic with value 0s.

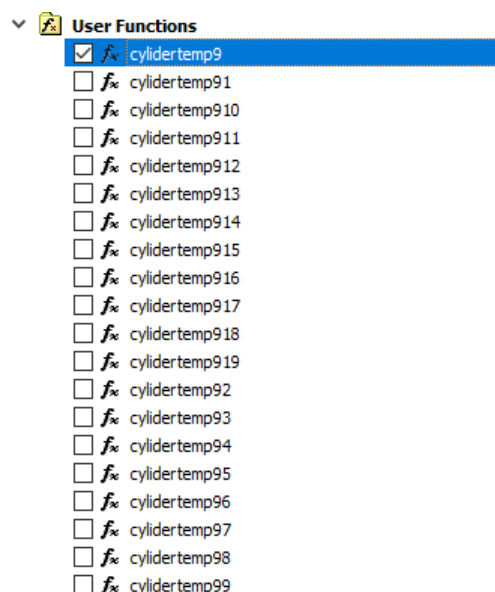
### 5.4.2 User Functions

Από την επιλογή Tools στο Initialize Profile Data ορίσαμε τις αρχικές θερμοκρασίες στα Nodes του κελύφους, σύμφωνα με το αρχείο (.csv) που είχαμε δημιουργήσει. Το αρχείο αυτό εμφανίζεται ως User Function. Τα αποτελέσματα τέθηκαν ορατά και έχουμε το αποτέλεσμα της Εικόνας 66.



Εικόνα 66 Οι θερμοκρασίες των nodes του κελύφους

Πέραν, όμως, αυτού του αρχείου έπρεπε να προσθέσουμε και τα υπόλοιπα αρχεία, τα οποία περιλαμβάνουν τις θερμοκρασίες σε ορισμένα Nodes, όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 65. Έτσι, δημιουργήθηκαν κι άλλες User Functions.

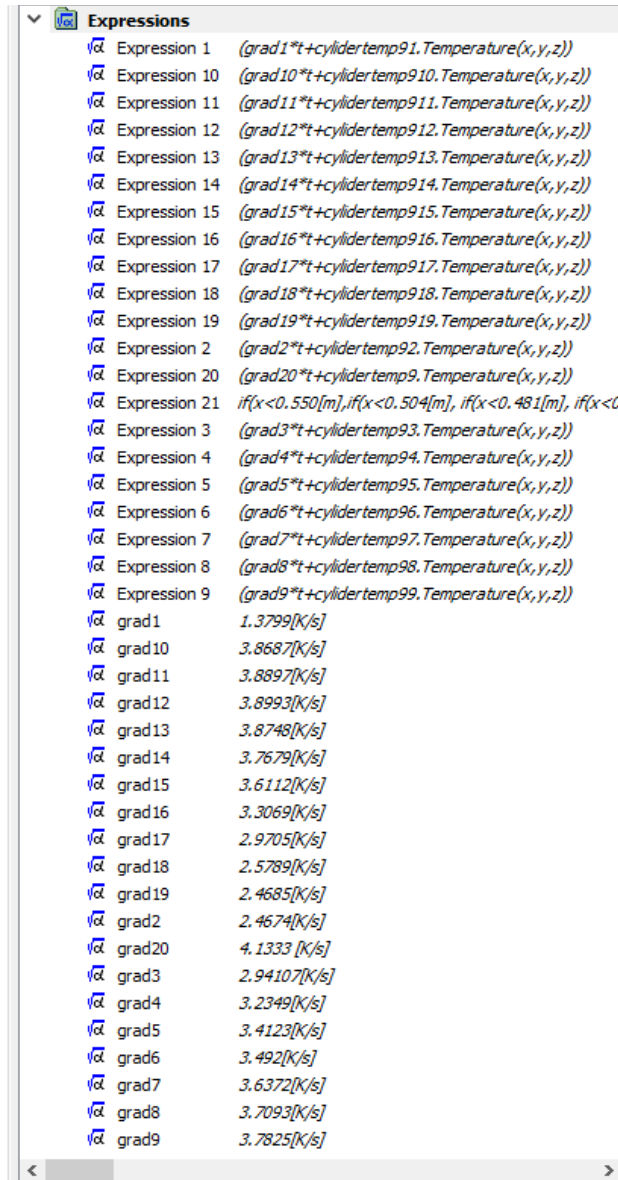


Εικόνα 67 User Functions



### 5.4.3 Expressions

Με βάση τα User Functions που δημιουργήσαμε παραπάνω και βάση των συναρτήσεων των μεταβολών θερμοκρασιών (Πίνακας 4), καταφέραμε να δημιουργήσουμε τα παρακάτω Expressions. Τα Expressions αυτά, πέρα από το Expression 21, αφορούν την έκφραση της μεταβολή της θερμοκρασίας σε ορισμένο εύρος κόμβων πάνω στον κύλινδρο.



Εικόνα 68 Expressions

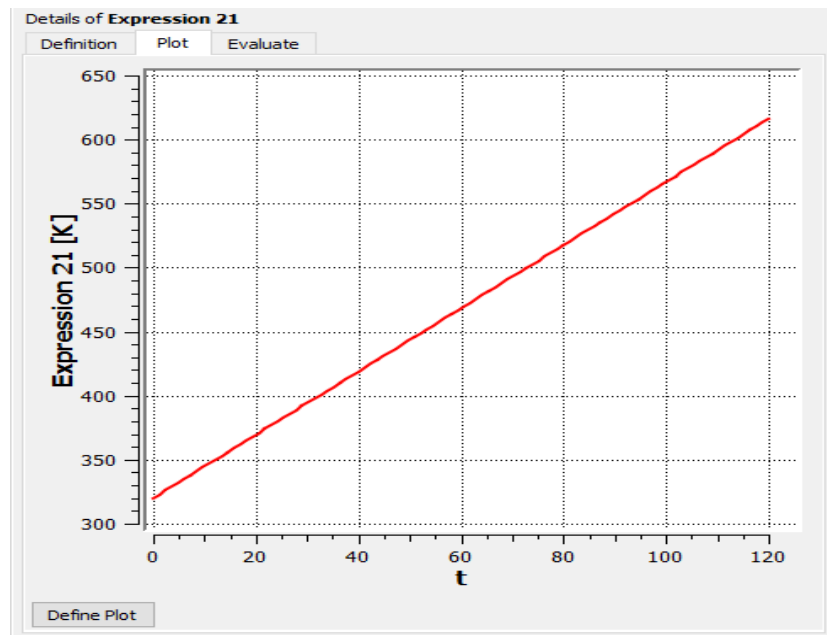
Το Expression 21 είναι αυτό που συμπεριλαμβάνει όλα τα επιμέρους Expressions και λόγω της δημιουργίας αυτού καταφέραμε να ορίσουμε τις συναρτήσεις των διαφορετικών μεταβολών της θερμοκρασίας στο κέλυφος. Μάλιστα το Ansys μας δίνει την επιλογή να δούμε και σε Plot την έκφραση αυτή, όπως και τις προηγούμενες (Εικόνα 70).

```

Details of Expression 21
Definition Plot Evaluate
if(x<0.550[m],if(x<0.504[m],if(x<0.481[m],if(x<0.435[m],if(x<0.412[m],if(x<0.366[m],
if(x<0.343[m],if(x<0.320[m],if(x<0.275[m],if(x<0.252[m],if(x<0.206[m],if(x<0.183[m],
if(x<0.160[m],if(x<0.114[m],if(x<0.092[m],if(x<0.068[m],if(x<0.045[m],if(x<0.022[m],
if(x<0.008[m], Expression 19, cylidertemp9.Temperature(x,y,z),
Expression 18), Expression 17), Expression 16), Expression 15),
Expression 14), Expression 13), Expression 12), Expression 11),
Expression 10), Expression 9), Expression 8), Expression 7),
Expression 6), Expression 5), Expression 4), Expression 3),
Expression 2), Expression 1)

```

Εικόνα 69 To Expression 21



Εικόνα 70 To Plot του Expression 21

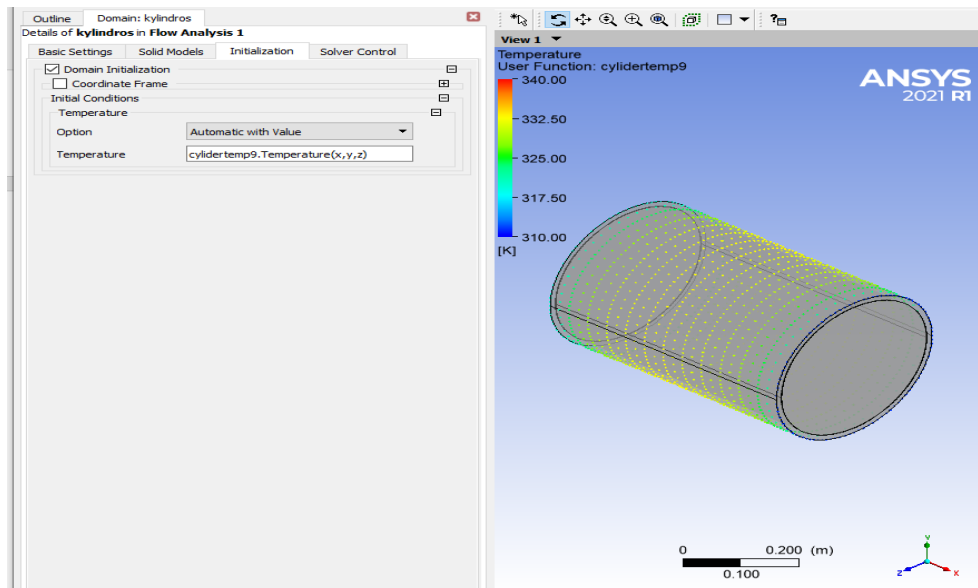
#### 5.4.4 Domains

##### Domain “kylindros”

Στην καρτέλα Basic Settings επιλέξαμε πως ο κύλινδρος είναι Solid Domain και μάλιστα Steel. Επίσης αποτελεί έναν Stationary Domain. Στην καρτέλα Solid Models στο Heat Transfer επιλέξαμε στο Option Thermal Energy και στην καρτέλα Initialization τσεκάρουμε το Domain Initialization. Στο Initial Conditions επιλέξαμε στο Temperature το Option Automatic with Value και Temperature σύμφωνα με το User Function που εμπεριέχει όλα τα Nodes.

Στο Boundary kylindros Default, ο οποίος έχει δημιουργηθεί από το Ansys, ως Basic Settings ορίσαμε Wall και στα Boundary Details επιλέξαμε Heat Transfer και Temperature, το οποίο λαμβάνει τις τιμές από το Expression 21. Στο Boundary water kylindros Interface επιλέξαμε στο Boundary Details το Conservative Interface Flux και στο Nonoverlap Conditions το Heat Transfer Coefficient με τιμή  $13,14 \text{ Wm}^2\text{K}^{-1}$ , που αντιστοιχεί στον χάλυβα.

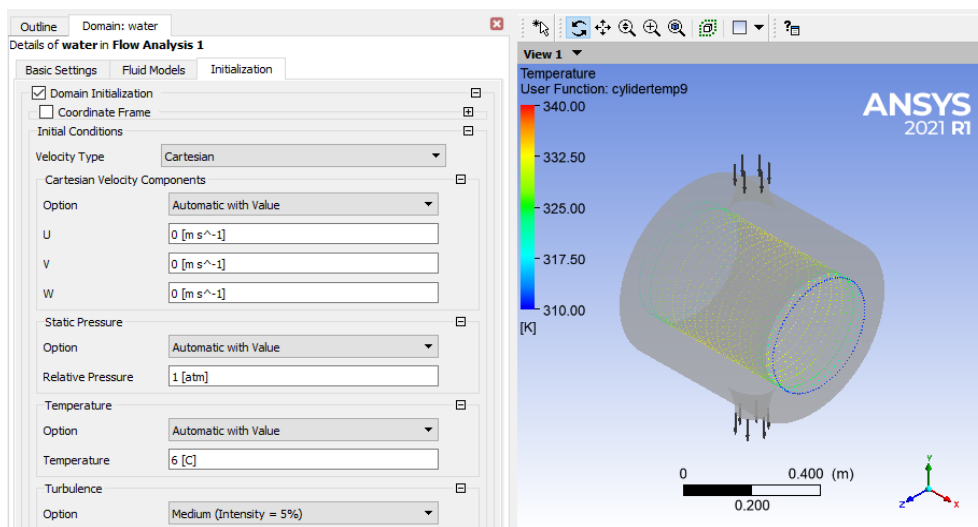




Εικόνα 71 Domain κύλινδρος

### Domain “water”

Πρόκειται για Fluid Domain και στο φυσικά στο Material επιλέξαμε Water. Στο Morphology επιλέξαμε Continuous Fluid, στο Reference Pressure 1atm και στο Domain Motion Stationary, αφού δεν περιστρέφεται. Στην καρτέλα Fluid Models επιλέξαμε στο Heat Transfer το Thermal Energy και στο Turbulence την επιλογή k-Epsilon και Wall Function Scalable. Ακόμη ως Initialization ορίσαμε τη θερμοκρασία 6°C.



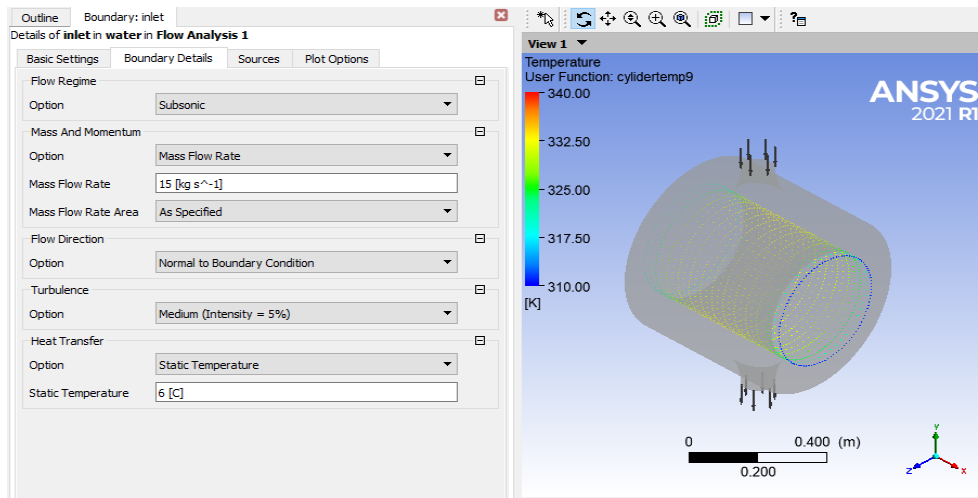
Εικόνα 72 Domain νερού

Δημιουργήσαμε τα Boundaries inlet και outlet. Στην πρώτη περίπτωση στην καρτέλα Boundary Details ορίσαμε τρία διαφορετικά Mass Flow Rates:

- i.  $10 \text{ kg s}^{-1}$
- ii.  $12,5 \text{ kg s}^{-1}$
- iii.  $15 \text{ kg s}^{-1}$

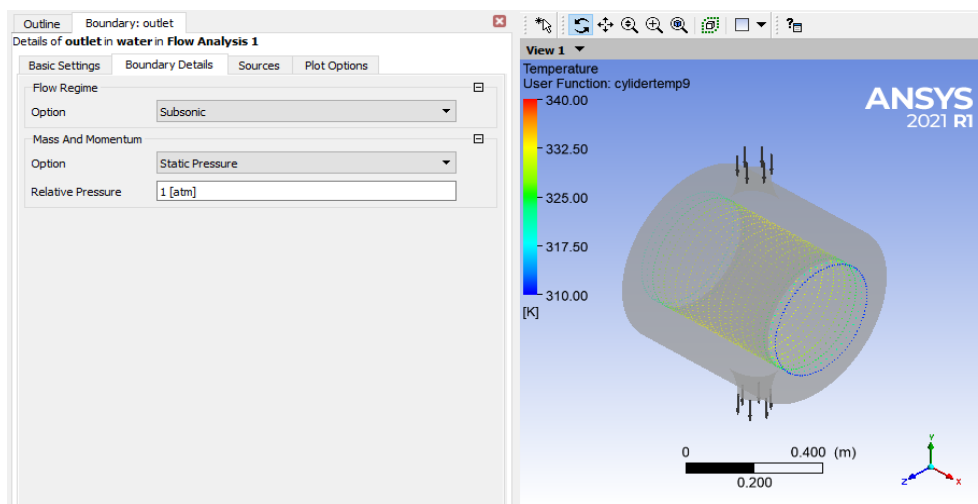
και Heat Transfer με Option Static Temperature στους 6°C.

Όσον αφορά τα Mass Flow Rates, έχει γίνει η παραδοχή ύπαρξης αντλίας που πραγματοποιεί βεβιασμένη ροή. Πέραν αυτού το σύστημα διαθέτει μεγάλες σωληνώσεις και ένα δοχείο αδράνειας (δεξαμενή νερού).



Εικόνα 73 Boundary inlet

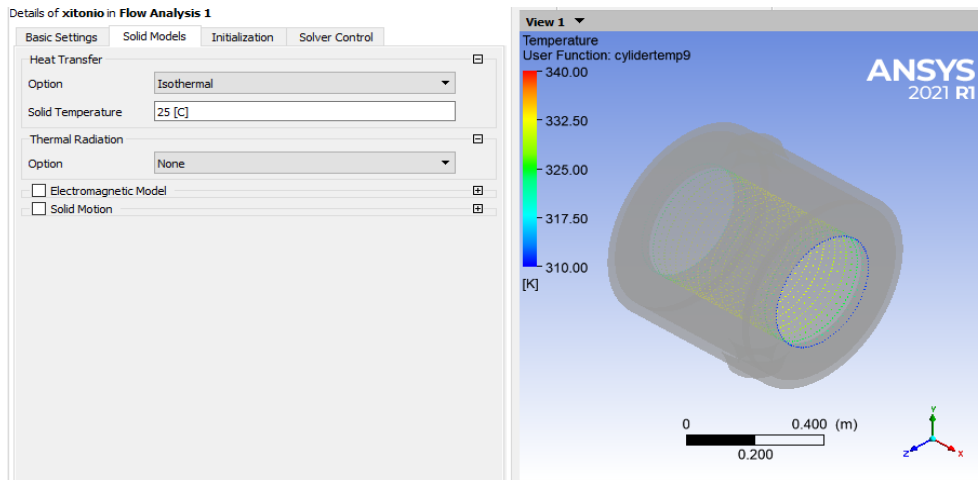
Στη δεύτερη περίπτωση δημιουργήσαμε το outlet. Στην καρτέλα Boundary Details ορίσαμε ότι στην έξοδο έχουμε μόνο Στατική Πίεση (Static Pressure) ίση με 1 atm.



Εικόνα 74 Boundary outlet

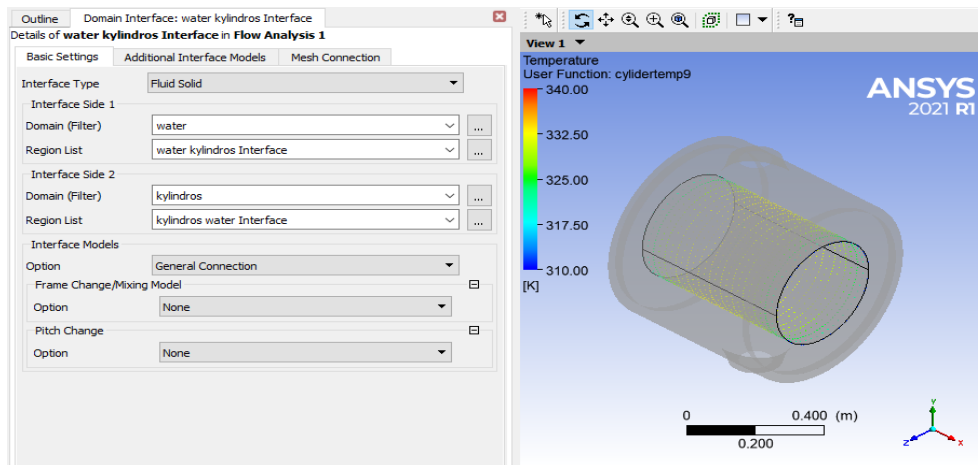
### **Domain “xitonio”**

Όπως και ο kyliindros, το xitonio αποτελεί Solid Domain από Steel και Stationary. Στην καρτέλα Solid Models στο Heat Transfer επιλέξαμε στο Option Isothermal με Solid Temperature 25°C, αφού βρίσκεται σε επαφή με το περιβάλλον.



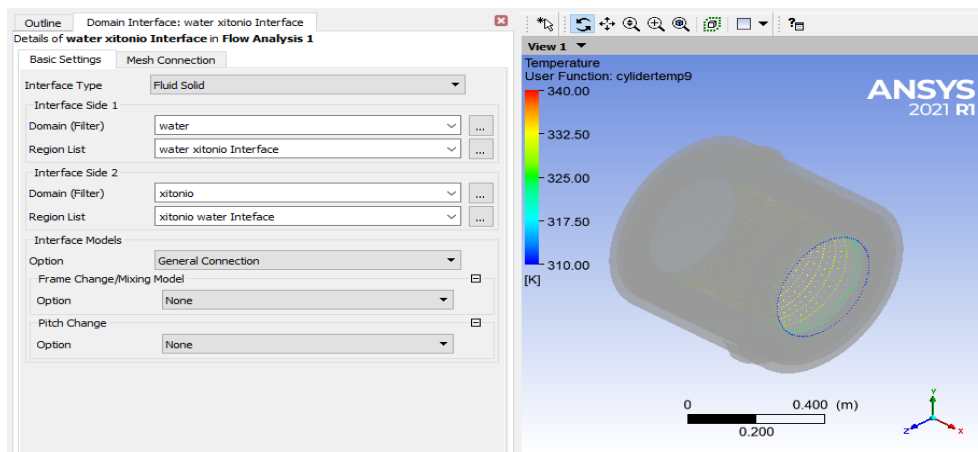
Εικόνα 75 Domain χιτώνιο

Αφού ολοκληρώσαμε με τα Domains ορίσαμε τα Interfaces μεταξύ αυτών. Ορίσαμε το water kyliandros Interface με Interface Type Fluid Solid.



Εικόνα 76 Domain Interface: water kyliandros Interface

Ορίσαμε το water xitonio Interface με Interface Type Fluid Solid.



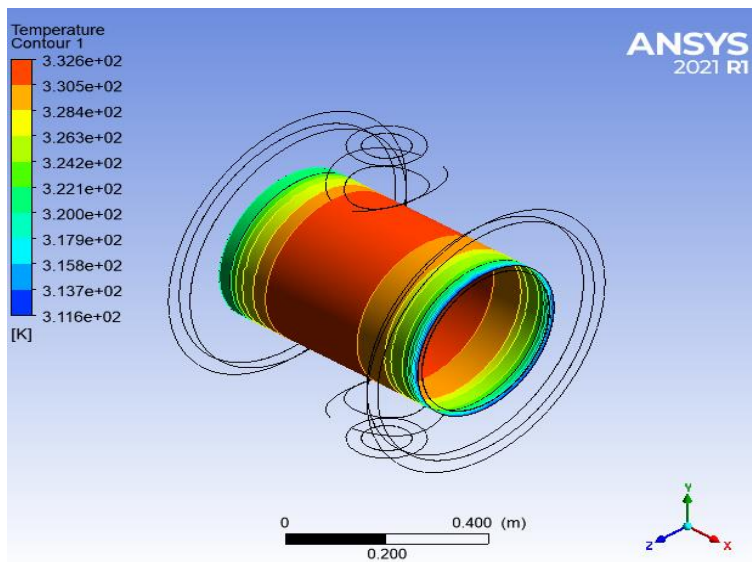
Εικόνα 77 Domain Interface: water xitonio Interface

## 5.5 Results

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται με τη βοήθεια του Contour, των Planes και των Streamlines και αφορούν θερμοκρασία, πίεση και ταχύτητα.

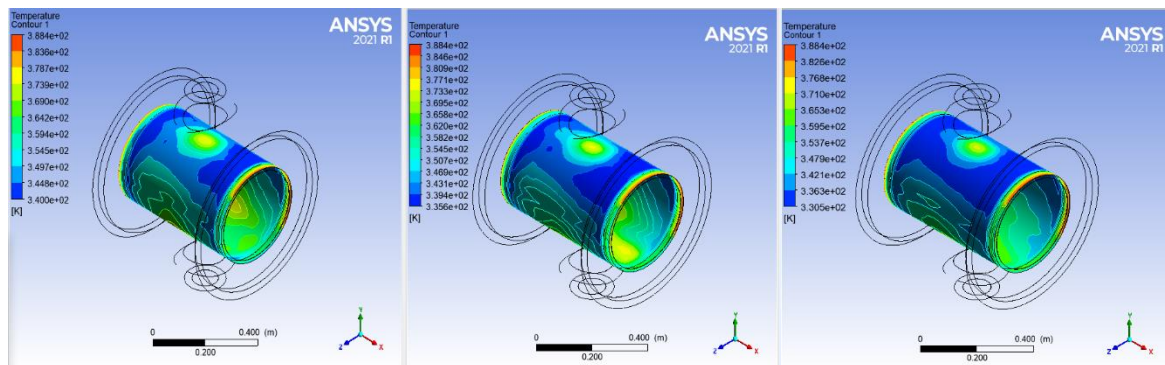
### 5.5.1 Μεταβολή θερμοκρασίας κυλίνδρου

Τη χρονική στιγμή 0s της ανάλυσης έχουμε το ίδιο θερμοκρασιακό προφίλ σε όλες περιπτώσεις.



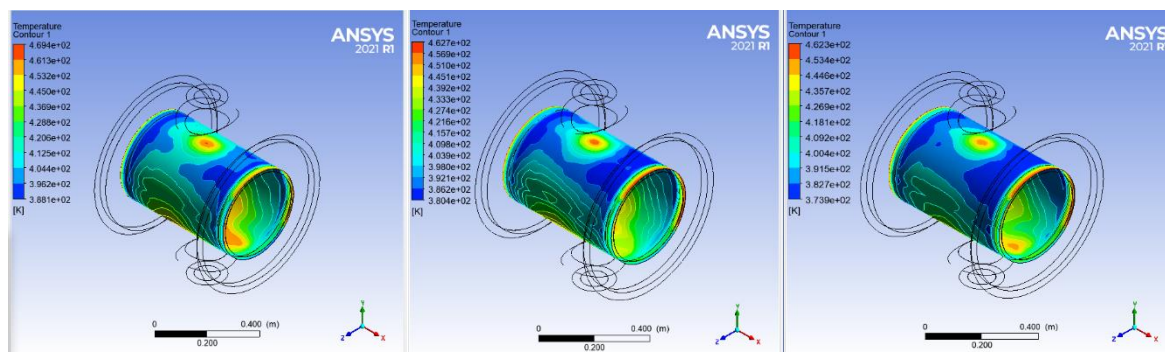
Εικόνα 78 Θερμοκρασίες στο κέλυφος του μύλου τη χρονική στιγμή 0s

Τη χρονική στιγμή 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



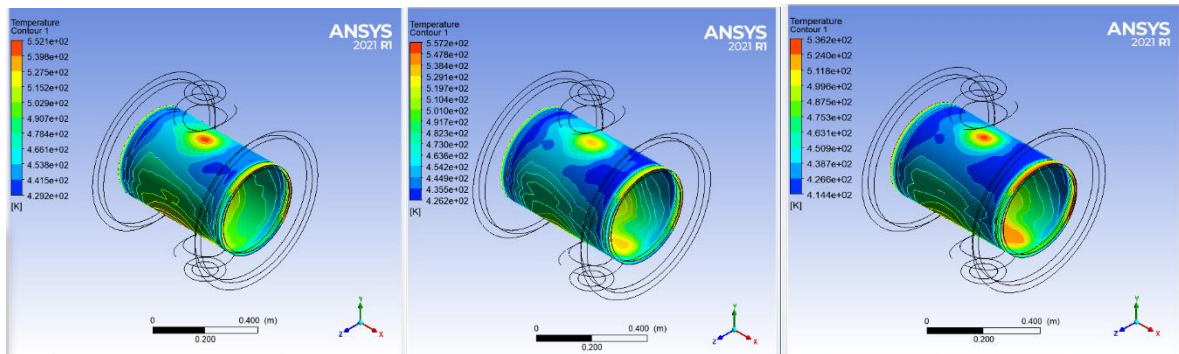
Εικόνα 79 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



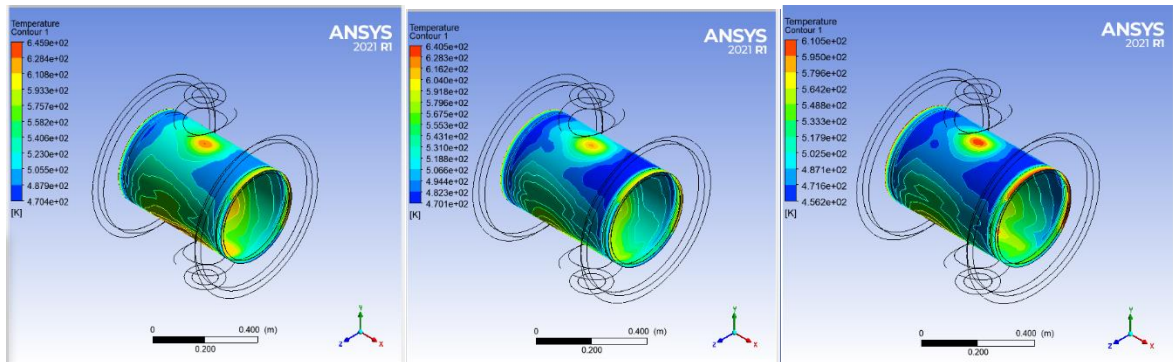
Εικόνα 80 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



Εικόνα 81 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

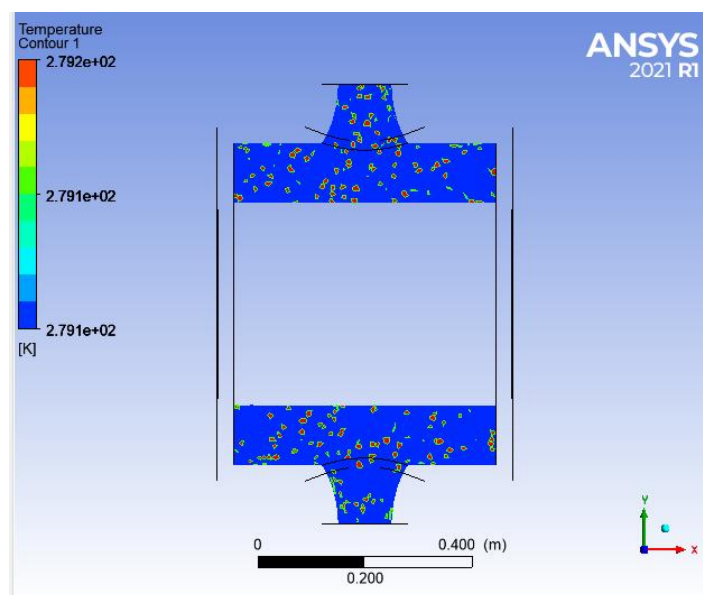
Τη χρονική στιγμή 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



Εικόνα 82 Θερμοκρασίες κυλίνδρου στα 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

### 5.5.2 Μεταβολή θερμοκρασίας νερού

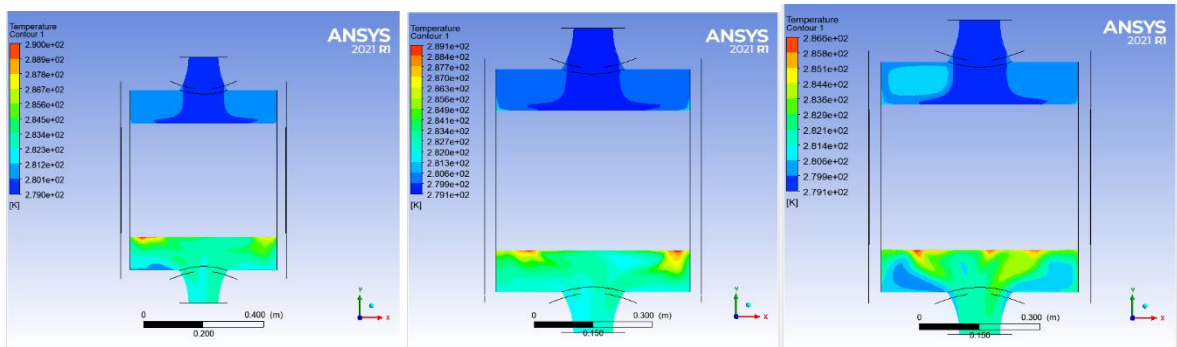
Τη χρονική στιγμή 0s της ανάλυσης έχουμε τις ίδιες θερμοκρασίες σε όλες περιπτώσεις.



Εικόνα 83 Θερμοκρασίες νερού τη χρονική στιγμή 0s

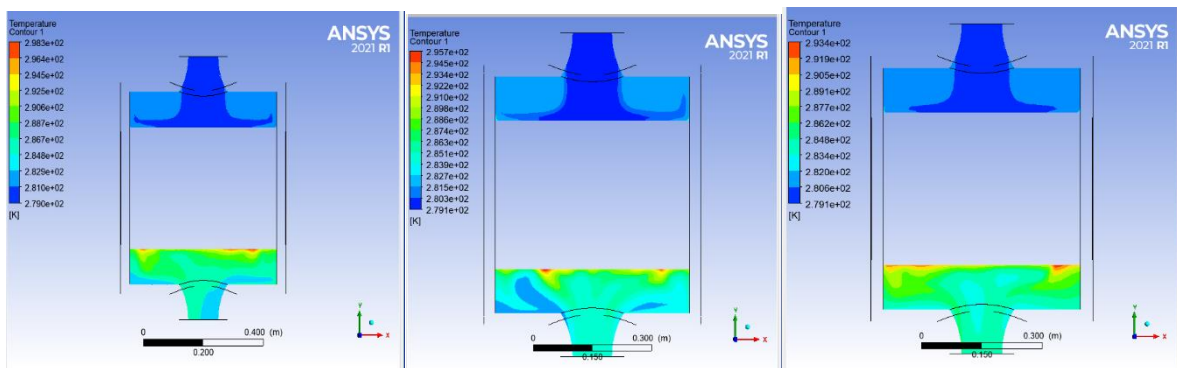


Τη χρονική στιγμή 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



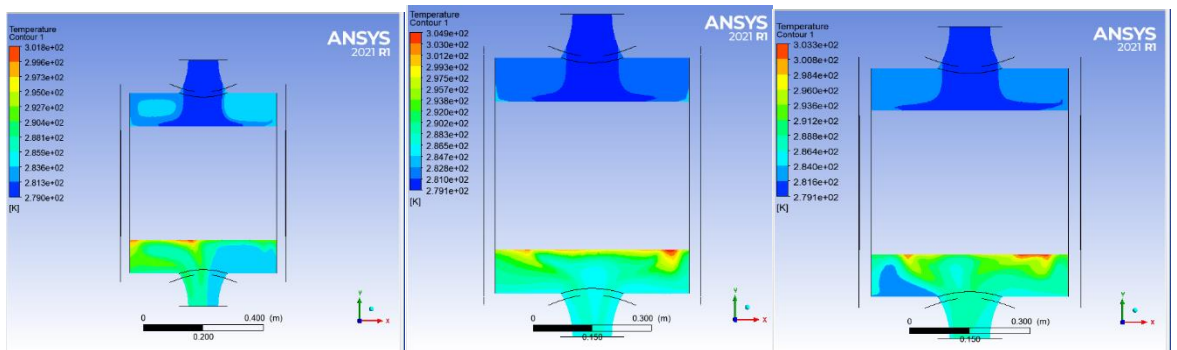
Εικόνα 84 Θερμοκρασίες νερού στα 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



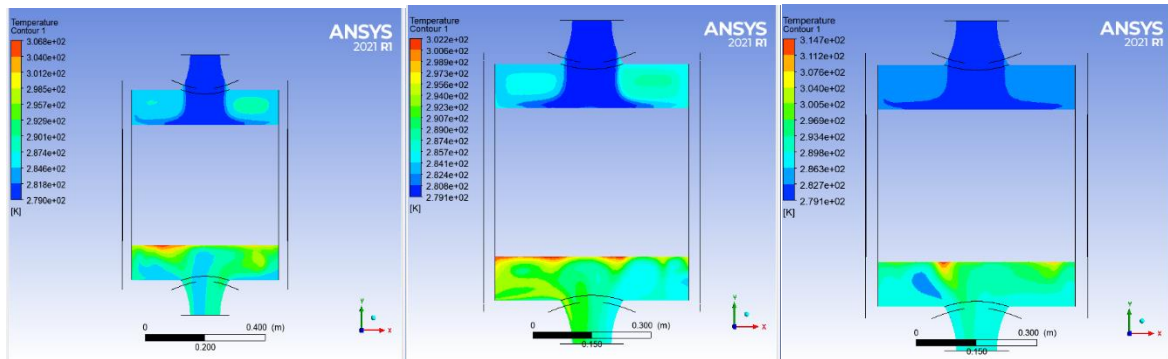
Εικόνα 85 Θερμοκρασίες νερού στα 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



Εικόνα 86 Θερμοκρασίες νερού στα 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

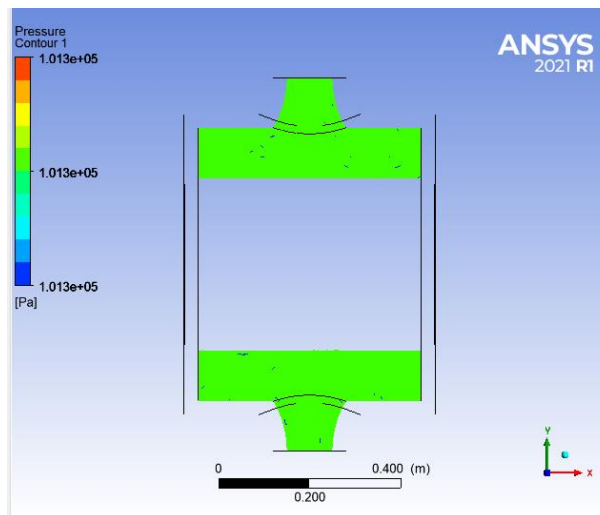
Τη χρονική στιγμή 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



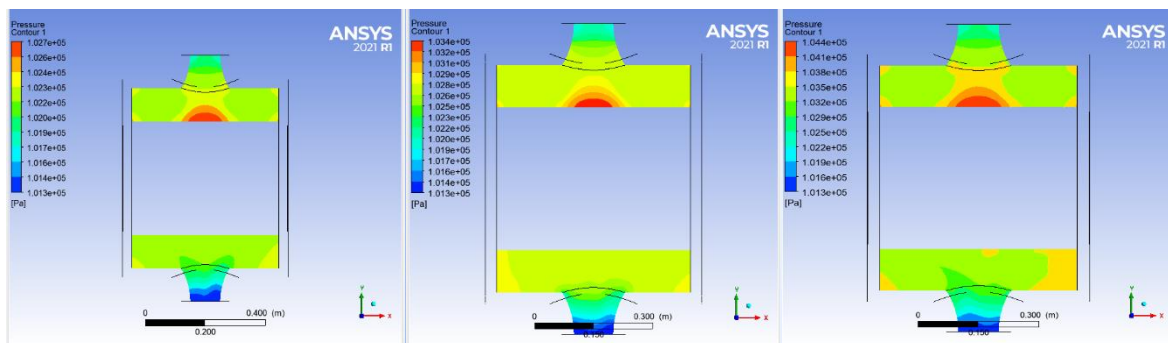
Εικόνα 87 Θερμοκρασίες νερού στα 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

### 5.5.3 Μεταβολή πίεσης

Τη χρονική στιγμή 0s της ανάλυσης έχουμε τις ίδιες πιέσεις σε όλες περιπτώσεις.

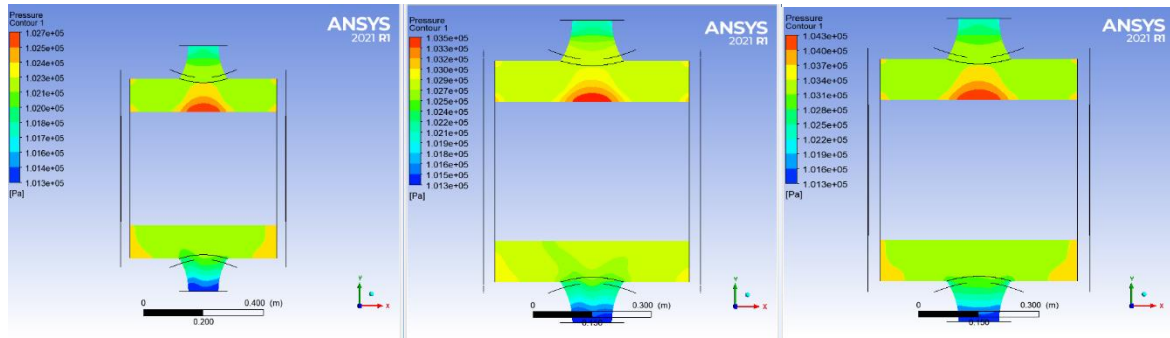


Τη χρονική στιγμή 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



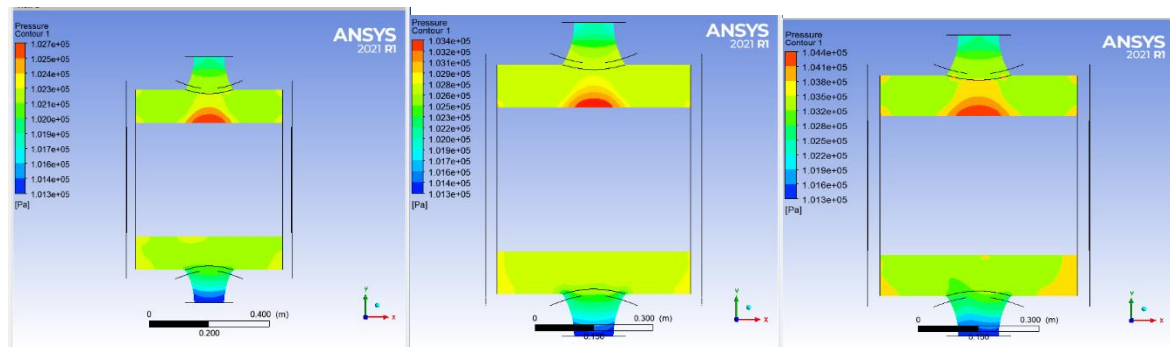
Εικόνα 88 Πιέσεις στα 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



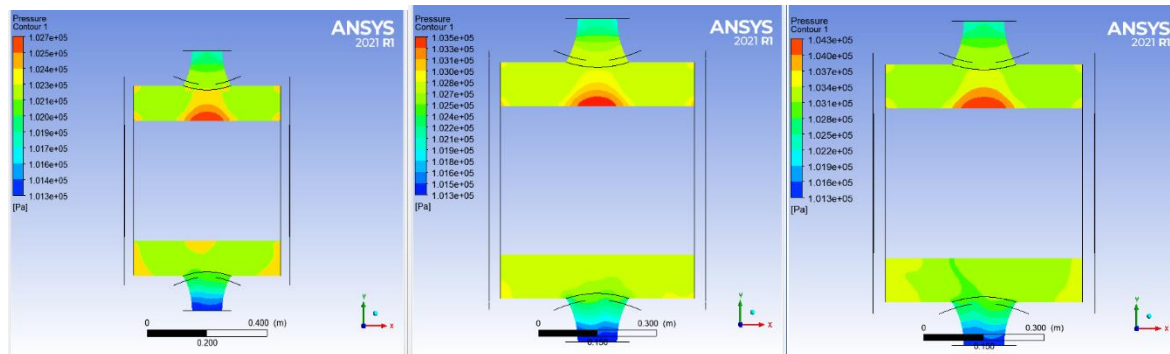
Εικόνα 89 Πιέσεις στα 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



Εικόνα 90 Πιέσεις στα 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

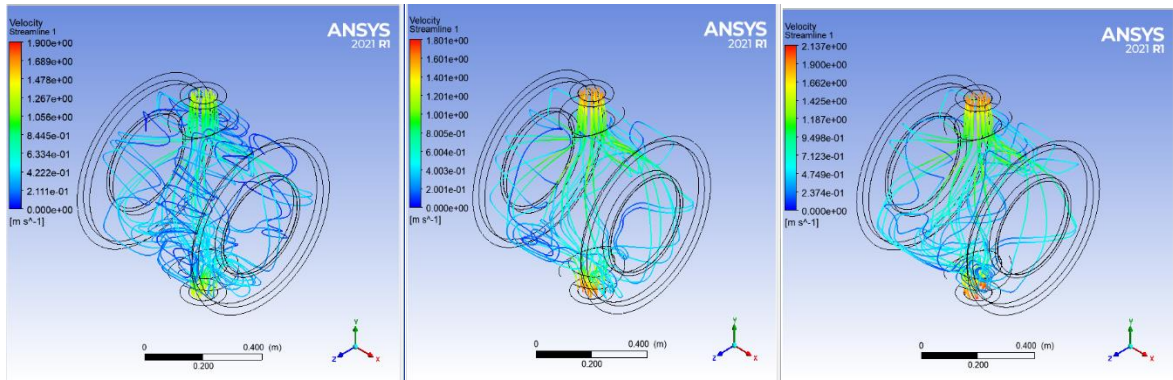


Εικόνα 91 Πιέσεις στα 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

## 5.5.4 Μεταβολή ταχύτητας

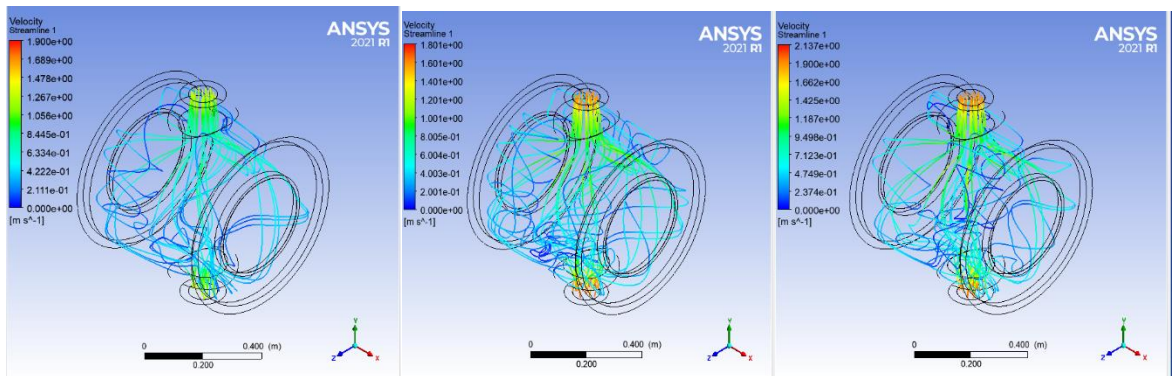
Τη χρονική στιγμή 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .





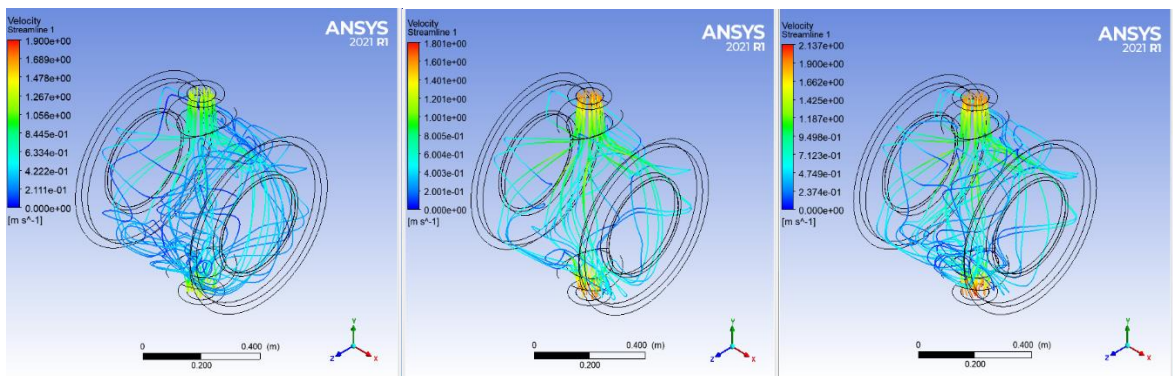
Εικόνα 92 Ταχύτητες στα 30s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



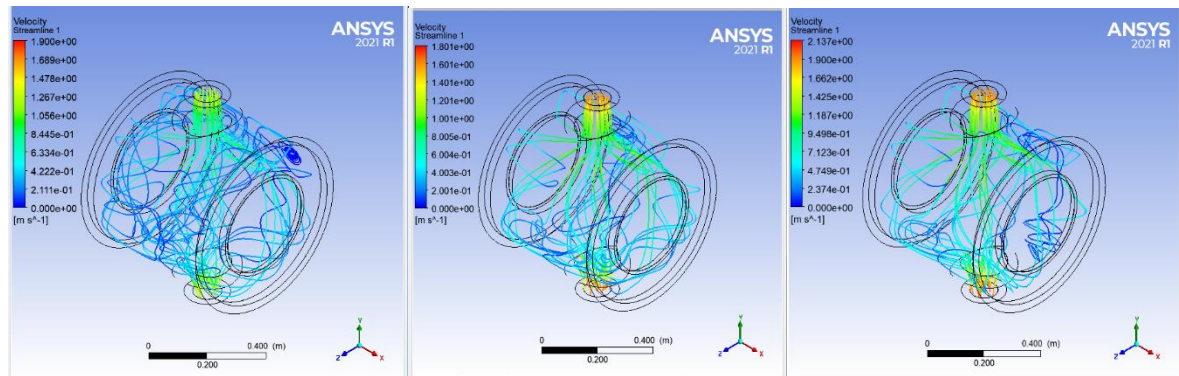
Εικόνα 93 Ταχύτητες στα 60s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



Εικόνα 94 Ταχύτητες στα 90s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

Τη χρονική στιγμή 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .



Εικόνα 95 Ταχύτητες στα 120s για  $10 \text{ kgs}^{-1}$ ,  $12,5 \text{ kgs}^{-1}$  και  $15 \text{ kgs}^{-1}$ .

## 6 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Από τις αναλύσεις στο Ansys προέκυψαν ορισμένα αποτελέσματα, τα οποία εμφανίζονται στον παρακάτω Πίνακα:

	<i>Flow Rate</i> $10 \text{ kgs}^{-1}$	<i>Flow Rate</i> $12,5 \text{ kgs}^{-1}$	<i>Flow Rate</i> $15 \text{ kgs}^{-1}$
<b>Θερμοκρασία inlet</b>	6 °C	6 °C	6 °C
<b>Μέγιστη θερμοκρασία outlet</b>	23 °C	20 °C	17 °C
<b>Μέγιστη ταχύτητα inlet</b>	1,285 m/s	1,607 m/s	1,928 m/s
<b>Μέγιστη ταχύτητα outlet</b>	1,369 m/s	1,707 m/s	2,064 m/s
<b>Μέγιστη πίεση inlet</b>	$1,018 \times 10^5 \text{ Pa}$	$1,022 \times 10^5 \text{ Pa}$	$1,025 \times 10^5 \text{ Pa}$
<b>Πίεση outlet</b>	$1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$	$1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$	$1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$

Πίνακας 5 Αποτελέσματα αναλύσεων

Γενικά γνωρίζουμε πως σε ένα σύστημα ψύξης νερού οι μέγιστες ταχύτητες ροής κυμαίνονται από 1,5-2,5 m/s. Αυτό επιτυγχάνεται στην περίπτωση μας στην δεύτερη και τρίτη περίπτωση.

<b>Maximum Flow Velocities in Water Systems</b>		
<b>Application</b>	<b>Maximum Velocity</b>	
	m/s	ft/s
Tap Water (low noise)	0.5 - 0.7	1.6 - 2.3
Tap Water	1.0 - 2.5	3.3 - 8.2
Cooling Water	1.5 - 2.5	4.9 - 8.2
Suction boiler feed water	0.5 - 1.0	1.6 - 3.3
Discharge boiler feed water	1.5 - 2.5	4.9 - 8.2
Condensate	1.0 - 2.0	3.3 - 6.5
Heating circulation	1.3 - 3.0	3.3 - 9.8

Πίνακας 6 Μέγιστες ταχύτητες ροής σε ένα σύστημα νερού

Από τα flow rates του νερού και την διαφορά θερμοκρασιών θα μπορούσαμε να διερευνηθεί η επιλογή του κατάλληλου chiller, των κατάλληλων σωλήνων και γενικότερα όλων των τμημάτων και μερών ενός συστήματος ψύξης.

Τέλος, περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να διεξαχθεί και ως προς το σχεδιασμό του χιτωνίου. Θα μπορούσε δηλαδή να διερευνηθεί η περίπτωση μικρότερου χιτωνίου, από την άποψη της μείωσης του όγκου νερού, ή ακόμα και η περίπτωση της χρήσης ενός άλλου ψυκτικού μέσου αντί του νερού.

## Βιβλιογραφία

- Beke, B. (1964). Principles of comminution. Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences.
- Bolger, R. (1995). Industrial minerals in pharmaceuticals. Στο *Industrial Minerals* (σσ. 52-63).
- COMSOL. (2017, January 15). Ανάκτηση από [www.comsol.com](http://www.comsol.com): <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>
- Conical Ball Mills Benefits & Advantages: Hardinge*. (2015, March 30). Ανάκτηση από 911Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/compare-benefits-and-advantages-of-conical-ball-mills>
- Deniz, V. (2013). Effects of mill speed on kinetic breakage parameters of four different particulate pumices. Στο *Particulate Science and Technology* (σσ. 101-108).
- Evans, P. (2017). *The Engineering Mindset*. Ανάκτηση από [www.theengineeringmindset.com](http://www.theengineeringmindset.com): <https://theengineeringmindset.com/absorption-chiller-works/>
- Fu, Y., Gu, B.-J., Wang, J., Gao, J., Ganjyal, G. M., & Wolcott, M. (2018). Novel micronized woody biomass process for production of cost-effective clean fermentable sugars. *Bioresource Technology* 260 , σσ. 311-320.
- Grewal, I. (2010). *Introduction to Mineral Processing*.
- Haldar, S. K. (2013). Mineral Exploration Principles and Application . Στο S. K. Haldar, *Mineral Exploration* (σσ. 1-21). Elsevier Inc. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-416005-7.00012-X>
- Ito, A., Hioki, S., Kuwabara, T., Takahashi, T., Sakamoto, H., & Enda, Y. (2007). A study on milling pretreatment for ethyl alcohol production from cellulosic woody biomass . *Journal of MMJ* 123 , σσ. 413-418.
- Makris, P., & Founti, M. (1996). Constructional aspects of dry pulverizers for energy efficient production of powders. *5th World Congress of Chemical engineering, Particle Technology Forum*. San Diego, California.
- Michaud, D. (2015, 24 July). *911metallurgist*. Ανάκτηση από [www.911metallurgist.com](http://www.911metallurgist.com)/blog: <https://www.911metallurgist.com/blog/secondary-tertiary-crushing-circuits>
- Michaud, D. (2016, November 7). *Grinding Mills – Common Types*. Ανάκτηση από <https://www.911metallurgist.com/>: <https://www.911metallurgist.com/blog/common-types-grinding-mills>)
- Michaud, D. (2016, October 22). *Pebble Mill Grinding*. Ανάκτηση από <https://www.911metallurgist.com>: <https://www.911metallurgist.com/blog/pebble-mills>
- Michaud, D. (2016, October 30). *Tube Mills*. Ανάκτηση από <https://www.911metallurgist.com>: <https://www.911metallurgist.com/blog/tube-mills>
- Mining Mill Operator Training*. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://millops.community.uaf.edu>: <https://millops.community.uaf.edu/amt-135/amt-135-lesson-6/>
- orykta.gr*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων: <https://www.orykta.gr/ekmetalleusi-emploutismos/methodoi-emploutismou>
- orykta.gr*. (χ.χ.). Ανάκτηση από [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr): <https://www.orykta.gr/ekmetalleusi-emploutismos/metallourgikes-diergasies/81-elliniki-tsimentobiomihania>
- Polysius, K. (χ.χ.). *Tube mills for dry grinding*.
- Stanford, H. W. (2016). HVAC Water Chillers and Cooling Towers: Fundamentals, Application, and Operation, Second Edition. *CRC Press*, xvii.

- Takahashi, T. (2019). Scaled-up pulverizing for lignocellulose biomass using a vibratory mill with ring media. *Renewable Energy An International Journal*, σσ. 77-83.
- Takahashi, T., Ito, A., Enda, Y., Ito, K., & Kobayashi, J. (2010). Research and development of the vibration mill using cog-disk mediums for lignocellulosic biomass pulverization. *Trans. JSME, Ser. B 76-770*, σσ. 1654-1660.
- Takahashi, T., Ito, A., Enda, Y., Ito, K., & Kobayashi, J. (2012). Research and Development of the Vibration Mill Using Cog-Ring Mediums for Improvement in Efficiency of Lignocellulosic Biomass Pulverization. *Trans. JSME, Ser. B 78-788*, σσ. 905-916.
- Thomas Publishing Company. (2021). Ανάκτηση από <https://www.thomasnet.com:https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/types-of-chillers/>
- Weiss, N. L. (1985). *SME Mineral Processing Handbook*. Colorado, USA: Littleton.
- Wikipedia. (2021, July 9). Ανάκτηση από [www.wikipedia.org:https://en.wikipedia.org/wiki/Mineral\\_processing](http://www.wikipedia.org:https://en.wikipedia.org/wiki/Mineral_processing)
- Wikipedia. (2021, September 3). Ανάκτηση από [https://en.wikipedia.org/:https://en.wikipedia.org/wiki/Chiller#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/:https://en.wikipedia.org/wiki/Chiller#cite_note-1)
- Wills, B. A. (1988). *Mineral Processing Technology*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Βικιπαίδεια. (χ.χ.). *Εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων*. Ανάκτηση από [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BC%CF%80%CE%BB%CE%BF%CF%85%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82\\_%CF%84%CF%89%CE%BD\\_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD#%CE%95%CF%80%CE%AF%CF%80%CE%BB%CE%B5%CF%85%CF%83%CE%B7](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BC%CF%80%CE%BB%CE%BF%CF%85%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CF%84%CF%89%CE%BD_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD#%CE%95%CF%80%CE%AF%CF%80%CE%BB%CE%B5%CF%85%CF%83%CE%B7)
- Ζαννής, Γ. (2008). Βελτιστοποίηση λειτουργικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών ειδικών μύλων υπέρλεπτης λειοτρίβησης (δακτυλιόμυλων) με χρήση πειραματικών μεθόδων. *Διδακτορική διατριβή*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
- Μακρής, Π., & Φούντη, Μ. (1994). Κατασκευαστική συμβολή για την εξοικονόμηση ενέργειας στην ξηρή λειοτρίβηση υλικών. *Συνέδριο πανελληνίου συλλόγου χημικών μηχανικών: Ορθολογική χρήση ενέργειας στη βιομηχανία διεργασιών*. Αθήνα.
- Πετράκης, Ε. (2004). Σχέση ενέργειας και μεγέθους κόκκων κατά την λειοτρίβηση ψαθурών υλικών, Μεταπτυχιακή διατριβή. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Σταμπολιάδης, Η. (2008). *Εμπλουτισμός Μεταλλευμάτων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Τσακαλάκης, Κ. (2018). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ*. Αθήνα.