BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİK DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLMÜŞ MALZEME AKIŞININ CFD ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin GEZER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MAYIS 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİK DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLMÜŞ MALZEME AKIŞININ CFD ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin GEZER
(181212872014)
ORCID: 0000-0002-6418-0632

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN
ORCID: 0000-0001-8647-4861

MAYIS 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 181212872014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hüseyin GEZER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DİK DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLMÜŞ MALZEME AKIŞININ CFD ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN**

Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN**

Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Salih COŞKUN

Uludağ Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15.05.2021
Savunma Tarihi : 27.05.2021

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Hüseyin GEZER

İmzası :

Aileme ve milletime,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sürecinde bana göstermiş olduğu ilgi ve alaka hasebiyle danışman hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN'e teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın yapılabilmesi için gerekli imkanları sağladıkları ve iş hayatıyla eş zamanlı olarak tez çalışmamı yürütebilmem için gösterdikleri anlayış dolayısıyla Bilim Makine İnşaat San. ve Tic. AŞ. Yönetim kurulu başkanı Sn. Cemal BİLİM ve yatırım dizayn bölümü müdürü Sn. Yener DUMAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca yetişip bugünlere ulaşmamı sağlayan, benden her türlü desteğini esirgemeyen kıymetli ailem; annem Gülten GEZER, babam Abdurrahim GEZER ve kardeşlerime, ve son olarak bu gibi çalışmaların yapılabilme imkan ve şeraitinin teminatı devletim ve kadirşinas milletime teşekkürleri bir borç bilirim.

Şubat 2021 Hüseyin GEZER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **vii**
SEMBOLLER ..... **viii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **x**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 5
1.2 Dik Değirmen Tarihçesi 5
1.2.1 Valsli değirmenler 10
1.2.2 Modern dikey valsli değirmenler 20
1.2.3 Seperatörler 21
1.2.4 Islak öğütme için seperatörler 23
1.2.5 Kuru öğütme için seperatörler 23
2. LİTERATÜR TARAMASI **27**
3. MATERYAL METOT **37**
3.1 Değirmen Modelleme 37
3.2 Mesh Oluşturma 39
3.3 Sınır Şartlarının Tanımlanması 42
3.4 Programda Seçilen Modeller ve Formülasyonlar 50
4. BULGULAR **52**
4.1 Plane 1 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları 53
4.2 Plane 2 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları 56
4.3 Plane 3 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları 58
4.4 Plane 4 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları 60
4.5 Değirmen Çıkışı Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları 62
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ **66**
KAYNAKLAR **68**
ÖZGEÇMİŞ **71**

KISALTMALAR

CAD **:** Bilgisayar Destekli Tasarım
CFD **:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CKP **:** Chichibu Kawasaki Pregrinder
Co **:** Firma
DEM **:** Ayrık Eleman Modelleme
DPM **:** Ayrık Faz Modelleme
FLS **:** Frederik Lassoe Smidth Firması
MVR **:** Çok Sürüşlü Dik Değirmen
MPS **:** Mikro Öğütücü Sistem
RGM **:** Reynolds Gerilim Modeli

SEMBOLLER

Atm : Atmosfer basıncı

cm : Santimetre

$\vec{F}$: Dış gövde kuvveti

Ft : Feet

G : Santrifüj kuvveti

Gb : Kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi

Gk : Hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi

H_2O : Su molekülü

Hp : Horsepower

K : Kelvin

k : Türbülans kinetik enerjisi

kg : Kilogram

kW : Kilowatt

kWh : Kilowatt saat

m : Metre

m^3 : Metreküp

mm : Milimetre

p : Statik basınç

Pa : Pascal

Rpm : Dakikadaki devir sayısı

S_m : Sürekli olan faza, dağılan ikincil fazdan eklenen kütle

t : Zaman

u : Dalgalanan gaz akış hızı

°C : Santigrat derece

Ɛ : Disipasyon oranı

μ : Moleküler vizkozite

μm : Mikrometre

ρ : Akışkan yoğunluğu

σ_ε : Disipasyon oranı için Prandtl sayısı

σ_k : Türbülans kinetik enerjisi için Prandtl sayısı

$\vec{\boldsymbol{v}}$: Hız bileşeni

$\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}}$: Gerilme Tensörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Sahadan alınan veriler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması **65**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Değirmen kesiti. **2**
Şekil 1.2: Dik değirmen parçaları. **3**
Şekil 1.3: Dik değirmen yapısı. **4**
Şekil 1.4: Dik değirmen atası, taş öğütme. **6**
Şekil 1.5: Yassı taş değirmeni. **7**
Şekil 1.6: Dökme demirden ruloların kullanıldığı öğütme makinesi. **8**
Şekil 1.7: Yuvarlamalı değirmenlerin kullanıldığı fabrika **9**
Şekil 1.8: İlk bilyalı değirmenlerden birine örnek. **9**
Şekil 1.9: Yıllara göre kullanılan değirmen türlerinin değişimi **10**
Şekil 1.10: İlkel valsli değirmen örneği. **11**
Şekil 1.11: Edge-Runner değirmen. **12**
Şekil 1.12: Neate dinamik öğütücü. **13**
Şekil 1.13: Griffin değirmeni. **14**
Şekil 1.14: Çimento öğütmede Griffin değirmenleri, Norman. **15**
Şekil 1.15: Raymond değirmeni. **16**
Şekil 1.16: Geliştirilmiş Raymond değirmeni. **16**
Şekil 1.17: Fuller-Leigh değirmeni. **18**
Şekil 1.18: Dikey basınç ve döner tablalı, bilyalı değirmen. **19**
Şekil 1.19: Valsli ve bilyalı değirmenlere göre öğütme güç gereksinimleri. **19**
Şekil 1.20: Değirmen çapına bağlı olarak yapı hacmi. **21**
Şekil 1.21: Modern valsli değirmen çalışma prensibi. **22**
Şekil 1.22: Slurry (Bulamaç) seperatörü. **24**
Şekil 1.23: Kanallı seperatör. **24**
Şekil 1.24: Askham hava seperatörü **25**
Şekil 1.25: Üçüncü nesil seperatör. **26**
Şekil 2.1: 1927 yılına ait dik değirmen örneği. **27**
Şekil 2.2: Loesche marka değirmen örneği. **29**
Şekil 2.3: Pfeiffer MPS değirmeni. **30**
Şekil 2.4: Dik silindirli değirmen parçaları. **31**
Şekil 2.5: Mesh üretim konsepti. **33**
Şekil 2.6: Polihedron ağ örneği. **33**
Şekil 2.7: CFD türbülans modelleri karşılaştırması. **34**
Şekil 2.8: Seperatör bıçak yapısı mesh işlemi. **35**
Şekil 3.1: Değirmen modelleme çalışması. **37**
Şekil 3.2: Değirmen model iç kesiti. **38**
Şekil 3.3: Silindirlerin konumlandırılması. **38**
Şekil 3.4: Eleman sayısı. **39**
Şekil 3.5: Eleman dağılım grafiği. **40**
Şekil 3.6: Mesh kalitesi belirleme çizelgesi. **40**
Şekil 3.7: Ortogonal kalite. **40**

Şekil 3.8: Çarpıklık değerleri. **41**
Şekil 3.9: Mesh uygulaması sonucu. **41**
Şekil 3.10: Mesh uygulama detayı. **41**
Şekil 4.1: Plane 1 gösterimi. **52**
Şekil 4.2: Plane 2, Plane 3 ve Plane 4 görünümü. **52**
Şekil 4.3: Plane 1 üzerinde hız dağılımı. **53**
Şekil 4.4: Plane 1 hız akış çizgisi ve vektör gösterimi. **54**
Şekil 4.5: Plane 1 üzerinde sıcaklık vektörü. **54**
Şekil 4.6: Plane 1 sıcaklık dağılımı. **55**
Şekil 4.7: Plane 1 üzerinde basınç dağılımı. **56**
Şekil 4.8: Plane 2 hız dağılımı. **56**
Şekil 4.9: Plane 2 hız vektörü. **57**
Şekil 4.10: Plane 2 sıcaklık dağılımı. **57**
Şekil 4.11: Plane 2 üzerinde basınç dağılımı. **58**
Şekil 4.12: Plane 3 hız vektörleri. **58**
Şekil 4.13: Plane 3 sıcaklık dağılımı. **59**
Şekil 4.14: Plane 3 basınç dağılımı. **59**
Şekil 4.15: Plane 4 hız dağılımı. **60**
Şekil 4.16: Plane 4 hız vektör görünümü. **60**
Şekil 4.17: Plane 4 üzerinde basınç dağılımı. **61**
Şekil 4.18: Plane 4 üzerinde sıcaklık dağılımı. **61**
Şekil 4.19: Değirmen çıkış hız dağılımı. **62**
Şekil 4.20: Değirmen çıkış sıcaklık dağılımı. **62**
Şekil 4.21: Değirmen çıkış basıncı. **63**
Şekil 4.22: Tane çapına bağlı olarak partikül takibi. **63**
Şekil 4.23: Analizi yapılan ve sahada incelenen dik değirmen. **64**
Şekil 4.24: Verilerin alındığı çimento üretim tesisinin ana kumandası. **65**
Şekil 5.1: Dik değirmen CFD çalışmaları süreç diyagramı. **66**

DİK DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLMÜŞ MALZEME AKIŞININ CFD ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada; çimento, madencilik, cevher işleme gibi alanlarda kullanılan öğütme ekipmanlarından biri olan dikey valsli değirmenin CFD analizi yapılarak, elde edilen veriler ile sahadan alınan verilerin karşılaştırılmasının yapılması, dik değirmen performansını artırmaya yönelik varsa önerilerin getirilmesi ve ülkemizde yurt dışından temin yoluyla kullanılan bu değirmenin yerli imkanlarla üretimine ön ayak oluşturulması amaçlanmıştır.

Dik değirmenler özellikle çimento, madencilik gibi cevher malzemelerin öğütülme prosesinin olduğu iş alanlarında kullanılan öğütme görevini yerine getiren makinelerdir. Öğütmeyle birlikte gerçekleştirilmesi gereken ayırma işlemini harici bir sistemle değil kendi içlerinde yer alan seperatör (ayırıcı) kısmıyla gerçekleştirebilir ve ayrıca eğer ıslak öğütme işlemi yapılacaksa sıcak gaz girişi sayesinde kurutma işlemini de öğütme ile aynı anda gerçekleştirebilirler. Bu özellikleri aynı zamanda hacimsel olarak da kapladıkları alandan tasarruf sağlamaktadır. Çalışmamıza konu olan dikey valsli değirmenlerin kullanıldığı çimento endüstrisi yüksek enerji tüketiminin olduğu bir alan olup, burada ki öğütme işleminde harcanan elektrik enerjisi toplam üretim sürecinde harcanan elektrik enerjisinin %60'dan daha fazlasını oluşturmaktadır. Dik değirmenlerde enerjinin büyük kısmı öğütme işlemine harcansa da önemli ölçüde bir bölümü faydalı bir iş yapmadan, ses ve ısı olarak kaybedilmektedir. Teorik olarak öğütme verimliliği bilyalı değirmen, silindir, pres gibi öğütme elemanlarına kıyasla daha büyük ölçüde arttırılabilir ve elektrik tüketimi azaltılabilir. Bunula birlikte yüksek çalışma basıncından dolayı dik değirmenlerin bu avantajları pratik üretim sürecinde çok açık değildir.

Çalışma kapsamında halihazırda Bilecik Vezirhan'da kurulu Dinçer Çimento AŞ. Tesisinde kullanılmakta olan Pfeiffer MVR 5000 R4 tip dikey valsli değirmen baz alınarak Inventor Professional 2018 programında katı modelleme işlemi yapılmıştır. Model üzerinde analiz öncesi gerekli düzenlemeler SpaceClaim programında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra model Ansys 2020 R1 programına aktarılıp, meshleme (ağlara bölme) işlemi yapılıp, sınır şartları tanımlanmıştır. Matematiksel modeller tanımlanarak gerekli optimizasyonlar yapıldıktan sonra akışkan analizi gerçekleştirilmiş ve analiz sonlandırılmıştır.

Son olarak yerinde yapılan incelemelerde sıcaklık, basınç, tane büyüklüğü ve hız parametrelerinde analizden elde edilen teorik sonuçlar ile pratik veriler karşılaştırılmış ve dik değirmen içi akış analizi ile gerçek verilerin doğrulaması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dik Değirmen, Öğütme, CFD, Modelleme, Ansys, Akış Analizi.

CFD ANALYSIS OF CRUSHED MATERIAL FLOW IN VERTICAL ROLLER MILL

SUMMARY

The aim of this study is execution of CFD analysis at a vertical mill which is used for grinding at cement, mining, ore processing, etc. sectors; while comparing received data with actual data on site, coming forth with suggestions to increase the vertical mill performance if any, and promoting the possibility of local fabrication of this equipment which is being imported actually.

Vertical mills are machines used for material grinding in fields of business like cement, mining, etc. that have grinding processes in their operations. Their advance technology, results in putting away the need of an external system using a separator (classifier) implemented within; and drying the material during grinding phase by the use of a hot air inlet if the material to be grinded is wet. These qualifications also make efficient use of space available. Cement industry that is commonly using our subject, vertical mills with rollers; is a sector with high energy consumption, in which grinding equipment has the major share of over 60%. While the major consumption of energy is for grinding at vertical mills, a significant share is lost as sound and heat. Theoretically, vertical mills have higher possibility of increasing the grinding efficiency and decreasing the energy consumption with regard to ball mills, cylinders, or roller presses. Besides, due to high pressure operation conditions, these advantages are not too clear in practical operation on field.

In scope of this study, solid modeling of a Pfeiffer MVR 5000 R4 type vertical roller mill currently being operated in Dinçer Çimento AŞ in Vezirhan/Bilecik was created by using Inventor Professional 2018 modeling program. Before analysis, required editing is made my using SpaceClaim computer program. Then the model is transferred into Ansys 2020 R1 computer program for meshing (dividing into webs), and limit conditions are identified. After identifying mathematical models and completing required optimizations, flow analysis is applied and analysis is finalized.

Finally, theoretical results and practical data on temperature, pressure, particle size and speed parameters are compared, and inner mill flow analysis is used for verification of actual data.

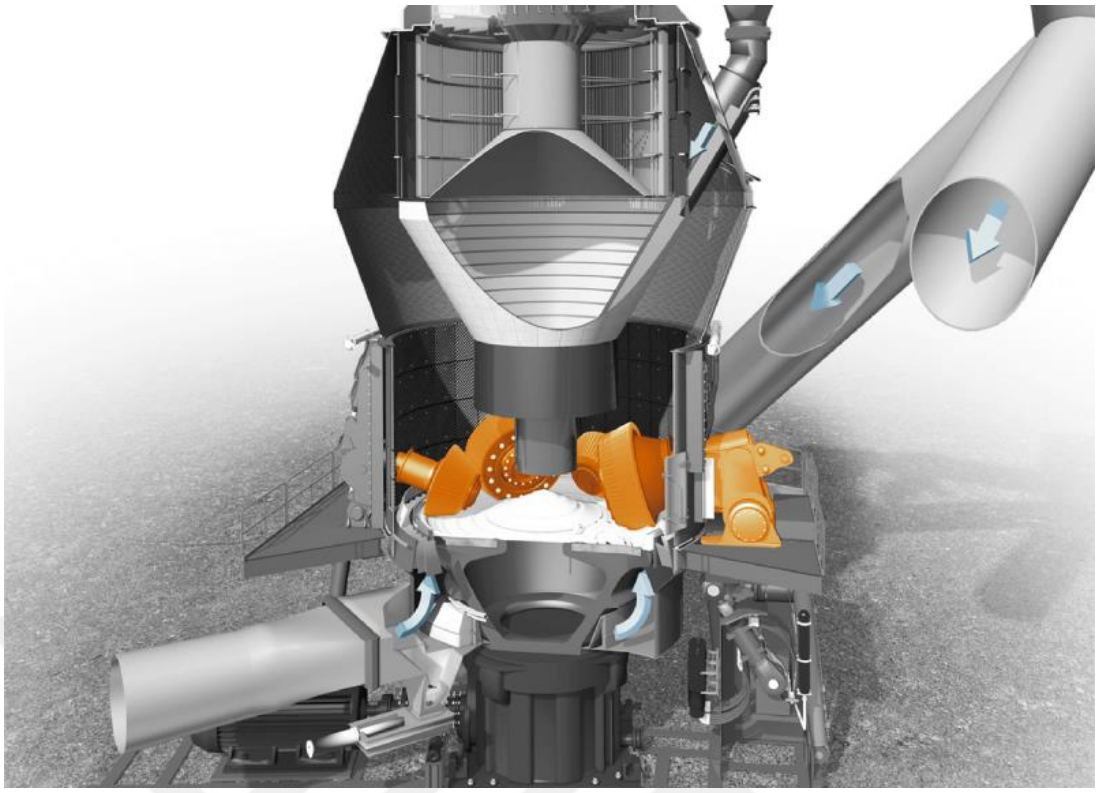
Keywords: Vertical Mill, Grinding, CFD, Modeling, Ansys, Flow Analysis.

1. GİRİŞ

Öğütme ve parçalama; materyalin daha küçük parçalara bölünmesiyle hacmini küçültmek için uygulanan bir işlemdir. Öğütme, ufalamanın son aşamasıdır ve bu aşama daha fazla enerji tüketilir. Bu işlem için gerekli enerji dünya ortalaması olarak tüm enerji tüketimi içinde yaklaşık %4'lük paya sahiptir. Bunun ise ana tüketicisi %0,77 ile çimento endüstrisi iken, onu %0,62 ile ahşap öğütme ve %0,21 ile cevher işleme takip etmektedir [1]. Bu bağlamda minimum enerji tüketimi ile yüksek kaliteli tanecik ürünlerin üretimi ise mevcut maden, mineral işleme, çimento üretim gibi öğütme teknolojisinin kullanıldığı tesisler için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu amaçla üreticiler rekabet gücünü arttırmak için enerji tüketimini azaltmaya çalışırlar.

Dünyada çeşitli türlerde öğütme makineleri endüstride kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları dikey valsli değirmenler, bilyalı değirmenler, çekiçli değirmenler ve yüksek basınçlı öğütücü silindirleridir. Farklı türdeki öğütme makinaları için çalışma mekanizması da farklıdır. Bilyalı değirmenler temel olarak darbe etkisini esas alırken, dik değirmenlerde ana mekanizma sıkıştırmadır. Klaus Schönert'e [2] göre ise öğütmenin en etkili yolu parçacığı iki plaka arasında sıkıştırmaktır. Dik değirmenlerin öğütme mekanizması esas olarak bu hipoteze dayanmaktadır. Bu açıdan dik değirmenler diğer öğütme ekipmanlarına kıyasla daha avantajlıdırlar. Dik silindirli değirmenler diğer öğütme elemanlarına kıyasla daha az enerji tüketimine sahiptir. Yine dik değirmenler diğer öğütme ekipmanlarına göre daha az yer kaplamakta ve daha az kurulum maliyetine neden olmaktadırlar. Çalışma sırasında daha düşük gürültü sağlamakla birlikte öğütme parçalarında daha az aşınma olmaktadır. Ayrıca dik silindirli değirmenlerin işletimi daha basit ve hizmet ömrü daha uzundur.

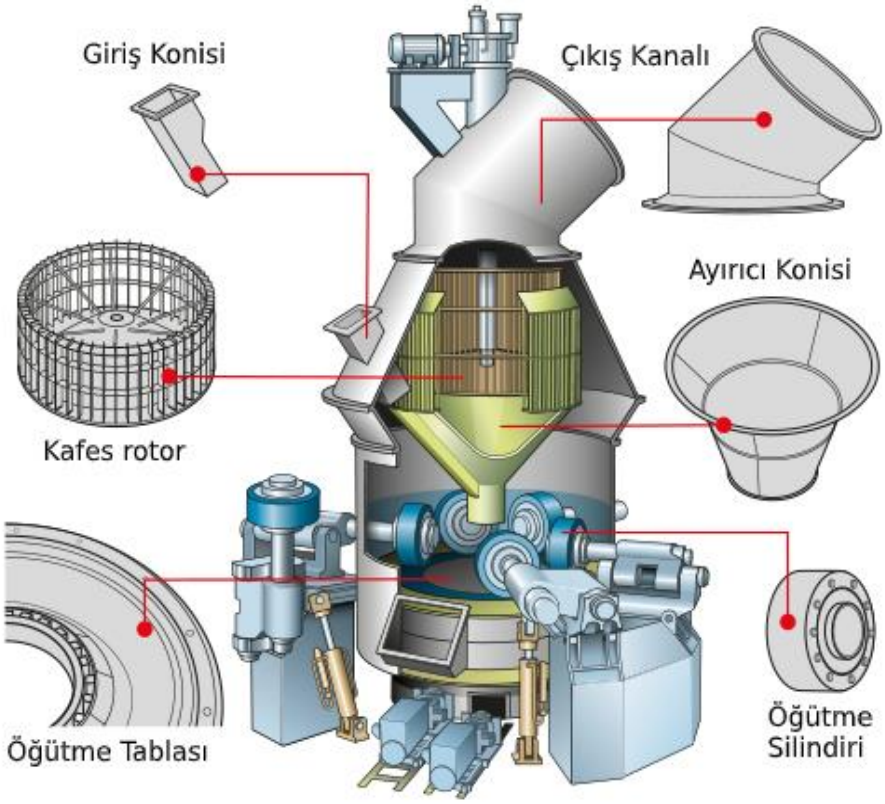
Dik silindirli değirmenlerin bir diğer önemli özellikleri ise hem kuru hem yaş malzeme öğütmesi yapabilmesidir. Yaş öğütmede yapılan enerji sarfiyatı kuru öğütmeye göre önemli ölçüde daha azdır. Bu nedenle cevher hazırlama tesislerinde genellikle öğütme yaş olarak yapılmaktadır.



Şekil 1.1: Değirmen kesiti. [3]

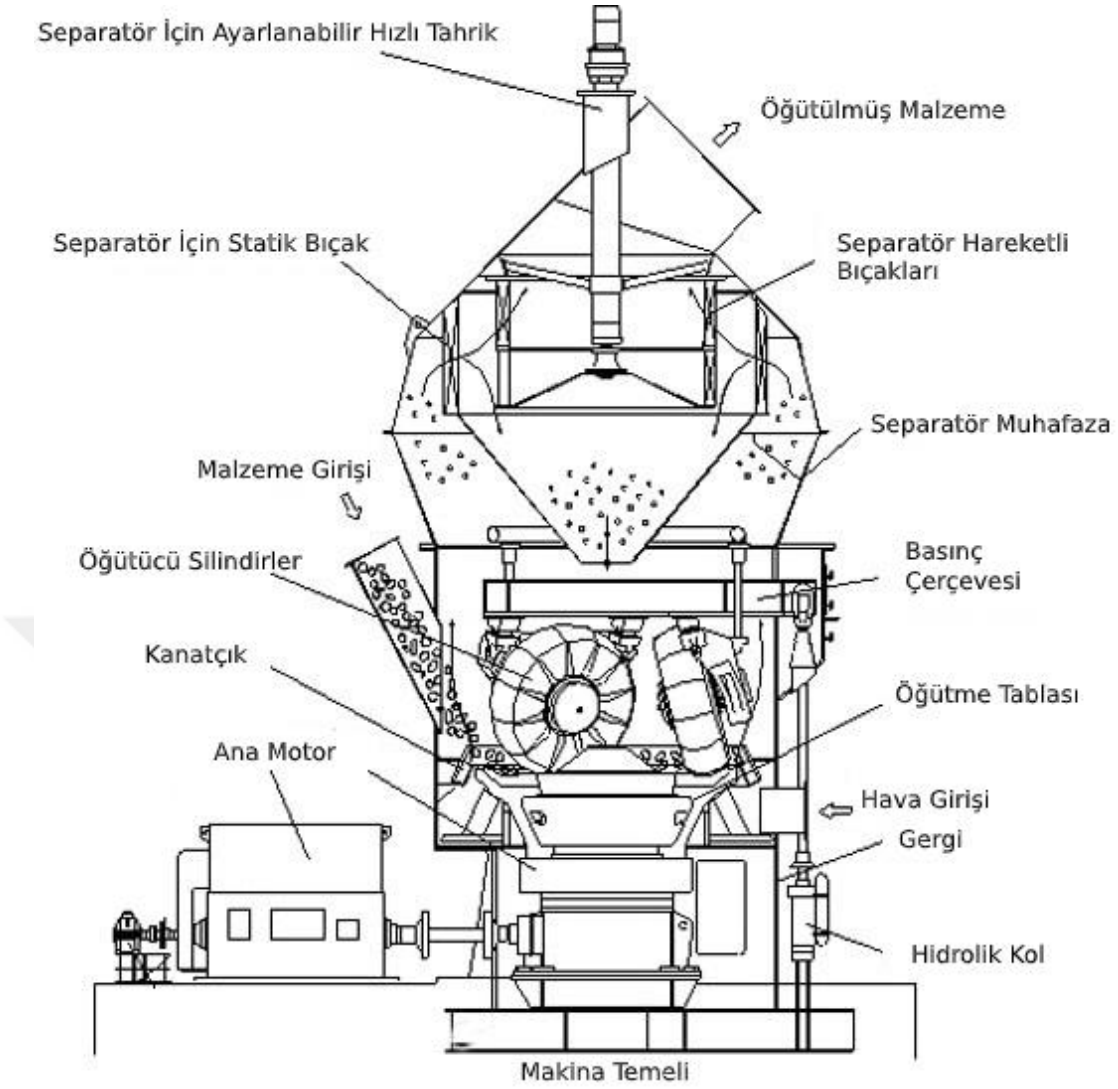
Dik değirmenler öğütme ve ayırma işlemlerini bir arada yerine getirmektedir. Öğütme işlemi, öğütme tablası ile silindirler arasında meydana gelir burada sıkıştırma kuvveti etkilidir. Ayırma işlemi ise değirmen içerisinde yer alan dinamik hava ayırıcısı (dinamik seperatör) tarafından gerçekleştirilir. İstenilen çıkış tane büyüklüğü seperatör açısal hızına bağlı olarak, seperatör dışında yer alan rotor ve seperatör üzerindeki kanatların açısı ve yerleştirilme mesafeleri ile ayarlanabilmektedir.

Dik değirmen redüktör üzerinde dönen bir öğütme tablası ve 4 adet öğütme silindiri ile donatılmıştır. Öğütme silindirleri kendi eksenleri üzerinde rölatif hareket yaparlar. Değirmende silindirler üzerinde gerekli baskıyı oluşturmak için hidrolik sistem vasıtasıyla çalışan bir de baskı sistemi vardır. Bunun dışında tablayı ve separtörü döndürebilmek için gerekli sürücü ve motorlar, değirmen çıkışında öğütülmüş malzemenin yukarı çıkmasını sağlamak amacıyla emiş kuvveti yaratan bir fan ve malzeme giriş ve çıkışı ile sıcak hava giriş konileri mevcuttur. Yeteri kadar incelmemiş malzemeyi başka bir ifade ile öğütülmemiş malzemeyi öğütülmüş malzemeden ayırarak tekrar öğütülmesini sağlayan bir seperatör sistemi de değirmenin ana parçalarından biridir.



Şekil 1.2: Dik değirmen parçaları. [4]

Metalden arındırılmış ve tartılmış hammadde karışımı, klapeden geçerek değirmene gelir. Aynı anda değirmene sıcak gaz beslenir. Değirmen bir motor vasıtasıyla kendi etrafında dönen öğütme tablası ve serbest halde kendi etrafında rölatif dönme hareketi yapan ve hidrolik baskı, gerdirme sistemine bağlı olan silindirler arasına sıkıştırılan hammadde, basınç ve kesme kuvvetlerinin etkisiyle incelir. Öğütme için gerekli olan kuvvet merdanelerin ağırlığı ve baskı ünitesinden sağlanır. Hammaddeye uygulanan kesme kuvveti merdanelerin dönüş hızı ile öğütme tablasının dönüş hızı arasındaki farktan kaynaklanır. Sıcak gazın etkisinde kalan hammadde öğütme esnasında kaba rutubetini de kaybeder. Kurutulmuş ve inceltilmiş hammadde proses gazları marifetiyle seperatör sistemine taşınır. Bu noktada değirmen çıkışında yer alan fanın gerçekleştirdiği emiş kuvveti ile değirmene verilen sıcak gaz malzemenin yükselmesini sağlar. İstenilen inceliğe gelmemiş partiküller seperatör marifetiyle ikinci bir kez öğütülmek üzere değirmene geri döndürülür. İstenilen incelikteki partiküller hava akımı ile ürün filtresine taşınır ve oradan da havalı bantlar vasıtasıyla stok silosuna taşınır ve böylece farin öğütme işi tamamlanmış olur.



Şekil 1.3: Dik değirmen yapısı. [5]

Dik Değirmen (Vertical Roller Mill); kurutma, öğütme ve ayrıştırma (seperasyon) proseslerini aynı anda gerçekleştirebilen kompak bir makinadır. Yumuşak ve orta sertlikteki hammaddelerin öğütülmesinde yüksek kapasite sağladığı gibi, dik değirmenler diğer sistemlere kıyasla düşük enerji tüketimine sahiptir. Bu nedenle günümüz fabrikalarında özellikle çimento alanında yaygın olarak kullanılırlar. Yaygın uygulamalarda dik değirmenlerin kontrolü ve optimizasyonu önem kazanmıştır. Sonuç olarak, çalışma prensipleri ve etkileri detaylı olarak analiz edilmelidir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları yapmak bu sistemlerin genel verimliliğini artırmanın yollarından biridir. Model geliştirmek içinse operasyonel parametreler ile çıkış boyutu, hızı gibi çıktılar arasındaki ilişkiler araştırılmalıdır. Bu amaçla yapılan çalışmaların çoğu teorik ve laboratuvar ölçeğinde yapılmıştır. Kersting [6] teorik olarak dik değirme modeli geliştirirken, Musto ve Dunn[7] ise

laboratuvar ölçekli testler yapıp, bunları operasyonel çıktılarla karşılaştırdılar, fakat bu yaklaşımlar endüstriyel ölçekli üreticiler için yetersiz kaldı. Wang ve ark. [8] tarafından yapılan çalışmada ise malzeme özellikleri ve parçacık boyutu dağılımları kullanılmış, ancak dik değirmenin çalışma prensipleri dikkate alınmamıştır.

1.1 Tezin Amacı

Dikey valsli değirmen modellemesi üzerine yapılan tüm bu çalışmalar değerlendirildiğinde, mevcut modellerin yetersizliği nedeniyle değirmenin minimum enerjiye karşılık maksimum verim vermesine yönelik çalışma yapılması ihtiyacı görülmüştür. Bu kapsamda çalışmanın amacı çimento sektöründe kullanılan hammadde dik değirmeninde öğütülen malzemenin değirmen içindeki akışının CFD analizini yapmak ve operasyonel parametrelerin dikey valsli değirmenlerin performansı üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Bu şekilde dikey valsli değirmen için verimli çalışma koşulları tespit edilebilecektir. Bu amaçla Dinçer Çimento Vezirhan tesisinde bulunda Pfeiffer MVR 5000 R4 Farin Değirmeni esas alınarak çalışmalar gerçekleştirilecek ve analiz sonuçlarıyla değirmenin test sonuçlarının karşılaştırılması yapılacaktır.

1.2 Dik Değirmen Tarihçesi

Dik değirmenlerin geçmişi eski zamanlara dayanır; muhtemelen atların sürdüğü yağ değirmeni günümüzün sofistike tasarımlarının öncülüydü. Boyut ve kapasite hariç, en belirgin değişiklik tahrik sisteminde oldu. Silindir takımı eski değirmenlerde de kullanılırken, öğütme tablası genellikle günümüzde de kullanılmaktadır [9].

Öğütmenin ilk zamanlarında, teknolojinin çoğu yumuşak olan tahılı öğütmek için geliştirilmişti. Un öğütmekte kullanılan motorlu makinalar doğrudan elle öğütme tekniklerinden gelişti. El değirmeni, yassı taş değirmene (flat stone mill), el merdanesi ve havan ise valsli değirmene dönüştü [10].

Boya ve mürekkep gibi daha sert malzemelerin öğütülmesinde ise genellikle ıslak öğütme yöntemiyle aynı ekipmanlar kullanılarak yapıldı.

Dik değirmen öğütme tekniği modern bir proses olarak kabul edilse de aslında tarihi 16. yüz yılda tahıl öğütmek için kullanılan metal rulo çiftlerine dayanmaktadır. Avrupa'da ise ilk un değirmenleri 1820'lerde Macaristan ve İsviçre'de inşa edildi.



Şekil 1.4: Dik değirmen atası, taş öğütme. [11]

Sıkıştırma (ve kazıma) ile ayırma ilkesine dayanan bu tasarım İsviçre'deki başarısız olan ilk valsli değirmenin temelini oluşturdu. Ne yazık ki bunlar istenileni veremedi, ancak 1830'da Frauenfeld, İsviçre'de bir mühendis olan Jacob Sulzberger tarafından yeniden inşa edildi. Sulzberg bir süre sonra her biri ters yönde dönen, birbirinden bağımsız ve buhar gücüyle çalıştırılan demir silindirli sistemi tasarladı. Burada bazıları yivli bazıları düz olan değirmen taşları tahılın öğütülmesinde kullanıldı. Aynı zamanlarda bu sistemin un öğütülmesi için kullanılması fikri İngiltere'de de ivme kazandı [12].

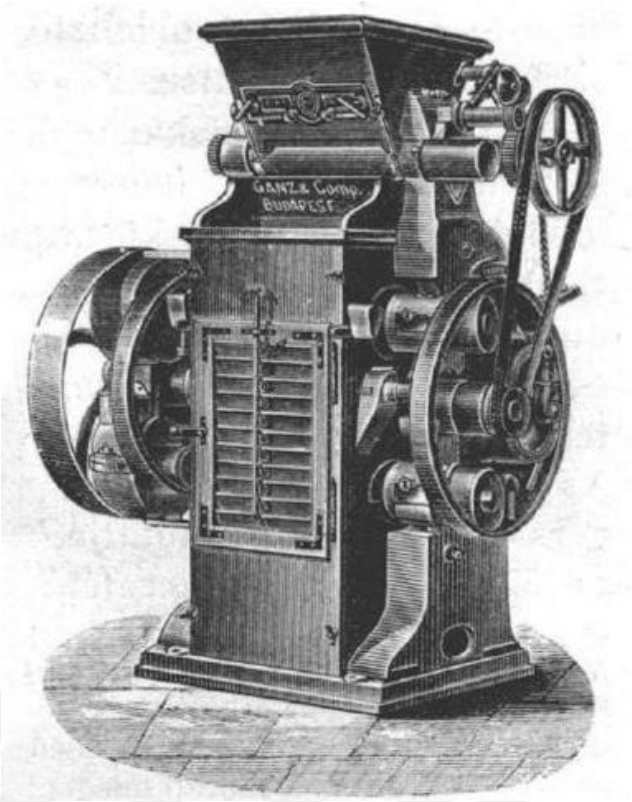
İngiltere'deki en eski kombine vals ve taş değirmeni muhtemelen 1862'de Gustav Buchholz tarafından Fison and Co. firması için Ipswixh'te tasarlanandı. 1870'te ise değirmen taşlarının yerini yivli rulolar aldı. Bu sadece ülkedeki ilk tam valsli değirmen değil, aynı zamanda Amerika'ya öğütülmüş un ihraç eden ilk valsli değirmendi [13].



Şekil 1.5: Yassı taş değirmeni. [14]

Değirmen valsleri için farklı malzeme türlerinin test edildiği deneyler de yine bu dönemde yapıldı. Değirmen teknolojisindeki önemli adımlardan biri 1870 yılında Abraham Ganz tarafından soğutulmuş dökme demirden valslerin kullanılmasıydı. Rulolar sert bir dış kabuk vermek üzere dökümden sonra hızla soğutuldu [15].

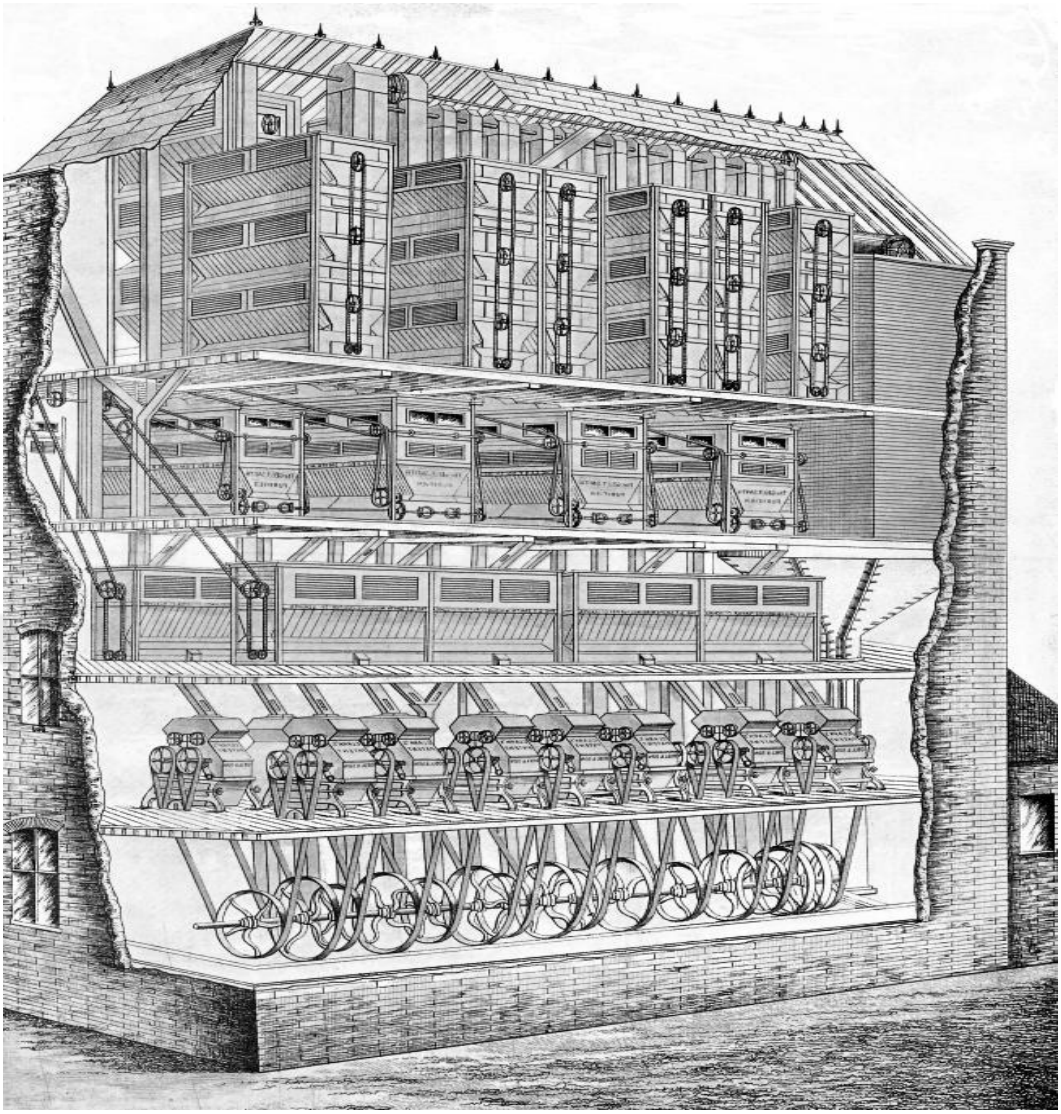
1874'te Napoli'den Friedrich Wegmann porselen valsli değirmen patentini aldı. Demir veya çelik rulolardan daha verimli olduğu iddia edilen Wegmann'ın porselen ruloları, taş öğütmeden önce, öncül işlem makinası olarak kullanıldı. Çünkü porselen rulolar demir rulolara göre çok daha fazla bakım gerektiriyordu ve ömürleri de çok daha kısaydı. Ancak yeni sistemdeki kademeli öğütme, geleneksel değirmen taşlarına kıyasla daha ince ürün elde edilmesini sağladı. 19. yüzyılın sonunda irili ufaklı birçok değirmen işletmesi, valsli değirmenciliğe geçti [16].



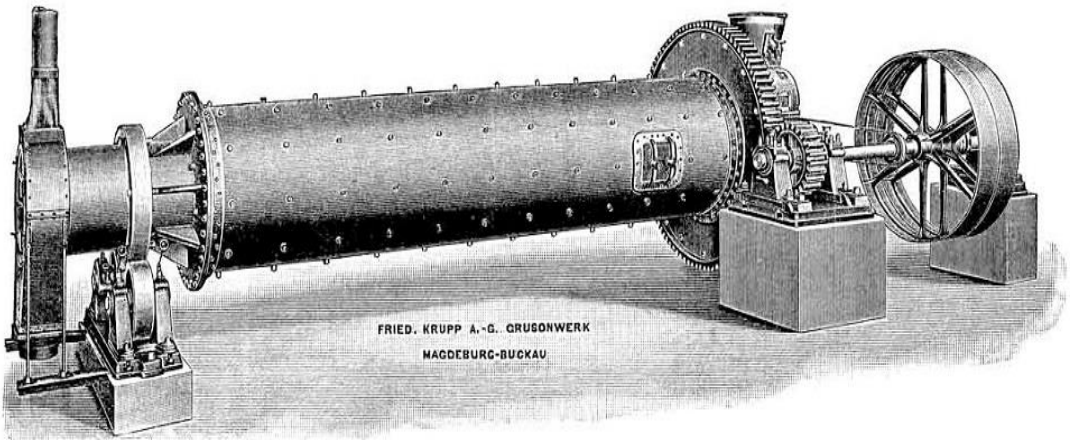
Şekil 1.6: Dökme demirden ruloların kullanıldığı öğütme makinesi. [17]

Sert malzemelerin ince öğütülmesi için taş değirmen sınırlamaları, yuvarlamalı bilyalı değirmenin (tumbling ball mill) geliştirilmesine yol açtı. Makul kabul gören ilk yuvarlanan değirmen, Sachsenberg kardeşler ve Bruckner tarafından tasarlandı ve 1885'te Gruson Atölyesi tarafından inşa edildi. Bu tasarım diğer birçok ağır işleme endüstrisinde kullanılmakla birlikte özellikle çimento endüstrisinde önemli bir basamak oldu. Fırınların geliştirilmesinde olduğu gibi, 1875-1975 yılları arasındaki ana hedef, bilyalı değirmenler enerji dönüşümü açısından son derece verimsiz olmasına rağmen, ucuz enerji uygulama yöntemlerini bulmaktı. Giderek daha ince öğütülmüş çimento ihtiyacının artmasından dolayı, bilyalı değirmenlerde öğütme sırasında üretilen muazzam miktarda atık ısıyı dağıtmak daha zor hale geldi [10].

Sert malzemelerin sıvı bir ortamda öğütülmesinin daha kolay olduğu yönündeki eski gözlemler, çimento endüstrisinde de hammaddenin ıslak öğütme prosesine tutulmasına yola açtı. Suyu hammadde karışımından ayırmak için gerekli enerji öğütme sırasında tasarruf edilen enerjiden daha fazla olmasına rağmen, bu teknikle yapılan öğütme kuru öğütmeye göre enerji tasarrufu açısından çok daha verimliydi. Yassı taş değirmenler gibi bilyalı değirmenlerde ıslak öğütme için kolayca modifiye edilirken, valsli değirmenler neredeyse her zaman kuru öğütme için kullanıldılar.

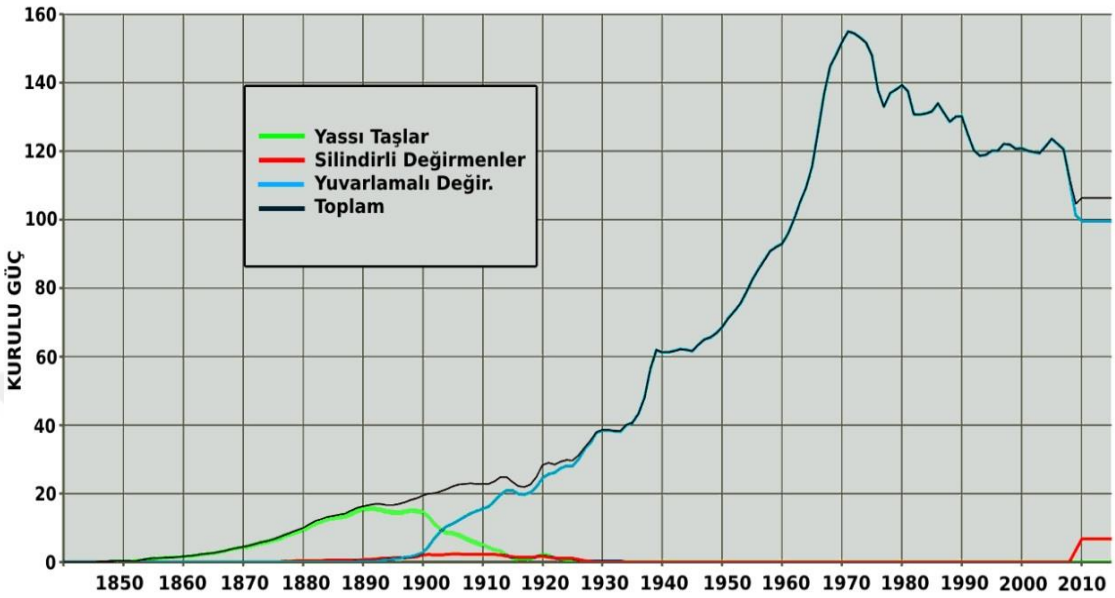


Şekil 1.7: Yuvarlamalı değirmenlerin kullanıldığı fabrika. [18]



Şekil 1.8: İlk bilyalı değirmenlerden birine örnek. [9]

1975'ten itibaren enerji verimliliğini artırma kaygısı valsli değirmenlerin kullanımında değişikliğe gidilmesine yol açtı. Bugünse bu değirmenler hem hammaddenin kuru öğütülmesinde hem de son öğütme aşaması olarak tesislerde kullanılmaktadır.

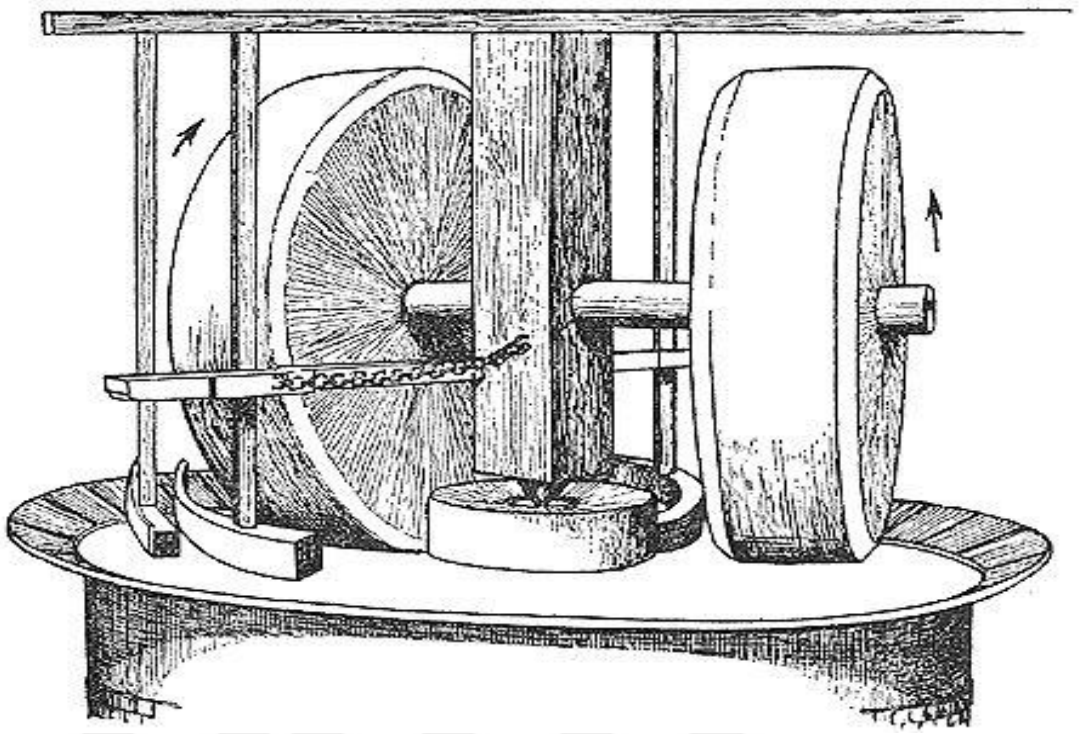


Şekil 1.9: Yıllara göre kullanılan değirmen türlerinin değişimi. [19]

1.2.1 Valsli değirmenler

Valsli değirmenlerin tarihi neredeyse yassı taş değirmenler kadar geçmişe dayanır. İlk formlar dairesel bir tablanın üzerinde ortasından geçen bir mil sayesinde eşgüdümde hareket eden iki taş tekerlekten oluşmaktaydı. Bu tür değirmenler, düz taşların kesme etkisinden yoksun oldukları ve neredeyse tamamen tekerleklerin ağırlığı ile öğütme gerçekleştirdiğinden yassı taş değirmenlerden oldukça farklılardı.

Çimento endüstrisinde erken kullanımı, temel olarak yassı taşların kullanımından önceki ezme işlemiydi. Bununla birlikte, bir dizi teknik gelişme, bunları tek başına kullanılan bir öğütme makinası olarak çekici hale getirdi. Demirden öğütme yüzeyleri daha yüksek basınçlara ve buhar gücünün kullanımı silindirlerin ağırlığının merkezkaç kuvveti ile desteklenebildiği daha yüksek hızlı makinelere izin verdi. Yine de ilk valsli değirmenlerin yassı taş değirmenler ile karşılaştırıldıklarında bir takım eksiklikleri vardı. Malzeme bunlarda doğal olarak girişten çıkışa doğru ilerleyemeyip, yaklaşan silindirin yolundan dışarı çıkma eğilimindeydi. Öğütme yolundaki malzemenin yatağı silindir yakalamasına uygun şekilde hazırlanmalıydı.



Şekil 1.10: İlkel valsli değirmen örneği. [20]

Uygulamada, beslenen malzemeyi doğru konumlandırmak ve ince taneleri temizlemek için döner mekanizmaya çeşitli tasarımlarda sıyırıcı ve fırçalar eklenmişti.

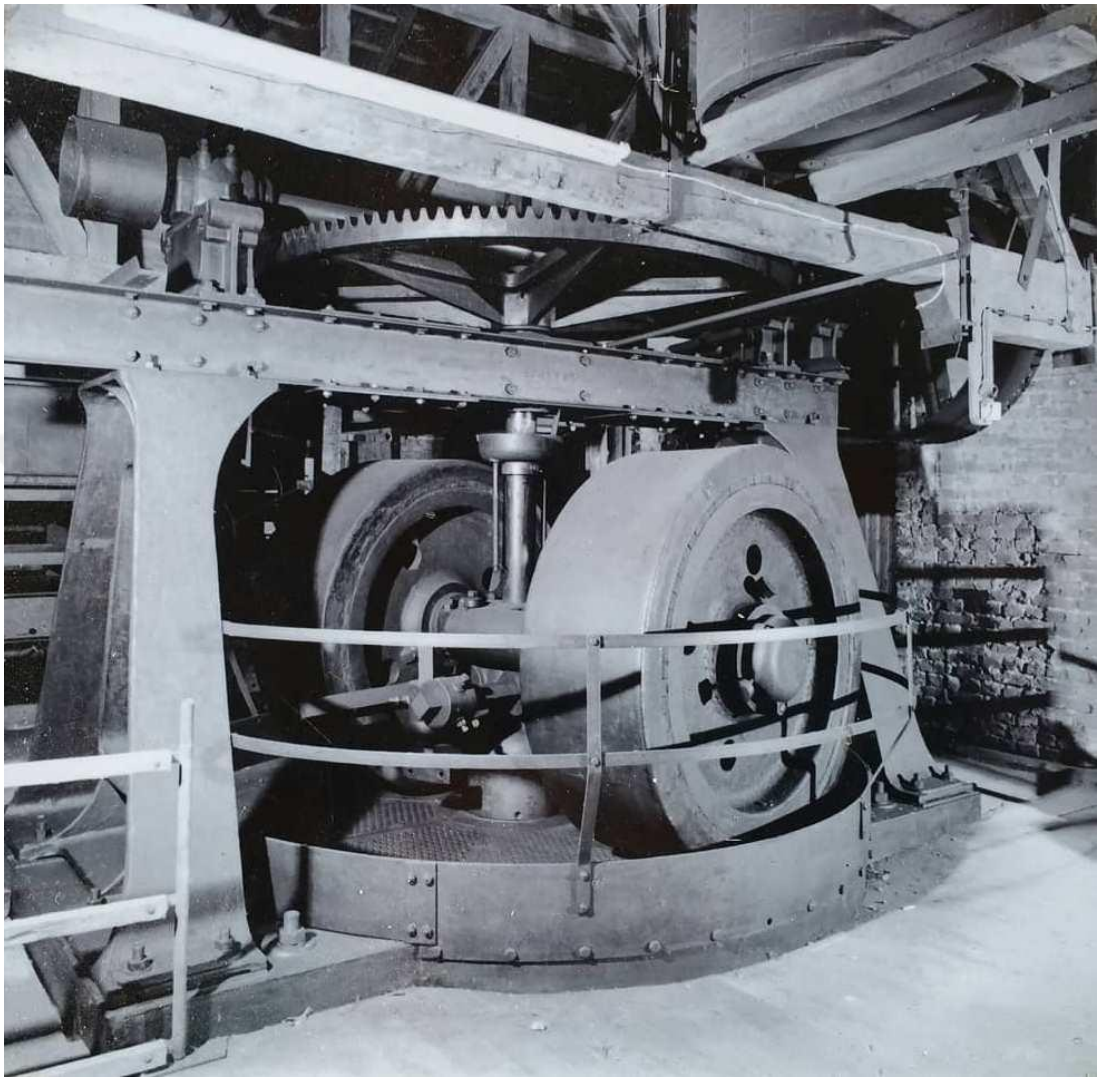
Yatak hazırlığı sorunu, bu alanda 20. yüzyıldaki gelişmelerin öğütme yolunda yapışkan ezilebilir bir kütle oluşturan nemli malzemelerin öğütülmesiyle başladığını gösterir.

Böylece iki farklı valsli değirmen türü ortaya çıktı:

- Aksın dönmesi vesilesiyle silindirlerin sabit haldeki öğütme tablasının üzerinde hareket ettiği eski form,
- Silindirlerin, milin dışından uzanan kendi aksları üzerinde durdukları ve öğütme tablasının dönme hareketi yaptığı, modern değirmenlerde kullanılan form.

Bu değirmen türlerinden biri olan ve bir İngiliz firması olan Dutrulle ve Solomon, tarafından 1886'da üretilen değirmen, o tarihten itibaren çimento öğütme alanında kullanıldı. Tasarım üst üste ve eş merkezli yuvarlanma yollarıyla 3 aşamalı öğütme etkisi gerçekleştirmekteydi. Malzemeyi hareket ettirmek için silindirler, ayrıca fırçaları ve sıyırıcıları da harekete geçiren ortak bir şaft tarafından döndürülmekteydi. Ürün, döner eleğe kendisini taşıyacak bir elevatöre boşaltılmaktaydı. Silindirler,

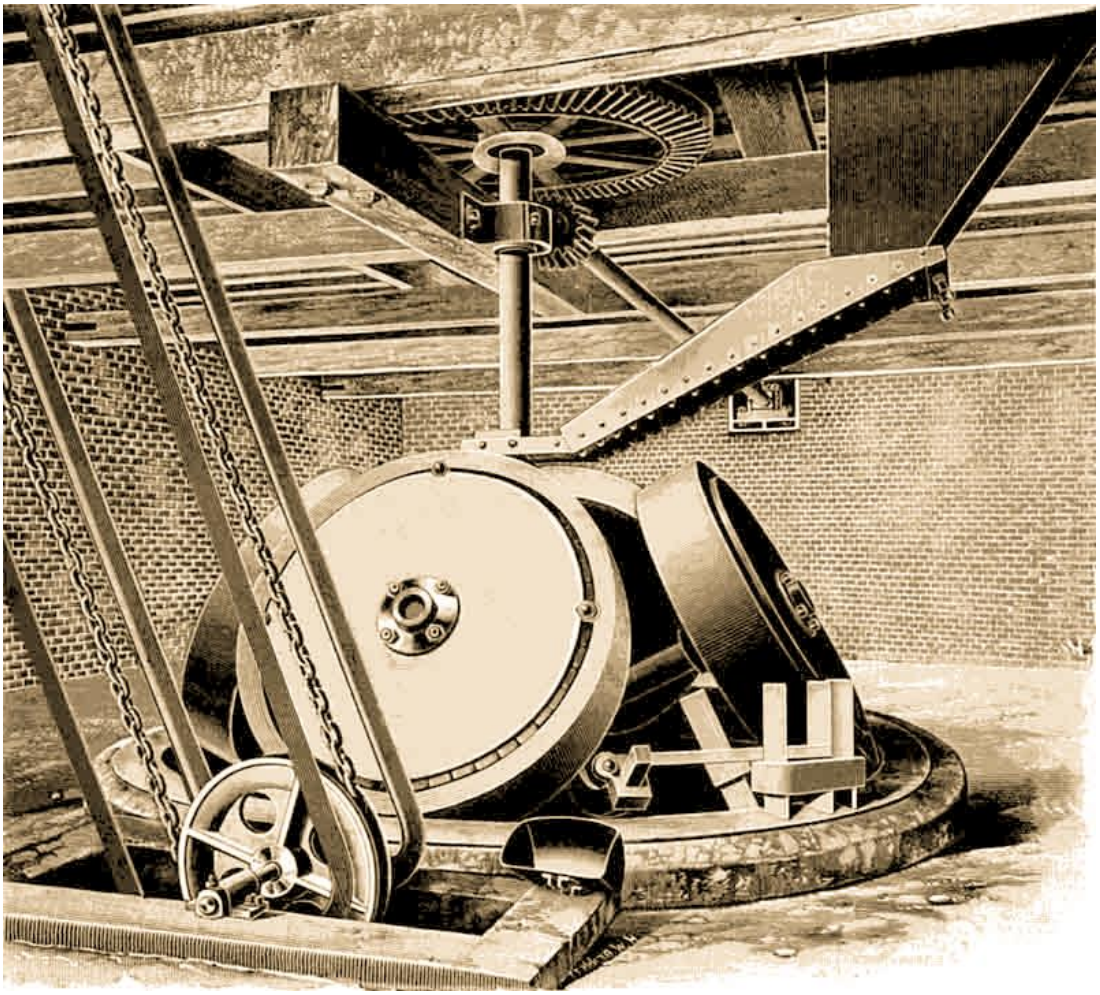
değiştirilebilir sert alaşımlı çelik korumalara sahiplerdi. Ama bunun sonucu olarak, bakımları oldukça güçtü. Tasarımın en belirgin dezavantajı, farklı ebatlı silindirler nedeniyle tahrik milinin dengesiz kuvvetlere maruz kalmasıydı.



Şekil 1.11: Edge-Runner değirmen. [21]

1891 yılına gelince ise Neate'nin Dinamik Öğütücüsü (Dynamic Grinder) imal edildi ve ilk olarak Percy J. Neate'nin Borstal Manor çimento öğütme tesisinde kullanıldı. Değirmen her biri 1,5m çapında ve 3 ton ağırlığında dört silindire sahipti. Silindirler 30°'lik açıyla yerleştirilmiş ve değiştirilebilir çelik korumaya sahiplerdi. Silindirlerin eğimi hafif bir ekstra santrifüj basıncı üretti, ancak amaç tam hızda stabiliteyi arttırmaktı. Kazıyıcılar malzemeyi öğütme tablasından ayırıp, değirmenin her ilki tarafında yer alan elevatör çukurlarına sürüklüyorlardı. Elevatörler malzemeyi, reddedilenlerin değirmene geri döndüğü, bir çift eleğe taşıyordu.

Neate, standart bir yassı taş değirmenin hacmine denk gelecek büyüklükte, daha kompakt ve daha yüksek hızlı bir değirmendi. Ancak çoğu yerde sadece taş değirmenler için ön öğütücü olarak kullanıldılar [22].



Şekil 1.12: Neate dinamik öğütücü. [23]

Freeman patentli Hidrolik Basınçlı Öğütücü (Hydraulic Pressure Grinder) ise hepsi soğutulmuş dökme demirden imal edilmiş bir yatak (taşlama plakası), 2 feet çapında 10 inç genişliğinde üç kenar koşucu (edge-runners) ve flanşlı bir üst plakadan oluşmaktaydı. Silindirler bir mil yardımıyla tahrik edilen, döner bir şasiye tutturulmuştur. Öğütme basıncı, şasinin üzerinde bulunan hidrolik kollarla sağlanmaktaydı. Taşlama yatağı dakikada yaklaşık 50 devir hızla dönmekteydi. Bu değirmenin başarısı silindirler açısından henüz gelişmemiş metalürji teknolojisiyle sınırlıydı [24].

Değirmen tarihindeki önemli kilometre taşlarından biriyse Griffin adı verilen değirmen tipiydi. Bu değirmen 1886 yılında geliştirilmiş olup bir sarkaç

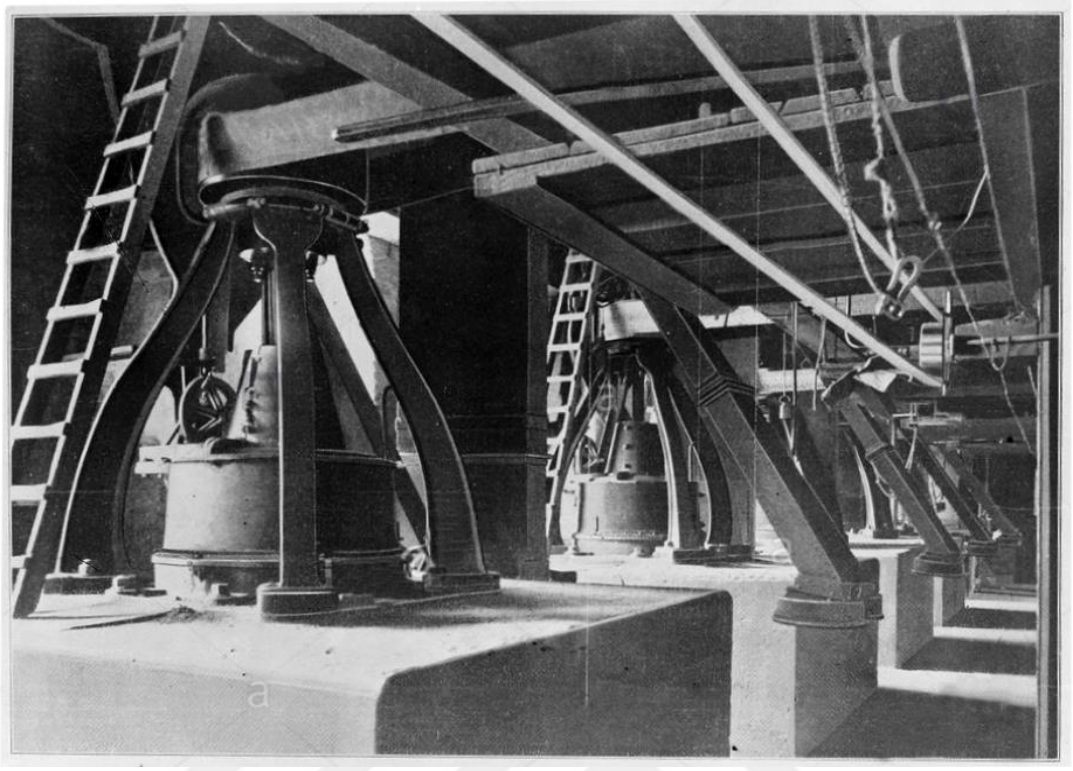
mekanizmasını içinde barındırmaktaydı. Ağır bir çelik kırma silindiri, üst kısma bilyalı mafsal ile bağlanmış çelik bir şaftın alt ucuna sıkıca tutturulmuştu. Böylece şaft, kırma silindirini çevreleyen gövde içerisinde herhangi bir yönde dönmekte serbestti. Şaft, üstteki yatay bir kasnak vasıtasıyla hızla döndürüldüğünde, silindir öğütmenin gerçekleştiği halkanın iç yüzeyine merkezkaç kuvveti ile baskı yapmakta ve böylece kasnağın döndüğü yönün tersine halkanın etrafında dönmekteydi. Silindirin altına düşen malzeme, şaftın tabanına tutturulmuş çelik bıçaklar tarafından tekrardan sisteme katılırdı. Silindirin üzerinde bitmiş ürünü eleğe gitmeye ve oradan bir hazneye ayrılmaya zorlayan hava akımını oluşturan fanlar bulunmaktaydı. Değirmen boyutu halkanın veya tablanın çapı ile belirlenirdi. 24 inç çapında 175 pound ağırlığında silindirlere sahip 36 inçlik bir değirmen 25-35 hp güç tüketir ve saate 8-10 varil çimento öğütürdü [25].



Şekil 1.13: Griffin değirmeni. [26]

Bu değirmen 1890'larda hem kuru hammadde hem de çimento öğütmede kullanılmaya başlandı. Daha sonraları tüm proseste yer aldı (kömür öğütme vb.). İlk kez Martin Earles tarafından 1899'da otonom çimento öğütmesi için kuruldu ve 1904'te Norman çimento tesisinde hammadde, kömür ve çimento öğütme için kullanıldı [25].

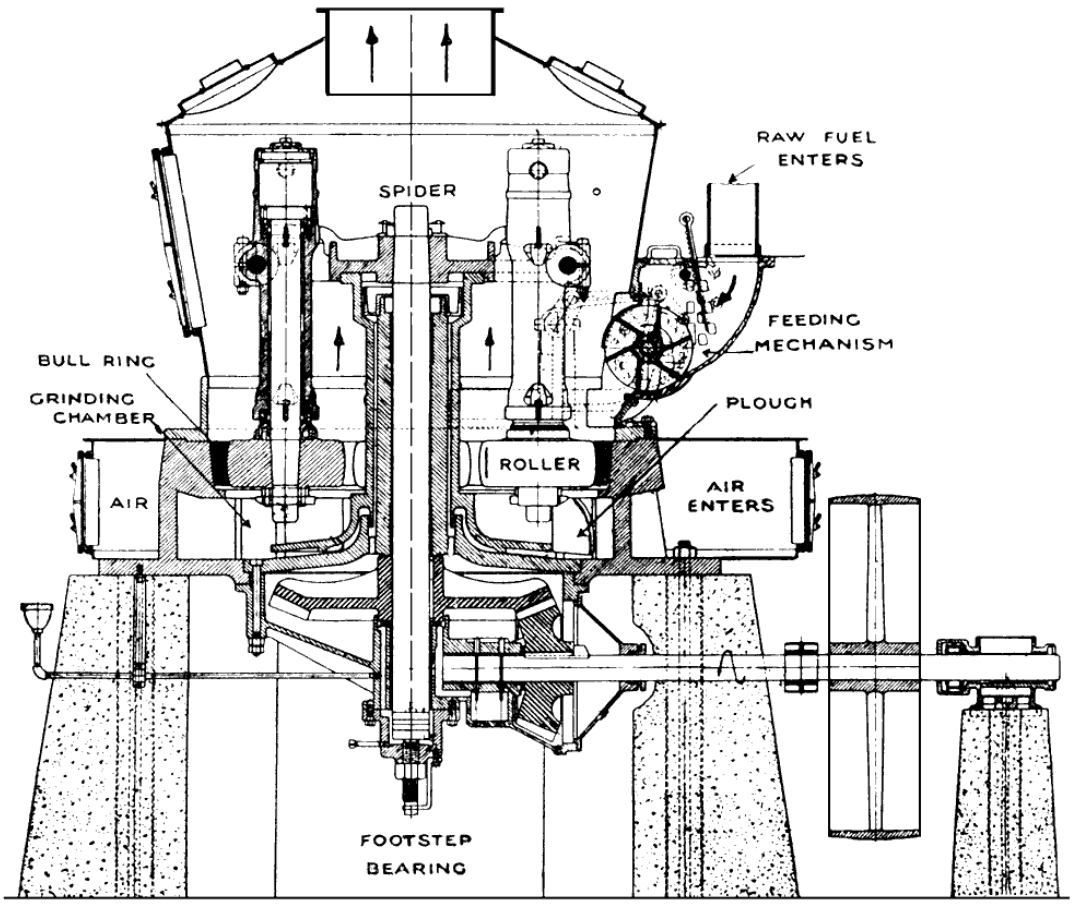
Kullanıldıkları yirmi yıl kadar süre boyunca, pazarın ince çimento ihtiyacını karşılasalar da 1920 yılıyla birlikte bilyalı değirmenlerin gerisinde kaldılar.



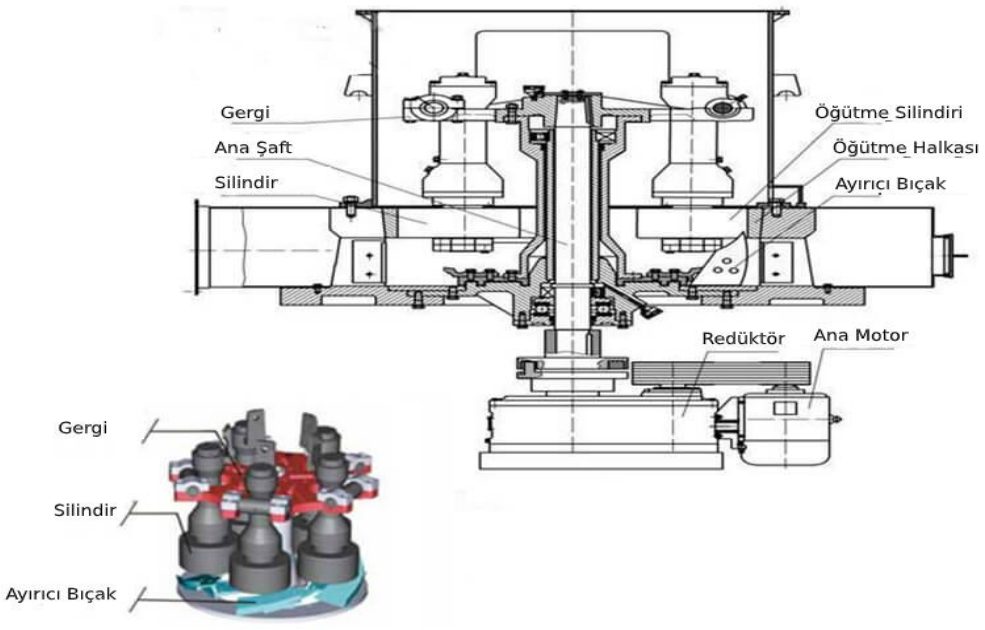
Şekil 1.14: Çimento öğütmede Griffin değirmenleri, Norman. [27]

Sonraki yüzyılda kullanılmaya devam edilen sarkaç değirmenlerinin bir türü de Raymond değirmeniydi. Çok sayıda sarkaca bağlı silindir merkezi bir şafta asılmış ve öğütme haznesinin üzerinde kenarlarında delikler açılmıştı. Öğütme kuvveti, silindir çapları ve hızlarıyla sınırlı olduğundan değirmen yumuşak malzemelerin öğütülmesinde kullanıldı. 1925 yılında Loesche firması, birinci nesil Raymond değirmeninin dezavantajlarını özetleyip, değirmen yapısını geliştirmeye karar verdi. Böylece, çalışma prensibi Raymond değirmenine zıt olan ve geliştirilmiş Raymond değirmeni adı verilen değirmeni üretti. Geliştirilmiş Raymond değirmeni pozitif ve negatif basınçlı hava akışına sahipti. Bu değirmen genellikle kömür öğütmenin öncül işleminde kullanıldı [28].

Fuller-Lehigh değirmeni FLS firması tarafından 1905 yılında üretildi. Çeşitli tiplerde bulunmasına rağmen öğütme ve boyutlandırma prensipleri her tipte benzerdi. ¾ inç ile 1 inç arasında ezilmiş olan ürün, üstteki otomatik bir besleyici ile değirmene girer ve öğütme bölgesine ulaşırdı. Öğütme elemanı sabit, yatay, içbükey bir taşlama halkasında yuvarlanan dört serbest çelik bilyadan oluşurdu. 150 cm çapında taşlama halkasına sahip en büyük türleri, her biri 330 kg ağırlığında bilyalara sahipti.



Şekil 1.15: Raymond değirmeni. [29]

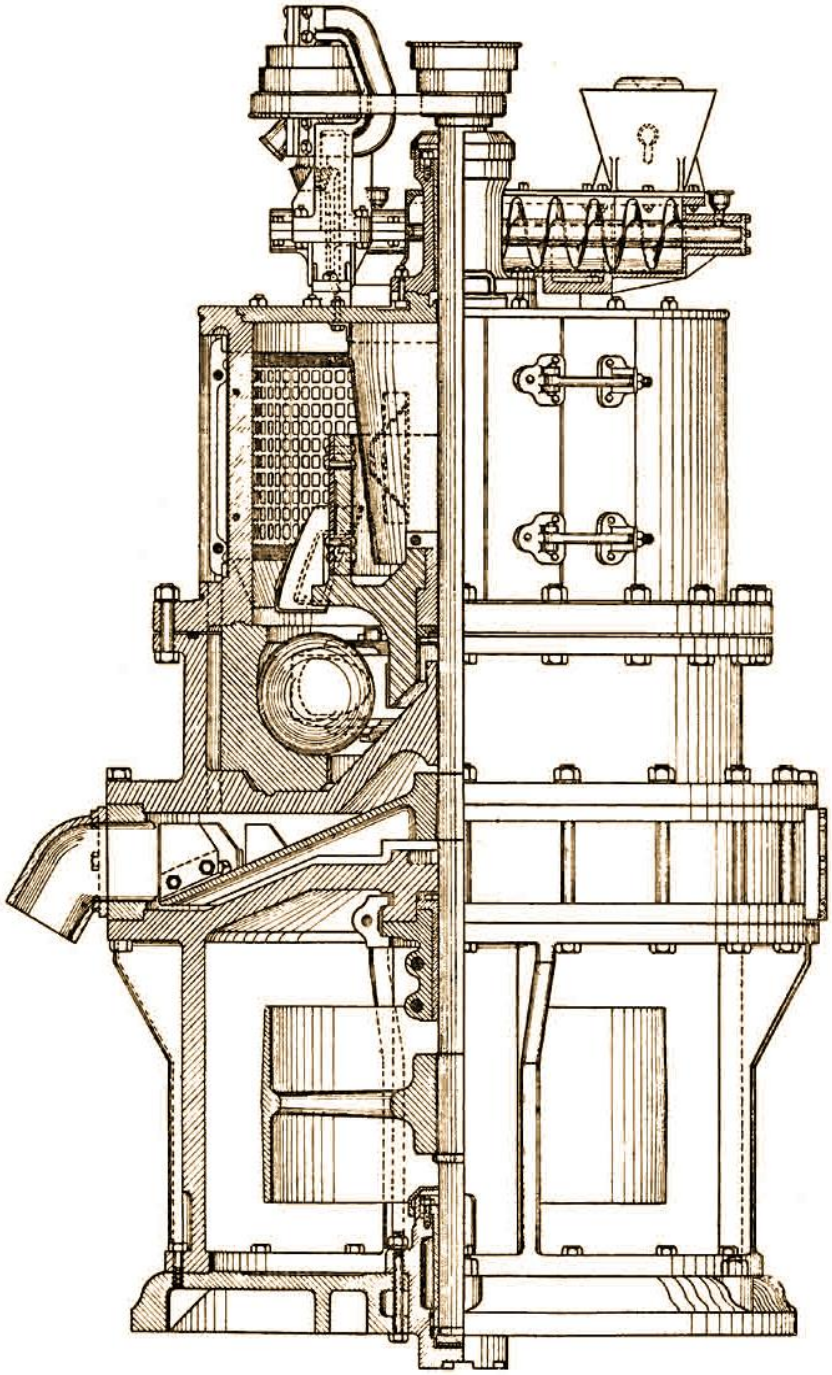


Şekil 1.16: Geliştirilmiş Raymond değirmeni. [30]

Bilyalar, doğrudan değirmen şaftına bağlanmış dört eşit uzaklıktaki yatay kola tutturulmuş dört itici vasıtasıyla öğütme halkasının etrafında ilerletilirdi. Besleyici tarafından boşaltılan malzeme düzgün ve sürekli bir akışla bilyalar ve öğütme halkası arasına düşer ve istenen inceliğe indirgenirdi. Ana şafttan tahrik edilen bir fan vasıtasıyla, ince öğütülmüş malzeme öğütme bölgesinden yukarıdaki bir hazneye kaldırılır ve orada tutulurdu. Bir aspiratör görevi gören ikinci bir fan, ince öğütülmüş parçacıkları, ayırma odasını tamamen çevreleyen elekten geçirecek şekilde çeker ve bunlar hava basıncı vasıtasıyla bir çıkış ağzından boşaltılırlardı.

Daha ince öğütülmüş ürün elde etmek amacıyla, bu değirmenin başka bir tipi, öğütme haznesi ile eleme bölümü arasında ikincil veya yardımcı bir ayırma bölümü kullanılmaktaydı. Yine başka bir tipte makinanın kendisinin ayrılmaz bir parçası olan bir hava ayırıcı eleman kullanılmaktaydı. Bunu temel alan varyasyonlar, o zamandan beri kömür öğütme ve sonrasında hammadde öğütme için kullanımda kaldı [31].

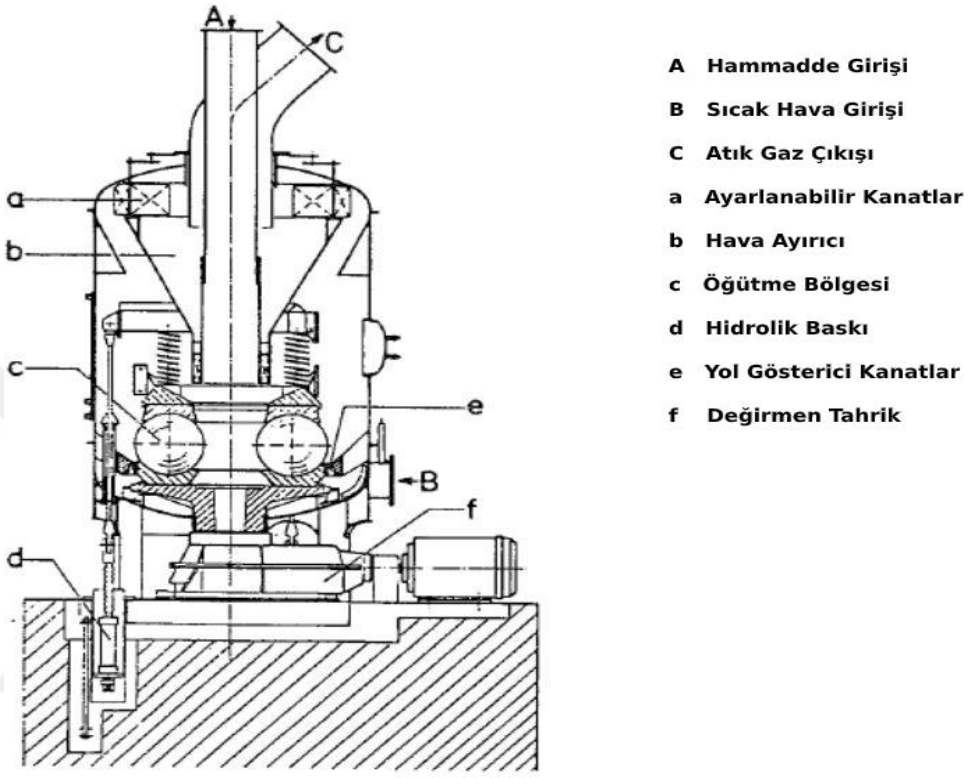
1920'lerde Fuller-Leigh değirmenleri, o zamanlar çoğalan elektrik santralleri tarafından toz hale getirilmiş kömür ile ateşleme sisteminin geri plana düşmesi sebebiyle önemlerini yitirdiler. Cladius Peters, Fuller-Leigh değirmenin üretim haklarını elde etti ve daha sonra tüm dikey valsli değirmenlerde kullanılacak, bir dizi özelliği içerek şekilde modifiye etti. Darbeye dayanıklı yapısı (şok direnci – 3,5 bar) kömür öğütme için tasarlandı. Temel olarak bu değirmen öğütme bölmesi, ayırıcı ve tahrik ünitelerinden oluşur. Öğütme bölümü alttaki dönen, üstteki sabit olan öğütme halkalarından oluşur. Ayarlanabilir çelik yaylar yada hidrolik-pnömatik basınç cihazları, üst taşlama halkasını birbirine yakın şekilde konumlandırılmış bilyalara bastırır. Öğütme bilyaları, bilyalı rulmanlarda olduğu gibi halkalar arasında yuvarlanır. Bir besleyici, malzemeyi ya merkezi olarak sınıflandırıcıdan yada yanal olarak değirmen yan duvarından geçirerek, orada merkezkaç kuvvetinin malzemeyi öğütme bilyalarının altına sürüklediği öğütme bölmesine sokar. Öğütülmüş malzeme öğütme bölmesinin çevresinden bir hava akımının malzemeyi seperatöre kaldırmasıyla ayrılır. Sınıflandırıcıda (classifier) reddedilen malzeme öğütme bölümüne geri dönerken, ince taneler hava ile birlikte değirmeni terk eder. Islak malzeme, sıcak hava veya uygun atıl gazlar vasıtasıyla değirmen içinde kurutulabilir. Üreticinin beyanlarına göre 400 °C'ye kadar giriş gazı sıcaklıklarına özel bir önlem alınmaksızın izin verilir [32].



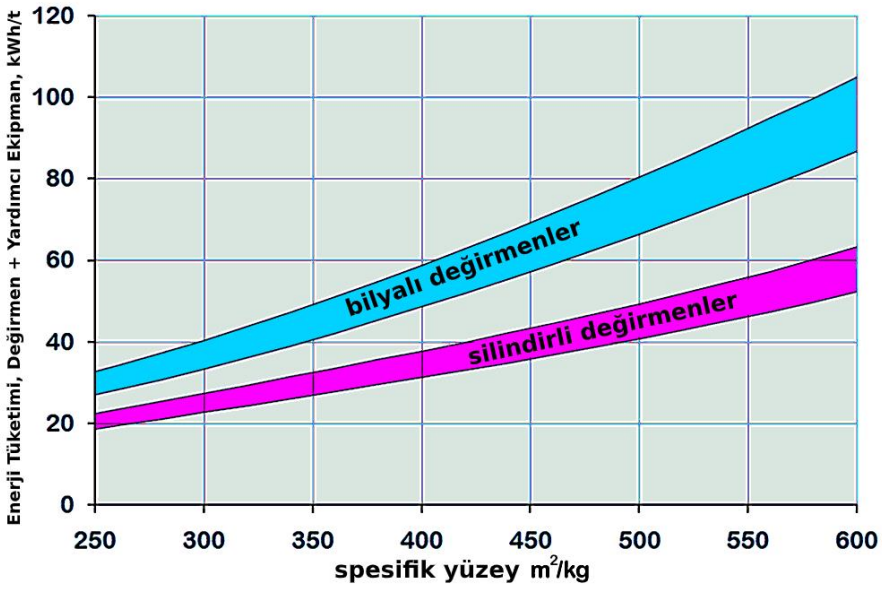
Şekil 1.17: Fuller-Leigh değirmeni. [33]

Dik değirmenler başlangıçta kömür öğütmesi için geliştirilmişti, çünkü kömür nispeten yumuşak bir malzeme olduğundan öğütülmesi daha kolaydır. Ayrıca düşük yoğunluğu sebebiyle ayırıcıya taşımak ve oradan da değirmenden çıkarmak için daha düşük hızda bir hava akımına gereksinim duyulur. Dik değirmenlerin hammadde ve çimento öğütme için uygulanmaları daha uzun sürdü. Bu uygulamalarda valsli değirmenler, incelik ve diğer çıktı gereksinimlerini kolaylıkla karşılayabilen bilyalı değirmenlerle rekabet etmek zorunda kaldı. Bununla birlikte, bilyalı değirmenler,

valsli değirmenlerin neredeyse iki katı kadar enerji tüketimine sahipti. Enerji maliyetleri artana kadar dikey valsli değirmenlerle daha sert malzemelerin öğütülmesi yönünde büyük bir çaba yoktu. 1973'teki enerji kriziyle birlikte bu alandaki ciddi çalışmalar meydana geldi. Tüm öğütmenin silindirli dik değirmenlerle yapıldığı ilk tesis ise 1999 yılında Vietnam'da kuruldu [34].



Şekil 1.18: Dikey basınç ve döner tablalı, bilyalı değirmen. [35]



Şekil 1.19: Valsli ve bilyalı değirmenlere göre öğütme güç gereksinimleri. [36]

1.2.2 Modern dikey valsli değirmenler

Claudius Peters değirmeninin başarılı özelliklerini temel alan, ortak özelliklere sahip birçok modern değirmen tasarlandı:

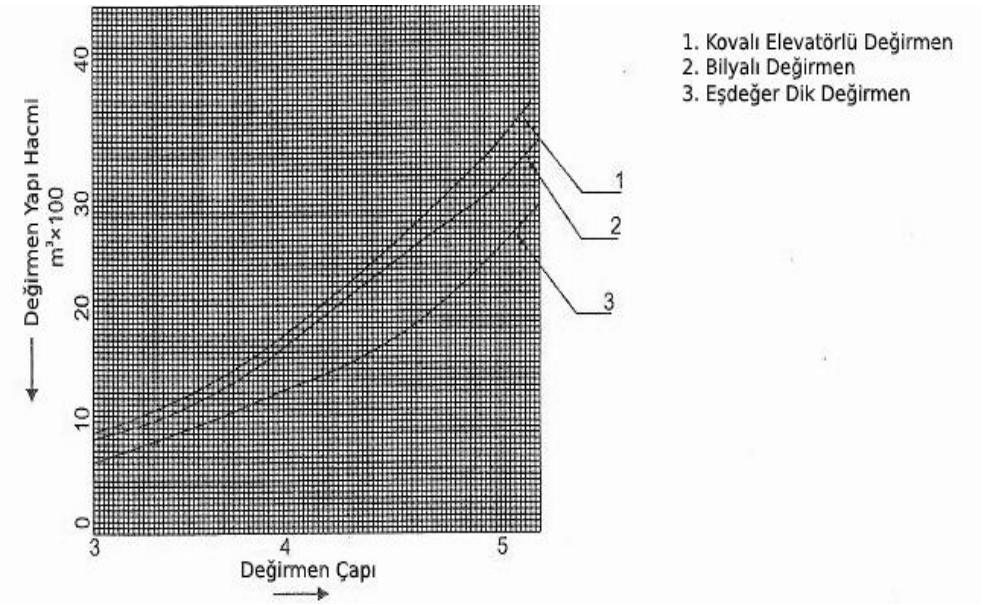
- Silindirler döner bir tabla üstünde ve sabit eksenler üzerinde bulunur. Ayrıca silindirlerin tablaya doğru basması için değirmen dışından ayarlanabilir gergiler vasıtasıyla basınç uygulanmaktadır.
- Tablanın çevresinde malzemeyi seperatöre kaldırmak için gerekli hava akımının (gerekirse hava sıcak olabilir) geçebileceği şekilde bir halka (ring) yapısı bulunmaktadır.
- Değirmenin içinde üst kısımda bulunan bir seperatör vasıtasıyla kaba ve ince malzemeler birbirinden ayrılır. Yeterli incelikteki parçacıklar hava vasıtasıyla değirmenden ayrılırken kaba parçacıklar değirmene geri döner.

Farklı üreticilerin farklı uygulamaları bazı küçük varyasyonlara yansımıştır:

- Tablalar düz yüzeyli olabileceği gibi girintili-çıkıntılı yüzeylerde olabilmektedir.
- Silindirlerin üzerinde durdukları eksenler düz yada eğimli olabilmektedir. Bu şekilde silindirlere açı verilebilir.
- Seperatörler, statik veya dinamik seperatörler olarak mevcut olabilirler.

Bu değirmenler kuru öğütme prensibine sahiptirler ve kapalı devre çalışırlar. Bunlar hava ile ayrıştırma yapan değirmenlerdir. Hava ile taşıma ve ayrıştırma için değirmene büyük miktarlarda hava alındığından, değirmen daha yüksek bir kurutma kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla, hammadde ve kömür malzemeler için kurutma ve öğütme elemanları olarak kullanılırlar. Öğütmenin yanında kurutma işlemini de gerçekleştirebilmeleri dik silindirli değirmenleri diğer öğütme ekipmanlarına göre bir adım daha öne çıkarmaktadır.

Seperatörler, değirmenin kendi parçaları olduklarından yardımcı elemanların sayısı daha azdır. Dikey bir değirmenin kapladığı taban alanı aynı kapasitedeki bilyalı bir değirmenden çok daha azdır. Bu sayede yerden tasarruf sağladığı gibi, kurulum maliyetleri açısından da avantaj sağlamaktadır [37].



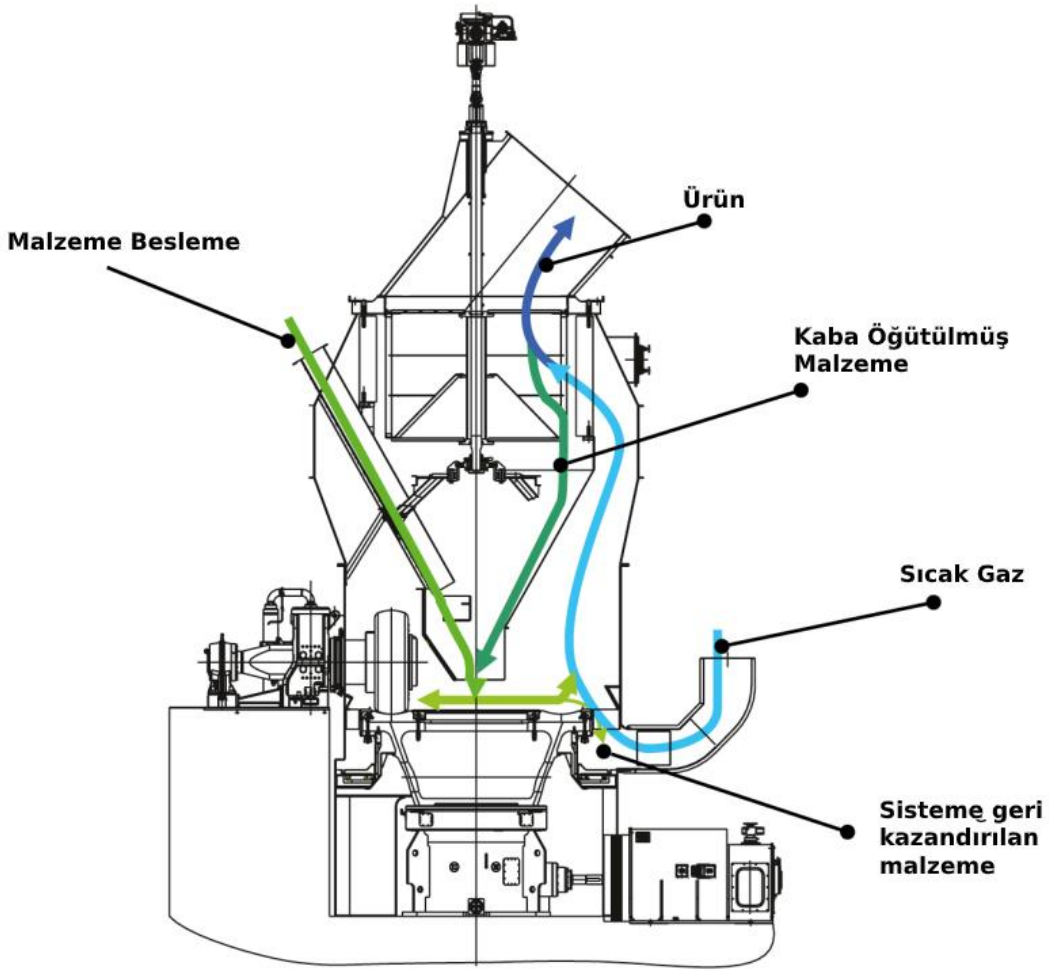
Şekil 1.20: Değirmen çapına bağlı olarak yapı hacmi. [38]

Silindirler, dişli kutusu vasıtasıyla tablaya dikey bir kuvvet uygularlar. Bu nedenle bir dik değirmen için dişli kutusu, baskı yüküne dayanabilecek özel tasarıma sahip olmalıdır.

Valsli değirmenlerin içindeki tozlu ortamdan dolayı, yataklar özel olarak tasarlanmalı ve zorlamalı yağlama sistemi ile yağlanmalı ve basınçlı contalar kullanılmalıdır. Bu sayede tozsuzlaştırma sağlanarak, çevresel anlamda daha yüksek bir kalite elde edilmektedir. Ayrıca bu sayede tozsuzlaştırma için harici bir filtreleme sistemi kullanılmasının önüne geçilebilir yada en azından daha düşük kapasiteli filtre kullanılarak maliyetten tasarruf sağlanabilmektedir. [37].

1.2.3 Seperatörler

Dik değirmenlerin en önemli parçalarından biri olan ve modern dik değirmenlerde, değirmenin kendi bir parçası olarak bulunan seperatörlerinde geçmişine kısaca değinmek gerekir. Çoğu öğütme işlemi, öğütülen malzeme yeterli inceliğe kavuşur kavuşmaz sistemden çıkarılırsa en iyi sonucu vermiş olur, çünkü ince tanecikler bir "yastıklama" etkisine sahiptir ve bu nedenle de büyük parçacıkların öğütme yüzeyiyle iyi temas etmesini engeller. Partikül büyüklüğünün yaklaşık bin kat azaltılması gereken çimento öğütme gibi bir işlemde, öğütmenin ilk zamanlarında yeterli büyüklüğe kavuşan parçacıklar geri kalanların öğütülmesini engeller, ayrıca olması gerekenden daha ince hale gelebilir.



Şekil 1.21: Modern valsli değirmen çalışma prensibi. [39]

Öğütmenin ilk zamanlarında, hem çimento hem de hammadde karışımı için elekler seperatör olarak kullanılmıştır. Hammadde karışım ayırmasında, kritik kesim boyutu yaklaşık 100µm'dir ve elekler oldukça etkili olmuştur. Çimento söz konusu olduğunda ise, başlangıçta aşırı kaba ürünün kabul edilebilir olduğu düşünüldü fakat giderek daha ince eleklere ihtiyaç arttı. Elek maliyetleri giderek arttı ve daha küçük parçacık boyutlarında etkileri azaldı. Alternatif bir yönteme olan ihtiyaç hava seperatörlerini ortaya çıkardı. Günümüzde hala hava seperatörleri değirmenler için temel eleman olmaya devam ediyor.

Çimento endüstrisindeki seperatörler genel anlamda iki başlık altında toplanır;

Statik seperatörler

Koni tipi seperatörler

V-tipi seperatörler

Dinamik seperatörler

Birinci nesil seperatörler

İkinci nesil seperatörler

Üçüncü nesil (yüksek verimli) seperatörler

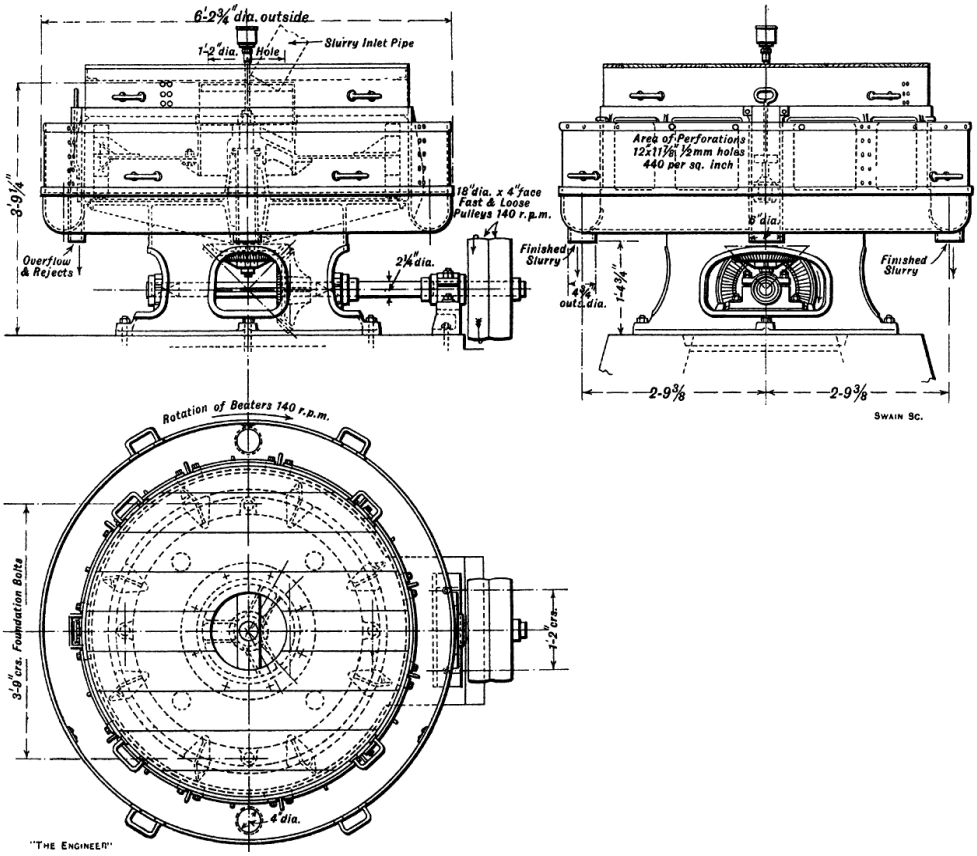
1.2.4 Islak öğütme için seperatörler

Slurry seperator (bulamaç seperatörü); 1926'da İngiltere, Dunstable'da kurulan şekildeki örnekte, 56" (1,42m) çapındaki "çırpıcılar" bulunmaktaydı. Çamur kıvamındaki kalın bulamaç, yerçekimi etkisi altında ince bir elekten oldukça yavaş bir şekilde akacak ya da hiç geçemeyecektir. Bu seperatör ise 140 rpm hızla dönerek 500 μm dairesel delikli elek plakalarına, 15 G etkisinde santrifüj etkisiyle bulamaç malzemeyi fırlatıyordu. Her ne kadar dönemi için yeterli şekilde hizmet verebildiyse de, değişen ihtiyaçlar ve gelişen teknoloji ile birlikte yeni tasarımlar üzerine çalışması gerekmekteydi. Elekten geçiş sırasındaki baskıyı arttırmak için çeşitli tasarımlar geliştirilmişti [40].

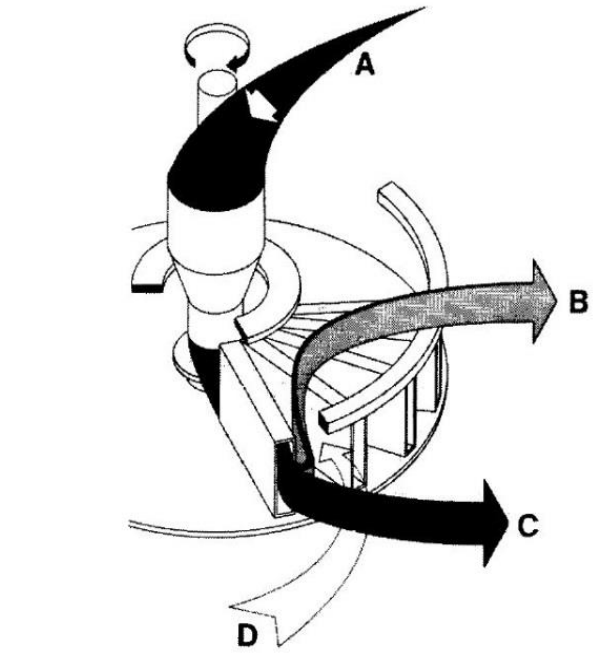
Ancak bu seperatörler oldukça düşük konsantrasyonlarda tatmin edici sonuçlar vermektelerdi. Bu nedenle başka tasarımların gelişmesi gerekiyordu. Bu yöndeki çalışmalar günümüzün hidrosiklonları ve kanallı seperatörleriyle sonuçlandı.

1.2.5 Kuru öğütme için seperatörler

Başlangıçta kuru öğütme için kullanılan elekler yerlerini gelişen teknolojiyle birlikte, zamanla hava ayırıcılara (air seperators) bıraktı. Öğütme teknolojisindeki gelişmeler ince parçacıkların değirmen çıkışında verimli bir şekilde ayrılması ihtiyacını ortaya çıkarırken, aynı zamanda statik seperatörlerin yetersizliklerini de göstermiş oldu. Bu bağlamda Askham Hava Seperatörü, 1885 yılında Mumford ve Moddie tarafından patentlendi ve bu dinamik seperatörlerin de başlangıcı oldu. Buradaki ilke ince parçacıkları, kalın taneciklerden bir hava akımı vasıtasıyla ayıklamaktı. İyi sonuç elde etmek için, malzeme ayrılmadan önce hava akımında iyi dağıtılmalı ve kalın taneler verimli bir şekilde geri kazandırılmalıydı. Askham seperatörü bunu gelecekte yapılacak hava seperatörlerinde de kullanılacak şekilde başarıyla gerçekleştirdi. Askham seperatörü, ortak bir şaft üzerinde bir hava sürkülasyon fanı ve bir malzeme dağıtım plakası içeren bir rotora sahipti. Fan, makinenin iç ve dış halkaları arasında hava sirkülasyonuna neden olmaktaydı.



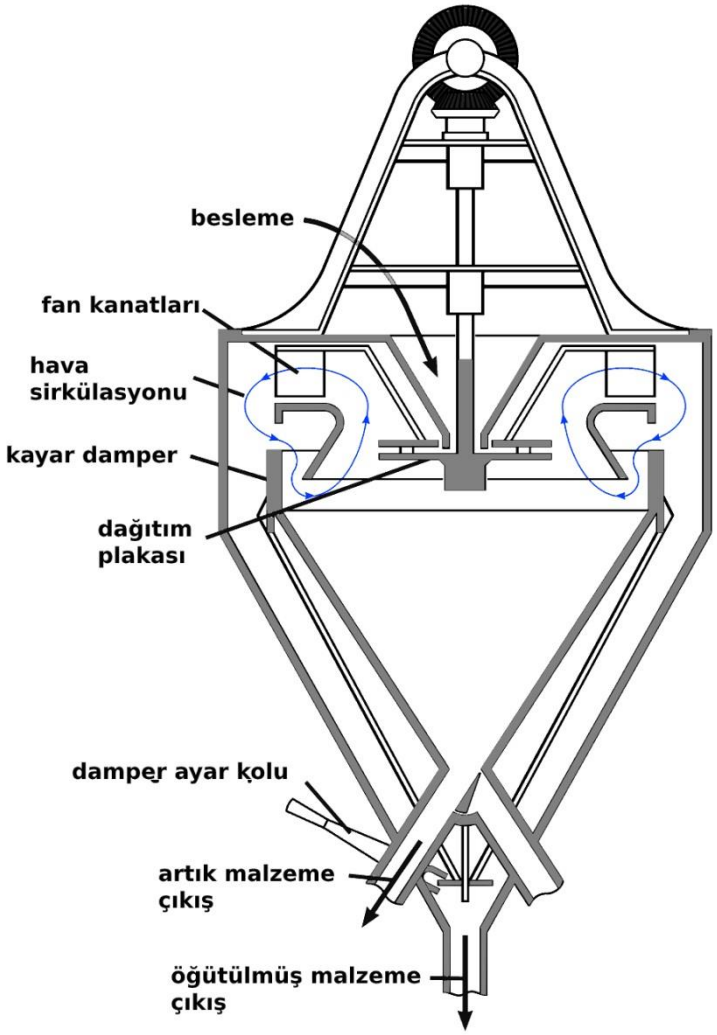
Şekil 1.22: Slurry (Bulamaç) seperatörü. [41]



Kanallı Separator (Krupp-Polysius)
A: Besleme B: Öğütülmüş Malzeme, C: Artık Malzeme, D: Ayırma Havası

Şekil 1.23: Kanallı seperatör. [42]

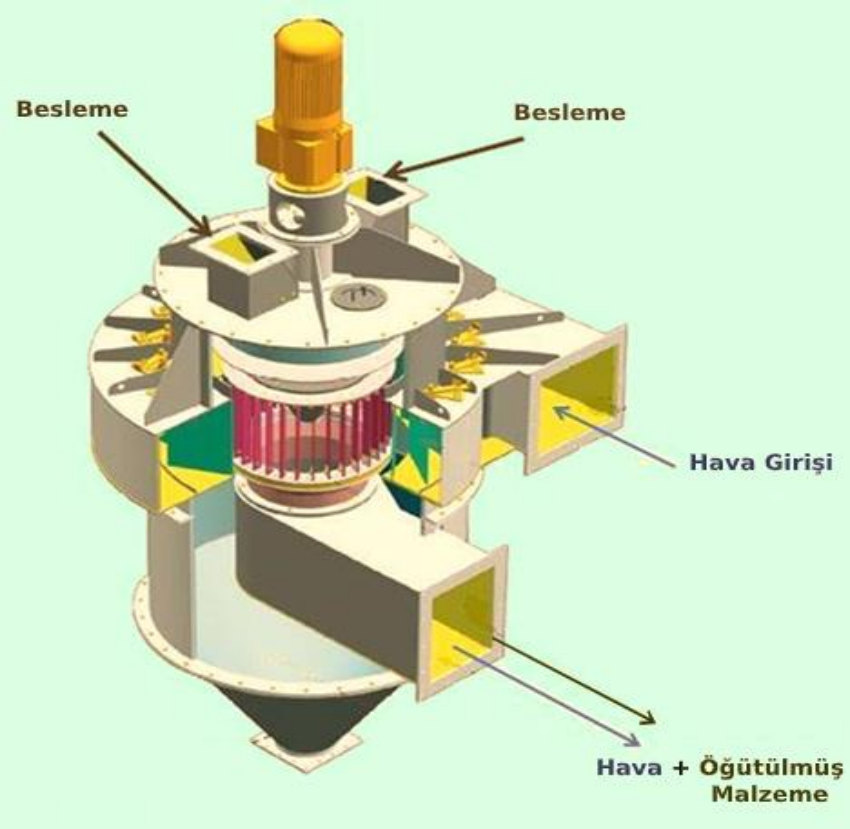
Sürüklenemeyecek kadar büyük parçacıklar iç koniye düşer ve değirmene geri kazandırılırdı. Taşınabilen ince malzeme ise hava akımı ile birlikte dış halkaya geçerdi. Çıkış malzeme inceliği rotor hızının değiştirilmesiyle veya damper vasıtasıyla ayarlanabilirdi. Bu seperatör daha ince çimentolara ihtiyaç duyulan 1890'larda birçok büyük tesiste kullanılmaya başlanmıştı [43].



Şekil 1.24: Askham hava seperatörü. [44]

Birinci nesil seperatörlerin en önemli avantajları basit, "tek potlu" tasarımlarıydı, ancak büyük ölçüde yer çekiminin etkisiyle, ince tanelerin hava akımından ayrılması verimsizdi. İkinci nesil tasarımlar 1960 yılıyla birlikte ortaya çıktı. Bu tasarımlar havayı dış siklonlardan geçirerek, ayırma G kuvvetini arttırmayı içeriyordu. Üçüncü nesil tasarımlar ise 1979 yılında başladı ve sonrasında devam etti.

Öğütülmüş malzemenin ayrıştırılması ve dağıtılması, karşıt santrifüj ve darbe kuvvetleri sağlayan bir döndürme kafası vasıtasıyla ve fan gücü altında çekilmesiyle büyük ölçüde geliştirildi.



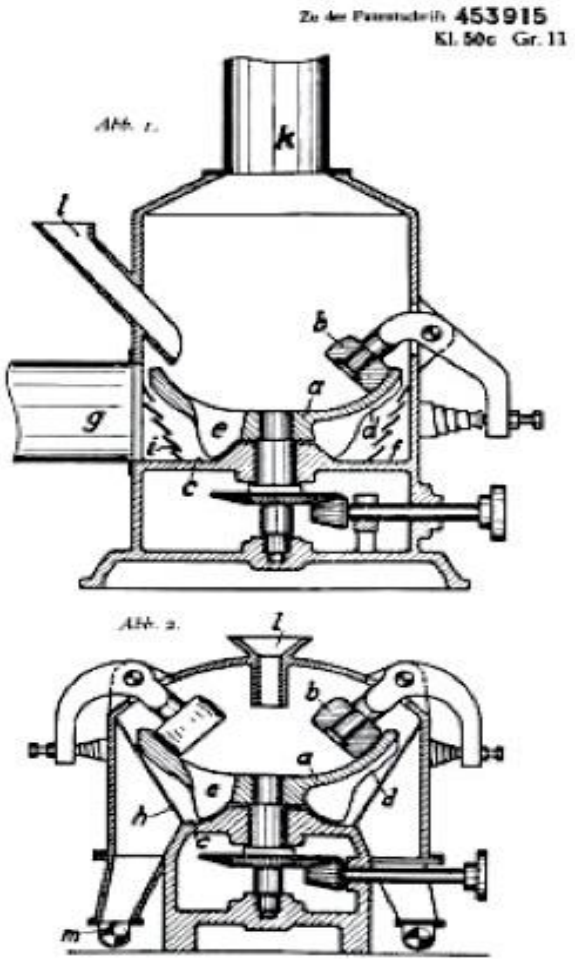
Şekil 1.25: Üçüncü nesil seperatör. [45]

Gelişmiş tasarımlar giderek daha fazla güç tüketimi gerektiriyordu ancak bu durum elde edilen malzeme çıktısıyla dengelenebilmektedir. Ayrıca tane büyüklüğü ince ayarını yapabilmek ve değirmen sisteminin daha iyi soğutulabilmesi diğer avantajlarıdır.

Valsli değirmenlerde, seperatörler değirmen içerisine yerleştirildi ve ayrılamayan büyüklükteki tanelerin sisteme geri dönüşü sağlandı. Bu geliştirmelerle son öğütmede güç kullanımı %30'lar kadar azaltılabildi. Üçüncü nesil seperatörlerin valsli değirmenlerle birleştirilmesi bunları günümüz çimento öğütme prosesleri için önemli bir konuma getirdi.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Çimento alanında dik değirmenin ortaya çıkışıyla, bilyalı değirmen öğütme mekanizmasının eksikliklerinin çoğunun üstesinden gelindi ve benzersiz öğütme prensipleriyle dikey valsli değirmenler dikkat çekti. Dik değirmen kırma, öğütme, kurutma, sınıflandırma ve taşımayı tek bir sistemde birleştirmesi açısından sadece yer tasarrufu sağlamakla kalmadı, aynı zamanda yatırım maliyetlerini de önemli ölçüde azalttı. Özelikle gelişmiş dikey değirmen sisteminin ön ısıtıcıdan gelen atık ısıyı kullanmasıyla ön kalsinatörlü çimento üretim hatları için önemli avantajları görülmüş oldu.



Şekil 2.1: 1927 yılına ait dik değirmen örneği. [46]

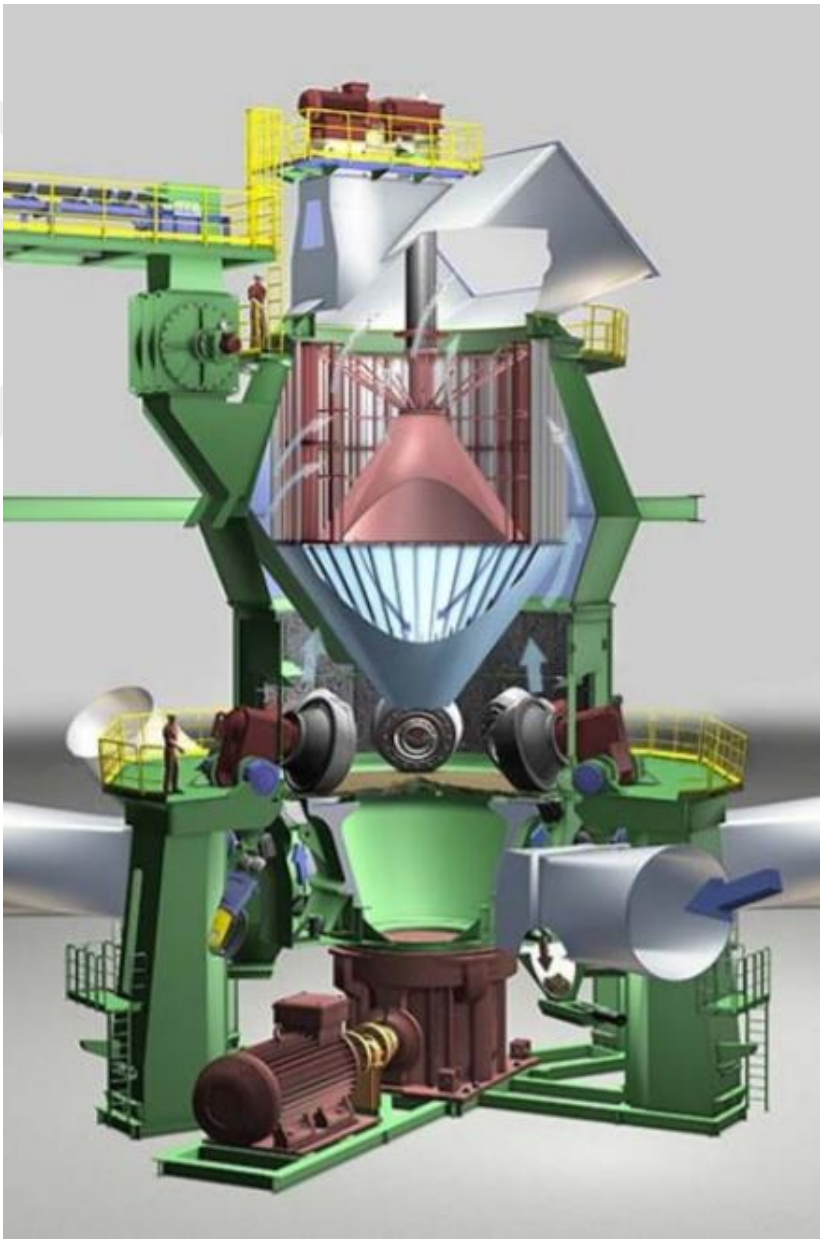
Bugüne kadar ihtiyaçlara bağlı olarak farklı türlerde dikey valsli değirmenler üretilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu değirmenlerde birçok aşamalardan geçerek günümüzdeki hallerini almışlardır.

İlk dikey değirmen 1920'lerde Almanya'da icat edilirken, çimento üretimi için kullanılan ilk dik silindirli değirmense yine Almanya'da 1935'te kullanıldı. Avrupa'daki çimento fabrikalarında uzun yıllar kullanıldıktan sonra, dik silindirli değirmen ABD ve Kanada'da kabul görmeye başladı. Özellikle ABD'de yüksek elektrik masraflarına getirdiği çözümle dikkat çekti. ABD'de ilk dik değirmen 1973 yılında faaliyete geçti. Sonrasında Asya'da gelişen çimento endüstrisiyle birlikte dik değirmenler buralarda da geniş bir uygulama sahası yakaladı. Avrupa, Amerika ve Asya'da kullanıldıktan sonra, dik değirmen 1980'lerde hızlı bir gelişme gösterdi. 500 t/s kapasiteli büyük değirmenlerde ilk o zaman geliştirildi. 1990'larda ise yeni bir atılımla yapı ve üretim süreci optimize edildi.

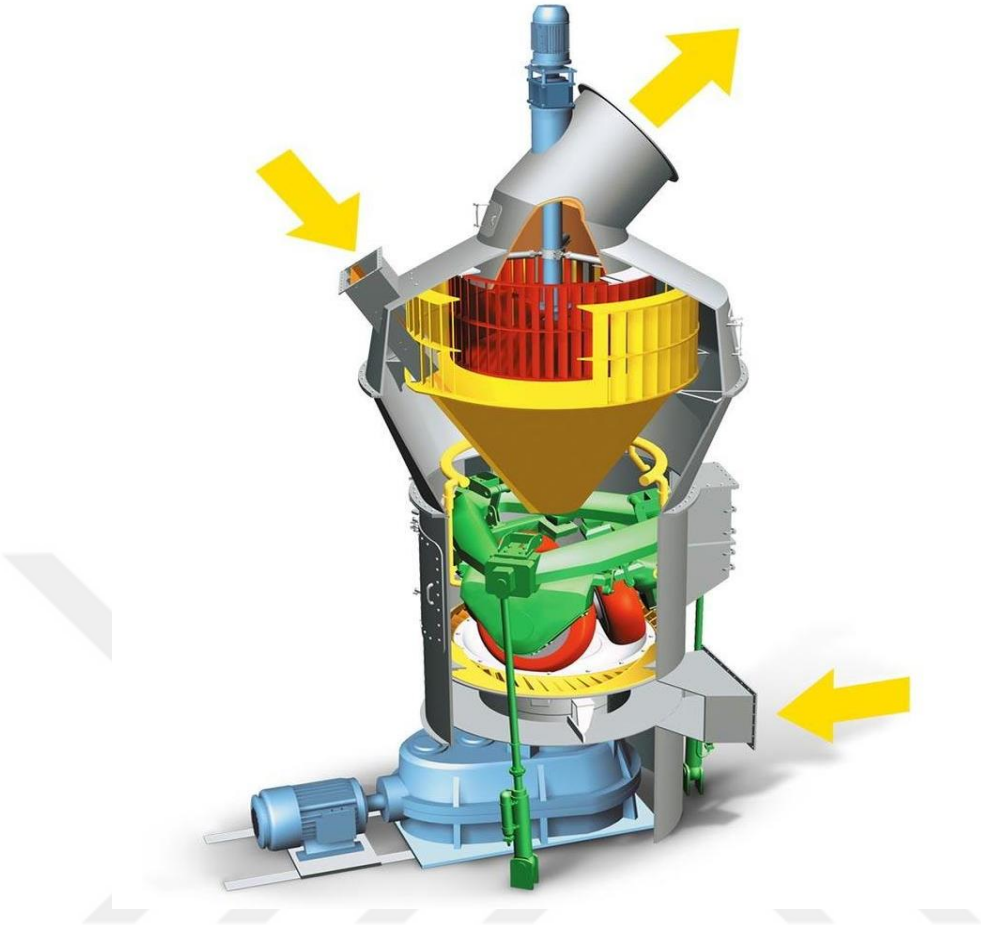
1987 yılında Chichibu Kawasaki Pregrinder (CKP) olarak adlandırılan yeni bir dikey valsli değirmen, Chichibu Çimento Şirketi ile Kawasaki Heavy Industries firmalarının ortaklığında piyasaya sürüldü. Bu değirmende yüksek sirkülasyon basıncından kaynaklanan verimsizlikler azaltılmak için mekanik bir malzeme boşaltma sistemi kullanılmıştır [47]. CKP değirmenleri, geleneksel dikey valsli değirmenlerin öğütme bölümü ile benzer bir konsepte sahipti. Malzeme öğütme tablasına beslenir ve tablanın dönüşünden kaynaklanan merkezkaç kuvveti ürünü dağıtır. Daha sonra, malzeme valslerin altında öğütülür. Öğütülmüş malzeme tablanın çevresinden geçer ve boşaltım şutları tarafından boşaltılır [48]. 90'lı yılların ortasında Loesche GmbH firması klinker ve cüruf öğütülmesi amacıyla 4 valsli (2+2) dikey değirmenini tanıttı. Bu sistemde dört silindirden ikisi daha küçük silindirlerle değiştirildi. Küçük silindirler malzemeyi hazırlarken ana silindirler öğütmekteydi. Bu sayede malzemenin öğütülmeye hazırlanması harici bir sistemle değil değirmen içerisinde gerçekleştirilmiş oluyordu [49].

MPS (mikro öğütücü sistem) ve MVR (çok sürüşlü dik değirmen) değirmenleri ise 1864 yılından beri faaliyet gösteren Gebr. Pfeiffer firması tarafından üretilmiştir [50]. Pfeiffer MPS dikey valsli değirmen (Şekil 2.22) çimento hammaddesi, çimento, klinker, granül yüksek fırın cürufu, kömür, kireçtaşı ve alçı öğütmesi için kullanılmıştır [51]. Değirmenin kapasitesi ve boyutu, öğütülecek malzemeye göre değişir. MPS dikey valsli değirmenlerin kapasitesi, çimento hammaddeleri için 6500

kW kurulu güçle 650 ton / saate kadar ulaşabilir [52]. Gebr. Pfeiffer, pazarın gereksinimlerini karşılamak için MVR değirmeni (Şekil 2.23) adı verilen başka bir dikey valsli değirmen geliştirdi. Değirmenlerin tasarımı, silindirlerden biri arızalansa bile sürdürülebilir çalışmaya olanak sağlar [53]. MVR değirmeni, dört ila altı öğütme silindirinden, düz öğütme tablasından, nozul halkalı mahfazadan, ayırıcıdan ve tahrik ünitesinden veya alternatif olarak planet dişlilere sahip geleneksel bir tahrikten oluşur. MVR valsli değirmen daha yüksek verim oranlarını sağlamak için tasarlanmıştır. Hammaddeler için maksimum MVR valsli değirmen kapasitesi 12000 kW kurulu güç ile 1400 ton / saattir [54].



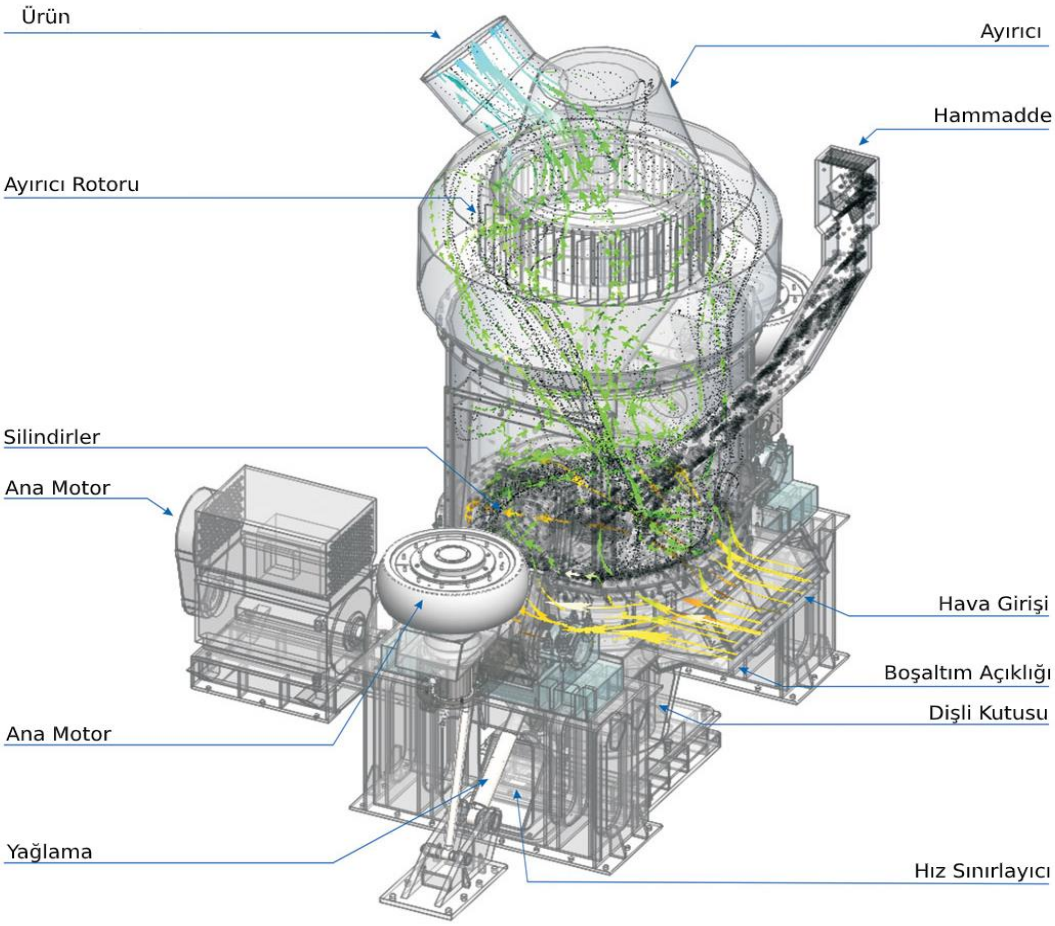
Şekil 2.2: Loesche marka değirmen örneği. [55]



Şekil 2.3: Pfeiffer MPS değirmeni. [56]

Genel olarak dik değirmenler çimento ve kömür endüstrisinde kullanılır. Aydoğan ve Benzer [57], dört farklı değirmende bulunan devrelerin genel devre performanslarını karşılaştırmış ve dik değirmen teknolojisinin bilyalı değirmenden daha düşük spesifik enerji tüketimi gösterdiği sonucuna varmıştır. Schaefer [58], dik değirmen (VRM) ile kuru öğütmenin, geleneksel öğütme sistemlerine karşı avantajlarını vurguladı. VRM'lerin bir dezavantajı silindirlerin titreşimidir. Fujita ve Saito [59], değirmen titreşiminin sürtünme özelliklerinden kaynaklandığını belirledi. Junga ve diğ. [60], tanecikli malzemenin öğütme tablasındaki davranışını incelemiş ve tablanın çevresel hızı ile diğer öğütme özellikleri arasında güçlü bir ilişki bulmuştur. VRM'lerin bir başka büyük avantajı kurutmadır; Isıtılmış hava akışı vasıtasıyla ham maddelerin nemini azaltmak mümkündür. Bunun için yakındaki bir atık ısı kaynağı kullanılabilir. Bu kurutma özelliği, çimento endüstrisi uygulamaları için oldukça önemlidir.

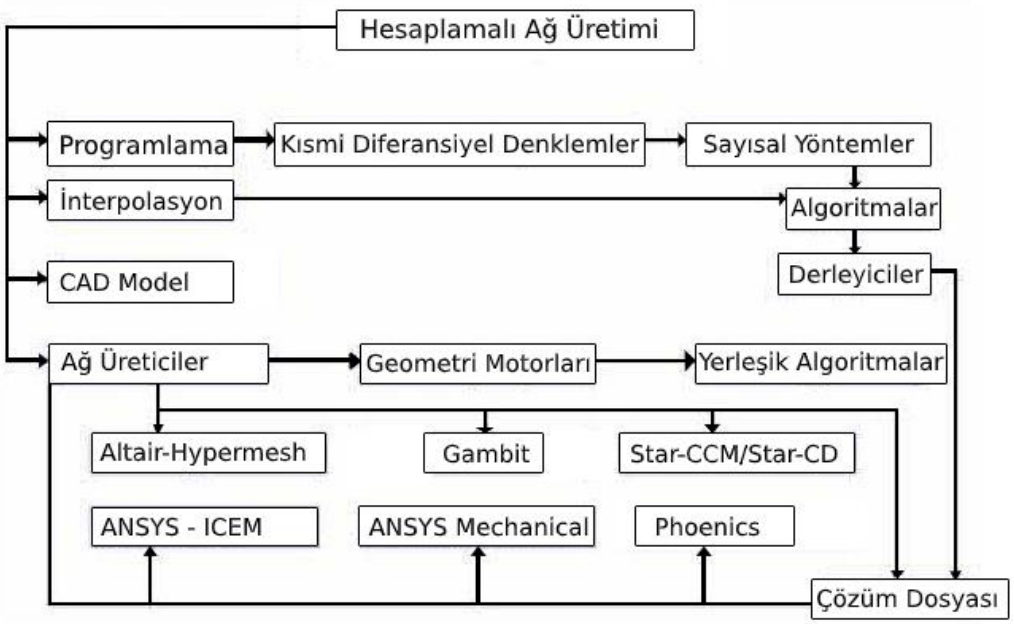
Bir kapalı devre dik değirmenin ve seperatörünün (ayırıcı) iç işlemi oldukça karmaşıktır ve henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Üç hava sirkülasyonu olduğu için, dik değirmen içerisinde üç ayırma işlemi gerçekleşir. Dönen öğütme tablasına bağlı olarak ortaya çıkan merkezkaç kuvveti, parçacıkları tablanın üzerinden çıkış deliğine doğru gitmeye zorlar. Büyük parçalar buradan dökülerek bir kovalı elevatör vasıtasıyla tekrar sisteme kazandırılır. Orta büyüklükteki partiküller, limit hızlarının, yukarı doğru hava hızıyla aynı olmasına bağlı olarak değirmen içinde dolaşır. Küçük parçacıklar ise hava vasıtasıyla seperatöre taşınır [61]. Bu olay, güncel araştırmaların bu işlemlerin sonlu hacimli veya ayrık elemanlı bilgisayar simülasyonlarına odaklanmasının nedenidir. 1990'lı yıllardan bu yana, bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesi ile, katı-gaz akışının toz ayrıştırma çalışmaları, siklon ayırıcı ve değirmen seperatöründe başarıyla uygulanmaktadır. Ancak, dik değirmenin katı-gaz akışı alanında araştırmalar daha yeni başlamıştır [62-63].



Şekil 2.4: Dik silindirli değirmen parçaları. [64]

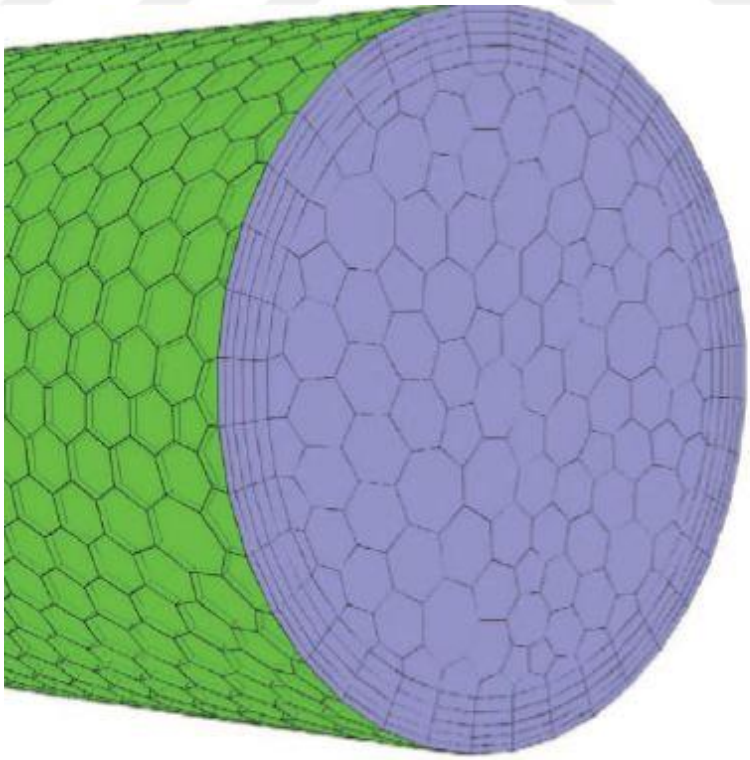
Bhambare ve Lu [65], MPS kömür dik değirmenlerinin CFD modellemesini gerçekleştirmiş ve bu tekniğin bu makinelerin iç yapısını ve çalışmasını daha da geliştirmek için uygun olduğu sonucuna varmıştır. Son araştırmaların diğer bir yönü de, laboratuvar ölçeğinde VRM'lerin veya sadece farklı bölümlerinin inşasıdır. Werner ve diğ. [66] ve Meissner ve ark. [67] bu tür laboratuvar ölçekli cihazlar ürettiler. Bu sayede temel işlemler araştırılabilmekte ve bilgisayar simülasyonları doğrulanabilmektedir. Meissner ve arkadaşları laboratuvar ölçeğinde ve endüstriyel ölçekte deneylerden elde edilen verileri karşılaştırmışlardır; bu sayede laboratuvar ölçekli çalışmalar doğrulanabilmiştir.

Bu çalışmada da kullanılacak olan CFD analiz yöntemine değinecek olursak, ilgili literatür taraması yaptığımızda görüyoruz ki; günümüzde artık mühendisler tarafından tasarımların doğrulanması ve optimize edilmesi amacıyla CFD simülasyon kullanımı gittikçe artmaktadır. CFD kullanımındaki artış, bilgisayarların artan işlem gücünün ve gelişmiş CFD simülasyon yazılımlarının bir sonucudur. CFD, akış analizi yapmak için sayısal yöntemler kullanan bir akışkan dinamiği dalıdır. Akış profilindeki herhangi bir bölge için akış hızı, sıcaklık, basınç, yoğunluk, kimyasal konsantrasyonlar ve diğer birçok özelliği analiz eder. Cfd simülasyonu kullanmanın faydalarından biri fiziksel testlere kıyasla çok daha az maliyet getirmesidir. Ayrıca, kullanıcılara termokupllar ve basınç sensörleri gibi proses enstrümantasyonunun verebileceğinin ötesinde ek bilgi verir. Bu tip sensörler akıştaki bir nokta için veri sağlar. CFD simülasyonlarından elde edilen çıktılar ise akışkandaki herhangi bir düzlem boyunca sıcaklık ve kimyasal konsantrasyonlar gibi çeşitli verileri gösteren kontur diyagramlarını içerir. Akış verilerini gösteren yol çizgileri üretilebilir. Ek olarak, geçici ve döngüsel akış davranışlarını göstermek için videolar üretilebilir [68]. Genel olarak, tek / çok bileşenli düzeneklerin genel akış davranışını anlamak için kullanılan CFD yöntemleri geometri modellemesi, hesaplamalı ağ üretimi, akış fiziğinin türbülanslı, iki fazlı tanıtılması ve görselleştirme adımlarını içerir [69]. Hesaplamalı ağ üretimi, simülasyon projelerinde genellikle en önemli ve zaman alıcı kısım olarak kabul edilen temel unsurdur. Ağ kalitesi, akış denklemlerinin sayısal çözümünün doğruluğunu, yakınsamasını ve hızını etkiler. Ağ (mesh) üretim konsepti 1985'te JF. Thomson [70] tarafından ortaya konulmuştur. Bir takım bilgisayar programları yapılmış ve Bhasker [71] tarafından bazı endüstriyel elemanlarda bu program uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde bu uygulamanın şeması verilmiştir.



Şekil 2.5: Mesh üretim konsepti.

Birkaç çeşit mesh (ağlama) yöntemi bulunur. İki boyutlu uygulamalar için üçgenler ve dörtgenler kullanılır. Üç boyutlu uygulamalar içinse tetrahedron, heksahedron, prizma, piramit ve polihedronlar bulunmaktadır. Şekilde polihedron ağ örneği görülmektedir.

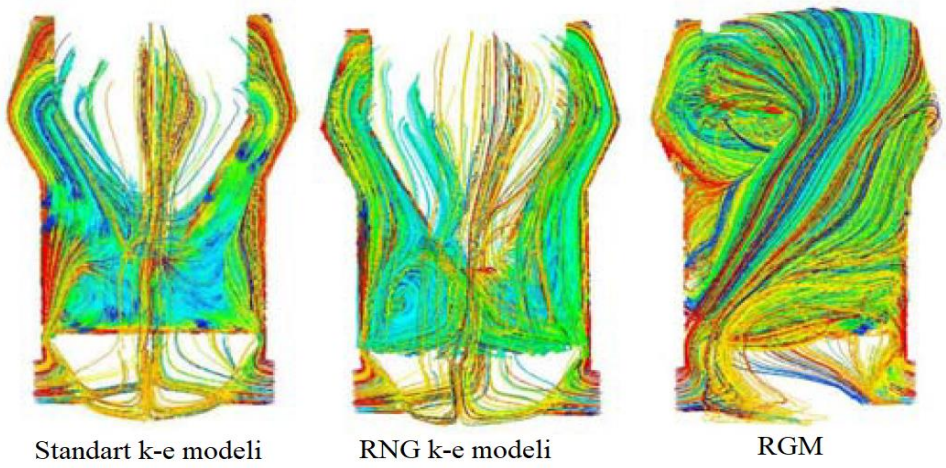


Şekil 2.6: Polihedron ağ örneği. [72]

Ağ seçimi uygulamaya bağlıdır. Seçim yapılırken çözüm elde etmek için gereken hesaplama işlem zamanı ve sayısal difüzyon göz önünde bulundurulmalıdır. Üretilen hücrelerin miktarı ve kalitesi bu değerleri etkiler. Sayısal difüzyon, çok boyutlu durumlarda önemli hata kaynaklarından biridir. İyi bir CFD uygulaması kullanılan hücre türüne ve sayısına bağlıdır.

CFD analizin temelinde ayrıca Sonlu Elemanlar Metodu yer almaktadır. Proses ekipmanlarında akış, gaz/sıvının bir bölümden diğerine taşınmasını içerir ve kütle, moment ve enerji tasarrufu prensipleri ile tarif edilir. Navier Stokes (taşıma) denklemleri bu ilkelerden türetilmiştir. Bu Navier Stokes denklemlerini sayısal olarak ayrıştırmak için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılır [71].

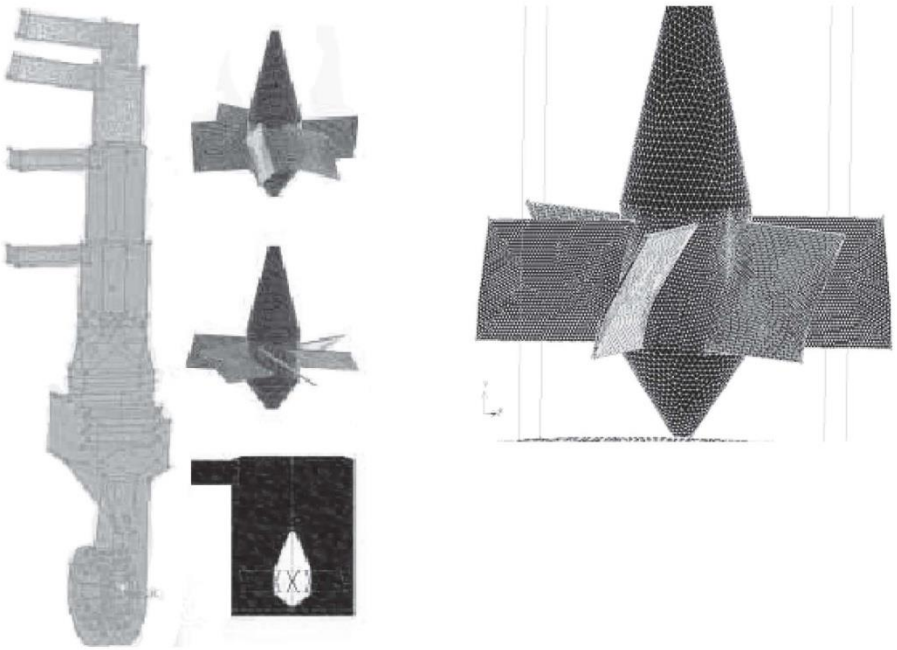
Yapılan literatür çalışması sırasında 2009 yılında dik değirmende CFD analizde k-ε türbülans, RNG k-ε ve RGM (Reynolds Gerilim Modeli) türbülans modellerinin karşılaştırılmasının yapıldığı görüldü [73].



Şekil 2.7: CFD türbülans modelleri karşılaştırması. [73]

2011 yılındaysa D. Haijan ve arkadaşları tarafından bir dik değirmenin giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkını azaltmak için CFD analizi yapıldı ve yüksek basınç direncine yol açan nedenler incelendi [74]. Kömür değirmeninde öğütme verimini arttırmak için CFD analiz uygulaması C. Bhasker tarafından uygulandı [75]. 2009 yılında Nuray K. tarafından kömür değirmeninin Cfd analizi, tek fazlı akış olarak kabul edilerek yapıldı. Kömür parçacıkları inceleme dışında tutulup temiz hava akımı CFD Fluent programında sayısal olarak simule edilmiştir [76]. J. Parham ve W. Easson ise kömür dik değirmeninin separtörünün (ayrıştırıcı) ölçekli bir modelini kullanarak, seperatör parçacık ayırma tahminlerini geliştirmek ve hesaplamalı

simülasyonların doğrulanması amacıyla veri elde etmek için çalışma yaptı [77]. 2009 yılında S. Kamales ve arkadaşları değirmen içinde kömürün kurutulması işlemini analiz etmek amacıyla MPS tip kömür dik değirmeninin üç boyutlu hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) modelini geliştirmiştir. Simülasyonu gerçekleştirmek için ticari bir CFD yazılım paketi olan Fluent'teki kömür kurutma modeli ile birlikte Eulerian-Lagrangian simülasyon yaklaşımı kullanılmıştır [78]. R. Guizani ve H. Mhiri, 2014 yılında, dönme hızının dinamik seperatörün akış karakteristiğine etkisini gözlemlemek amacıyla CFD analiz çalışması yaptılar [79]. Kömür değirmeni parçası olan seperatörün bıçak yapısıyla ilgili ise 2014 yılında M. Kozic ve arkadaşları Ansys Fluent yazılım paketinin Euler-Euler ve Euler-Lagrange yaklaşımını kullanılarak çok fazlı akışın sayısal simülasyonlarını yaptılar. Bu çalışmayla bıçak açısının modifikasyonu, bıçak şekli ve seperatörün dikey konumunun brülörlerdeki kömür tozu dağılımı üzerindeki etkisi analiz edildi [80].



Şekil 2.8: Seperatör bıçak yapısı mesh işlemi. [80]

E. Why, F. Alnaimi ve ark. ise kömür dik değirmeninde hava akış debisi ve kömür paritküllerinin akış debilerinin öğütülmüş kömür inceliğine etkisini belirlemek amacıyla çalışmıştır. 5 farklı debi kullanılarak CFD analiz yapılmış ve simülasyon sonuçlarıyla deneysel kömür incelik sonuçları karşılaştırılmıştır [81].

H. Konuray Demir, 2015 yılında işlem değişkenlerinin dik değirmen performansı üzerine etkisini inceledi. Bu amaç doğrultusunda, bir tasarım değişkeni olan kenar

yüksekliğinin etkisi, öğütme yükünün etkisi, sınıflandırıcı dönüş hızının etkisi, hava hızının etkisi ve değirmen içi basınç farkının etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada akış alanı ile ilgili bir inceleme yapılmayıp, tasarımsal parametreler değerlendirilmiştir [82].

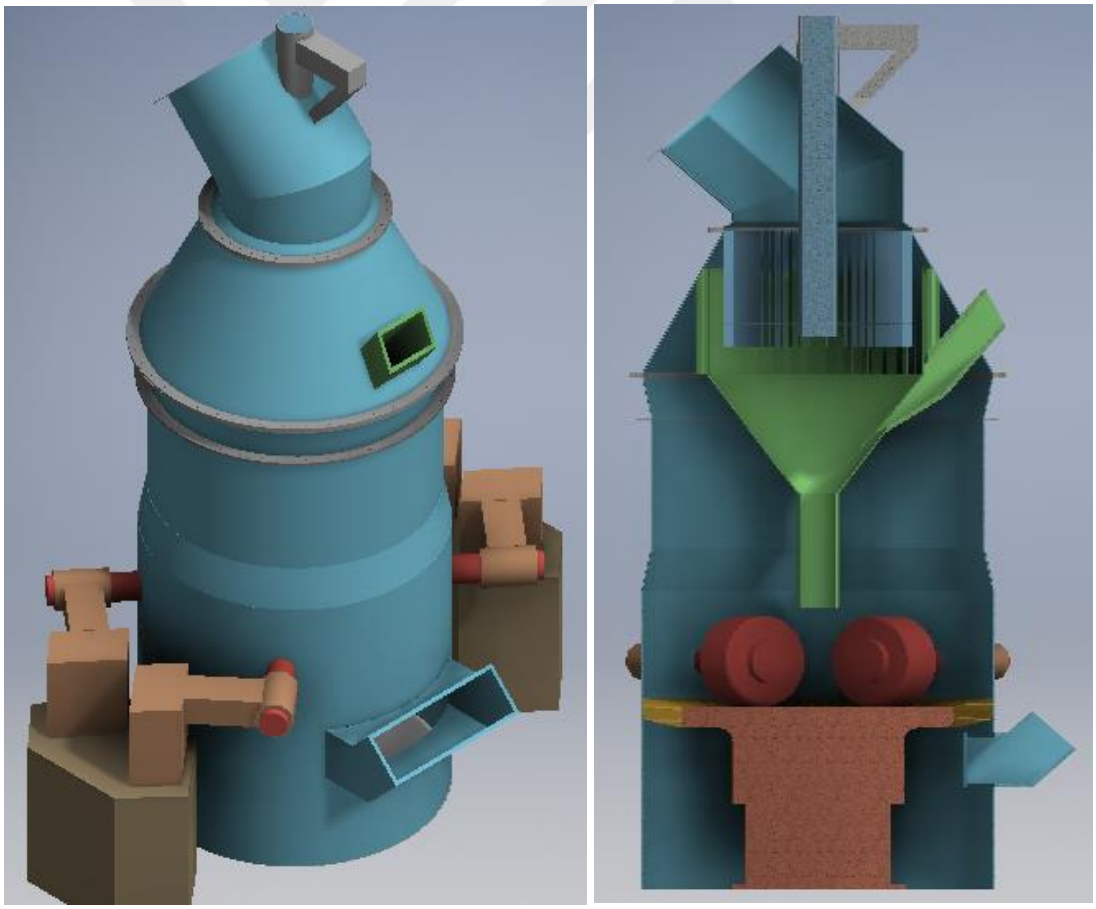
2017 yılındaysa D. Altun dik değirmenlerin matematiksel modellemesi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada dik valsli değirmenlerin matematiksel modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı malzemeler kullanılarak pilot ve endüstriyel ölçekli öğütme testleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmaları kapsamında, dik valsli değirmen öğütme ve sınıflandırma kısımları olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Her bir operasyon için model parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan model parametreleri ile operasyonel değişkenler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Kurulan ilişkiler matematiksel eşitliklerle ifade edilerek yeni model yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen model yapısı, pilot ölçekli test verileri üzerinde simülasyon yolu ile test edilmiştir [83].

Yapılan literatür taramasında özetle bu tezde analizi yapılan MVR tip dik değirmenin bir benzeri olan kömür öğütme sitemi MPS pulverizer üzerine CFD analizler yapıldığı ve performans arttırmaya yönelik çeşitli öneriler getirilebildiği görüldü. Buradan yola çıkarak MVR tip hammadde öğütme değirmeni içinde benzer bir çalışma yapılabileceği düşünülmüştür. Yine özetle dik değirmen ile bilyalı değirmenin verimlilik kıyaslaması, dik değirmende tabla dönüş hızının öğütme parametreleriyle ilişkisi, dik değirmende CFD analizde hangi türbülans modelinin kullanılmasının daha uygun olduğu ve seperatörün kanat yapısının akış karakteristiğine etkisi ile ilgili çalışmalar yapıldığı saptandı. Böylece bu çalışmada MVR tip bir dik değirmen için seperatör bıçak yapısı, tabla dönüş hızı gibi sınırlı parametreler ile değil komple sistem içi akış alanı üzerine CFD analizi yapılması, analiz sonuçları ile halihazırda kurulu olan bir dik değirmenin işlem parametrelerinin karşılaştırılması ve varsa verimlilik arttırmaya yönelik önerilerin getirilmesi, aksi takdirde teorik tasarım kriterleriyle gerçek sistem verilerinin doğrulamasının yapılması gerektiği ve bu konuda yeterli çalışmaların mevcut olmadığı belirlenmiştir. Ve böylece bu çalışmanın yapılmasına ihtiyaç olduğu görülmüştür.

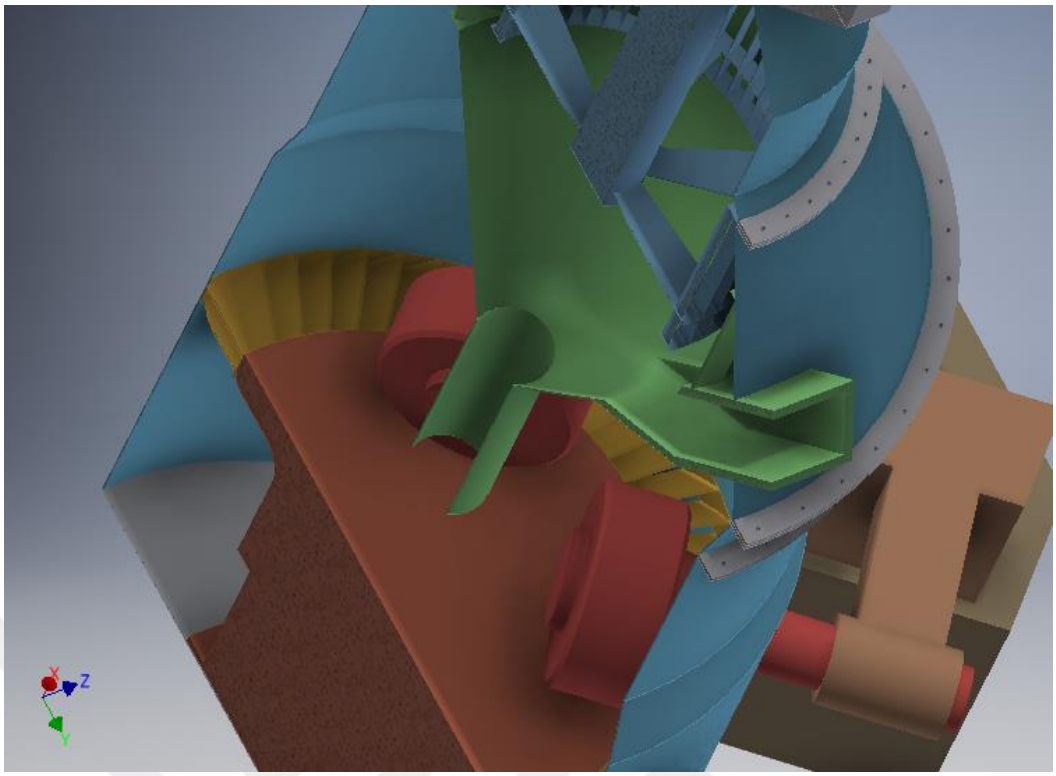
3. MATERYAL METOT

3.1 Değirmen Modelleme

Dik değirmen modeli Gebr. Pfeiffer firmasının MVR-5000 tipi değirmeni baz alınarak oluşturulmuştur. Geometri oluşturulurken komple değirmen ele alınmış fakat öğütme DEM (ayrık eleman modelleme) analizi kapsamına gireceği için öğütülen parçanın değirmen içindeki davranışı, seperatörde ayrıştırılması ve sistemden ayrılmasını içeren bölgeleri bu çalışmada ele alınmıştır. Modelin oluşturulmasında Autodesk Inventor Professional 2018 yazılımı kullanılmıştır. Oluşturulan geometriye ait görünüşler Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmektedir.

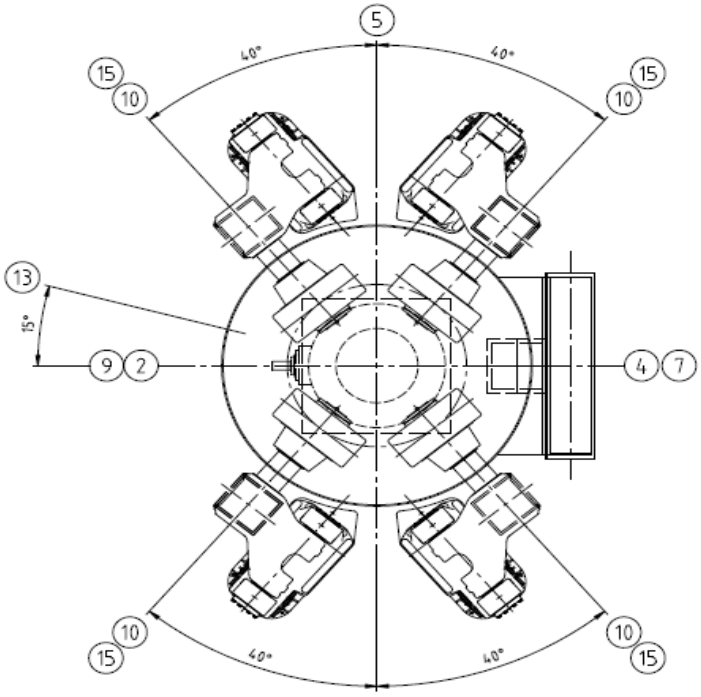


Şekil 3.1: Değirmen modelleme çalışması.



Şekil 3.2: Değirmen model iç kesiti.

Değirmen modelinde görüldüğü üzere karşılıklı ikişer grup halinde 4 adet silindir yer almaktadır. Öğütme silindirlerinin (rollers) konumlandırılması Şekil 3.3'te verilmiştir.

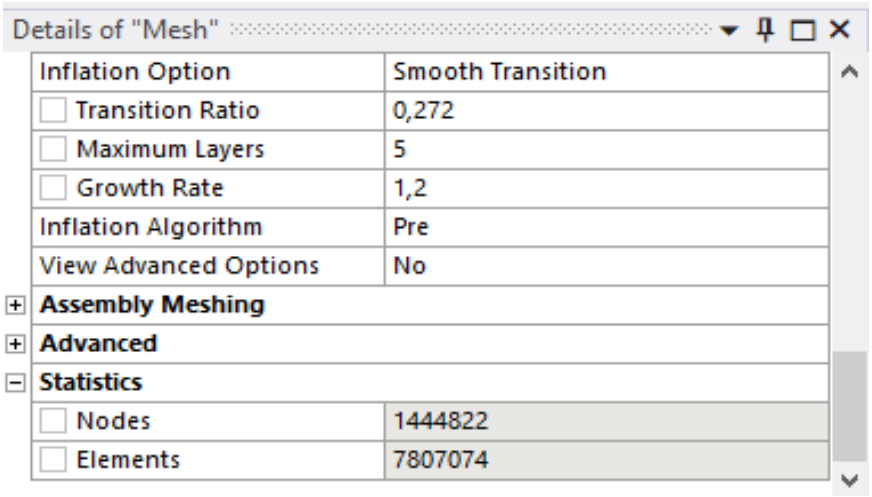


Şekil 3.3: Silindirlerin konumlandırılması.

Katı modeli oluşturulmasından sonraki adım analiz öncesi modelin hazırlanmasıdır. Analizi yapmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD – Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) programı olan Ansys Fluent 2020 R1 yazılımı kullanılmıştır. Analiz için gerekli olan mesh oluşturma, sınır şartlarının ve bölge tiplerinin belirlenmesi işlemleri yine ANSYS Fluent programında gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar analiz öncesi gerekli çalışmalar olup analiz kalitesini belirleyen temel aşamalardır.

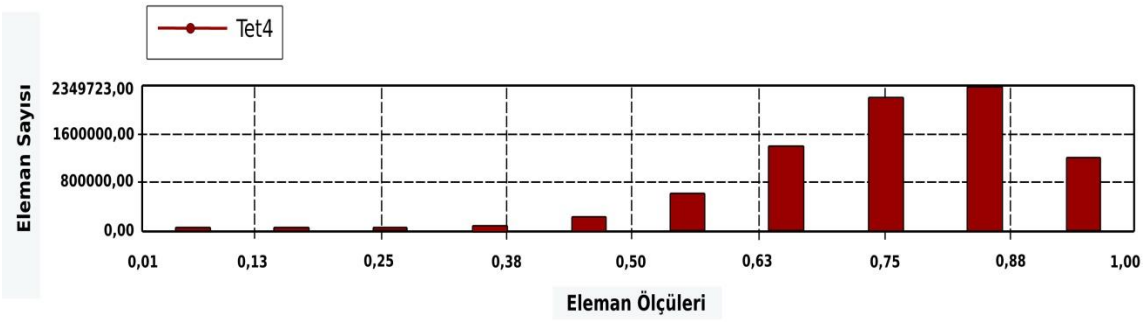
3.2 Mesh Oluşturma

Ansys yazılımı içerisinde, mevcut geometride ağ yapısı oluşturulmuştur. 4,8 milyon, 6,2 milyon ve 7,8 milyon eleman sayılarında olmak üzere üç farklı meshleme yapılmıştır. Her üç eleman sayısı ile çalışmalar yapılarak çözümün eleman sayısından etkilenmediği "optimum eleman sayısı" tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan modelleme çalışmalarında 7,8 milyon üzerindeki eleman sayılarında yapılan çözümlemelerde çıktıların değişmediği görülmüştür. Bu yüzden model genelinde 150 mm eleman boyutu ve ince unsurlar içinde minimum 30 mm eleman olacak şekilde ağ yapısında 7807074 adet hücre kullanılmıştır. Eleman sayısı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Eleman sayısı.

Yapılan ağlara bölme işlemine ait eleman dağılım grafiği ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu grafik; eleman sayısının, eleman boyutlarına oranını gösterir. Grafik ve veriler Ansys Fluent 2020 R1 yazılımından alınmıştır.



Şekil 3.5: Eleman dağılım grafiği.

Mesh kalitesi belirlenirken ortogonal kalite ve çarpıklık değeri parametreleri göz önüne alınır. Düşük ortogonal kalite (orthogonal quality) veya yüksek çarpıklık (high skewness) değerleri önerilmez. Genel olarak minimum ortogonal kalite > 0,1 ve maksimum çarpıklık < 0,95 tutulmaya çalışılır. Ancak bu değerler hücrenin konumuna bağlı olarak farklı olabilir. Mesh (ağ) kalitesini belirlemek için kullanılan spektrum Şekil 3.6'da verilmiştir.

Ağ yapısı çarpıklığa bağlı kalite spektrumu

Mükemmel	Çok İyi	İyi	Kabul Edilebilir	Kötü	Kabul Edilemez
0-0.25	**0.25-0.50**	**0.50-0.80**	**0.80-0.95**	**0.95-0.98**	**0.98-1.00**

Ağ yapısı ortogonal kalite spektrumu

Kabul Edilemez	Kötü	Kabul Edilebilir	İyi	Çok İyi	Mükemmel
0-0.001	**0.001-0.14**	**0.15-0.20**	**0.20-0.69**	**0.70-0.95**	**0.95-1.00**

Şekil 3.6: Mesh kalitesi belirleme çizelgesi. [84]

Bu tez çalışmasında yapılan mesh işleminin ortogonal kalite ve çarpıklık değerleri sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

Details of "Mesh"

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	1,3687e-002
Max	0,99746
Average	0,76839
Standard Deviation	0,12444

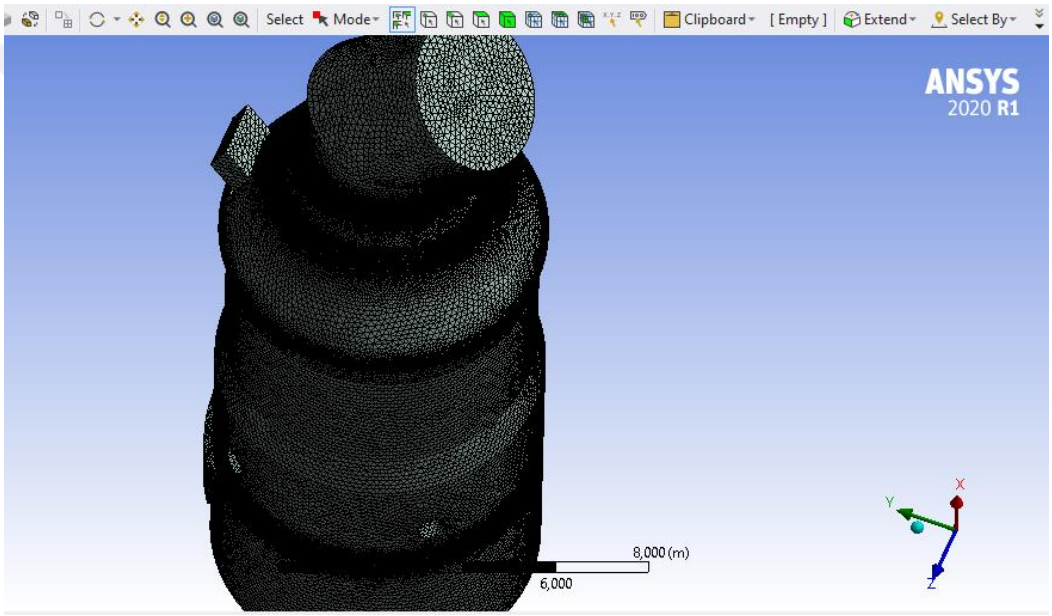
Şekil 3.7: Ortogonal kalite.

Details of "Mesh"

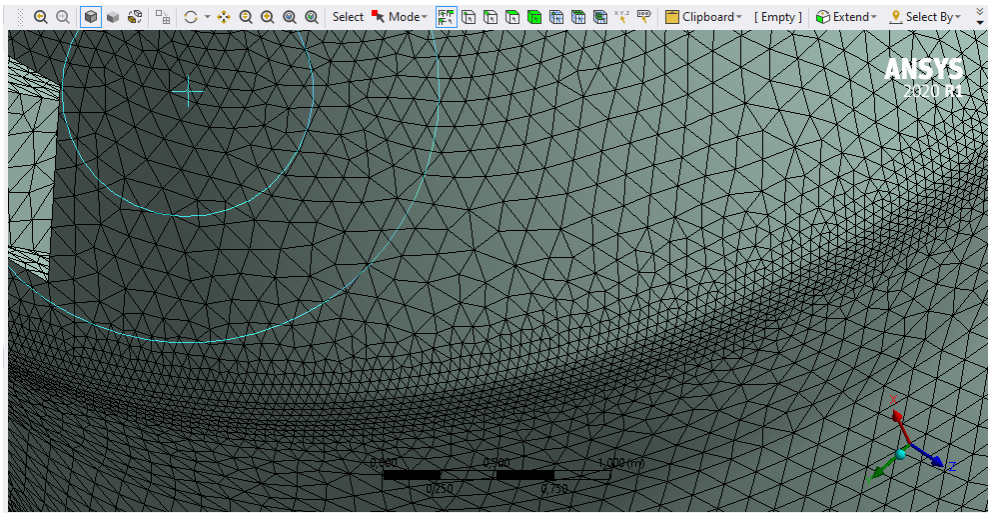
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
Min	2,5926e-010
Max	0,98631
Average	0,23024
Standard Deviation	0,12617

Şekil 3.8: Çarpıklık değerleri.

Değerler uygulanan mesh yapısının analiz için yeterli olduğunu göstermektedir. Mesh (ağlama) uygulamasının örnek görselleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir..



Şekil 3.9: Mesh uygulaması sonucu.



Şekil 3.10: Mesh uygulama detayı.

3.3 Sınır Şartlarının Tanımlanması

Farin hammaddesi , belirli kimyasal kompozisyona sahip kalker, kil, demir cevheri, vb. gibi malzeme öğütülerek ince bir toz haline getirilir. Bu toz "farin" olarak adlandırılır. Bu değirmende kullandığımız malzeme karışımı şu şekilde tanımlanmıştır.

- % 26,52 Kil
- % 72,20 Kireçtaşı
- % 1,28 Demir cevheri

Kaba tanecikler: 0 ile 80 mm arası, maksimum %10'u daha büyük (en fazla 140 mm)

İnce tanecikler: 0 ile 20 mm arası, minumum %5'i daha büyük (en fazla 100 mm) ve maksimum %20 < 2mm

Yüzey nemi : %5 H_2O

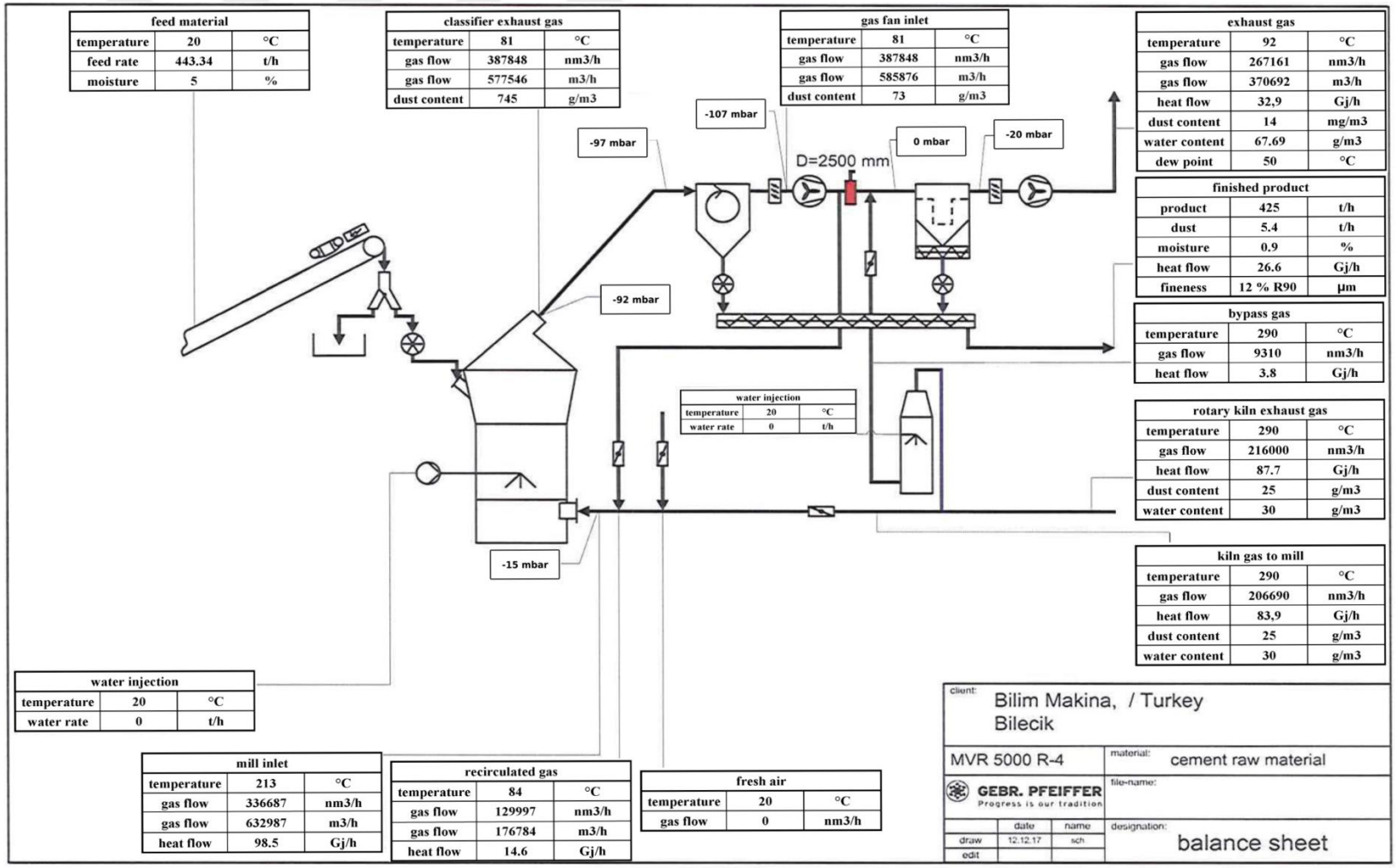
Kütle yoğunluğu : 1,43 t/m^3

Parçacıklar DPM (Ayrık faz modelleme) Fluent yöntemi kullanılarak modellenmiş ve yukarda verilen özelliklerde tanımlanmıştır. Yine sistemin sınır şartlarının ve giriş verilerinin belirlenmesi ve programa tanımlanabilmesi için değirmen üreticisi firmanın hazırlamış olduğu MVR5000 R4 tip değirmen ve buna bağlı sistem özelliklerini gösterir şemadan yararlanılmıştır. Bu şema Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Şemada yer alan verilere göre sisteme giren sıcak gazın sıcaklığı, basıncı ve debisi verilmiştir. Beslenen malzemenin besleme oranı, sıcaklığı ve nemi belirtilmiştir. Değirmen girişi gaz sıcaklığı, yoğunluğu gibi özellikler ile birlikte sistemden ayrılan ürünün debisi, tane büyüklüğü, nemi görülmektedir. Yine sistemden ayrılan çıkış gazının sıcaklığı, gaz akışı, toz içeriği, su içeriği gibi özelliklerin teorik olarak belirlenen değerleri bu şemada görülmektedir. Bu veriler analizin yapılabilmesi için gerekli temeli oluşturmuş ve sınır şartları ile girdilerin tanımlanmasında faydalanılmıştır.

Sınır şartları ve yüklemelerin tanımlandığı kısımlar ve isimlendirmeleri şu şekilde verilmiştir;

Inletfeed: malzeme beslenen kısım

Outlet: öğütülemeyen malzemenin çıktığı alt kısım



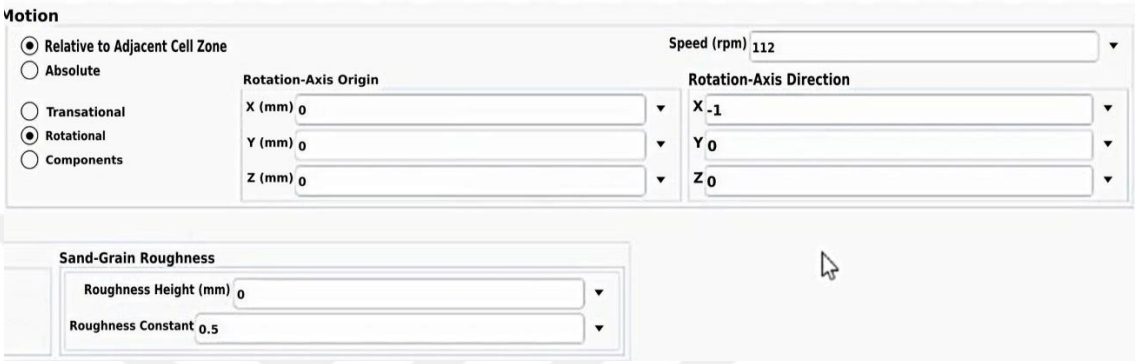
Şekil 3.11: Sisteme ait verileri gösteren şema.

Outlettemp: alt taraftan sıcak havanın girdiği bölüm

Outlettop: değirmenin üstünde öğütülen malzemenin değirmenden ayrıldığı kısım

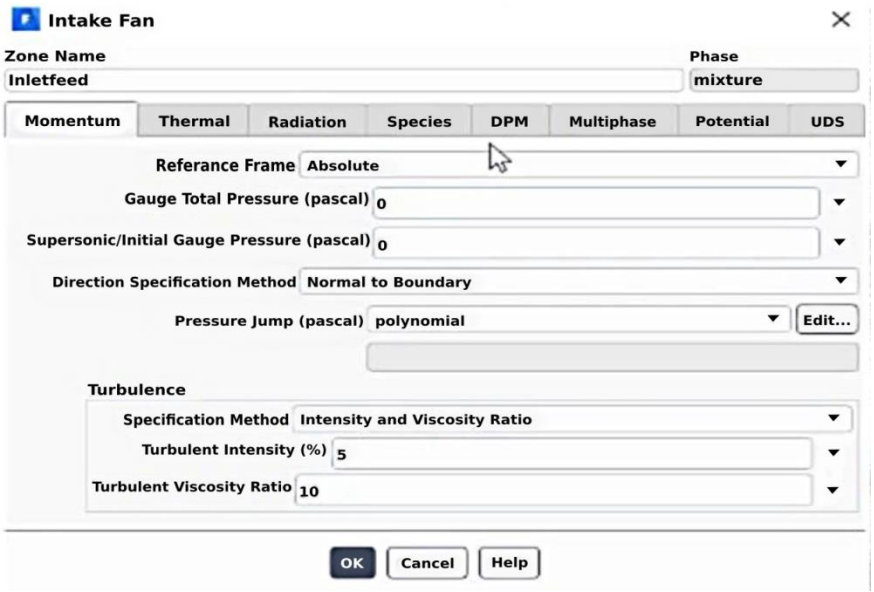
Wallseparate: seperatör dönen kısım

Seperatör istenilen tane boyutunda ayrıştırma işlemi için saat yönünde 112 rpm açısal hızla dönmektedir, analizde de saat yönünde dönmesi için x axis direction: -1 ve speed: 112 rpm olarak seçilmiştir ve Şekil 3.12'de gösterilmiştir..



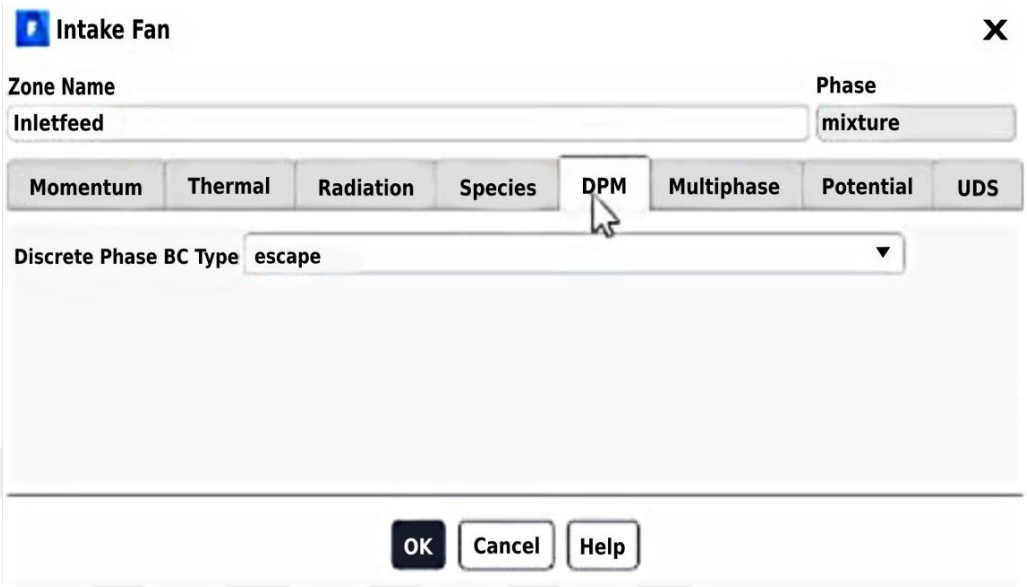
Şekil 3.12: Seperatör tanımlanması.

Inletfeed, yani malzeme girişi olarak tanımlanan kısım intake-fan olarak seçilmiştir. Bu sayede 1 atm basınçta eğer basınç farkı doğarsa hava çekebilmesi sağlanacaktır. Malzeme 1,2 m/s'lik hızla hareket eden bir lastik banttan serbest düşme yaparak değirmene girmektedir. Intake-fan tanımlamasına ait program ekran görüntüleri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir.



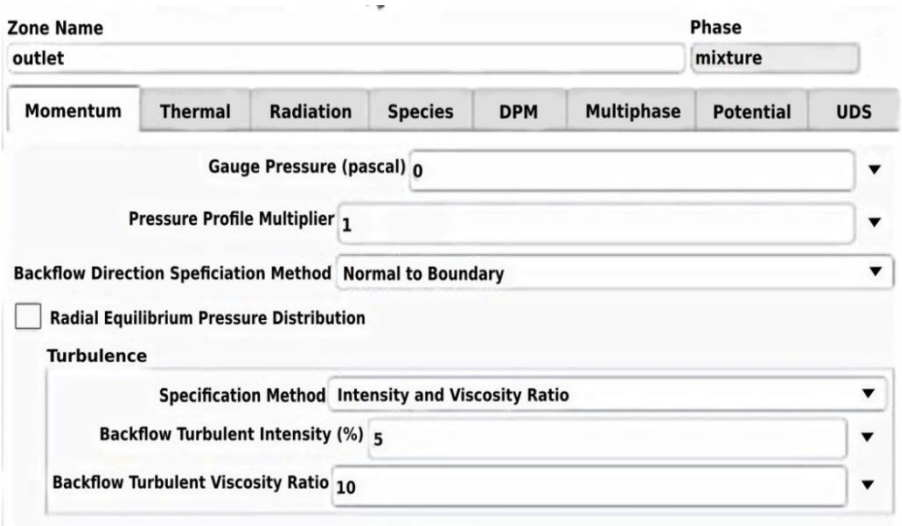
Şekil 3.13: Intake fan momentum tanımlaması.

DPM parçacık modelinde “escape” tanımlaması yapılmıştır. Bunun anlamı parçacık söz konusu sınırla karşılaştığında “kaçmış” olarak rapor edilir ve yörünge hesaplamaları sonlandırılır.



Şekil 3.14: Intake fan DPM tanımlaması.

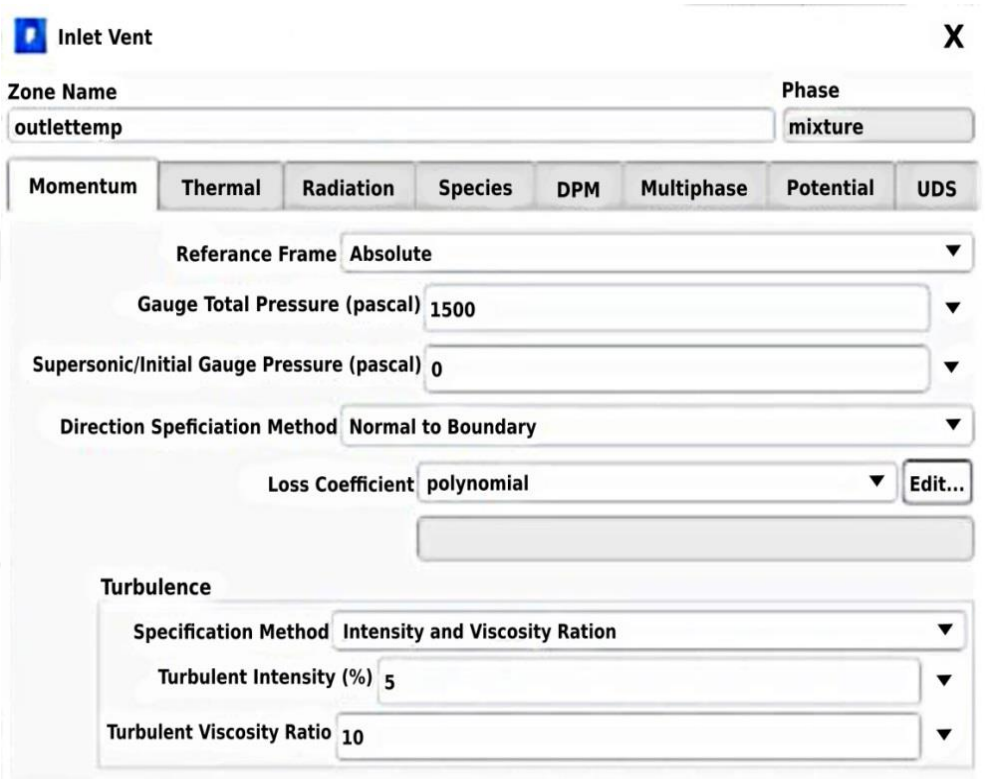
Ansys Fluent yazılımında kullanılan ayrık faz modeli (Discrete phase modeling – DPM), Lagrange yaklaşımını esas almaktadır. Bu yaklaşımda, sürekli faz içindeki partiküller Lagrange yaklaşımıyla modellenirken sürekli ya da taşıyıcı faz olan hava Euler yaklaşımıyla modellenir. Sürekli faz için zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemleri çözülürken, sürekli faz içinde hareket eden partiküller hesaplanmış akış alanı içerisinde izlenir. Bu partiküller, sürekli faz ile momentum, kütle veya enerji transferinde bulunabilirler.



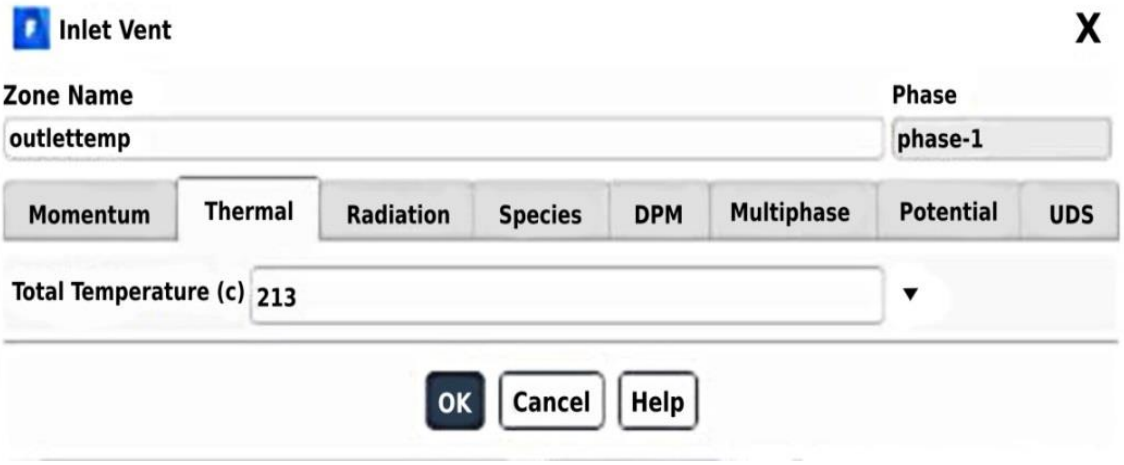
Şekil 3.15: Çıkış fan basıncı.

Çıkış fan basıncına ait değerlerin tanımlaması Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Burada basınç 0 pascal olarak belirlenmiştir. Ayrıca çok fazlı akış analizi olduğundan, hangi malzeme için basınç tanımlamasının olacağını göstermek açısından basınç profili 1 olarak belirlenmiştir.

Outlettemp, yani sıcak hava giriş kısmı 1500 pascal basınç altında çalışmaktadır ve inlet-vent tanımlanmıştır. 213°C'de sıcak gazı içeri almaktadır. Basınç ve sıcaklık tanımlanması ilgili görseller sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

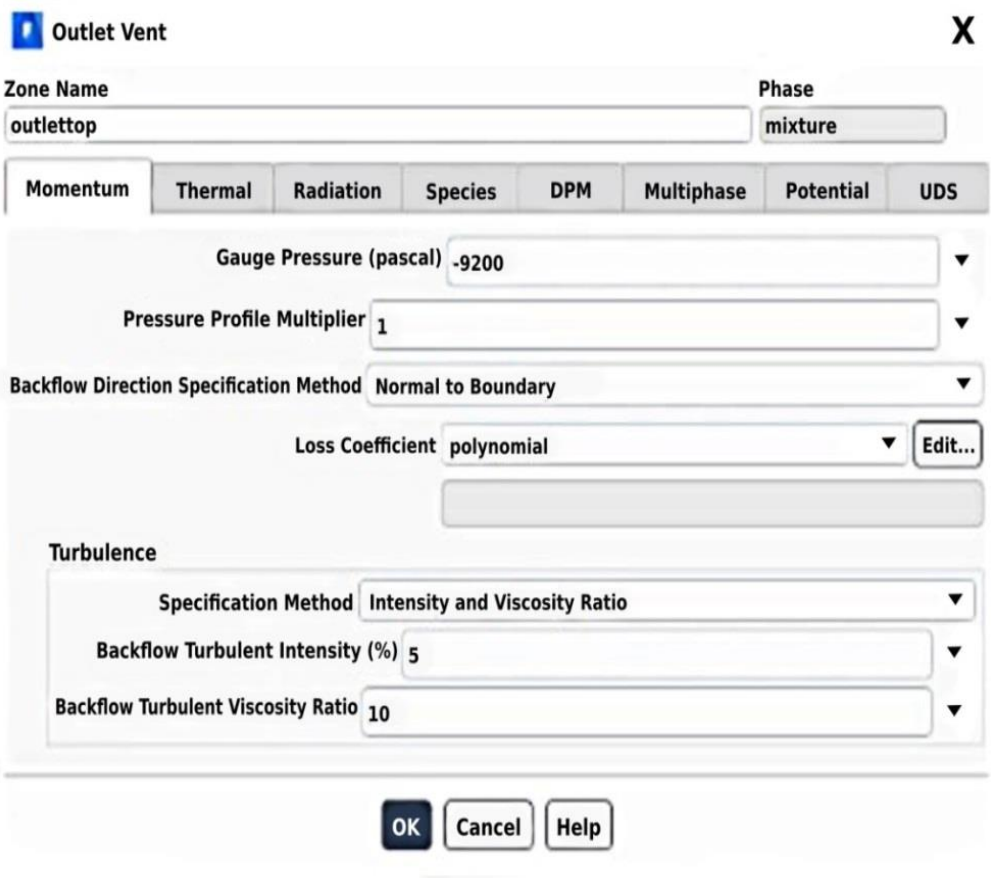


Şekil 3.16: Inlet-Vent basınç.

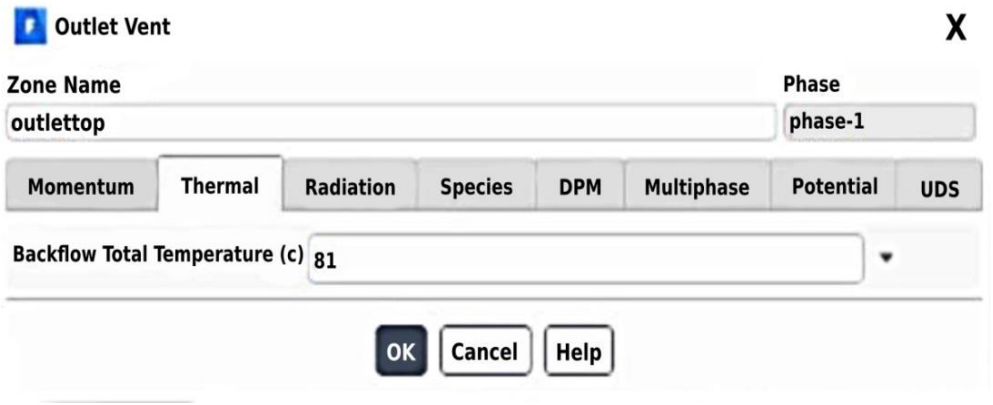


Şekil 3.17: Inlet-Vent sıcaklık.

Değirmen çıkışı, fan basıncı -9200 pascal ve outlet-vent olarak tanımlanmıştır. 81°C'de havayı dışarı vermektedir. Basınç ve sıcaklık tanımlanmasına ait görseller Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.18: Outlet-Vent basıncı.



Şekil 3.19: Outlet-Vent sıcaklık.

Sınır şartları ve yüklemeler yukarda gösterildiği şekilde tanımlanmış ve analiz çözdürmesi yapılmıştır.

3.4 Programda Seçilen Modeller ve Formülasyonlar

Viskoz Model: Akışkan analizlerinde başlıca tanımlanması gereken modellemelerden biri akış hareket modelidir. ANSYS Fluent yazılımı altında pek çok türbülans model seçeneği mevcuttur. Bu analizde var olan türbülanslı akışın tanımlanabilmesi için standart k-ε modeli tanımlanmıştır.

Üç tane k-ε türbülans modeli bulunmaktadır, bunlar Standart, RNG ve Realizable olarak ayrılırlar. Bunların arasındaki temel farklılıklar ise; türbülanslı viskozitenin hesaplanma yöntemi, k-ε'un türbülans yayılımıyla ilgili olan Prandtl sayıları ve ε denklemindeki üretim ve tüketim terimleridir.

Standart k-ε modeli, türbülans kinetik enerjisi (k) ve bunun dağılım oranı (ε) için model taşınım denklemlerine dayanan bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve dağılma oranı (ε) aşağıdaki taşınım denklemlerinden elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_m + S_k \qquad (3.4.1)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{e^2}{k} + S_\varepsilon \qquad (3.4.2)$$

Burada; G_k ortalama hızın gradyanına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, G_b kaldırma kuvvetine bağlı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, Y_m sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalı genleşmenin toplam dağılım oranına katkısını gösterir. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabitlerdir. σk ve $\sigma\varepsilon$ sırasıyla k ve ε'un türbülanslı Prandtl sayılarıdır.

Türbülans viskozitesi :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (3.4.3)$$

eşitliği yardımıyla elde edilir [85].

Enerji Denklemi: Isı transferi çözümlemesinde enerji denklemini çözebilmek için aktif hale getirilmiştir. Enerji korunum denklemleri;

$$\varepsilon_g \rho_g C_{pg}\left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + u_g \nabla(T_g)\right) = -\nabla q_g - Q_{gs} - \Delta Q_{rg} + Q_r \quad \text{(gaz)} \qquad (3.4.4)$$

$$\varepsilon_s \rho_s C_{ps}\left(\frac{\partial T_s}{\partial t} + u_s \nabla(T_s)\right) = -\nabla q_{gs} + Q_{gs} - \Delta Q_{rs} - Q_r \quad \text{(katı)} \qquad (3.4.5)$$

Momentum Korunumu Denklemleri

Modelde çözülen denklemlerden biri momentum denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.\left(\overline{\overline{\tau}}\right) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (3.4.6)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada p statik basıncı, $\overline{\overline{\tau}}$ gerilme tensörünü ve $\rho\vec{g}$ ile $\vec{F}$ yerçekimine bağlı kuvvet ve dış gövde kuvvetini göstermektedir. $\vec{F}$ aynı zamanda modelden bağımsız gözenekli ortam gibi diğer koşulları ve kullanıcı tarafından belirlenen kaynakları içerir.

Eşitlik (3.4.6)'da belirtilen gerilme tensörü $\overline{\overline{\tau}}$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu\left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right] \quad (3.4.7)$$

Burada; μ moleküler viskoziteyi, I birim tensörü ve eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim hacim genişlemesinin etkisini belirtmektedir [86].

Kütlenin korunumu denklemleri:

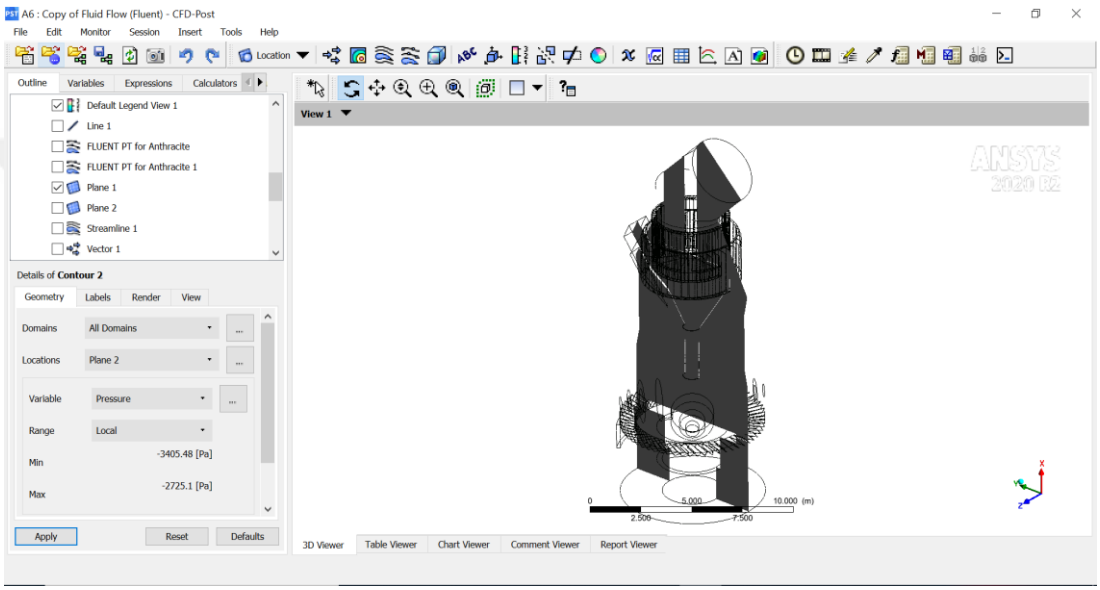
Kütlenin korunumu ya da süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) = S_m \quad (3.4.8)$$

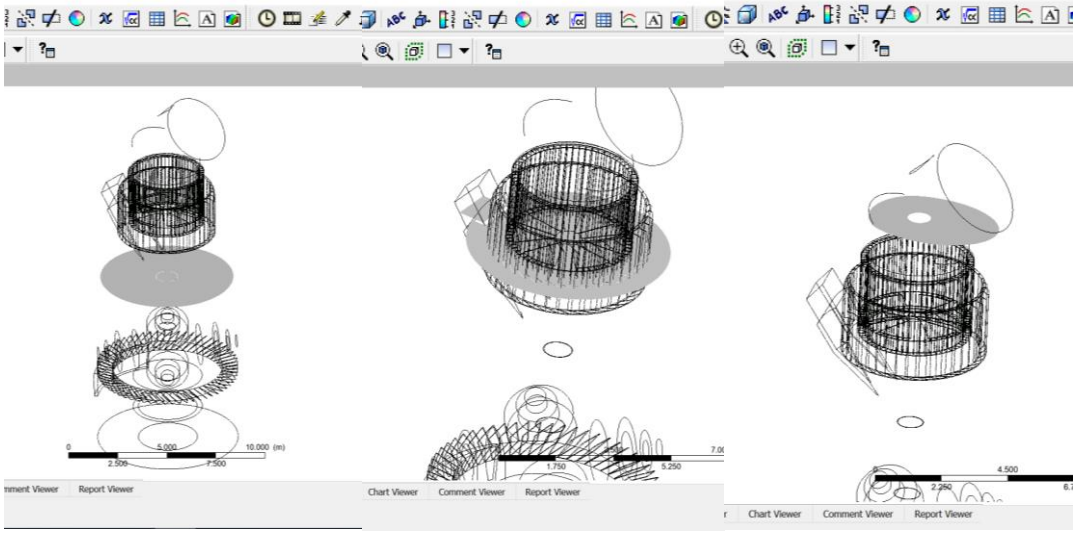
S_m sürekli olan faza, dağılan ikincil fazdan eklenen kütledir.

4. BULGULAR

Sayısal modelleme sıcaklık, hız ve basınç değerleri, değirmenin 5 farklı noktasına atanan plane (yüzeyler) üzerinden çekilmiştir. Verilerin alındığı görünüş ve yükseklikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



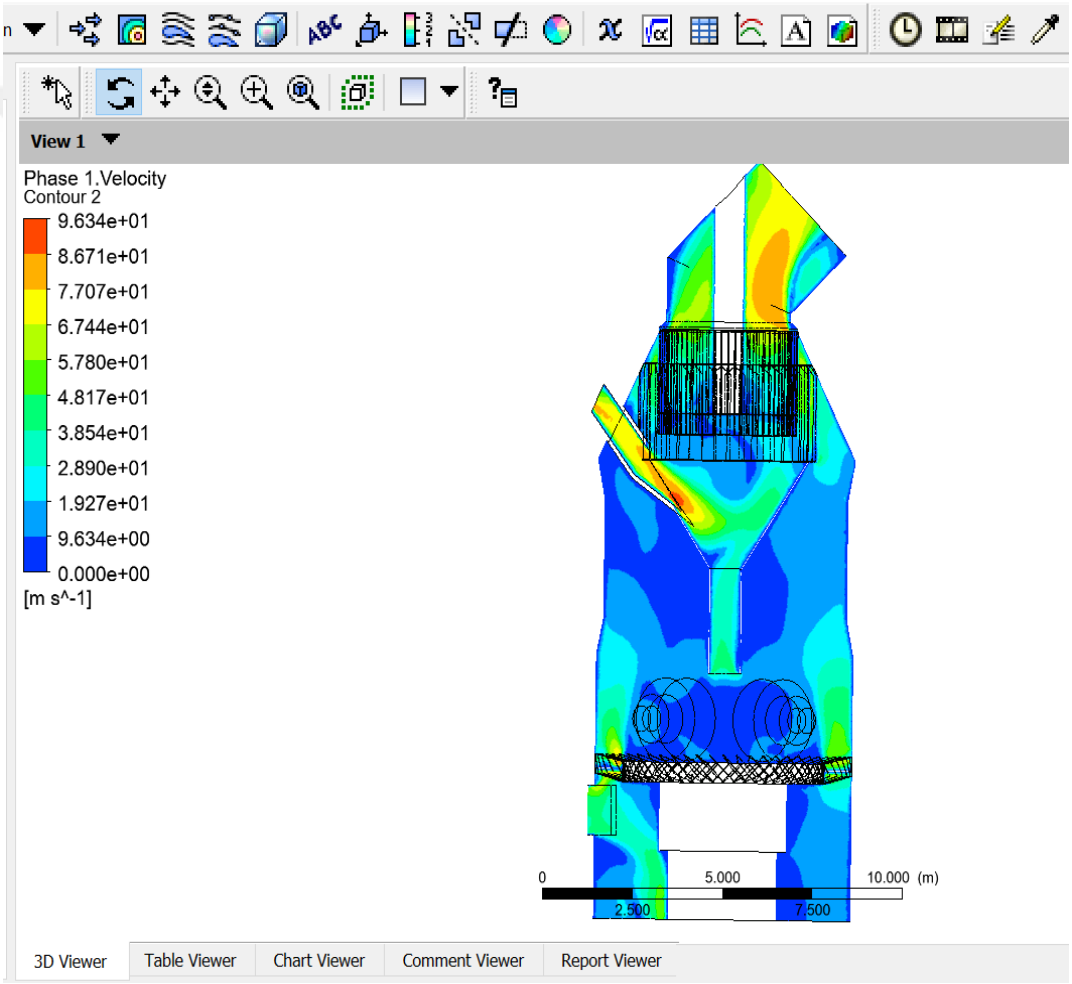
Şekil 4.1: Plane 1 gösterimi.



Şekil 4.2: Plane 2, Plane 3 ve Plane 4 görünümü.

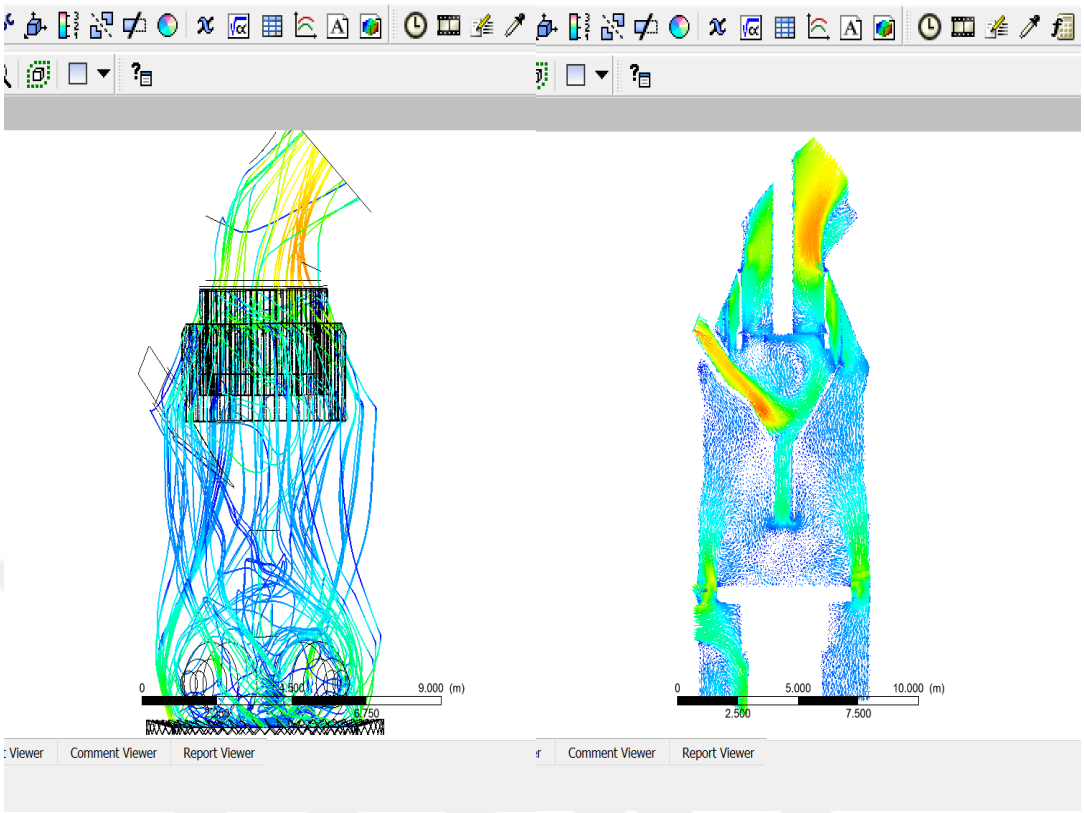
Plane 1 değirmenin boyuna kesitini gösterirken, Plane 2 : 5,95 m , Plane 3 : 9,5 m , Plane 4 : 13,5 m yüksekliklerindedir. Verilerin çekilmesi amacıyla bu yüzeylerin atanmasında bulundukları konumlar rol oynamaktadır. Plane 2 öğütme tablası ile separatör arası kısıma denk gelirken, plane 3 separatörün içini göstermesi amacıyla ortasına denk gelecek şekilde atanmıştır. Plane 4 ise separatörün hemen çıkışına verilmiştir. Son olarak malzemenin değirmenden çıkış verilerinin çekilebilmesi için değirmenin çıkışına da çıkış plane'i adıyla bir yüzey atanmıştır.

4.1 Plane 1 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları

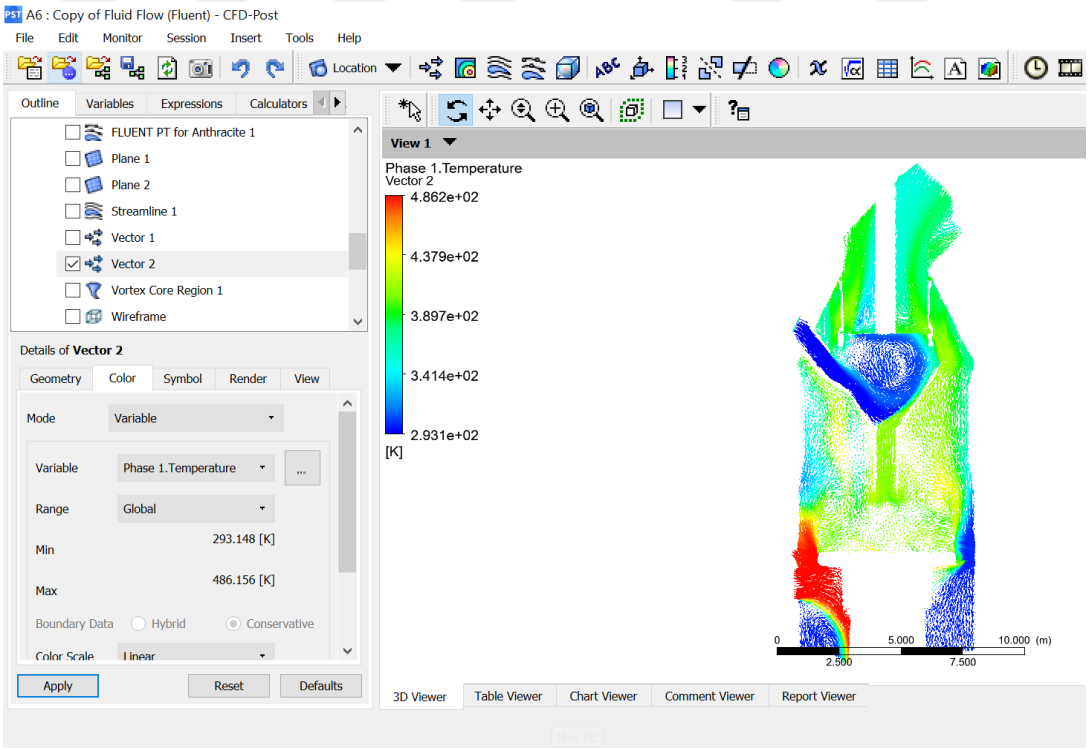


Şekil 4.3: Plane 1 üzerinde hız dağılımı.

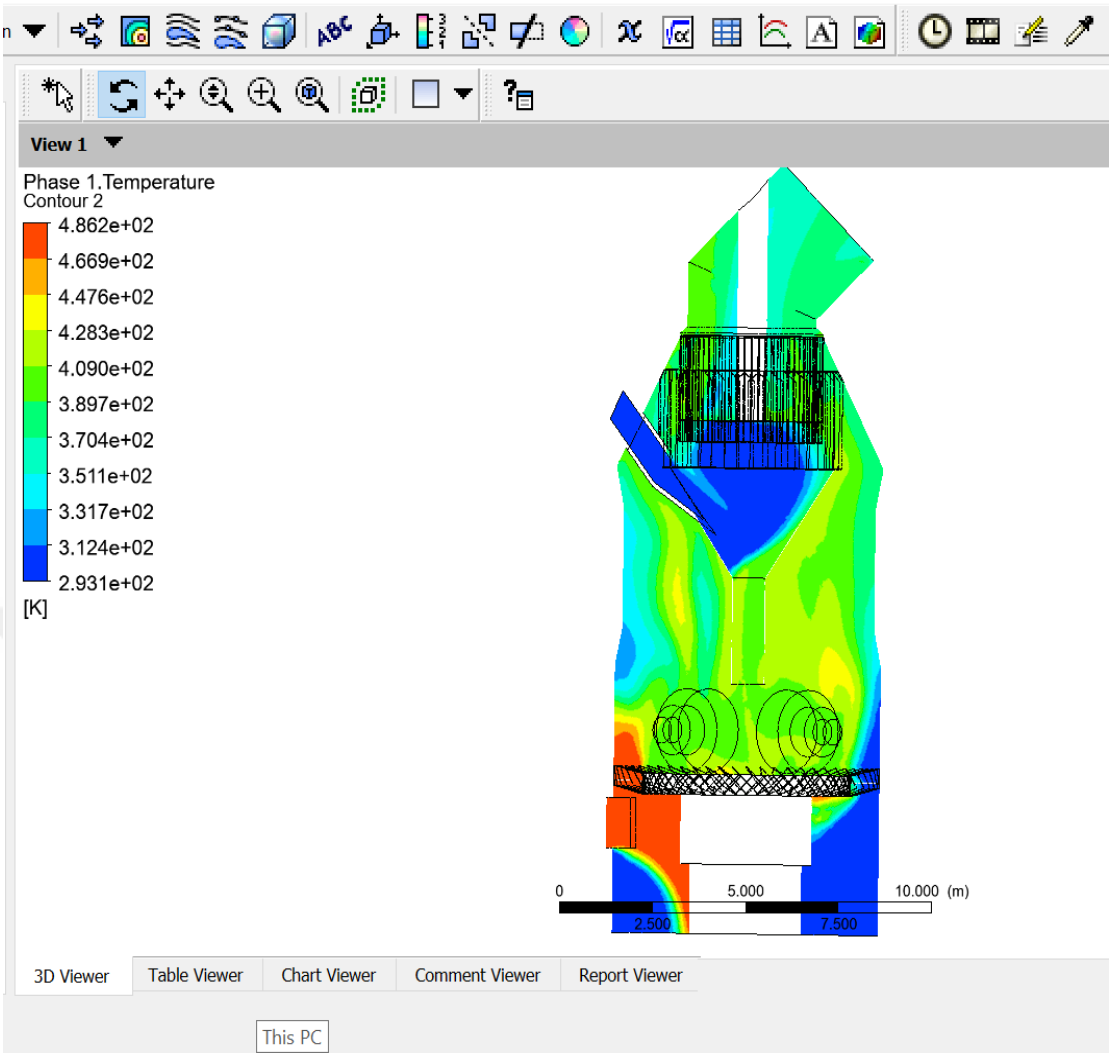
Değirmenin enine kesiti boyunca hız dağılımları kontur, vektör ve akış çizgisi şeklinde yukarda verilmiştir. Sonuçlara göre parçacık hızları 0 ile 96,34 m/s arasında değişmektedir. En yüksek hız değerleri değirmene giriş ve çıkışında görülmektedir.



Şekil 4.4: Plane 1 hız akış çizgisi ve vektör gösterimi.



Şekil 4.5: Plane 1 üzerinde sıcaklık vektörü.

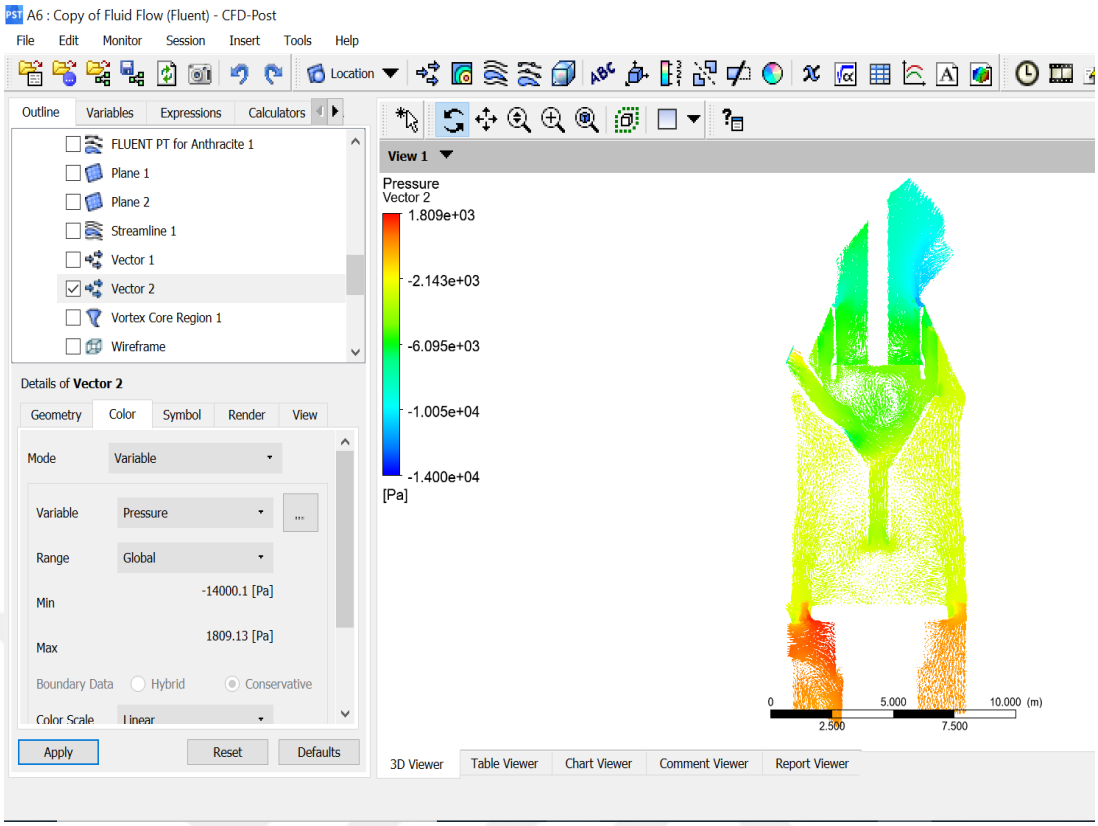


Şekil 4.6: Plane 1 sıcaklık dağılımı.

Plane 1 için değirmenin enine kesitinde sıcaklık dağılımlarının kontur ve vektör görünümleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da verilmiştir.

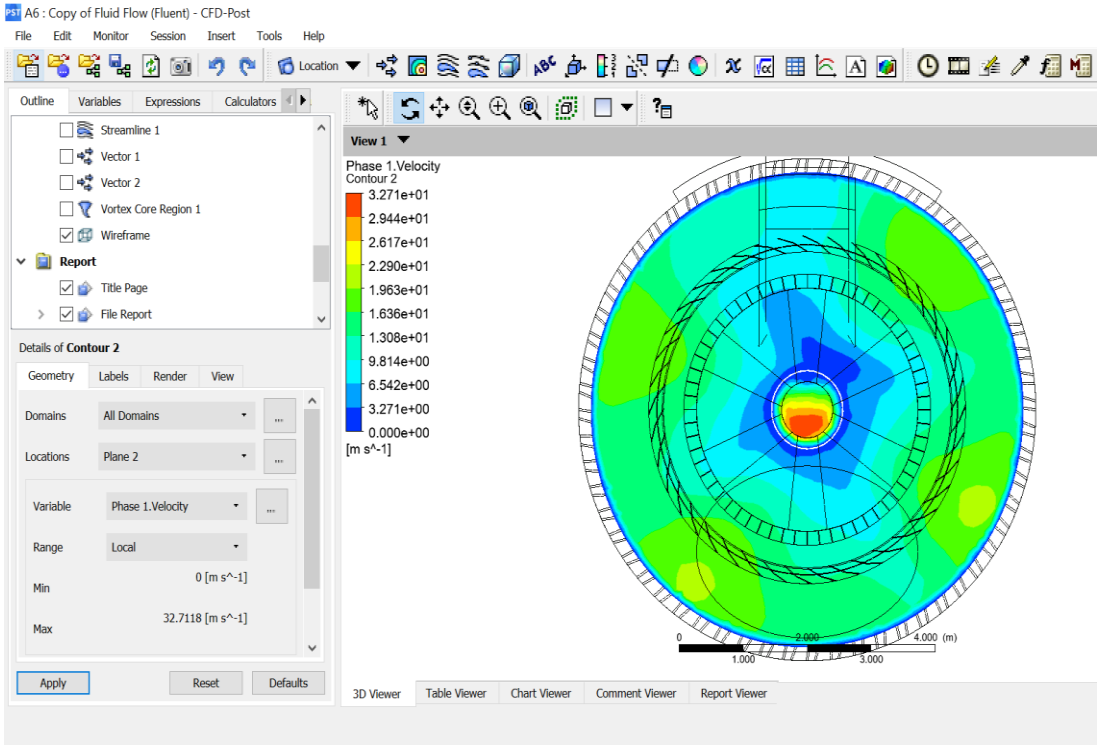
Sıcaklık değerlerinin 20°C ile 213°C arasında değiştiği şekildeki kontur dağılımlarından gözlemlenmiştir. Malzemenin değirmen giriş sıcaklığı 20°C iken alt kısımdan gelen 213°C 'deki sıcak gaz vasıtası ile sıcaklık bu iki değer arasında şekilde görüldüğü üzere dağılmıştır.

Yapılan analiz sonucunda XY kesitinde basınç değerlerinin min. -14000 Pa ve maks. 1809 Pa olduğu ve yüksek basıncın en fazla sıcak gaz giriş bölümünün çevresinde gerçekleşirken en az değerlere fan vakum kuvvetinden dolayı değirmen çıkışında ulaştığı görülmüştür.

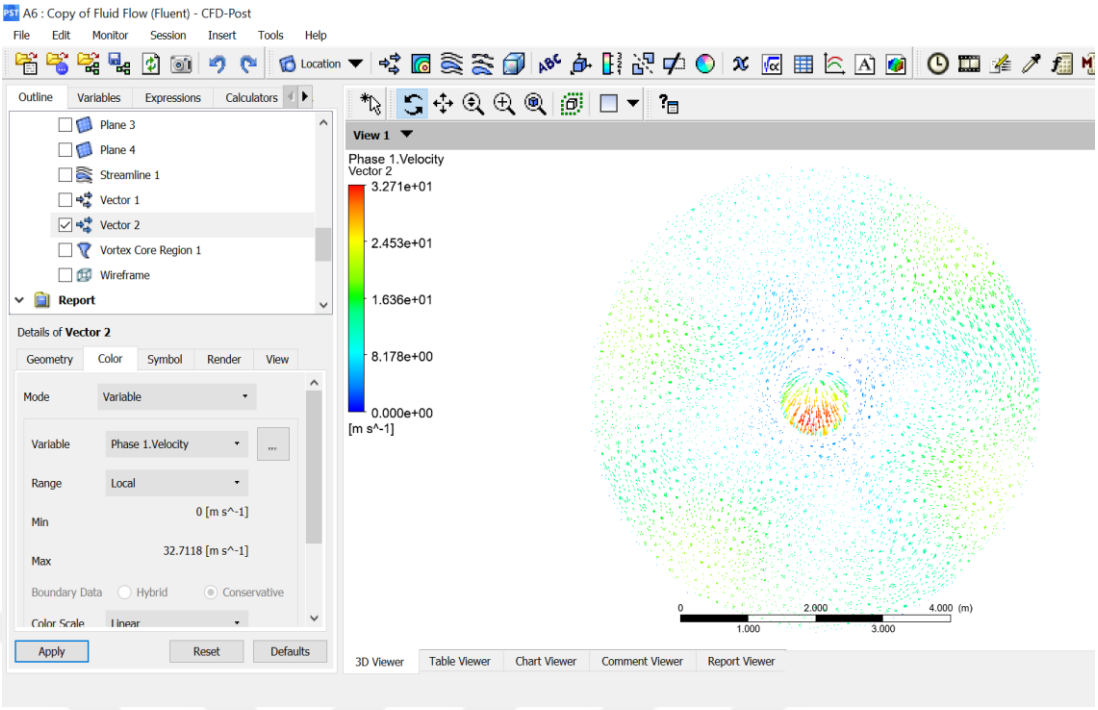


Şekil 4.7: Plane 1 üzerinde basınç dağılımı.

4.2 Plane 2 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları

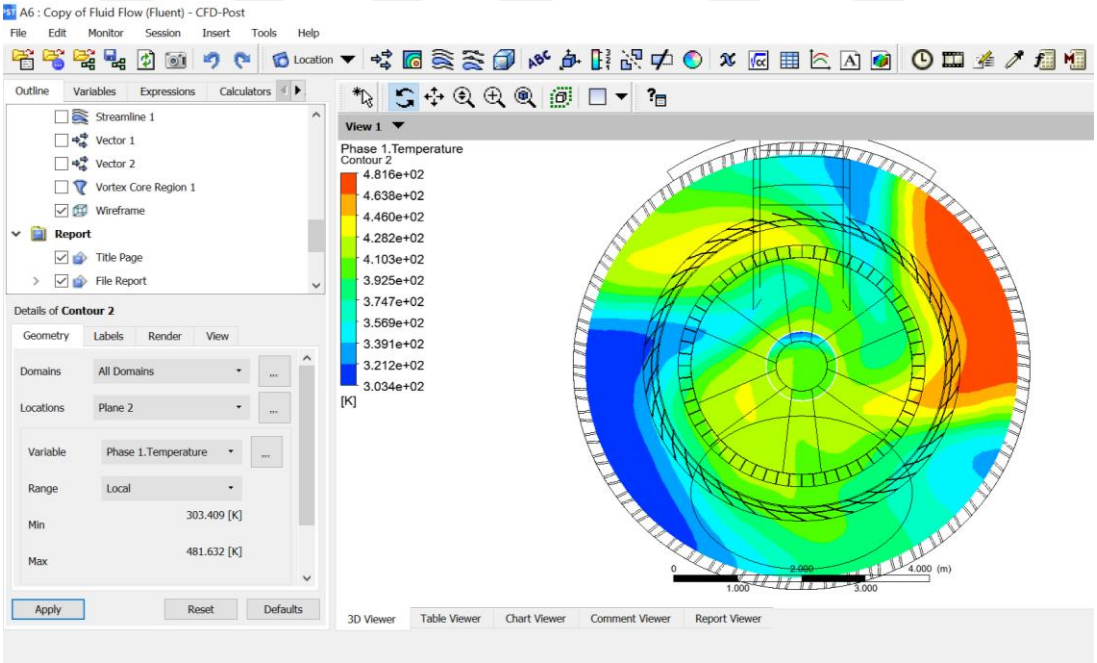


Şekil 4.8: Plane 2 hız dağılımı.



Şekil 4.9: Plane 2 hız vektörü.

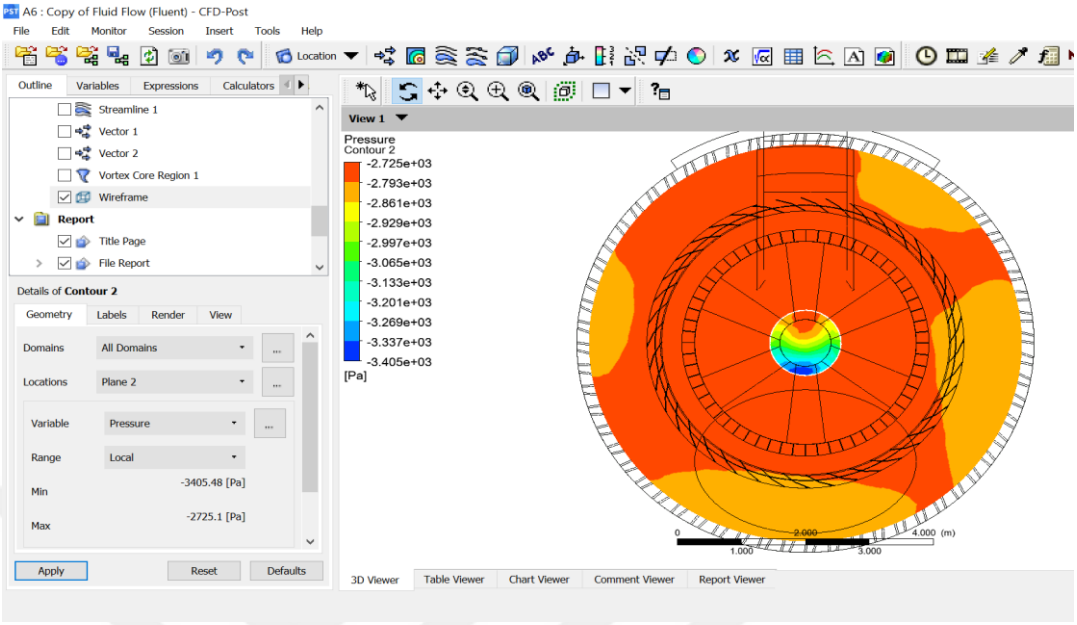
Bu düzlemde lokal olarak maksimum hız 32,7 m/s olarak bulunmuştur ve bu hız malzemenin tablaya düştüğü orta kısımda yoğunlaşmaktadır.



Şekil 4.10: Plane 2 sıcaklık dağılımı.

Plane 2 düzleminde lokal sıcaklığın 30°C ile 208°C arasında değiştiği ve sıcaklık artışının seperatörün dönüş yönüne bağlı olarak değirmene sıcak gazın girdiği

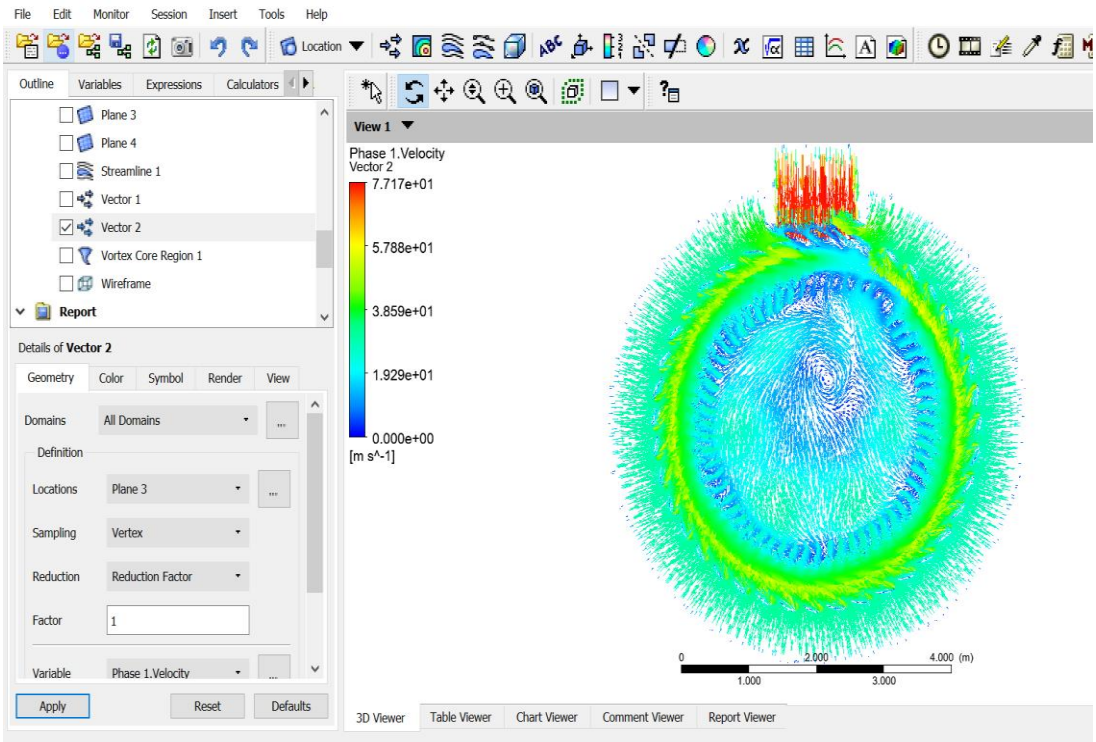
kısımda artış gösterdiği zıt yönde ise en düşük sıcaklık değerlerini verdiği şekilde görülmektedir.



Şekil 4.11: Plane 2 üzerinde basınç dağılımı.

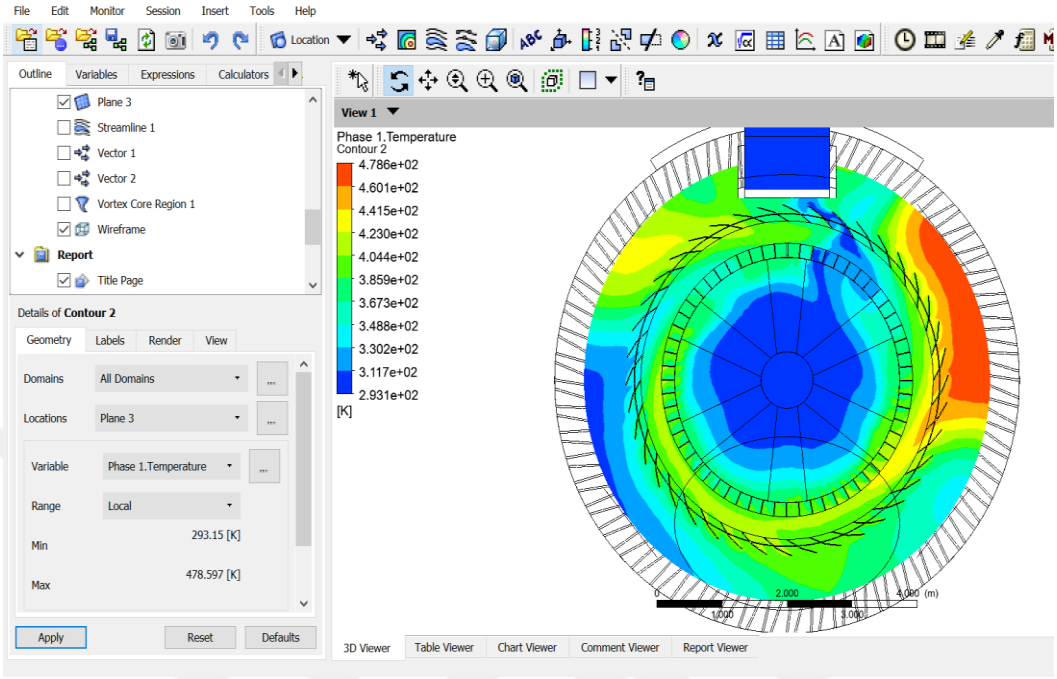
Yine bu düzlemde elde edilen basınç değerleri yukarıdaki şekilde görülmektedir.

4.3 Plane 3 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları



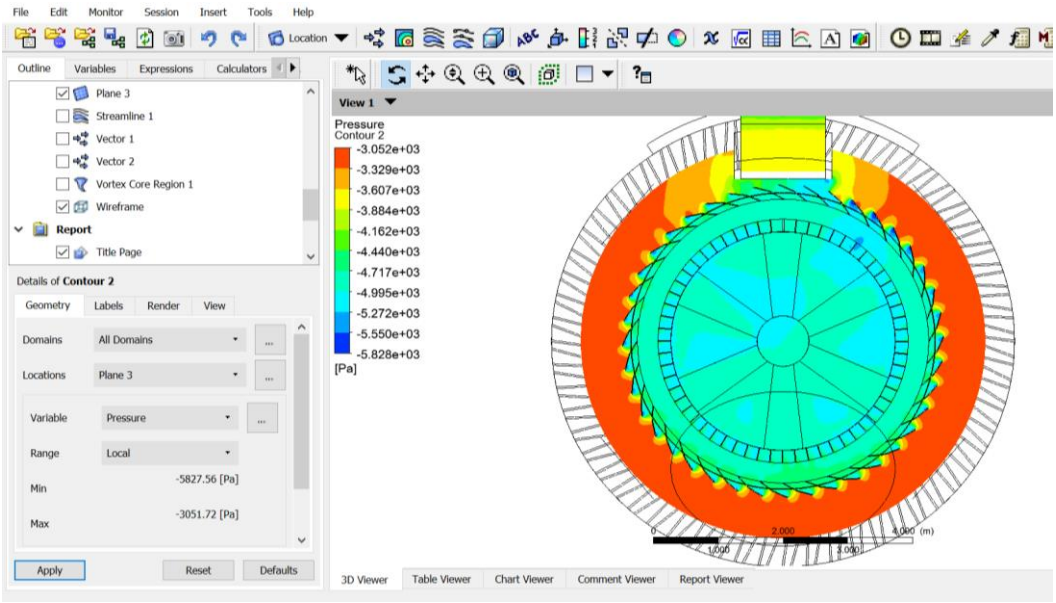
Şekil 4.12: Plane 3 hız vektörleri.

Partikül hızlarının girişte 77 m/s gibi en yüksek değerlere ulaştığı rotor kanatlarının etrafında yine nispeten daha yüksek hızlar varken seperatörden geçen partiküllerin hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13: Plane 3 sıcaklık dağılımı.

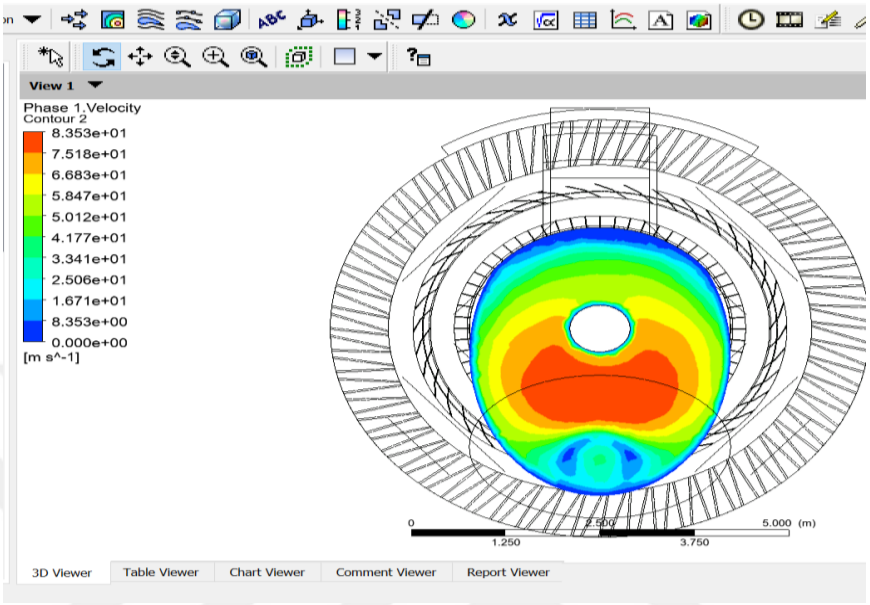
Plane 2 'ye göre bu düzlemde en yüksek sıcaklıklar aynı bölgede oluşurken farklı olarak malzeme girişi ve seperatör altındaki bölgede beklendiği üzere düşük sıcaklıklar şekilde gözlemlenmektedir.



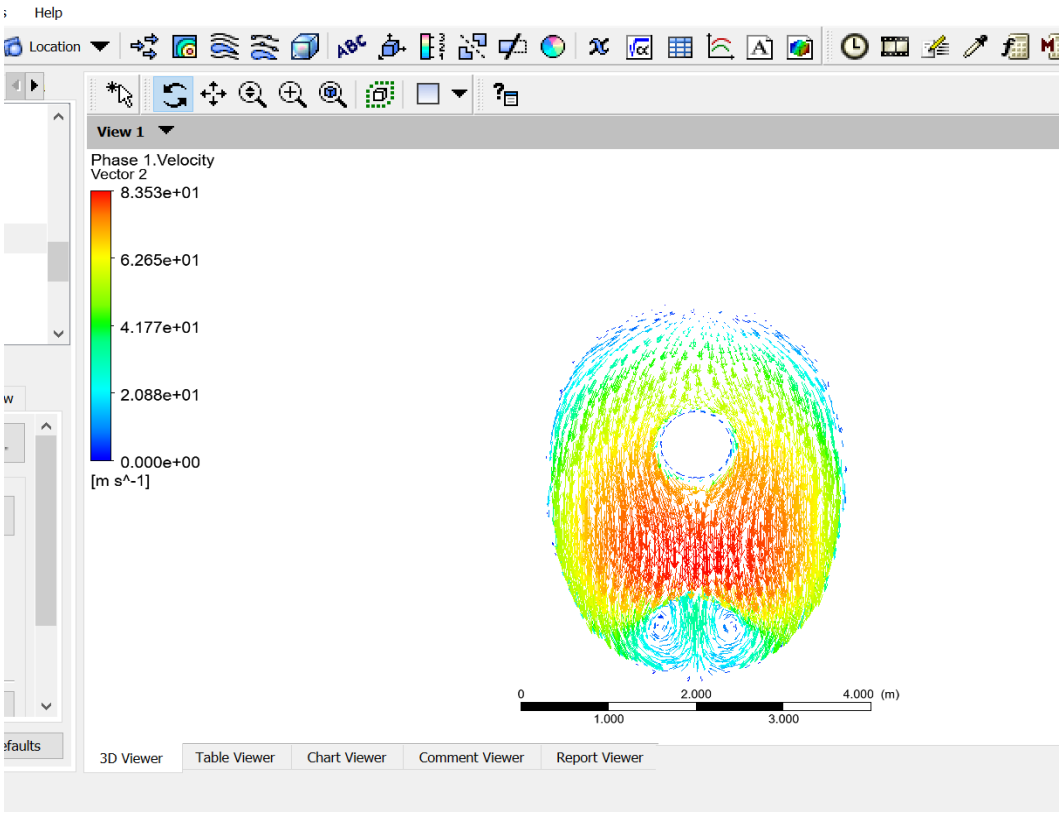
Şekil 4.14: Plane 3 basınç dağılımı.

Yine rotor kantlarının etrafında daha yüksek basınç değerlerine ulaşılırken iç kısımlarda bu daha düşük değerler olarak okunmaktadır.

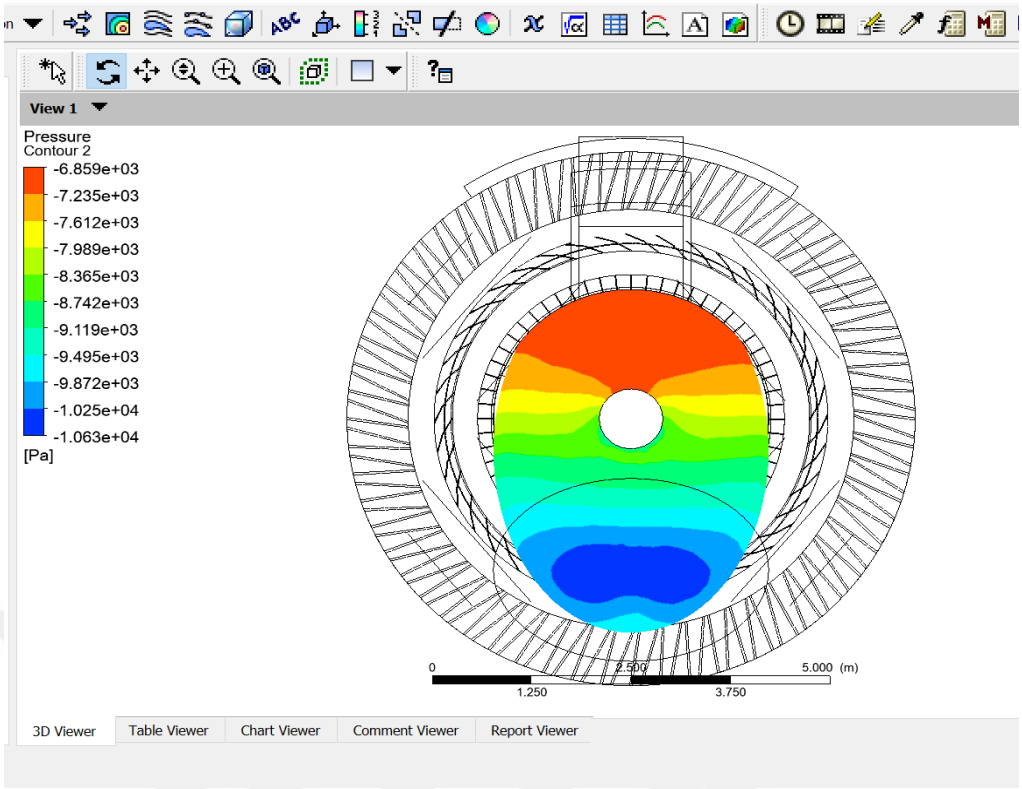
4.4 Plane 4 Üzerinde Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları



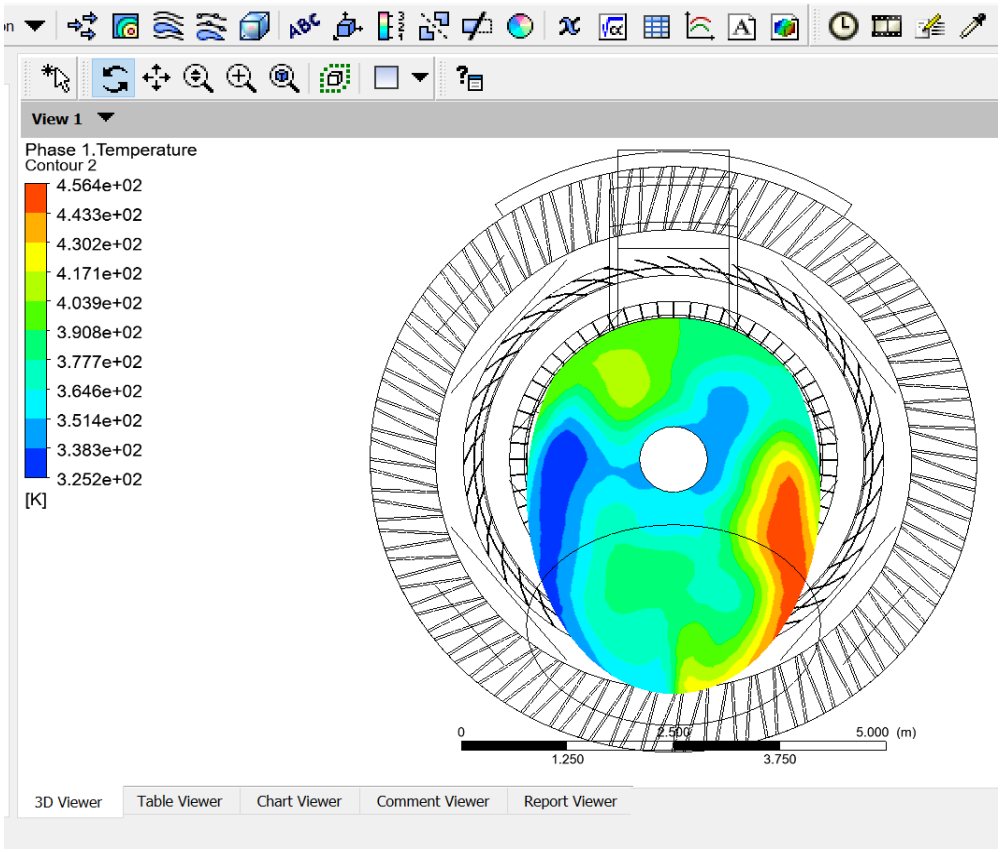
Şekil 4.15: Plane 4 hız dağılımı.



Şekil 4.16: Plane 4 hız vektör görünümü.

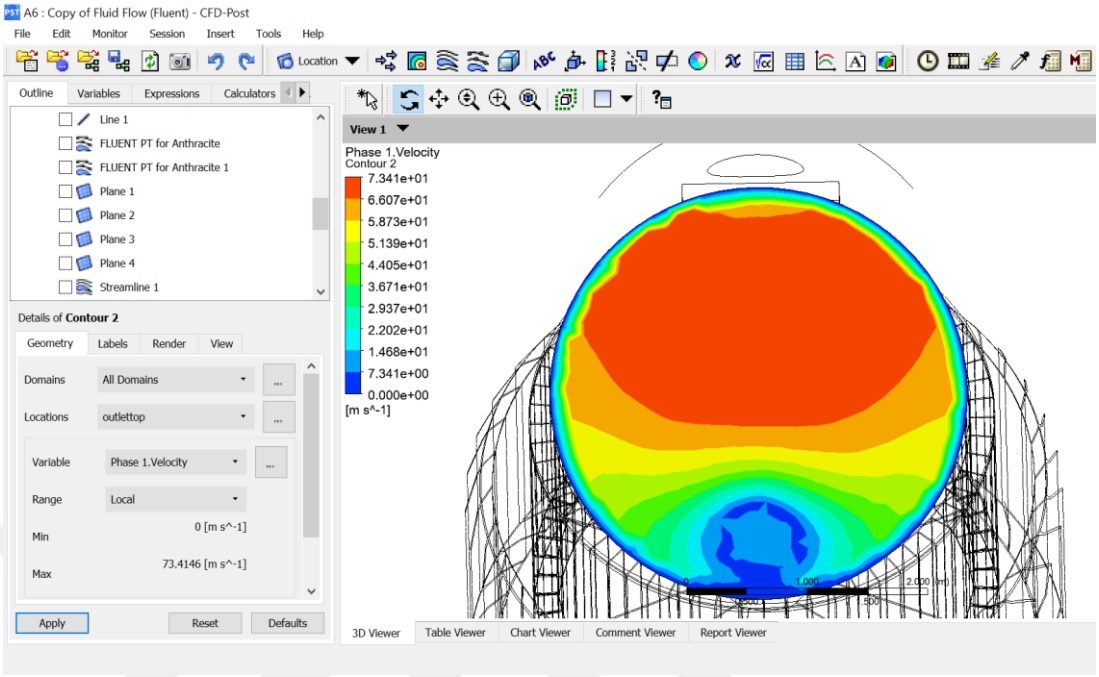


Şekil 4.17: Plane 4 üzerinde basınç dağılımı.



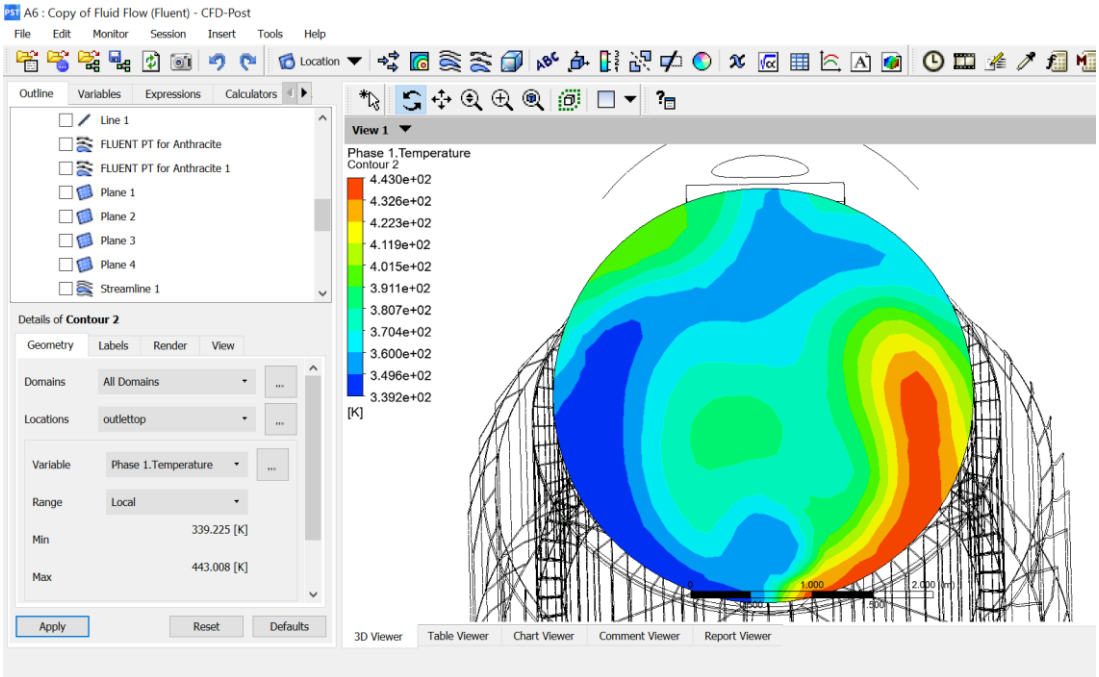
Şekil 4.18: Plane 4 üzerinde sıcaklık dağılımı.

4.5 Değirmen Çıkışı Hız, Basınç ve Sıcaklık Sonuçları



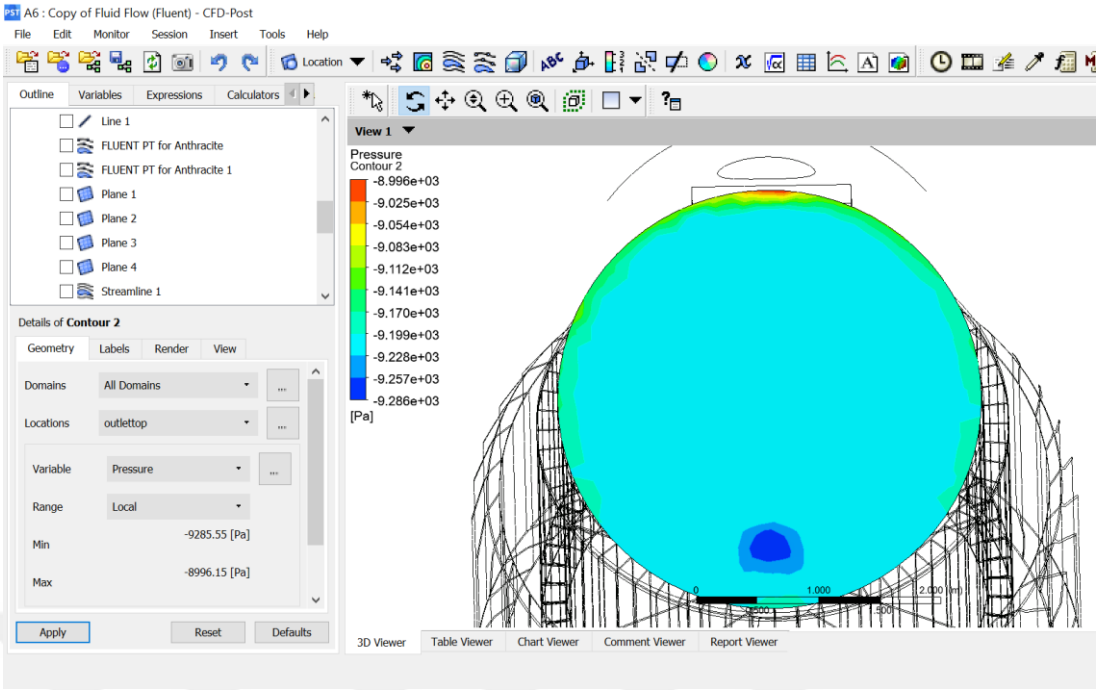
Şekil 4.19: Değirmen çıkış hız dağılımı.

Değirmen çıkışındaki hız değerleri analiz sonucunda şekilde görüldüğü gibi elde edilmiştir. Maksimum hız değirmenden çıkarken 73 m/s olarak görülmektedir.



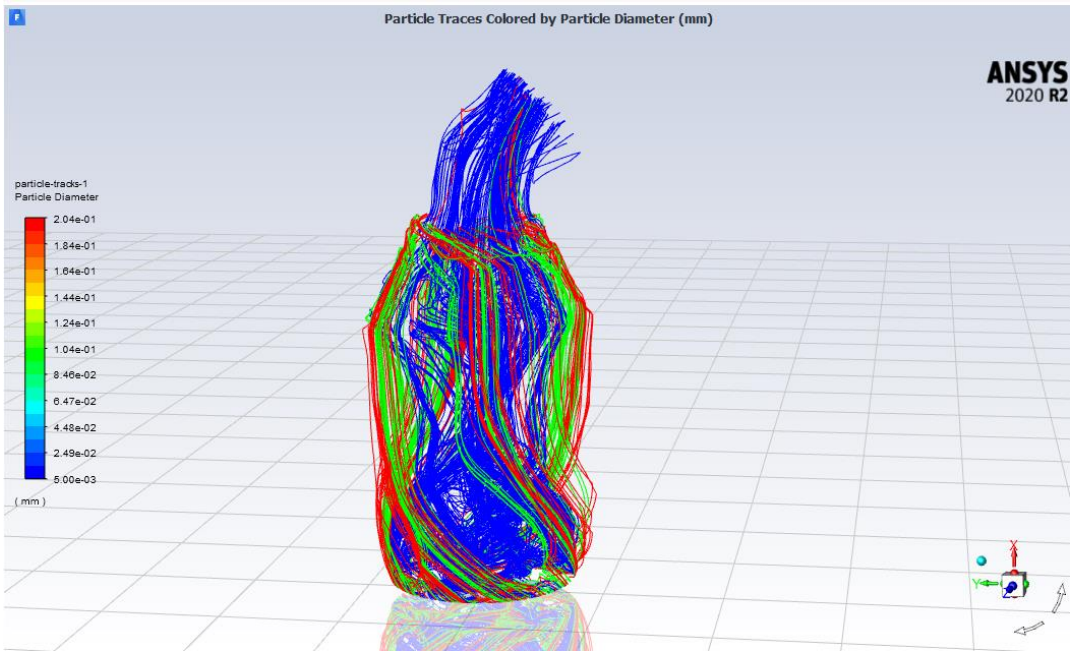
Şekil 4.20: Değirmen çıkış sıcaklık dağılımı.

Değirmen çıkışında partikül sıcaklıkları 66 °C ile 170°C değişmektedir. Malzeme değirmenden çıkarken ısınmış ve kurumuş halde ayrılmaktadır.



Şekil 4.21: Değirmen çıkış basıncı.

Beklendiği üzere vakum etkisiyle çıkış basıncı daha stabil haldedir ve -9000 ile -9285 Pa arasında seyretmektedir.



Şekil 4.22 : Tane çapına bağlı partikül takibi.

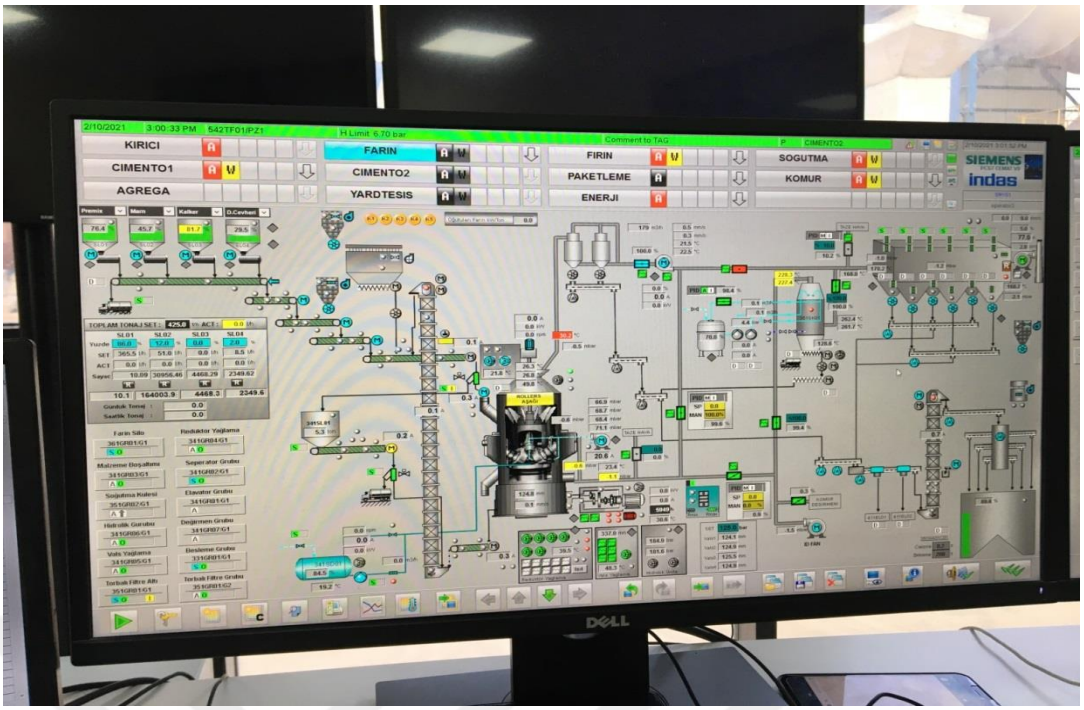
Şekilde tane büyüklüğüne bağlı olarak partikül izlenmesi verilmiştir. Analizde bu verinin separatör dönme hızı gibi diğer parametrelere bağlı olarak istenen tane büyüklüğünde değirmenden ayrılıp ayrılamadığını görmek üzere 0,005 ile 0,20

arasında tane büyükleri tanımlanmış ve şekildeki gibi ince taneciklerin geçip, kalın taneciklerinse geri döndüğü tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmanın sahadaki verilerle karşılaştırılması yapılmak üzere Bilecik ili, Vezirhan ilçesinde bulunan Dinçer Çimento üretim tesisindeki bahse konu farin dik değirmeni yerinde incelenmiş ve sistemin kumanda merkezinden gerekli veriler elde edilmiştir.



Şekil 4.22: Analizi yapılan ve sahada incelenen dik değirmen.



Şekil 4.23: Verilerin alındığı çimento üretim tesisinin ana kumandası.

Yapılan incelemeler sonucunda sahadan alınan veriler ile analiz sonucu elde edilen verilerin karşılaştırılması aşağıdaki çizelge üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Sahadan alınan veriler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

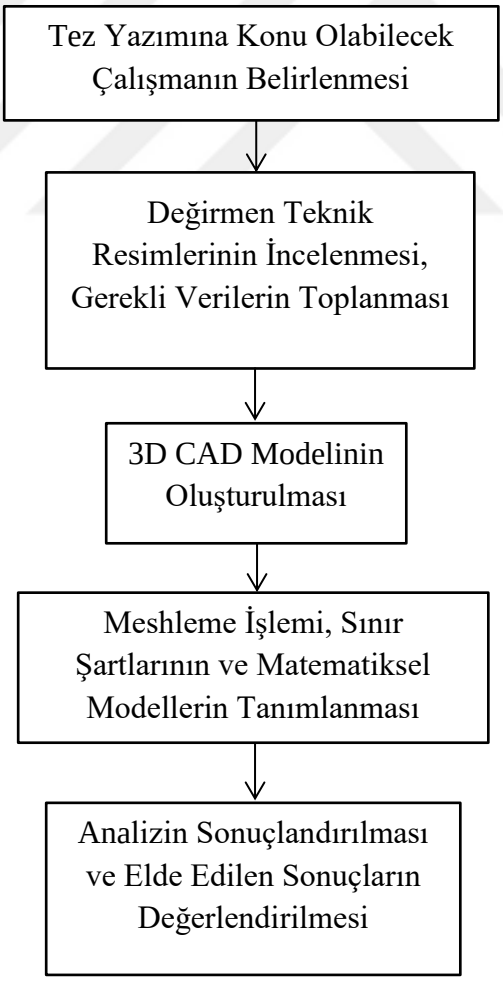
Parametre	Sahadan elde edilen veriler	Analiz sonucu elde edilen değerler
Değirmen Giriş Gaz Sıcaklığı (°C)	223	213
Değirmen Çıkış Gaz Sıcaklığı (°C)	80	97
Değirmen Giriş Basıncı (Pa)	-3550	-3700
Değirmen Çıkış Basıncı (Pa)	-9100	-9200
Malzeme Çıkış Hızı (m/s)	27	36
Separatör Hızı (rpm)	104	112
Malzeme Çıkış Tane Büyüklüğü (mm)	0,096<	0,090<

Sahadan alınan bu veriler değirmenin 24 saatlik süre zarfında ana kumanda kontrol merkezinde gösterdiği değerlerdir. Karşılaştırmanın yapılabilmesi amacıyla her bir parametre için maksimum ve minimum değerler arasında ortalama değer tespit edilmiştir. Aynı şekilde analizde elde edilen verilerde yine ortalama olacak şekilde tespit edildikten sonra değerlendirme yapılabilmiştir. Bu veriler değirmenin teorik parametrelerle uygunluğunu göstermektedir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada çimento, madencilik gibi sektörlerde yaygın kullanımı bulunan dik silindirli değirmenin CFD analizleri gerçekleştirilerek, değirmenin gerçek geometrisi ve çalışma şartlarında gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda elde edilen veriler ile sahadaki verilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapılan CFD analizleri sonucunda değirmen içindeki akış alanı incelenmiş ve akış alanı düzensizlikleri ve problemleri açısından değerlendirme yapılmıştır.

Tez çalışması sırasında gerçekleştirilen işlemler aşağıda süreç diyagramı olarak Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1: Dik değirmen CFD çalışmaları süreç diyagramı.

Analizi yapılacak değirmen belirlenmesi ve katı modelinin oluşturulması ardından bileşenlerin çözüm ağları oluşturularak analize başlanmıştır.

Bu analiz sonucunda değirmenin performansı, verimliliği, hız, basınç ve sıcaklık dağılımları, öğütülen malzemenin gereken tane boyutuna ulaşıp ulaşamadığı, seperatörün istenen boyutta malzemeye ayırıp ayıramadığı gibi pek çok konu hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Değirmenin geneli için hız dağılımına bakıldığında en yüksek hızlara malzeme girişi ve çıkışında ulaşıldığı görülmüştür. Malzemenin öğütülmesi ve seperatörde ayrılmasına kadar olan kısımda hızların nispeten düşük olduğu görülmektedir. Öğütülen malzemenin değirmenden ortalama 36 m/s hızla ayrıldığı tespit edilmiştir. Ki bu da sahadaki verilerle uyuşmaktadır.

Sıcaklık için yapılan değerlendirmedeyse, malzemenin 20°C ortam sıcaklığında değirmene girdiği ve sıcak hava girişinden 213°C gazın değirmene verildiği tasarım olarak bilinmekteydi. Bu şekilde analize işlenen sınır şartlarına göre en düşük sıcaklığın malzeme girişinde ve en yüksek sıcaklığında doğal olarak sıcak hava girişinde olduğu ve bu sayede malzemenin ortalama 97°C sıcaklıkta değirmenden ayrıldığı görülmektedir. Bu da daha sonrasında fırında pişirilecek olan farin malzemesi için istenen sıcaklık değerindedir.

Yine tasarım aşamasında belirlenmiş parametrelere göre istenen tane boyutunu elde etmek için seperatör 112 rpm hızla dönmektedir. Analiz sonucunda bu hız altında istenen tane büyüklüğünde, yani 0,09 mm altındaki malzemelerin kanatlar arasından geçerek değirmenden ayrıldığı tespit edilmiştir. Ve sahadaki durumla bu sonuç örtüşmektedir.

Sonuç olarak sayısal modelleme ile elde edilen tespitler değirmenin uygun tasarlandığını ve istenen şekilde çalıştığını göstermektedir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre değirmen verimini arttırmaya ve enerji tüketimini azaltmaya yönelik fark yaratacak öneriler getirilememiştir. Ancak bu değirmenler yurt dışından temin edilmekte ve yüksek maliyetlere mal olmaktadırlar. Bu çalışma sonucundan yola çıkarak yapılabilecek bir milli dikey valsli değirmen tasarımı çalışması ülkemizin bu alandaki dışa bağımlılığının azaltılmasına katkıda bulunacak ve bu bağlamda özgün bir değere sahip olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Rao, R. B.** (2004). *Advancement in comminution circuits: Theory and practice, Mineral Characterisation and Processing*, Indian Institute of Mineral Engineers, 93-103.

[2] **Schönert, K.** (1988). *A First Survey of Grinding with High Compression Roller Mills*, International Journal of Mineral Processing, 22(1), 401-412.

[3] **Url-1.** <https://www.cementequipment.org/home/raw-materials-processing/select-favorite-type-7-different-types-vertical-mill/>, erişim tarihi 22.02.2021

[4] **Url-2.** <https://hkz.deenarielo.pw/roller-mill-an-understanding-of-components.html>, erişim tarihi 15.03.2021

[5] **Lian D., Xiaoli L., Kang W., & Yang L.** (2015). *Research on slag grinding process control,* 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), 64.

[6] **Kersting, F. C.** (1994). *Mathematical model of a roller mill for fuel grinding drying in coal fired power stations*, Aufbereitungs Technik, 10, 563-571.

[7] **Musto, R. L., & Dunn, M. R.** (1986). *Effect of table speed and geometry on roller mill performance*, Zement Kalk Gips Transactions, 12, 709-711.

[8] **Wang, J., Chen, Q., Kuang, Y., Lynch, A. J., & Zhuo, J.** (2009). *Grinding process within vertical roller mills: Experiment and simulation*, Mining Science and Technology, 19, 97-101.

[9] **Url-3.** <https://www.cementkilns.co.uk/grinding.html#roller>, erişim tarihi 05.10.2020

[10] **Lynch, A. J., & Rowland, C.A.** (2005). *The History of Grinding, Society for Mining*, Metallurgy, and Exploration Inc., (Vol. 6, pp. 77-104).

[11] **Url-4.** <https://en.wikipedia.org/wiki/Roller_mill>, erişim tarihi 08.03.2021

[12] **Yafa, S.** (2015). *Grain of Truth: Why Eating Wheat Can Improve Your Health*, (Vol. 1, pp. 132-150).

[13] **United States. Patent Office,** (1903). *Annual Report of the Commissioner of Patents*.

[14] **Url-5.** <http://resources.amdigital.co.uk/gc/time/access.php>, erişim tarihi 18.03.2021

[15] **Berend, I.** (2012). *An Economic History of Nineteenth-Century Europe: Diversity and Industrialization* (Vol.1, pp.253-255).

[16] **Wrigley, C., Tömösközi, S., & Békés, F.** (2011). *Hungarian-Australian collaborations in flour milling and test milling over 120 years.* Cereal Research Communications, 39(2), 215–220.

[17] **Url-6.** <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ganz-Mechwart_hengersz%C3%A9k.jpg>, erişim tarihi 19.03.2021

[18] **Url-7.** <https://catalogue.millsarchive.org/westminster-bridge-mill>, erişim tarihi 21.03.2021

[19] **Black, J. T., Kohser, R. A.** (2000). *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*, McMillan Publishing, (Vol.1, pp. 307)

[20] **Url-8.** <http://www.texva.com/holland/The%20Duutcch%20Winndmiiill.htm>, erişim tarihi 10.04.2021

[21] **Brenda J. B.** (2006). *Gunpowder, Explosives and the State* A Technological History, 133

[22] **Url-9.** <https://www.locandailfagiano.it/>, erişim tarihi 08.11.2020

[23] **Url-10.** <https://tr.pinterest.com/pin/456552480978424705258 5/>, erişim tarihi 15.03.2021

[24] **Redgrave, G.R.** (1895). *Calcareous Cements: Their Nature, Manufacture & Uses with Some Observations Upon Cement Testing* (Vol. 2, pp. 110-132).

[25] **Sabin, L.C.** (2017). Cement And Concrete, *Preparation And Mixing Of The Raw Materials, Nabu Press* (Vol. 1, pp. 15-40).

[26] **Meissner, P., Böhm, A., & Plochberger, T.** (2013). *Auslegung einer Labor-Walzentellermühle.* BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte, 158(6), 233–24. (Vol.1, pp. 234)

[27] **Url-11.** <https://www.cementkilns.co.uk/cement_kiln_norman.html>, erişim tarihi 28.03.2021

[28] **Url-12.** <https://www.gravelmill.com/solutions/the-history-of-raymond-mill.html/>, erişim tarihi 11.11.2020

[29] **Ladoo R. B.** Talc and Soapstone: Their Mining, Milling, Products and Uses, *United States. Government Printing Office* (Vol. 1, pp. 46).

[30] **Url-13.** <https://www.hdmilling.com/introduction-of-main-mill-for-raymond-mill-hd1620.html>, erişim tarihi 16.03.2021

[31] **Ladoo, R. B.** (1923). Talc and Soapstone: Their Mining, Milling, Products and Uses, *United States. Government Printing Office* (Vol. 1, pp. 47).

[32] **Duda, W.H.** (1985). Cement Data Book, *International Process Engineering in the Cement lndustry 3rd edition* (Vol. 3, pp.232-233).

[33] **Url-14.** <https://picclick.com/Collectibles/Advertising/Merchandise-Memorabilia/Advertising-Print/1910-19/?page=24>, erişim tarihi 18.02.2021

[34] **World Cement**, The Cement Industry's No.1 Technical Journal, February 1999.

[35] **Url-15.** <https://www.cementequipment.org/wp-content/uploads/2018/03/img_5a9bc1e7009c7.png>, erişim tarihi 20.03.2021

[36] **Url-16.** <https://www.911metallurgist.com/blog/grinding-mill-power>, erişim tarihi 26.04.2021

[37] **Deololkar, S.P.** (2008). Handbook for Designing Cement Plants, CRC Press (Vol. 1, pp. 164-165).

[38] **Loucks B.** (2012). *Demolition Debris & Waste Source Volume Calculations*, Engineering Calculations. (Vol.1, pp. 8-11)

[39] **Url-17.** <https://www.wikiwand.com/en/Rawmill>, erişim tarihi 20.03.2021

[40] **Office for Publication and Advertisements**, (1928). The Engineer, Office for Publication and Advertisements (Vol. 145, pp. 94).

[41] **Url-18.** <https://www.cementkilns.co.uk/cement_kiln_dunstable.html>, erişim tarihi 18.03.2021

[42] **Url-19.** <https://www.cementequipment.org/home/air-separators-2/#Channel-wheel_separator_with_external_blower_Krupp_Polysius_AG>, erişim tarihi 07.03.2021

[43] **Beaufort, A. F.** (1904). Journal of the Society of Arts, Journal of the Society of Arts (Vol. 52, pp. 754).

[44] **Url-20.** <https://tr.pinterest.com/pin/456552480978424752/?d=t&mt=signupOrPersonalizedLogin>, erişim tarihi 28.02.2021

[45] **Url-21.** <https://www.thecementgrindingoffice.com/separators/sep3genb/sep3genb.htm>, erişim tarihi 19.03.2021

[46] **Url-22.** <https://www.slideshare.net/LoescheLA/pioneers-of-the-past-masters-of-the-future>, erişim tarihi 20.03.2021

[47] **Sekine, K., Sutoh, K., Ichikawa, M., Hashimoto, I., Sawamura, S., & Ueda, H.** (1991). *Increasing the throughput of grinding plants by using the CKP system*, ZKG International (Vol. 44, pp. 337-341).

[48] **Miranda, R. F., Minas, I., Yamana, W. T., Pirapora, S., Cimentos, V., & Tete, P.** (1998). *Brazilian progress in grinding*, World Cement (Vol. 29, pp. 40-42)

[49] **Schaefer, H.U.** (2001). *Loesche mills for grinding of clinker and slag for the production of cement with interground additives*, ZKG International (Vol. 54(1), pp. 20-30).

[50] **Reichard, E. Y., Heyd, P., & Lukas, K. P.** (2007). *MPS vertical roller mills for slag and slag cements*, Global Cement Magazine (Vol. 60, pp. 22-24).

[51] **Jung, O., & Kraft, B.** (2005). *High efficiency classifiers for MPS vertical roller mills*, ZKG International (Vol. 58(6), pp. 55-60).

[52] **Pfeiffer, G.** (2016)**.** *Competence in Cement, Gebr. Pfeiffer* (Vol. 1, pp. 20-21).

[53] **Woywadt, C.** (2012). *Operating experience with the Pfeiffer MVR vertical roller mill and the Multidrive*, ZKG International (Vol. 12, pp. 1-8).

[54] **Reichardt, Y.** (2010). T*he new Pfeiffer roller mill MVR: reliable grinding technology for high throughput rates*, ZKG International (Vol. 11, pp. 40-45).

[55] **Url-23.** <https://www.mining-technology.com/contractors/crushers/loesche/>, erişim tarihi 02.04.2021

[56] **Url-24.** <https://www.gebr-pfeiffer.com/en/products/mps-vertical-roller-mill/>, erişim tarihi 27.03.2021

[57] **Aydogan, N. A. & Benzer, H.** (2011). Comparison of the overall circuit performance in the cement industry: High compression milling vs. ball milling technology, Miner. Eng., (Vol. 24, pp. 211-215)

[58] **Schaefer, H. U.** (2001). *Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals*, Miner. Eng. (Vol. 14(10), pp. 1155–1160).

[59] **Fujita, K. & Saito, T.** (2006). *Unstable vibration of roller mills,* J. Sound Vib. (Vol. 297, pp. 329–350).

[60] **Junga, R., Mateuszuk, S. & Pospolita, J.** (2009). *Investigations into the movement of milled medium in the bowl of a ring-roller mill,* Powder Technol, (Vol.191, pp.61–71).

[61] **Jensen, L. R. D., Friis, H., Fundal, E., Moller, P., Brockhoff, P. B. & Jespersen, M.** (2010). *Influence of quartz particles on wear in vertical roller mills*, Miner. Eng. (Vol. 23, pp. 390–398).

[62] **Zhang, R.** (2004). *Gas-Solid Two –phase Flow Study on Coarse Coal Three-dimensional Separator*, Jilin: School of Mechanical Engineering of Jilin University.

[63] **Shin, M.S., Kim, H.S., & Jang, D.S.** (2005). *A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments*, Applied Thermal Engineering, (Vol. 25, pp. 1821–1835).

[64] **Url-25.** <http://cninnovativeindustry.com/nt-lm-series-vertical-mill/>, erişim tarihi 18.03.2021

[65] **Bhambare, K. S., Ma, Z., & Lu, P.** (2010). *CFD modeling of MPS coal mill with moisture evaporation,* Fuel Process. Technol. (Vol.91, pp.566–571).

[66] **Werner, V., Zelkowski, J., & Schönert, K.** (1999). *Lab-scale roller table mill for investigating the grinding behaviour of coal*, Powder Technol. (Vol. 105, pp. 30–38).

[67] **Meissner, P., Böhm, A., & Plochberger, T.** (2013). An energy based comparison of vertical roller mills and tumbling mills, *13th Eur. Conf. On Comminution and Classification*, Braunschweig. (pp. 55-58)

[68] **Url-26.** <https://www.turnellcorp.com/Publications/WorldCement2012-CFD-Duct%20Optimization.pdf>, erişim tarihi 21.03.2021

[69] **Bhasker, C.** (2011). *Simulation of Three Dimensional Flows in Industrial Components using CFD Techniques, Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications* (Vol. 1, pp. 219-254).

[70] **Thomson, J.F., Warsi, Z.U.A., & Mastin, C.W.** (1985). *Numerical Grid Generation – Foundations and Applications*, Elsevier Science Pub. Co. (Vol. 1, pp. 200-205)

[71] **Bhasker, C.** (2010). *CFD applications for Industrial Flow Simualtions, SONIC-10 Conference, International Institute of information Technology*, 20-30.

[72] **Url-27.** <https://www.facebook.com/ansystutor7/photos/pcb.208033721559769 6/2080336365597781/?type=3&theater>, erişim tarihi 25.03.2021

[73] **Sun, Y., Ze, X., Yang, X., Zhang, C., & Zhou, Y.** (2009). *Analysis of Flow Field in Vertical Roller Mill Chamber Based on Turbulent Models,* 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 637-640.

[74] **Haijan, D. Xingteng, C., & Wenhai, N.** (2011). *Numerical Study of the Flow Field in a Vertical Roller Mill, Applied Mechanics and Materials* (Vol. 52, pp. 659-663).

[75] **Bhasker, C.** (2001). *Numerical Simulation of Turbulent Flow in Complex Geometries Used in Power Plants*, Advances in Engineering Software (Vol. 33(2), pp. 71-83).

[76] **Kayakol, N.** (2009). *CFD Analysis: Bowling for Pulverized Coal*, Power Eng. Int. (Vol. 17, pp. 5-17).

[77] **Parham, J., & Easson, W.** (2003). *Flow Visualisation and Velocity Measurements in a Vertical Spindle Coal Mill Static Classifier*, Fuel (Vol. 82(15-17), pp. 2115–2123).

[78] **Bhambare, K., Ma, Z., & Lu, P.** (2010). *CFD Modeling of MPS Coal Mill with Moisture Evaporation*, Fuel Processing Technology (Vol. 91(5), pp.566–571).

[79] **Guizani, R., & Mhiri, H.** (2014). *CFD Study of the Effect of Rotation Speed on Dynamic Air Separator Flow characteristics And Pressure Drop*, The fifth International Renewable Energy Congress IREC, 17-21.

[80] **Kozic, M., Ristic, S., Puharic, M., & Linic, S.** (2014). *CFD Analysis of the Influence of Centrifugal Separator Geometry Modification on the Pulverized Coal Distribution at the Burners,* Transactions of FAMENA (Vol. 38(1), pp.25-36).

[81] **Why, E., Alnaimi, F., Hasini, H., & Nasif, M.S.** (2018). *Computational Study of Coal Particle Distribution in Coal Pulverizer: Effect of Air Flow Rate and Coal Particle Flow Rate*, MATEC Web of Conferences 225(1):02003

[82] **Demir, H. K.** (2015), *İşlem Değişkenlerinin Dik Değirmen Performansı Üzerine Etkisinin Araştırılması,* Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

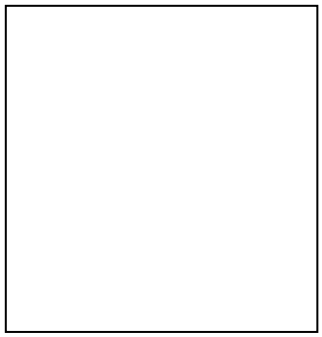
[83] **Altun, D.** (2017), *Dik Valsli Değirmenlerin Matematiksel Modellemesi,* Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi.

[84] **Url-28.** <https://forum.ansys.com/discussion/12577/what-is-the-source-of-mesh-quality-spectrum>, erişim tarihi 12.03.2021

[85] **Perrone, D., Castiglione, T., Klimanek. A., Morrone, P., & Amelio, M.** (2018), *Numerical simulation on Oxy-Mild combustion of pulverized coal in an indusrial boiler*, Fuel Processing Technology (Vol. 181, pp. 361-374).

[86] **Url 29.** <https://mfix.netl.doe.gov/documentation/MFIXEquations2012-1.pdf.>, erişim tarihi 04.03.2021

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Hüseyin GEZER
Doğum Tarihi ve Yeri **:**
E-posta **:**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2017, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** **:** 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Bilim Makina San. Tic. AŞ. – Proses Mühendisi