



**YÜKSEK SICAKLIKLARDA ÇALIŞAN DEMİR ÇELİK
ELEKTRİK ARK OCAĞI DÖKÜM DELİĞİNİN (EBT)
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Erdem ERDOĞAN

Nisan-2024

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**YÜKSEK SICAKLIKLARDA ÇALIŞAN DEMİR ÇELİK
ELEKTRİK ARK OCAĞI DÖKÜM DELİĞİNİN (EBT)
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE
MODELLENMESİ**

Danışman :
Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ

Hazırlayan :
Erdem ERDOĞAN

Kütahya-2024

Kabul ve Onay

KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Ana bilim dalında, 202385371010 öğrenci numaralı, Erdem ERDOĞAN'ın hazırlamış olduğu “YÜKSEK SICAKLIKLARDA ÇALIŞAN DEMİR ÇELİK ELEKTRİK ARK OCAĞI DÖKÜM DELİĞİNİN (EBT) HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLENMESİ” başlıklı yüksek lisans tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

18/04/2024

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Dr. Öğretim Üyesi Feridun KARAKOÇ (Danışman)		
Doç. Dr. Bahadır DOĞAN		
Dr. Öğretim Üyesi Halit ARAT		

Doç. Dr. Eray ACAR

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Yüksek Sıcaklıklarda Çalışan Demir Çelik Elektrik Ark Ocağı Döküm Deliğinin (EBT) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Modellenmesi*” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

18/04/2024

Erdem ERDOĞAN

Özgeçmiş

Erdem ERDOĞAN, İlk, orta ve lise öğrenimini KÜTAHYA ilinde tamamladıktan sonra Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun oldu. Mezuniyet sonrası 2014-2015 yılları arasında AMS Akyol Makine Sanayi’de Yatırım Mühendisi, 2016-Halen yılları arasında KÜMAŞ Manyezit Sanayi A.Ş.’de Tasarım Mühendisi olarak iş hayatına devam etmektedir. 2021 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Evlidir.



ÖZET

YÜKSEK SICAKLIKLARDA SIVI METAL DÖKÜM İŞLEMİ GERÇEKLEŞTİREN DEMİR ÇELİK ELEKTRİK ARK OCAĞI DÖKÜM DELİĞİNİN (EBT) HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLENMESİ

Erdem ERDOĞAN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ

Nisan, 2024, 70 Sayfa

Demir çelik ve demir dışı metal üretim sektörlerinin yaygın olduğu ülkelerde, yüksek sıcaklıklarda çalışan endüstriyel fırınların refrakter tasarımları verimlilik açısından önem arz etmektedir. Refrakter malzemeler bu sektörlerde önemli bir gider olarak karşımıza çıkmaktadır.

Refrakter malzemelerde iyi bir refrakterliği etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan bir tanesi de tasarım aşamalarıdır. Refrakter tasarım aşamaları endüstriyel fırınların tipine, kapasitesine ve sektörüne göre değişiklik göstermektedir. Çalışmam da demir-çelik Elektrik Ark Ocağı (EAO) döküm deliği (EBT) incelenmiştir. İşletme şartlarında; ocak içerisindeki ergimiş metalin düzenli ve hızlı bir şekilde dökümünün gerçekleşmesi istenilmektedir. Döküm deliğinde yapılan iyileştirmelerle; türbülanslı akış daha düzenli bir akışa dönüşmekte olup döküm deliği refrakter aşınmasını minimuma indirmektedir. Daha düzenli bir akış paralelinde akış hızını artırmaktadır. Böylece refraktere daha az süreyle sıvı metal teması ve yükü etki etmekte olup fırın döküm sayısını artırmaktadır.

Tez çalışmam da yüksek sıcaklıklarda çalışan endüstriyel bir elektrik ark ocağı (EAO) Eccentric Bottom Tap-Hole (EBT) blok tuğlasının iki farklı tasarımı için ANSYS Fluent ortamında akış analizi yapılmıştır. Öncelikle sektörde yaygın olarak kullanılan silindirik EBT blok tuğlasından ergimiş metal akış analizi yapılmıştır. İkinci tasarımda sektörde çok fazla kullanılmayan konik EBT blok tuğlasından ergimiş metal akış analizi yapılmıştır. Konik EBT, ergimiş metalin en optimum şekilde akış sağlaması amacıyla Fluent ortamında analizleri yapılarak tasarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda konik EBT tasarımının, silindirik EBT tasarıma göre daha düşük sıvı metal türbülansı ve yükü altında yüksek hızda döküm gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akış Kontrol; EBT; Elektrik Ark Ocağı; Fırın Modelleme; Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.

ABSTRACT

IRON AND STEEL ELECTRIC ARC FURNACE CASTING HOLE THAT PERFORMS LIQUID METAL CASTING PROCESS AT HIGH TEMPERATURES MODELING WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ERDOGAN, Erdem

Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ

April, 2024, 70 Pages

In countries where iron, steel and non-ferrous metal production sectors are widespread, refractory designs of industrial furnaces operating at high temperatures are important in terms of efficiency. Refractory materials are an important expense in these sectors.

There are many factors affecting the quality of refractory materials. One of them is the design stages. Refractory design stages vary according to the type, capacity and sector of industrial furnaces. In my study, the casting hole (EBT) of the iron-steel Electric Arc Furnace (EAF) was examined. In operating conditions; It is desired that the molten metal in the furnace is poured regularly and quickly. With the improvements made in the casting hole; The turbulent flow turns into a more regular flow and the casting hole minimizes refractory wear. It increases the flow rate in parallel with the laminar flow. Thus, liquid metal contact and load affect the refractory for a shorter period of time and the number of furnace castings increases.

In my thesis study, flow analysis was performed with ANSYS Fluent for two different designs of Eccentric Bottom Tap-Hole (EBT) block brick of an industrial electric arc furnace (EAF) operating at high temperatures. First of all, molten metal flow analysis was performed on cylindrical EBT block brick, which is widely used in the industry. In the second design, molten metal flow analysis was performed on the conical EBT block brick, which is not used in the industry. Conical EBT was designed by analyzing the molten metal in the Fluent environment in order to provide the most optimum flow. As a result of the analysis, it was concluded that the conical EBT design performed high-speed casting under lower liquid metal turbulence and load than the cylindrical EBT design.

Keywords: Computational Fluid Dynamics; EBT; Electric Arc Furnace; Flow Control; Furnace Modeling.

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince, yoğun çalışmalarına rağmenengin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, benden desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ'a;

Analiz çalışmalarımdayaştırma verilerini paylaşarak destek olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Halit ARAT'a;

Çalışmam süresince gösterdikleri anlayış ve destekler için KÜMAŞ A.Ş.'ye;

Ve hayatımın her anında bana olan inancını, güvenini ve desteğini hissettiğim eşim ve aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLOLAR LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GÖRSELLER LİSTESİ	xiv
SEMBOLLER ve KISALTMALAR	xvi

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1.GİRİŞ	2
1.2.TEZİN AMAÇ VE KAPSAMI	3
1.3.LİTERATÜR ÖZETİ	4

İKİNCİ BÖLÜM

REFRAKTERLER

2.1.EAO, POTA, EBT REFRAKTERLERİ ve ÇALIŞMA ŞARTLARI	7
2.1.1. Refrakter Malzemeler	7
2.1.2. EAO	8
2.1.3. Pota	9
2.1.4. EBT	10

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SAYISAL MODELLEME

3.1.SAYISAL MODELLEME	15
3.1.1. Korunum Denklemleri	15
3.1.1.1.Kütle korunum denklemi	15
3.1.1.2.Momentum korunum denklemi	16
3.1.1.3.Enerji korunum denklemi	17
3.1.2. Türbülans Modellemesi	17
3.1.2.1.Standart k- ε türbülans modeli	18

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

4.1.HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE SONLU ELEMANLAR

YÖNTEMİ İLE ANALİZ	21
4.1.1. Mesh Model	22
4.1.1.1.Mesh Eleman Çeşitleri	22
4.1.1.2.Mesh Kalitesi	23
4.1.1.3.Global Mesh Ayarları	24
4.1.1.4.Local Mesh Ayarları.....	25
4.1.2. Reynolds Sayısı, Türbülans ve Türbülans Modelleri	25
4.1.2.1.DNS	26
4.1.2.2.LES	26
4.1.2.3.RANS	27
4.1.2.4.Türbülans Model Seçimi	28
4.1.3. Çözüm Aşamaları.....	29
4.1.3.1.Basınç tabanlı çözücü için gerekli olan Basınç-hız Bağlantısı	29
4.1.3.2.Uzamsal Ayırıklaştırma Ayarları	29
4.1.4. Initialization (Başlatma)	29
4.2.EAO, POTA ve EBT TASARIMI	30
4.3.SIVI ÇELİK AKIŞ ANALİZİ	31
4.3.1. Adım-1	31
4.3.2. Adım-2	31
4.3.3. Adım-3	31
4.3.4. Adım-4	32

BEŞİNCİ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1.SİLİNDİRİK VE KONİK EBT SONUÇ GRAFİKLERİ	37
5.1.1. EBT Sıvı Çelik Türbülans Yoğunluk/Zaman Grafikleri	37
5.1.2. EBT Sıvı Çelik Hız/Zaman Grafikleri	38
5.1.3. EAO Sıvı Çelik Kapasite/Zaman Grafikleri	39
5.1.4. Silindirik ve Konik EBT Sıvı Çelik Simülasyon Görselleri	40

ALTINCI BÖLÜM**SONUÇLAR**

6.1.SONUÇLAR	48
KAYNAKÇA	49
DİZİN	51



TABLÖLAR LİSTESİ**Sayfa**

Tablo 2.1: MgO-C Refrakter Malzeme Özellikleri	7
Tablo 4.1: Mesh Özellikleri	32
Tablo 4.2: Sıvı Çelik Malzeme Özellikleri	33



ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: EAO 3d Model ve Bölgeleri	8
Şekil 2.2: Pota 3d Model Ve Bölgeleri	9
Şekil 2.3: EBT Türbülans Yoğunluk Görselleri	12
Şekil 2.4: EAO-EBT-Pota Çalışma Şeması	13
Şekil 3.1: Kontrol Hacmine Giren Ve Çıkan Kütlelerin Şematik Görünümü	15
Şekil 4.1: Serbestlik Derecesi	21
Şekil 4.2: Mesh Model	22
Şekil 4.3: Mesh Teknikleri	22
Şekil 4.4: Hex Mesh Elemanları	23
Şekil 4.5: Tetrahedral Mesh Yapıları	23
Şekil 4.6: Sizing Aralığı	24
Şekil 4.7: Akış Şekilleri	25
Şekil 4.8: DNS Akış Görünümü	26
Şekil 4.9: LES Akış Görünümü	26
Şekil 4.10: RANS Akış Görünümü	27
Şekil 4.11: Eddy Viscosity Model Görünümü	27
Şekil 4.12: RANS Model Görünümü	27
Şekil 4.13: DNS-LES-RANS Süreci	28
Şekil 4.14: Baseline Türbülans Model Görünümü	28
Şekil 4.15: Türbülans Model Karşılaştırması	29
Şekil 4.16: EAO 3d Model Ve Bölümleri	30
Şekil 4.17: Pota 3d Model Ve Bölümleri	30
Şekil 4.18: EBT 3d Model ve Ölçüleri	30
Şekil 4.19: EAO Sıvı Çelik Sınır Şartları	34

Şekil 5.1: EBT Sıvı Çelik Türbülans Yoğunluğunun Zamana Bağlı Değişimi 37

Şekil 5.2: EBT Sıvı Çelik Hızının Zamana Bağlı Değişimi 38

Şekil 5.3: Sıvı Çelik Boşalma Kapasitesinin Zamana Bağlı Değişimi 39



GÖRSELLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel 2.1: EAO Refrakter Uygulama Görselleri	9
Görsel 2.2: Pota Görselleri	10
Görsel 2.3: EBT Döküm Süreci Fotoğrafları	11
Görsel 2.4: Silindirik EBT Uygulaması	12
Görsel 4.1: Ansys Workbench Ekranı	31
Görsel 4.2: Ansys Design Modeler Ekranı	31
Görsel 4.3: Ansys SpaceClaim Ekranı	31
Görsel 4.4: Mesh Özellikleri	32
Görsel 4.5: Fluent Multiphase Ekranı	32
Görsel 4.6: Fluent Malzeme Ekranı	33
Görsel 4.7: Fluent Enerji Ekranı	33
Görsel 4.8: Fluent Viscous Ekranı	33
Görsel 4.9: Fluent Boundary Conditional Ekranı	34
Görsel 4.10: Fluent Method Ekranı	34
Görsel 4.11: Fluent Report Definitions Ekranı	34
Görsel 4.12: Fluent Residual Ve Converge Ekranları	34
Görsel 4.13: Fluent Initialization Ekranı	35
Görsel 4.14: Fluent Contour Ekranı	35
Görsel 5.1: 1. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri	40
Görsel 5.2: 70. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri	41
Görsel 5.3: 140. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri	42
Görsel 5.4: 210. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri	43
Görsel 5.5: 265. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri	44
Görsel 5.6: 335. Saniye Silindirik EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri	45

Görsel 5.7: 286. Saniye Konik EBT Kapasite/Hız/Türlülans Görselleri 45

Görsel 5.8: 360. Saniye Silindirik EBT Kapasite/Hız/Türlülans Görselleri 46



SEMBOLLER ve KISALTMALAR

3d	: Three Dimensions
A	: Alan
BSL	: Baseline
BOF	: Basic Oxygen Furnace
C_p	: Özgöl Isı
C_f	: Sürtünme Katsayısı
C_μ	: Orantılılık Sabiti
CAD	: Computer Aided Design
d	: Çap
DNS	: Direct Numerical Simulation
EAF	: Electric Arc Furnace
EAO	: Elektrik Ark Ocağı
EBT	: Eccentric Bottom Taphole
EVR	: Eddy Viscosity Ratio
FMG	: Full Multigrid
h	: Yükseklik
H	: Entalpi
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
Hex	: Hexahedral, Hexahedron
k	: Termal İletkenlik
K	: Kelvin
k-ε	: k epsilon
k-ω	: k omega
l_t	: Lenght
LES	: Large Eddy Simulation

Penta	: Pentahral, Pentahedron
R	: Yarıçap
RANS	: Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation
Re	: Reynolds Sayısı
RNG	: Reynolds Normalization Group
RSM	: Reynolds Stress Model
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	: Sonlu Elemanlar Methodu
SST	: Shear Stress Transport
Tet	: Tetrahedral, Tetrahedron
Tri	: Triange
u	: Hız
V_t	: Velocity
Quad	: Quadrilateral, Quadratic
ρ	: Yoğunluk
μ	: Akışkan Dinamik Viskosite
τ_{ij}	: Reynolds Gerilmeleri



TEZ METNİ



BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1.Giriş

Yüksek sıcaklıklarda çalışan endüstriyel fırınların hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile analizleri birçok sektörde çıktı ürün başına harcanan refrakter giderini düşürme konusunda önemli bir aşamadır. Fırınlarda yanmanın optimize edilmesi, akış hesabı, refrakter şekil ve konumların tasarlanması, süreler, türbülans, kayıplar, basınçlar, enerji gibi birçok kavramın önceden belirlenmesi, öngörülebilmesi büyük önem arz etmektedir.

Demir çelik, cam, bakır, kurşun, gümüş, ferrokrom ve altın gibi sektörlerde ait yüksek sıcaklıklarda çalışan endüstriyel fırınların optimizasyonu önemlidir. Fırınlarda döküm işlemlerinin üretim açısından hızlı, temiz ve düşük refrakter aşınması ile gerçekleşmesi istenmektedir.

Döküm ve üfleme blokları sektöre ve fırınların çalışma prensiplerine göre değişkenlik göstermektedir. Well block, porous plug, tap hole, nozzle gibi birçok çeşiti mevcuttur. Bu blokların yüksek sıcaklık ve yük altında çalışmaları çok hızlı aşınmalara sebebiyet vermektedir. Bu nedenle tüketim miktarları yüksektir. Yüksek işletme maliyetleri vardır. Bu bloklar özel yöntemlerle üretilmekte olup, üretimi uzun zaman almaktadır. Bu refrakterlerin karışımları; Alümina, Manyezit, Krom gibi yarı mamül ürünlerin içeriğine bağlayıcı ve belirli alaşımlar eklenerek hazırlanır. Hazırlanan karışımlar; endüstriyel preslerde belirli bir basınç altında kalıplarda ya da beton harç (castable) şeklinde bir kalıba dökülüp şekillenir. Sonrasında ise temper fırınlarda temperlenir ya da tünel fırınlarda yüksek sıcaklıklarda pişirilir ve kullanıma hazır hale getirilir.

Fırınlarda döküm ve üfleme süreçleri sektörlerde, süreç parametrelerine ve kapasitelerine göre değişiklikler göstermektedir. Demir çelik sektörü için bir Basic Oxygen Furnace (BOF) ortalama 6000-7000 döküm, pota fırını ortalama 80-100 döküm, Elektrik Ark Ocağı ortalama 400-600 döküm, tandış ortalama 15-25 döküm almaktadır. Bakır sektöründe ise Thomas Ocağı ortalama 400 döküm almaktadır. Fakat döküm ve üfleme blokları fırınların ana refrakterine göre çok daha az dayanım göstermekte olup süreç boyunca birçok kez değişim işlemleri yapılmaktadır. Bu değişim işlemlerinin minimuma çekilmesi işletme açısından çok önemli kazançlar sağlamaktadır.

Döküm ve üfleme blokların ideal tasarımları; ergimiş metalin dökümüne ve fırın içerisindeki metalin üfleme ile karıştırılmasına etkisi oldukça yüksektir. Bu nedenle

refrakterlerin ergimiş metalin akışına uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu şekilde ideal tasarımları yapabilmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) ve Sonlu Hacim Yöntemi (FVM) gibi akışkan dinamiği ve akış simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan sayısal teknikleri kullanan bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır. Bu programlarda yapılan akışkan analizi sayesinde refraktere etki eden kuvvetler belirlenir. Bu kuvvetlerin Refrakter yüzeye en ideal şekilde dağılımı ve minimuma indirilmesi sağlanır. Böylece refrakterin akış yüzey contour hattı belirlenir. Tasarım en ideal halini almış olur.

1.2.Tezin Amaç ve Kapsamı

Çalışmada ki amaç; döküm bloğunun ergimiş metal ile nüfuz eden kısımlarının minimum türbülans ile geçmesini sağlayacak tasarımın yapılmasıdır. Aksi taktirde yüksek türbülans oluşturacak tasarımlar refrakter verimliliğine negatif yönde etki eder.

Yüksek türbülans ergimiş metalin düzensiz akışta seyretmesine neden olur. Bunun sonucunda türbülans kaynaklı olarak refrakterin yüzeyine ilave değişken yük ve basınçlar meydana gelir. Bu kuvvetler refrakterde düzensiz ve hızlı aşınmaya neden olur. Bu da refrakter ömrünün düşmesine ve daha yüksek periyotlarda tamir ve değişime neden olur.

Yüksek türbülans kaynaklı düzensiz akış; süreç anında ergimiş metalin daha fazla atmosfer ile temas etmesine neden olur. Bu temas ergimiş metalin atmosferden daha fazla azot gibi çeliğin kırılganlığının artmasına neden olan istenmeyen elementlere nüfuz etmesi anlamına gelir. Bunun sonucunda ergimiş metale nüfuz eden azotu pota fırınında giderme işlemi daha uzun sürer.

Atmosfere daha fazla temas eden akış aynı zamanda daha fazla enerji kaybına neden olur. Döküm sonrası ergimiş metalin istenilen sıcaklığa ulaşması için daha fazla enerji harcanması anlamına gelir. Yüksek türbülans daha uzun döküm sürelerine ve sonrasında daha uzun süreç parametrelerinin uygulanmasına neden olur.

Bu tez çalışmasında; Yüksek sıcaklıklarda çalışan Endüstriyel Demir Çelik fırını olan Elektrik Ark Ocağının(EAO) EBT diye adlandırılan tap hole döküm bloğundan Pota fırınına döküm süreci incelenmiştir. Bu incelemede ana parametre dökümün gerçekleşmesi için kullanılan tap holler(EBT) olacaktır. Yurt içi demir çelik sektöründe EAO fırınında sıvı metal döküm işlemi için kullanılan standart silindirik EBT blok tuğlasının geliştirilmesi amaçlanmıştır. EBT blok tuğlasının silindirik tasarımı nedeniyle

döküm aşamasında meydana gelen yüksek türbülans, basınç kayıpları, döküm hızının yavaşlaması ve refrakter blok tuğla düzensiz aşınmalarının önüne geçilmek adına ANSYS Fluent ortamında analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda akışa uygun tasarlanan blok refrakter tuğla ile türbülans yoğunluğu azaltılmış, basınç kayıpları giderilmiş, döküm hızı artırılmış ve refrakter blok tuğla düzensiz aşınmalarının önüne geçilmiştir.

1.3.Literatür Özeti

Bu konudaki ilk çalışmalar demir çelik yüksek fırını içinde ölçüm yapmanın zorluğu nedeniyle, bir ocağın iç profilini tahmin etmek için yapılmıştır. Son zamanlarda, hesaplama teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte, yüksek fırın ocağının iç kısmı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile analiz çalışmaları yapılmaktadır. Yüksek fırın ocağındaki sıcak metal akışının ve ısı transferinin matematiksel modellemesi 20 yıl önce başlamıştır. Ocaktaki sıcak metal akışı ile ısı transferi arasındaki ilişki geliştirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra, kaba hesaplama yapılarak ocak akışını ve refrakter ısı transferini birlikte analiz etmek için bir model geliştirilmiştir. Fluent kullanılarak duvardaki kesme gerilimi ve ısı akışını tahmin etmek için aynı yüksek fırını simüle etmek için benzer çalışmalar yapılmıştır. (Yu Zhang, Rohit Deshpande, 2007)

Döküm deliklerinde ilk çalışmalar 2007 yılında RHI Magnesita firması tarafından başlamıştır. CFD simülasyon yazılımı kullanılarak çelik akışının akışkanlar dinamiği optimizasyonuna odaklanmıştır. Birleşim yerlerinin özel yapısı sayesinde kanalın iç yüzeyi tek parça BOF iç döküm deliği kadar pürüzsüzdür. Birleşim yerlerinin özel formda tasarlanmış tasarımı, çeliğin BOF döküm deliği tuğla arkasındaki olası boşluklara nüfuz etmesini önler. Çelik tesisi operatörleri, bakım nedeniyle oluşan arıza sürelerinin minimum düzeyde olmasını ve BOF iç döküm deliği sistemlerinden en yüksek performansı talep etmiştir. Devrim niteliğindeki bölümlü iç tuğla sistemi, ek yeri olmayan bir iç yüzey ile karakterize edilmiş ve izo-preslenmiş iç tap hole özelliklerini koaksiyel preslenmiş, karbon bağlı, magnezya karbon tuğlaların performansı ile birleştirmiştir. HAD kullanılarak özelleştirilmiş tasarım, en yüksek kullanım ömrünü ve çalışma süresi sınırları dahilinde refrakter malzemenin maksimum kullanımını garanti etmiştir. (M. Kirschen, C. Rahm, J. Jeitler, G. Hackl, 2008; Karim Badr, Marcus Kirschen, Christian Rahm und Jürgen Cappel, 2009)

Demir çelik ünitelerindeki Konvertör (BOF) tap holler, Elektrik ark ocak (EAO) tap holler(EBT), pota casting bloklar, tandiş, nozullar gibi birçok sistemdeki geometriler

elik akış özelliklerini geliştirmek, refrakter ömürlerini ve üretim kapasitelerini artırmak amacıyla birçok refrakter firmaları tarafından çalışmalar sürdürülmektedir.





İKİNCİ BÖLÜM

REFRAKTERLER

2.1.EAO, POTA, EBT REFRAKTERLERİ ve ÇALIŞMA ŞARTLARI

2.1.1. Refrakter Malzemeler

Refrakter malzemeler ateşe karşı dayanımı yüksek malzemeler olarak tanımlanırlar. Yüksek sıcaklığa uzun süre dayanabilme özelliği sebebiyle endüstriyel anlamda pek çok alanda kullanılırlar (Harbison Walker, 2005 ; Öztürk, 2015).

Günümüzde, demir çelik endüstrisi üretilen tüm refrakter malzemelerin yaklaşık %70'ini kullanmaktadır. Refrakterler; genel olarak fırın, reaktör, tutuşturucu, ocak, cam üretimi, ateş kalkanları ve roket platformlarının inşasında kullanılmaktadırlar. Günümüz endüstriyel sektörde birçok refrakter çeşidi vardır. Çelik döküm potaları ve elektrik ark ocakları manyezit karbon tuğlaların başlıca kullanım alanlarıdır. (Shaw, 1972).

Yüksek refrakterlikleri, cüruf atağına ve termal şoklara karşı dirençleri ile diğer alternatiflerinden daha üstün özelliklere sahip olan MgC-O tuğlalar 1970 yılların sonunda bulunmuş olup gelişimi günümüzde hala devam etmektedir. Bu refrakterlerin temel bileşeni magnezyum oksittir. MgC-O tuğlalar, ısı, termomekanik ve cüruf dayanımı gibi birçok refrakterlik özelliklerin yüksek olması nedeniyle özel önem taşıyan ürünler haline gelmiştir. MgO refraktere grafit katkısı yapılarak kompozit refrakter yapılarının geliştirilmesi olmuştur. Bu amaçla MgO harmanlarına ağırlıkça %3-15 flake (pulsu, tabakalı) grafit tozları ilave edilerek MgO-C tuğlalar üretilmektedir. Grafit, yüksek sıcaklıklarda sıvı metal ve sıvı cüruf tarafından refrakter yüzeyinin ıslatılmasını minimize ederek, iç yüzeye penetrasyonun zorlaşmasına ve böylece refrakterin korozyon dayanımının artmasını sağlamaktadır. (Yılmaz, 2023)

MgO saflığı ve kristal çapının büyük olması, bağlayıcı, grafit, porozitenin düşük, yoğunluğunun ve Soğukta Basma Mukavemetinin (SBM) yüksek olması refrakterliği artıran faktörlerdir. Tablo 2.1. de MgC-O tuğlanın kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.1. MgC-O Refrakter Tuğla Özellikleri

MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	C	Hacim Ağırlık	Görünür Porozite	Soğukta Basınç Mukavemeti	Yük Altındaki Refrakterlik	Sıcakta Kopma Modülü
%	%	%	%	%	g/cm ³	%	kg/cm ²	°C	kg/cm ²
97.0	0.1	1.6	0.8	15.0	3.00	3.3	350	>1750	80

Magnezya –Karbon tuğlaların Sıvı çelik ve cüruf ile teması sırasındaki korozyon üç ana kategori ile tanımlanabilir;

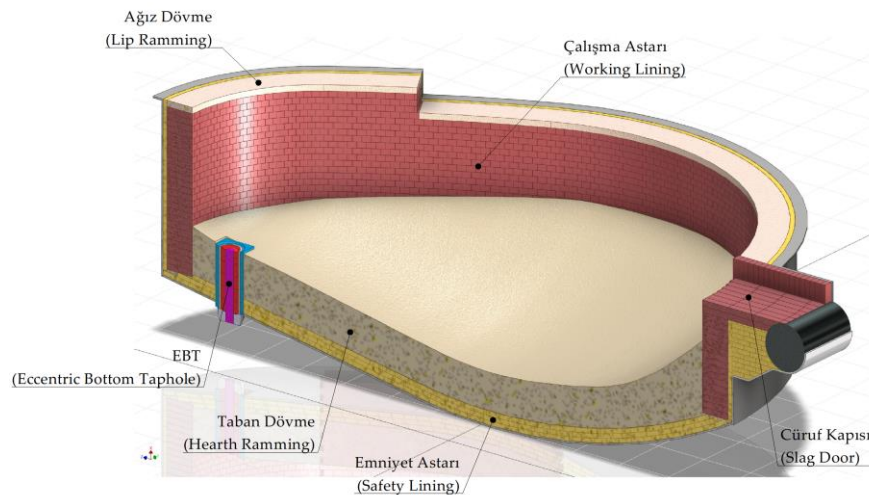
- Refrakter malzemelerin kimyasal bir süreç ile çözünmesi veya difüzyonu
- Cürufun refrakterlerin içine infiltrasyonu ile mekaniksel etkilere sebep olması
- Erozyon, refrakterlerin gaz ve cüruf hareketine maruz kaldığı aşınma prosesi

Çalışmamızda inceleyeceğimiz nokta tuğlada korozyona, aşınmaya neden olan sıvı çelik basıncı ve türbülans kaynaklı yüklerdir. (Sarioğlu, Timuçin, Sesver, 2013)

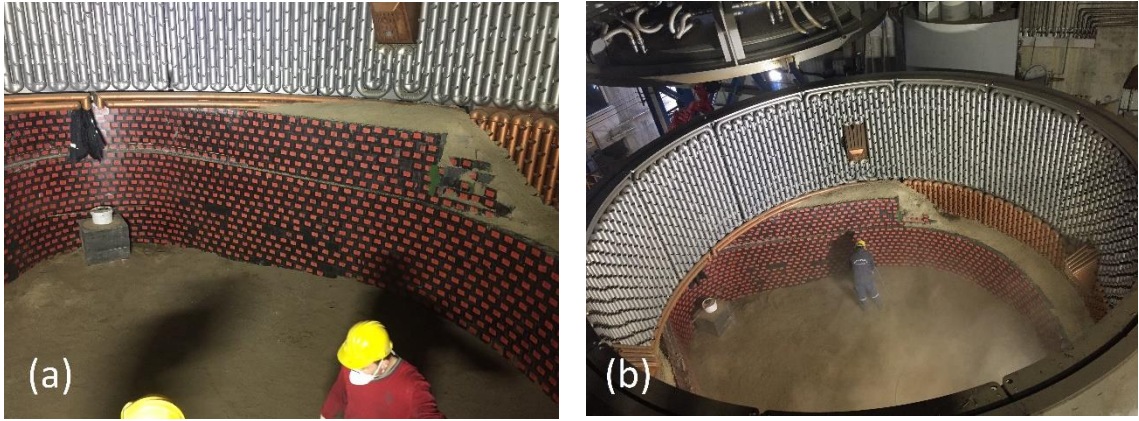
2.1.2. Elektrik Ark Ocağı (EAO)

Hurda ergitme ve direkt indirgenmiş cevher ergitme yöntemlerinde kullanılan EAO'lar, çelik üreticilerinin tercih ettiği proses tipidir. Bu süreçte hammadde olarak, hurda ve sünger demir tercih edilmektedir. EAO'da üretilen her ton çelik için yaklaşık 6-8 GJ enerji tüketilir. Çalışma astarı tasarımı MgC-O refrakter kullanılmış EAO'lar günümüzde daha çok tercih sebebidir. Aşınma seviyesinin en yoğun olduğu bölgelerde, 97-98% MgO içeren tuğlalar kullanılmaktadır. Soğuk bölgede 6-10% C, Cüruf bölgesinde 12-16% C, üst bölgede ise 8-12% C içeren refrakterler kullanılmaktadır. Taban bölgesinde manyezit esaslı dövülebilir malzemeler kullanılmaktadır. EAO'da mekanik etkilerden ziyade yüksek sıcaklık altında kimyasal süreçten kaynaklı aşınmalar çok daha fazladır. (Bilal Utku KARATAŞ, 2019) Çalışmanın ana konusu olan EBT tuğlaları EAO'nın döküm bloklarıdır. Şekil 2.1. de görüleceği üzere EAO taban uç noktasında bulunan kare şeklindeki refrakterlerdir. EAO içerisinde ergiyen demir bu noktadan pota fırınına boşalmaktadır. Ortalama bir EAO refrakterleri 600 kez sıvı çelik dökümünden sonra sökülüp yeniden örülmektedir. Şekil 2.1. de 3d EAO model görseli ve Şekil 2.2. de refrakter uygulama görselleri görülmektedir.

Şekil 2.1. EAO 3d Modeli Ve Bölümleri



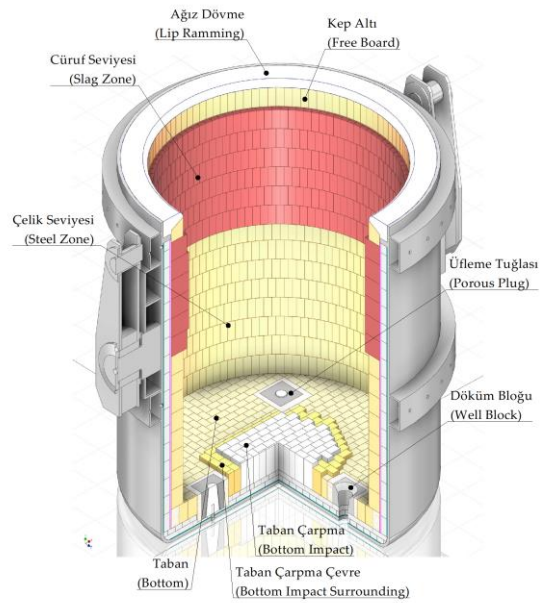
Görsel 2.1. EAO Refrakter Uygulama Görselleri (a)İç, (b) Üst



2.1.3. Pota

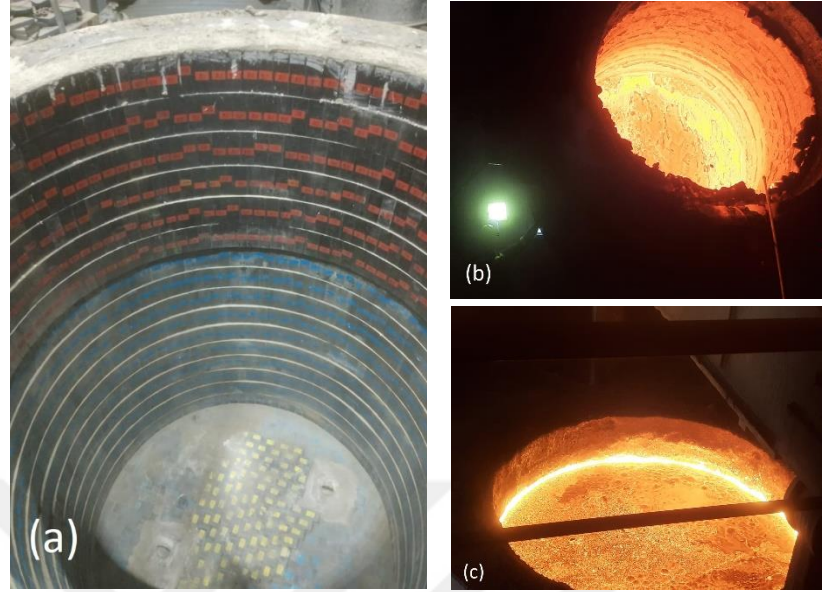
Potalar, çoğunlukla ergimiş metal üzerinde işlem yapılmasında kullanılmakta olup, EAO kullanan işletmeler ya da yüksek fırın ve konverter prosesleri ile çalışan işletmeler tarafından tercih edilir. Kükürt giderme, ısıtma, deoksidasyon ve homojenleştirme bu gibi işlemlere örnek oluşturmaktadır. Şekil 2.3. 3d Pota görseli görülmektedir.

Şekil 2.2. Pota 3d Modeli Ve Bölümleri



Aşınma seviyesinin en yoğun olduğu bölgelerde, 97-98% MgO içeren tuğlalar kullanılmaktadır. Taban ve çelik bölgelerinde 6-10% C, Cüruf bölgesinde 12-16% C içeren refrakterler kullanılmaktadır. Ortalama bir Pota refrakterleri 100 kez sıvı çelik dökümünden sonra sökülüp yeniden örülmektedir. (KARATAŞ, 2019) Şekil 2.4. de pota görselleri görülmektedir.

Görsel 2.2. Pota Görselleri (a)Refrakter Örülmüş, (b)Döküm Almış, (c)Sıvı Çelik ile Dolu



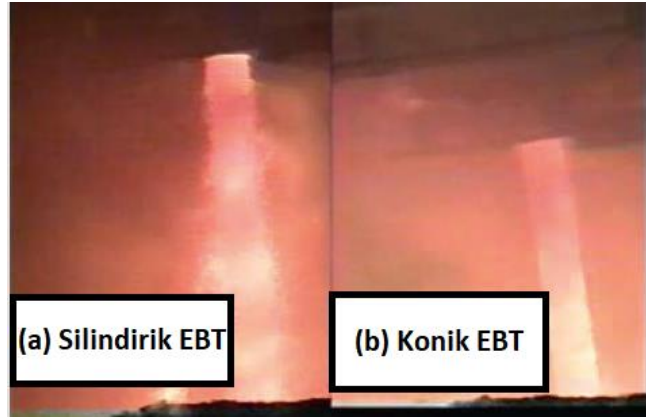
2.1.4. EBT

EBT diye adlandırılan refrakterler EAO döküm delikleridir. Ergimiş sıvı çeliğin EAO'dan potaya boşaltıldığı kısımdır. İç, uç ve dış kare diye adlandırılan 3 farklı refrakterden oluşmaktadır. En önemli kısmı iç ve uç refrakterlerdir. Genellikle bu kısımlara 97-98% MgO ve 12-16% C içerikli yüksek kalite refrakterler verilmektedir. İç ve uç refrakterler sıvı çelik ile temas halindedir. Aşınma genellikle sıvı çelik basıncı ve türbülans kaynaklı olarak mekanikseldir.

Silindirik EBT tamirlerle birlikte yaklaşık 140 döküm alabilmektedir. Demir çelik sektöründe silindirik EBT kullanımı yaygındır. Silindirik EBT'de türbülans kaynaklı düzensiz aşınmalar sebebiyle işletme esnasında EBT'de 2-3 kez tamir ihtiyacı gerekmektedir. Sürenin çok önemli olduğu demir-çelik işletmelerinde her tamir işletme açısından süre kayıplarına neden olmaktadır. Sektörde yurt dışında önemli firmaların konu hakkında çalışmaları mevcuttur.

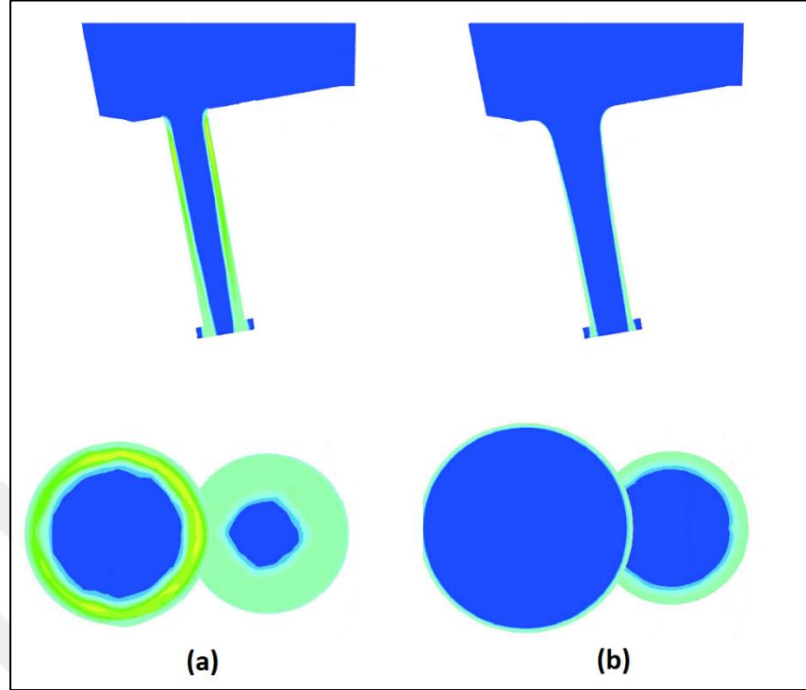
Genel anlamda türbülans engellerin, keskin köşelerin ve yüzeylerin olduğu bölgelerde yoğunluk gösterir. Çünkü bu bölgelerde akışa karşı direnç söz konusudur. EBT de meydana gelen türbülansı gidermek adına akışa uygun yeni tasarım gerçekleştirildi. Aşağıda verilen görsellerde iki farklı tipteki EBT de meydana gelen türbülanslar gösterilmiştir. Şekil 2.5. de görüldüğü üzere silindirik EBT de türbülans kaynaklı dağınık ve yayılarak çıkan bir akış, konik EBT de ise daha düşük türbülans kaynaklı dengeli ve kararlı çıkan bir akış olduğu gözlemlenmektedir.

Görsel 2.3. EBT döküm süreci fotoğrafları (a) Silindirik (b) Konik(Hackl, Jeitler, Kirschen, Rahm, 2008)

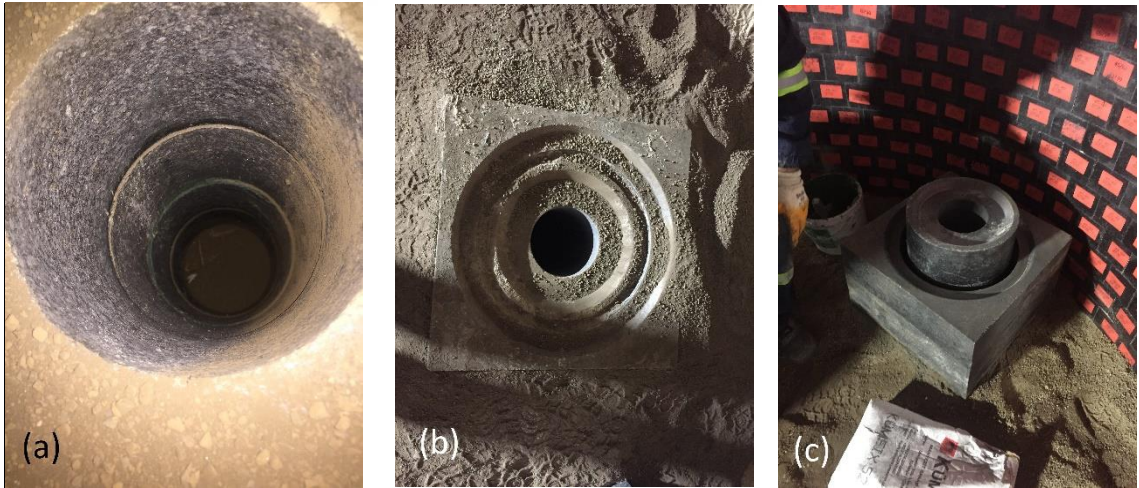


Türbülansın ilk nedeni silindirik EBT giriş kısmının keskin köşelerden oluşması ve bunun sonucunda EBT ağız kısmında basamak şeklinde akış altında hava tüneli oluşturmasıdır. Bu basamaktan sonra akış delik boyunca yüzeye yeniden yapışmaya çalışır. Akış boyunca bu durum türbülans oluşturur. Bir diğer nedeni ise deliğin silindirik olmasından kaynaklı olarak delik boyunca akış hızı ve basıncın düşmesi, kayma gerilmelerinin yükselmesi türbülansı oluşturur. Silindirik EBT de meydana gelen türbülans sıvı çelik akış hızının refrakter yüzeylerde soğrulup yavaşlamasına, dökümün düşük hızda gerçekleşmesine, refrakter yüzeylerde düzensiz kuvvetler oluşmasına ve düzensiz kuvvetlerden kaynaklı düzensiz yüksek aşınmalara sebebiyet vermektedir. Konik EBT de ise keskin köşeler yerine radyuslu köşeler, kayma gerilmelerini düşürmek için konik delik tasarımı kullanılmıştır. Böylece daha düşük türbülanslı, daha hızlı ve refrakterlerde daha düzenli bir aşınmayla döküm işlemi gerçekleşmiştir. Şekil 2.6. da silindirik ve konik EBT'nin ön kesit ve üst görünüşleri alınarak hacim boyunca türbülans yoğunlukları görülmektedir. Şekil 2.6. (a) da silindirik EBT de döküm deliği boyunca, türbülanslı akıştan dolayı girişten çıkışa kadar türbülans yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Şekil 2.6. (b) da konik EBT de döküm deliği boyunca, düşük türbülanslı akıştan dolayı girişte türbülans yoğunluğu görülmemekte olup çıkışa doğru biraz görülmektedir. Şekil 2.7. da silindirik EBT uygulama resimleri görülmektedir.

Şekil 2.3. EBT Türbülans Yoğunluk Görselleri (a)Silindirik EBT ön ve üst kesit, (b)Konik EBT ön ve üst kesit (Hackl, Jeitler, Kirschen, Rahm, 2008)



Görsel 2.4. Silindirik EBT Uygulaması (a)Silindirik Döküm Delik, (b)Üst Görsel, (c)Geniş Açılı Görseli



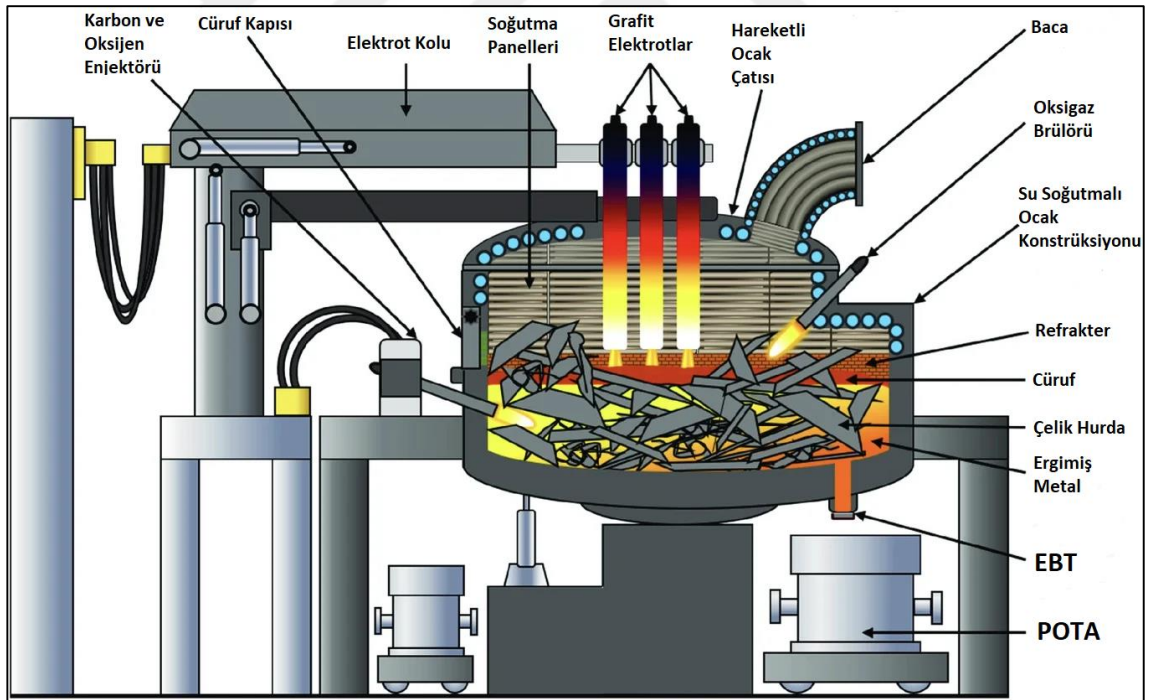
EBT elektrik ark ocağının döküm alma işlemi sırasında, EAO EBT tarafına yaklaşık $5-10^\circ$ eğilerek, döküm alma mekanizması açılır ve döküm deliği dolgusu otomatik olarak ergimiş çeliğin statik basıncı ile boşalır ve ergimiş çelik potaya akar. Ergimiş çelik yaklaşık %85-90'a ulaştığında EAO cürufu önlemek için hızla normal konumuna döner. Geri boşaltma prosesinde ergimiş çelik ile birlikte cürufun %5'i potaya akar. EAO normal konumuna döndükten sonra ergimiş çeliğin yaklaşık %10-15'i EAO içinde maya olarak bırakılır. EBT deliği aşınma durumu kontrol edilir. EBT tamirine

gerek yok ise döküm alma mekanizması kapatılır, EBT'nin üst tarafından dolgu malzemesi döküm deliğine doldurulur. EAO içerisine hurda yüklenir ve yeniden ark ile ergitme işlemi başlar. Bir dökümlük süre yaklaşık 45-50 dk'dır.

EBT deliğinde yüksek aşınmalar mevcut ise bu bölgeye özel tamir harçları kullanılmaktadır. EAO üst kısmından EBT deliği uygun bir boru ile tıkanır. Deliğin aşınan bölgelerine üst kısımdan el yardımıyla harç malzemesi boşaltılır. Malzeme aşınan kısımları akarak doldurur ve sıcaklığın etkisiyle kısa sürede o bölgede sinterleşir. Ve delik tamiri tamamlanmış olur.

Günümüzde bu işlemler el ve kaplar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte EBT iç ve uç tuğla değişimleri, döküm deliği aşınma kontrolü, temizliği, tamiri ve dolgu işlemleri artık robot ve manipülatörler yardımıyla hem daha güvenli hem de daha verimli bir şekilde yapılmaya başlanmıştır. Şekil 2.8. de EAO-EBT-Pota Çalışma Şeması görülmektedir.

Şekil 2.4. EAO-EBT-Pota Çalışma Şeması (Turkotherm, 2024)





ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
SAYISAL MODELLEME

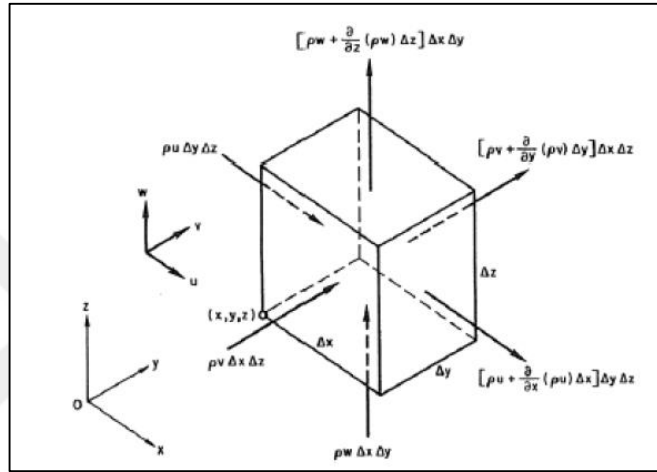
3.1.SAYISAL MODELLEME

Bu bölümde, çalışma kapsamında ticari yazılım Ansys Fluent ve açık kaynak kodlu yazılım olan OpenFOAM kullanılarak yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümleri için arka planda programların çözdüğü denklemler incelenecektir.

3.1.1. Korunum Denklemleri

3.1.1.1.Kütlenin korunumu denklemli

Şekil 3.1. Kontrol hacmine giren ve çıkan kütlelerin şematik görünümü (Ferziger, 1996).



Yukarıda ki görselde Eulerian akış modelleme metoduna göre kinematiği incelenecek olan akış hacmi oluşturulmuştur. Bu hacime giren ve çıkan akışkan parçacıklarına ait kütle korunum denklemleri aşağıda verildiği gibidir:

Kontrol hacminden ayrılan akışkan parçacıklarına ait net korunum denklemler x,y,z yönlerine göre:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \Delta y \Delta z \Delta x \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \Delta z \Delta x \Delta y \quad (3.1)$$

Kontrol hacmine giren akışkan parçacıklarına ait net korunum denklemleri x,y,z yönlerine göre:

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.2)$$

Zamana bağlı gerçekleşen akış durumlarında kütle korunum denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

formlarında ifade edilmektedir.

3.1.1.2.Momentum korunum denklemleri

Momentumun korunumu olarak adlandırılan konu, akışkanlar mekaniği biliminde en temelinde Newton'un ikinci yasası olarak da bilinmektedir ve en genel haliyle aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$F = \frac{dM}{dt} = \frac{d(mV)}{dt} = ma \quad (3.4)$$

(M = Lineer momentum ; F = İncelenen akışkan parçasına etkiyen net kuvvet ; a =incelenen akışkan parçasının sahip olduğu net ivme dV/dt)

Newton'un ikinci yasasına ait denklemle genelleştirilmiş olan momentumun korunum denklemi x,y,z yönleri için ayrı ayrı açılarak ifade edilecek olursa:

$$\begin{aligned} \rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \end{aligned} \quad (3.7)$$

Şimdiye kadar olan kısımda, momentumun korunum denklemlerinin daimi ve sıkıştırılamaz akış kabulü için elde edilen halleri ve x,y,z yönlerine göre açılmış hallerini kısmi diferansiyel denklemler şeklinde gördük. Bu denklemler incelenecek olan akışın tipine ve fiziğine göre çeşitli kısmi diferansiyel denklem çözümüyle metodları matematiksel olarak uygulanarak çözülmesi gereken denklemler elde edilmektedir.

Öncelikli gerçekleşen akışı doğru bir şekilde inceleyebilmek için, Newton tipi, sıkıştırılamaz ve viskoz bir akış için Navier Stokes denklemi,

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 V \quad (3.8)$$

Olarak ifade edilecektir. Bu denklemde ρ akışkan yoğunluğunu, μ akışkan viskozitesi, g yer çekimi ivmesi, V akışkan hızı, t zaman ve P akışkan basıncı değerlerini

ifade etmektedir. Daimi, sıkıştırılabilir ve türbülanslı akışlarda x,y,z yönlerine ait momentum denklemleri aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\rho \vec{B} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right) + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (3.9)$$

Burada verilen akış rejimi ve akışkan özelliklerine bağlı olarak matematiksel metodlarla açılarak farklı formlara getirilip çözümlenebilmektedir.

3.1.1.3. Enerjinin korunumu denklemi

Bir önceki bölümde verilen momentumun korunumunu ifade etmek üzere kullanılan denklem çözülürken Reynolds sayısında ifade edildiği gibi atalet kuvvetlerin vizkoz kuvvetlere göre çok daha büyük değerlere ulaştığı yüksek Reynolds sayılarının söz konusu olduğu durumlarda akış türbülanslı hale gelmekte ve sisteme ait enerji korunum denklemlerinin de gerekli forma getirilip çözümlenmesi gerekmektedir. Enerji denklemleri iste aşağıda verilen formülle ifade edilebilmektedir:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial(uE)}{\partial x} + \frac{\partial(vE)}{\partial y} + \frac{\partial(wE)}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial(uP)}{\partial x} - \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(wP)}{\partial z} + \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) \right. \\ &\left. + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

ρ yoğunluk, μ vizkozite, P basınç, E enerji, Re Reynolds sayısını, Pr Prandtl sayısını ve τ stres tensörünü belirtmektedir.

3.2. Türbülans Modellemesi

Türbülans denklemlerinin akış denklemleri üzerine uygulanması Reynolds'un 19. yüzyıl içerisinde yaptığı çalışmalar sonucunda 1895 yılında Navier-Stokes denklemi üzerine türbülans etkilerinden doğan düzensizliklerin matematiksel ifadelerini uygulamasıyla başlamıştır. Reynolds yaptığı çalışmalarda, meydana gelen türbülans kaynaklı düzensizliklerin zamana bağlı ortalamalarının alınıp bu etkilerin de denklemlere dahil edilmesi esasına dayanan "standart time avaraging" türbülans yaklaşımını geliştirmiştir. Meydana gelen bu düzensizlikleri ve gerilmeleri matematiksel bir ifadeye dökülebilmek amacıyla Bossinesq ve eddy vizkozitesi terimleri geliştirilmiş oldu. Yine aynı

yıllarda yaptığı çalışmalarda sınır tabaka yaklaşımının gelişmesine yol açmıştır. Bu yıllarda eddy vizkozitesini hesaplamak üzere günümüzde “zero equation model” olarak adlandırılan “mixing length” modeli Prandtl tarafından geliştirilmiştir. Türbülans kaynaklı şekilde ortaya çıkan düzensizliklerin daha doğru şekilde ifade edilebilmesi ve matematiksel ifadelerle dökülebilmesi giderek oldukça önemli bir hale gelmiştir. Bu nedenle incelenen akışkan parçacığının hareketini incelemek üzerine kurulan Prandtl’ın one equation modeline eddy vizkozitelerinin etkisi, türbülans dalgalarına ait kinetik enerji salınımları(k) cinsinden ifade edilecek şekilde yeniden düzenlenmiştir (Wilcox, 2006).

Bu denklem ise aşağıda verildiği gibidir,

$$R_{i,j} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{i,j} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{i,j} \quad (3.11)$$

3.2.1. Standart k- ϵ türbülans modeli

Aşağıda analiz çözümünde kullanılan k- ϵ türbülans modelinin çözüm denklemlerinden bahsedilmiştir.

Hızdaki dalgalanmaların varyansına türbülans kinetik enerjisi denir ve k ile gösterilir.

$$k = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (3.12)$$

Türbülans kinetik enerjisi içeren yeni momentum denklemi aşağıdaki gibi düzenlenir;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i k)}{\partial x_i} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.13)$$

Türbülans kinetik enerjisi k , ortalama akıştaki, türbülans dalgalanmalarından transfer edilen kinetik enerjidir. Türbülans kinetik enerjisinin yayılma oranı ϵ , iç enerji dahilinde bulunan kinetik enerjinin yayılımı olarak tanımlanır. k , ortalama akış dağılımlarının varlığı nedeniyle ortaya çıkar ve viskoz etkiler tarafından yayılır. Üretim ve yayılma arasındaki dengesizlik, türbülans kinetik enerjisinin artmasına ya da azalmasına neden olacaktır.

Denklemdaki ϵ türbülans kinetik enerji yayılım oranı, k türbülans kinetik enerjisi ve L_t türbülans uzunluk ölçüsü ile ifade edilebilir.

$$\epsilon \cong \frac{k^{3/2}}{L_t} \quad (3.14)$$

Bu durumda momentum denklemi;

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.15)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesidir. Standart k- ε modeli türbülans viskozitesini türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı ile ilişkilendirir.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.16)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi ile birlikte, Eddy viskozitesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\mu_t = \rho C_\mu L_t \sqrt{k} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

P viskoz kuvvetlerden dolayı oluşacak türbülans üretimini temsil eder ve şu şekilde ifade edilir.

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (3.18)$$

Burada $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ model sabitleridir.



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

4.1.HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), hareket denkleminde yola çıkılarak elde edilen akış denkleminin nümerik olarak çözümünü sağlayabildiğimiz bir yaklaşımdır. HAD akışkan akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonları bilgisayar destekli çözüm yöntemidir. Bu yöntem birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

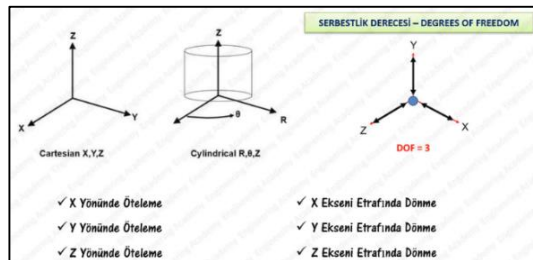
Ansys fluent çözücü, sonlu hacim yöntemine dayalıdır. Etki alanı, sonlu bir kontrol hacimleri kümesi halinde ayrıklaştırır. Genel taşıma denklemleri bu kontrol hacimleri setinde çözülür.

Sonlu elemanlar yöntemini mühendislik problemlerinin matematiksel bir ifade olarak tanımlanarak çözümlendirilmesi olarak tanımlayabiliriz.

Sonlu elemanlar metodu (SEM) adı verilen nümerik hesaplama tekniğinin kullanılarak fiziksel bir olayın nümerik bir ifadeye çevrilerek simülasyon yapılmasıdır. Temel analizleri türleri olarak dinamik, statik, harmonik, linear, Non linear, explicit(zamana bağlı), implicit(zamandan bağımsız), termal, burkulma, topoloji, yorulma ve akış analizleri yapılmaktadır. İşletme koşullarının analiz modeli üzerinde tanımlanması işlemleridir. Şekil 4.1. de serbestlik derecesi eksenel yönler üzerinde görülmektedir. (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

- Sabitleme koşulları
- Serbestlik dereceleri
- Uygulanan yükleme türleri
- Yük uygulama noktaları
- Termal durumlar
- Süreler
- Sabitler / Değişkenler

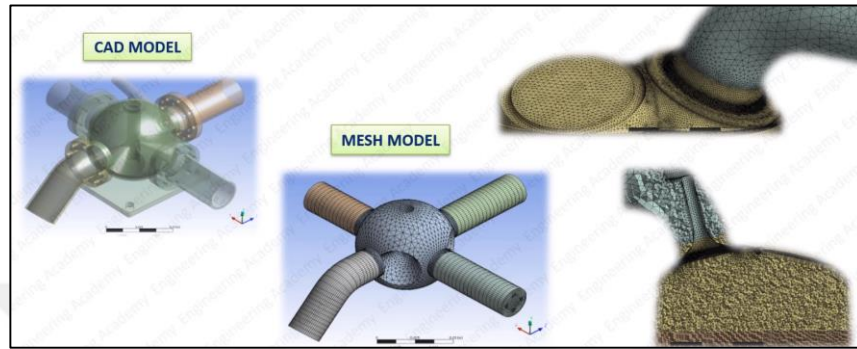
Şekil 4.1. Serbestlik Derecesi (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



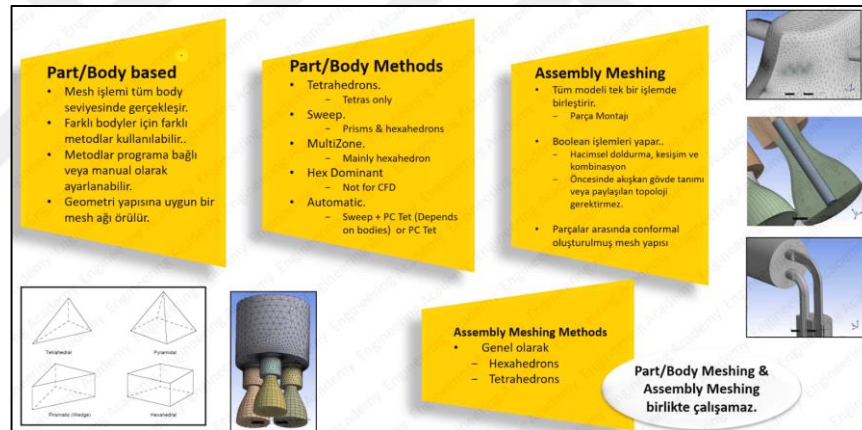
4.1.1. Mesh Model

Fiziksel problemi nümerik bir dil ile ifade etmektir. (ANSYS Fluent Tutorial Guide 2011; Jadidi, 2020) Şekil 4.2. de mesh modelleri ve şekil 4.3. de mesh teknikleri görülmektedir.

Şekil 4.2. Mesh Model (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



Şekil 4.3. Mesh Teknikleri (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

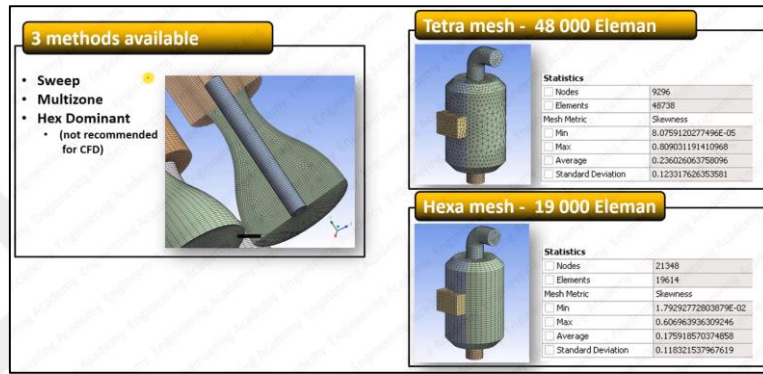


4.1.1.1. Mesh Eleman Çeşitleri

- Tetrahedron Elemanlar : Karmaşık katı modellerde tercih edilir. İyi bir meshleme ve kontrol yeteneği vardır. 4 yüzeyden oluşan dik prizma şeklindedir.
- Pentahedron Elemanlar : Düşük çözümleme yeteneğinden dolayı zorunlu olunmadıkça katı modellerde tercih edilmezler. 5 yüzeyli yarı quadratic şeklindedir.
- Kiriş-Çubuk Elemanlar : Kafes sistemlerinde, çelik konstrüksiyon analizlerinde tercih edilirler.
- Tri Angle Elemanlar : Yüzey modellerde çözüm yeteneği kötü bir eleman tipidir.
- Ouadrangle Elemanlar : Kompleks yüzey modellerde ve basit yüzey modellerde sıkça kullanılırlar.

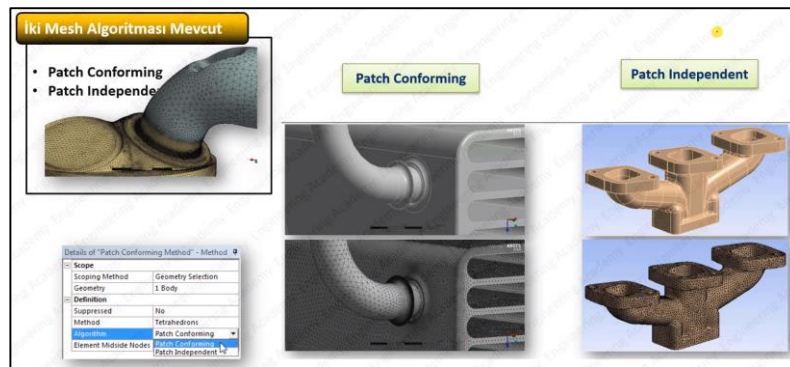
- Hexahedron Elemanlar : Katı ve yüzey modellerde en çok tercih edilen eleman tipidir. Aşırı deformasyona tabi olursa gerçek olmayan yüksek gerilimli sonuçlar verebilir.
- Hexahedral Elemanlar : Hexahedral elemanın avantajları basit geometrilerde daha az eleman ile daha hızlı çözüm sağlamaktır. Şekil 4.4. de hex mesh elemanları görülmektedir.

Şekil 4.4. Hex Mesh Elemanları (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



- Tetrahedral Mesh Elemanları : Tetrahedral mesh elemanın avantajları ise karmaşık geometrilerde kolay meshleme ve kaliteli bir mesh yapısı oluşturmayı sağlar. Şekil 4.5. de tetrahedral mesh yapıları görülmektedir.

Şekil 4.5. Tetrahedral Mesh Yapıları (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



4.1.1.2.Mesh Kalitesi

- Element Quality; Mesh eleman hacminin kenar uzunluklara oranıdır. 0-1 arasında bir değerdedir. 1'e yakın oldukça kalite artmaktadır.
- Aspect Ratio; Mesh unsurunun en uzun kenarının kısa kenara oranıdır. 1-20 arasında olup 1'e yaklaştıkça mesh kalitesi artar.

- Jacobian Ratio; Yay ölçüsünün kenar uzunluğuna oranıdır. 1-30 arasında olup 1'e yakın olması gerekir.
- Warping Factor; 0'a yakın olması gerekmektedir.
- Parallel Deviation; 0'a yakın olması gerekmektedir.
- Maximum Corner Angle; Üçgen formlarda 60-165 arasında olup 60'a yakın olması gerekir. Dörtgen formlarda 90-180 derece arasında olup 90'a yakın olması gerekir.
- Skewness; 0-1 arasında olup 0'a yakın olması gerekmektedir. Olması gereken element boyutu ile gerçek boyut arasındaki farka bakılarak değerlendirme yapılır.
- Orthogonal Quality; Elementlerin merkezinden kenarlarına olan uzaklığın, komşularının merkezine olan uzaklığa oranı ile değerlendirilir. 0-1 arasında olup 1'e yakın olması gerekir.
- Characteristic Length

4.1.1.3.Global Mesh Ayarları

- Curvature; Curvature normal açısı değerine göre kenar ve yüz boyutlarını belirler.
- Growth Rate; Geçişlerdeki mesh elemanlarının büyüme oranını ayarlar.
- Proximity; Dar bölgelerdeki mesh elemanları sayısını ayarlar.
- Min Size; Mesh algoritmasına göre üretilecek min mesh elemanı boyutunu ayarlar.
- Element size; Mesh algoritmasının en büyük mesh elemanı boyutunu ayarlar.
- Max. Size; Hacim mesh yapılarında hacim içerisinde kalan kısımdaki en büyük mesh eleman boyutunu ayarlar. Şekil 4.6. da ideal sizing aralığı görülmektedir.

Şekil 4.6. İdeal sizing Aralığı (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



- Transition; Slow (Default for CFD, Explicit), yumuşak geçişler sağlar, Fast (Default for Mechanical and Electromagnetic), daha ani ve kaba geçişler sağlar.
- Inflation; Smooth Transition, First Layer Thickness, Total Thickness, First Aspect Ratio, Last Aspect Ratio adında 5 farklı geçiş sekmesi vardır.
- İki Adet Algoritma mevcut; Pre ve Post
- View Advanced options; Layer Compressionda köşelerde inflation tabakalarının sıkışarak Stair Steppingde ise eşit adımlarla köşe noktaları geçmesini ifade eder.

4.1.1.4. Local Mesh Ayarları

- Method : Body'ler içindir.
- Sizing : Vertex, Edge, Face ve body'ler içindir.
- Contact Sizing : Edge ve Face'ler içindir. Parçalar arasındaki kontak bölgelerde hassas mesh yapısı ayarlanabilir.
- Refinement : Vertex, Edge ve Face'ler içindir.
- Face Meshing : Mapped ya da Pave meshleme için uygundur.
- Match kontrol : Edge ve face'ler içindir.
- Pinch : Vertex ve edge'ler içindir. Geometri üzerinde mesh işlemine dahil etmeyeceğimiz unsurları çıkartabiliriz.
- İnflation : Edge ve face'ler içindir.
- Contact Match : Matching meshleme içindir.
- Node Merge ve Move : Node'lar içindir.
- Cutcell meshing için sadece sizing ve inflation uygundur.

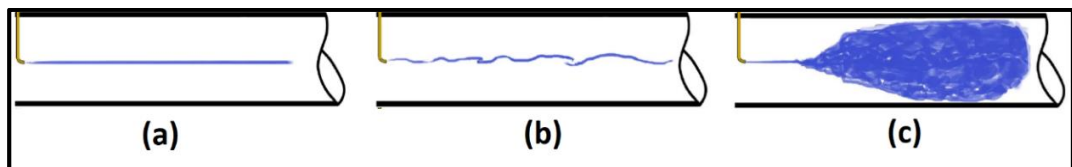
Element size, Number of division ve bias factor ile meshleme işlemine çeşitli dağılımlar verebiliriz. Behavior ayarı soft olursa global ayarlardan etkilenir, hard olursa global ayarlardan etkilenmez. (ANSYS Fluent Tutorial Guide 2011; Mohammad Jadidi, 2020)

- Defeaturing Local Mesh : Boyutlara göre ayar yapılabilir. Kaba mesh yapısı ile küçük unsurlar kaldırılır, ince mesh elemanları ile küçük unsurlar yakalanır.

4.1.2. Reynolds Sayısı, Türbülans ve Türbülans Modelleri

Türbülans, akışkanın hareketi sırasında görülen rastlantısal, düzensiz, karmaşık üç boyutlu girdap hareketleriyle tanımlanabilir. (ATİK, 2021) Şekil 4.7 de akış şekilleri görülmektedir.

Şekil 4.7. Akış Şekilleri (a) Laminer, (b) Geçiş, (c) Türbülanslı (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır. Reynolds sayısı, bir sıvının hızını veya akış modelini kontrol etmede viskozite etkisinin önemli olduğu sıvı sistemlerini

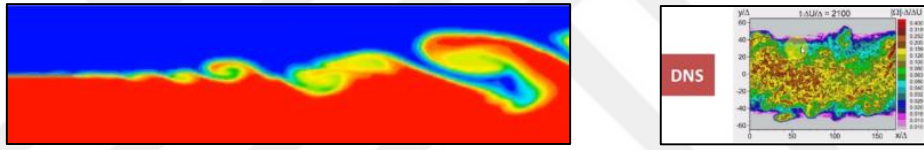
kategorize etmek için kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Bundan dolayı, reynolds sayısı laminar akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır. (Udemy, 2023)

$$Re = \frac{\rho V s d}{\mu} = \frac{\rho V s L}{\mu} \quad (4.1)$$

- Vs : akışkanın hızı ➤ Dış akışda
- $d = \text{boru çapı}$ $L = \text{uzunluk}$ Yüzeylerde : $Re > 500\ 000$
- $\mu =$ Engel etrafında : $Re > 20\ 000$
 $\text{akışkanın dinamik viskozitesi}$
- $\rho = \text{akışkanın yoğunluğu}$ ➤ İç Akışda : $Re > 2\ 300$

4.1.2.1.DNS (Direct Numerical Simulation)

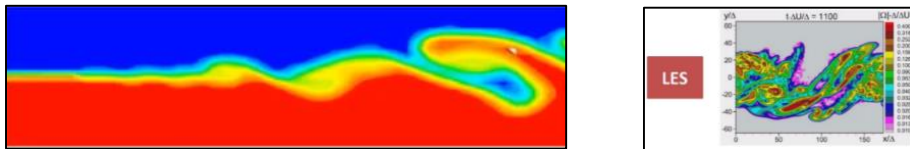
Şekil 4.8. DNS Akış Görünümü (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



Güçlü basitleştirmeler ve varsayımlar dikkate alınmadıkça Navier-Stokes denklemlerinin analitik çözümü yoktur ve doğrudan çözümlenmeleri DNS (Direct Numerical Simulation) hesaplama sınırlamaları nedeniyle gerçek mühendislik durumlarında neredeyse imkansızdır. DNS kullanımı yalnızca akademik uygulamalarla sınırlıdır. (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

4.1.2.2.LES (Large Eddy Simulation)

Şekil 4.9. LES Akış Görünümü (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

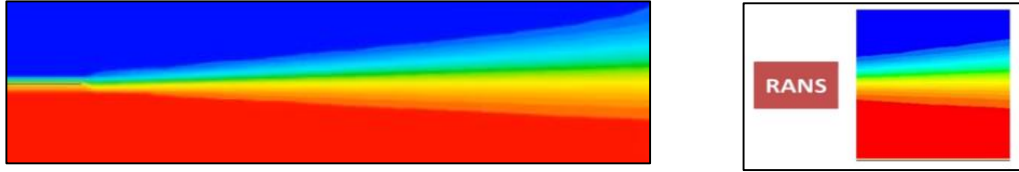


Tüm türbülans ölçeklerini modellemek yerine, akışın en fazla enerji içeren yapılarını hesaplamak için daha ayrıntılı yaklaşımlar kullanmak gerekebilir. Bu

yaklaşımına Large Eddy Simulation (LES) denir. (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

4.1.2.3.RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)

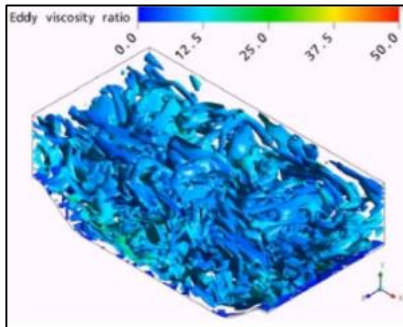
Şekil 4.10. RANS Akış Görünümü (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



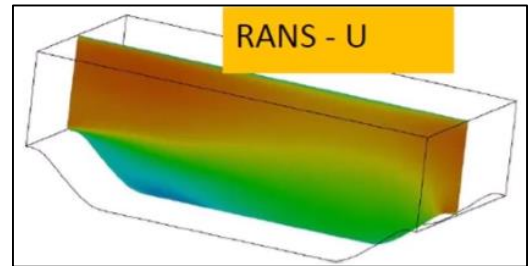
Reynolds-Ortalama Navier-Stokes denklemlerini çözmek için bu hipoteze dayalı olarak birçok türbülans modeli geliştirilmiştir ve bunlar RANS türbülans modelleri olarak bilinir. En yaygın olanları Spalart-Allmaras, k-e, k- ω ve SST'dir. RANS modelleri günümüzde endüstride çoğunlukla düşük hesaplama maliyetleri ve makul doğrulukları nedeniyle yaygın olarak uygulanmaktadır. (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

- Eddy Viscosity Models: Türbülans ve viskozite kullanarak modeller. Bu çalışmada kullandığımız method genel olarak bu metottur. Şekil 4.11. de model görünümü görülmektedir.
- Reynolds-Stress Models: Doğrudan taşıma denklemleri çözerek modeller. Karmaşık geometriler için uygundur. Hesaplamalar yoğundur. Şekil 4.12. de model görünümü görülmektedir. Şekil 4.13. de karşılaştırmalar görülmektedir.

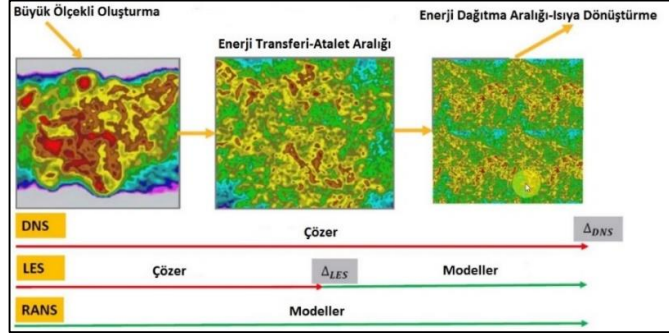
Şekil 4.11. Eddy Viscosity Model Görünümü (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



Şekil 4.12. RANS Model Görünümü (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



Şekil 4.13. DNS-LES-RANS Süreci (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

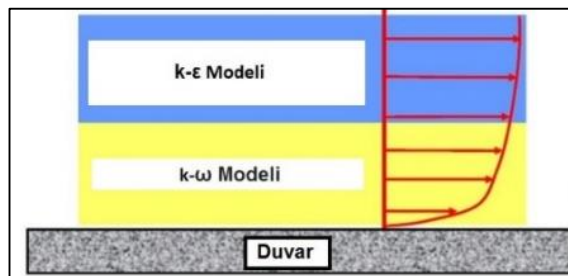


4.1.2.4. Türbülans Model Seçimi

Fluent birçok türbülans model seçeneği sunar. Bazıları yalnızca çok özel uygulamalar için kullanılır. Başlangıç için Realizable $k-\epsilon$ veya $k-\omega$ modelleri tavsiye edilen seçeneklerdir. Akış ayırma ya da ince çözülmemiş ısı transfer profilleri içeren uygulamalar gibi sınır katmanlarının yüksek doğrulukta çözünürlüğün kritik olduğu durumlarda SST $k-\omega$ tercih edilir. (ANSYS Fluent Tutorial Guide, 2011)

- **$k-\epsilon$ Modeli;** İyi bilinen ve Free-Stream(Merkez akış) kararlı ve sayısal olarak iyi çalışan yöntemdir. Viskoz alt katman aracılığıyla duvara entegre edilmesi zordur.
- **$k-\omega$ Modeli;** Basit ve sağlam formülasyonu, üstün yakın duvar formülasyonu, $k-\epsilon$ modeli için gerekli olan karmaşık doğrusal olmayan duvara yakın sönümlleme fonksiyonlarını içermez ve bu nedenle daha doğru ve sağlamdır.
- **Baseline (BSL) $k-\omega$ Modeli;** $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ 'nın kombinasyonudur. Yakın duvar çözümü için $k-\omega$ metodunu, merkez akışta ise $k-\epsilon$ metodunu kullanır. Şekil 4.14. de model görünümü gösterilmektedir.

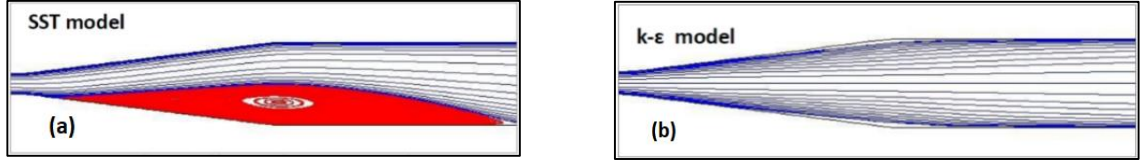
Şekil 4.14. Baseline Türbülans Model Görünümü (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



- **Shear Stress Transport (SST) Model;** Kayma gerilme taşınımının hesaplanamadığı BSL metoduna göre tercih edilmektedir. Kendine özgü

denklemleri mevcuttur. Şekil 4.15. de SST ve $k-\epsilon$ model görünüşleri gösterilmektedir.

Şekil 4.15. Türbülans Model Karşılaştırması (a) SST, (b) $k-\epsilon$ (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)



Realizable $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ Standart durumlar için tavsiye edilir.

4.1.3. Çözüm Aşamaları

4.1.3.1. Basınç tabanlı çözücü için gerekli olan Basınç-hız Bağlantısı

- Varsayılan olarak SIMPLE seçilidir. Rutin sıkıştırılmaz çoğu akış uygulamaları için idealdir.
- Sıkıştırılabilir akışlar için COUPLE seçilmelidir. Yüzdürme ve dönme içeren sıkıştırılmaz akışlar içinde seçilir. Yakınsama sorunları olan SIMPLE yerine de kullanılabilir.
- PISO geçici hesaplamalar için kullanılır.
- SIMPLeC öncelikle akademik ilgi alanına sahiptir.

4.1.3.2. Uzamsal Ayırıklaştırma Ayarları

Çoğu durumlarda varsayılan ayarlar önerilir. Yer çekimin etkinleştirildiği doğal konveksiyon problemlerde, basınç ayırıklaştırması PRESTO olarak değiştirilmelidir. Second order şemalar yakınsama için önerilmektedir. RSM türbülans modeli, Nonequilibrium duvar fonksiyonu, basınç çözümünde PRESTO şeması, basınç-hız ilişkisi için SIMPLeC şeması, momentum denklemi için QUICK şeması, türbülans kinetik enerjisi ve yayılım oranı için ise Second Order Upwind şeması ve Reynolds gerilmelerinin çözümünde ise First Order Upwind şeması değişkenlerinin kullanılması memnun edici sonuçlar verdiğini göstermektedir. (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

4.1.4. Initialization (Başlatma)

Fluent, yinelemelere başlamadan önce tüm çözüm değişkenlerinin başlatılması demektir. Temel olarak bu, meshdeki her bir hücrede her çözüm için bir değer atanması gerektiği anlamına gelir. (Udemy, CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2023)

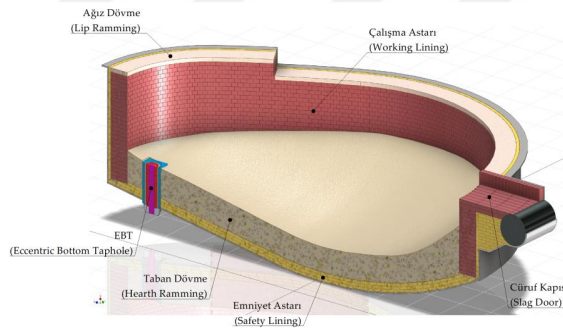
5 farklı initialization yöntemi mevcuttur;

- Hybrid Initialization (Varsayılan) : Çoğu durumda kullanılır.
- FMG initialization : Daha gerçekçi bir başlangıç tahmini sağlar, ancak uzun sürer.
- Standart başlatma
- Patch values
- Önceki bir çözümden başlama

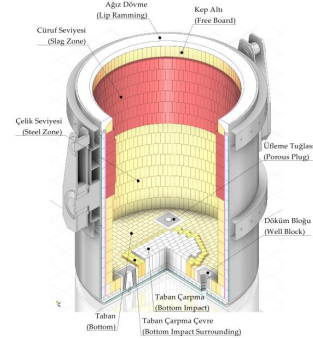
4.2.EAO, POTA ve EBT TASARIMI

Bu çalışmada Türkiye’de bulunan bir demir-çelik firmasında; 1650 °C sıcaklık ve 120t sıvı çelik kapasitesine sahip Elektrik ark ocağının, 1000 °C sıcaklık ve 100t sıvı çelik kapasitesindeki potaya iki farklı tipteki EBT ile sıvı çeliğin boşaltılması incelenmiştir. Standart silindirik EBT yerine konik EBT tasarımı kullanılarak döküm hızı, türbülans yoğunluğu, zamana bağlı döküm kapasitesi gibi parametreler incelenmiştir. Çeliğin ergitildiği EAO, ergitilen çeliğin döküm yapıldığı silindirik ve konik EBT ve sıvı çeliğin döküm yapıldığı pota fırının Autodesk Inventör programındaki çizimleri Şekil 4.16., Şekil 4.17., Şekil 4.18. deki gibidir.

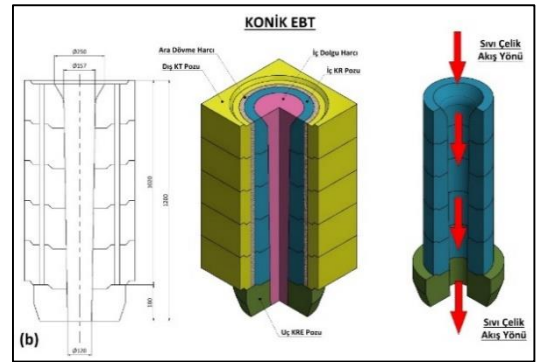
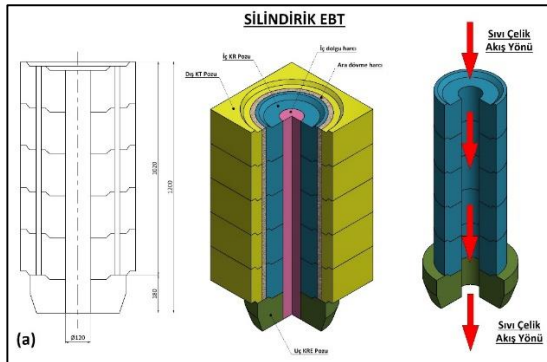
Şekil 4.16. EAO 3d Model Ve Bölümleri



Şekil 4.17. Pota 3d Model Ve Bölümleri



Şekil 4.18. EBT 3d Model ve Ölçüleri (a) Silindirik (b) Konik



EAO, Pota ve EBT refrakter tuğlaları manyezit karbon içerikli olup aşınmaya ve yüksek sıcaklıklara dayanım göstermektedir.[8] Fırının tüm yüzeyleri manyezit karbon refrakter tuğla ve manyezit harçlar ile örülmektedir. 1650 °C sıvı metal sadece refrakter harç ve tuğlalar ile temasta olup refrakterler aşınıp ömrünü tamamlayıncaya kadar döküm işlemi sürmektedir. EAO-EBT-Pota sıvı çeliğin akış yolunun gerçekleştiği hacmin iki farklı EBT tasarımı Autodesk Inventor programında 3d katı model olarak modellenmiştir. .ipt formatındaki dosyalar Ansys Workbench de açılmak üzere .step formatına dönüştürülmüştür. Tasarımlar Autodesk Inventor ve SpaceClaim'de programlarında, analizler ise ANSYS Fluent programında yapılmıştır.

4.3.SIVI ÇELİK AKIŞ ANALİZİ

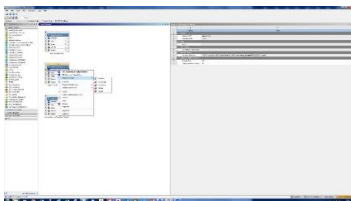
4.3.1. Adım-1

Öncelikli olarak sıvı çeliğin akış yolunun (EAO-EBT-Pota) gerçekleştiği hacmin 2 farklı EBT tasarımına göre 3d olarak Autodesk Inventor ortamında çizimi gerçekleştirilip Ansys Workbench dosya formatı olan .step formatına dönüştürülmüştür.

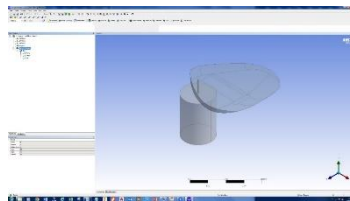
4.3.2. Adım-2

Ansys Workbench ekranı açılarak Fluent analiz sekmesi seçilmiştir. Seçili ekranda geometry kısmına .step formatı ile kaydetmiş olduğumuz 3d sıvı çelik hacmi import edilmiştir. Import edilen hacim space claim programında 3 part (EAO-EBT-Pota) şeklinde ayrılmış olup 3 farklı body elde edilmiştir. Ansys design modeller ekranında çizim generate edilerek onay verilmiş olup bodyler isimlendirilip tek part altında toplanmıştır. Şekil 4.19. da workbench ekranı, şekil 4.20. de design modeller ekranı, şekil 4.21. de spaceclaim ekranı gösterilmektedir.

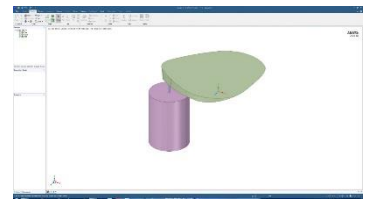
Görsel 4.1. Ansys Workbench Ekranı



Görsel 4.2. Ansys Design Modeler Ekranı



Görsel 4.3. Ansys SpaceClaim Ekranı



4.3.3. Adım-3

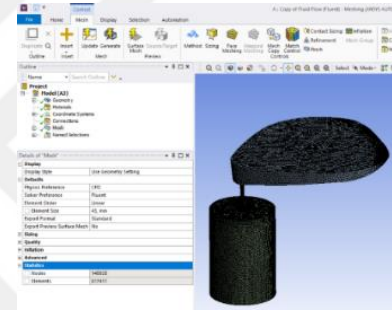
Geometri ekranından sonra mesh ekranına geçilmiştir. Mesh kısmı için daha öncede bahsedildiği gibi en optimum çalışma şekli seçilmiştir. Tüm bodylere automatic

method+Body sizing uygulanmıştır. Element size max. 200 mm. min 10 mm olarak seçilmiştir. Ek olarak pota ve EBT bodylerde akışın hızlı olduğu kısımlarda daha iyi sonuç alınması adına edge sizing uygulaması yapılmış olup local olarak mesh boyutu minimuma çekilmiştir. Capture curvature ve capture proximity sekmeleri açılarak geometrinin boyut değişikliği olduğu bölgelerde mesh boyutları geometriye uygun ayarlanmıştır. Element Quality, Skewness, Orthogonal Quality ve Aspect ratio değerleri istenilen değer aralıklarında olduğu kontrol edilmiştir. Mesh özellikleri tablo 4.1. de gösterilmektedir. Name Selection kısmında EAO üst yüzey ile Pota üst yüzey kısımları outlet(çıkış) yüzeyleri olarak isimlendirilmiştir. Bu koşullar altında 148,928 Nodes ve 817,411 Element kullanılmış olup şekil 4.22. de gösterilmiştir.

Tablo.4.1. Mesh Özellikleri

Mesh Metric	Element Quality	Aspect Ratio	Orthogonal Quality	Skewness
Min	0,0313	1,1576	0,0259	2,1434-007
Max	1.000	60,039	0,9970	0,9740
Average	0,8508	1,7967	0,7914	0,2072
Standart Deviation	0,0924	0,4522	0,1125	0,1141

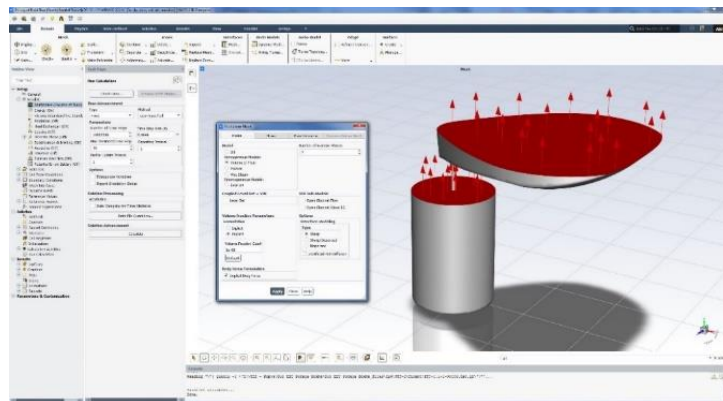
Görsel.4.4. Mesh Özellikleri



4.3.4. Adım-4

Solution sekmesinde çözüm parametreleri giriş işlemleri yapılmıştır. Solver tipi olarak mach sayısı 0-3 arasında olması nedeniyle Pressured-based, zamana bağlı olması nedeniyle transient ve yer çekimi etkisi olması nedeniyle y yönünde yer çekimi -9.81 olarak ayarlanmıştır. Sonrasında Multiphase sekmesi açılarak VOF/Implicit/Implicit Body Force parametreleri seçilmiştir. Problemimizde yakınsama gerektiren ve gerinim çok düşük olması nedeniyle implicit seçilmiştir. Şekil 4.23. de fluent multiphase ekranı gösterilmektedir.

Görsel 4.5. Fluent Multiphase Ekranı

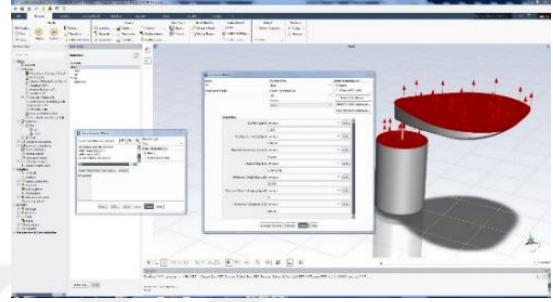


Çalışma koşullarımız altında hava ve sıvı çelik malzemeleriyle işlem yapılacağından dolayı ikinci malzeme olarak sıvı çelik programa tanımlanmıştır. Sıvı çelik malzeme özellikleri tablo 4.2. de gösterilmiştir. Sonrasında tekrar phase sekmesi açılarak malzeme isimleri hava ve sıvı çelik olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.24. de fluent malzeme ekranı gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Sıvı çelik malzeme özellikleri

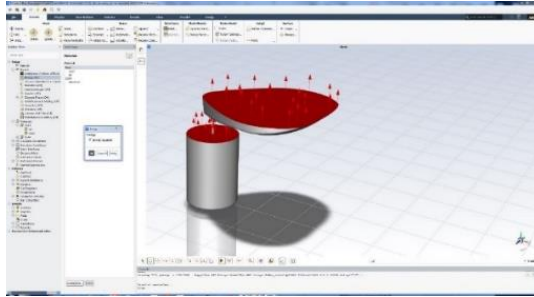
Yoğunluk, kg/m ³	6900
Özısı, j/kg.K	481,482
Viskozite, kg/m.s	0,0075
Sıcaklık, K	1813
Termal İletkenlik, W/m.K	80,4
Moleküler Ağırlık, kg/kmol	55,845
Standart Entalpi, j/kg.mol	-8.24e+11

Görsel 4.6. Fluent Malzeme Ekranı

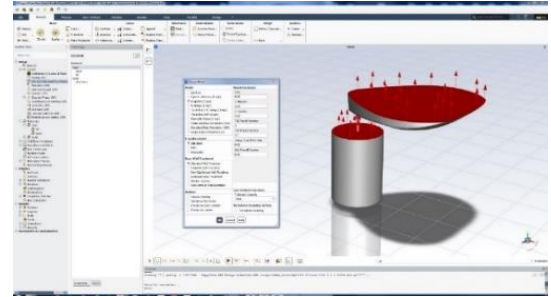


Çalışma şartları altında ısı transferi gerçekleşeceği sebebiyle enerji denklemleri açılmıştır. Viscous ekranında ise k-epsilon/Standart/Standart Wall Function sekmeleri seçilmiştir. Yakın duvar çözümü problemimizde gerekmediği ve daha basite indirgemek amacıyla k-e modeli seçilmiştir. Şekil 4.25. de fluent enerji ekranı ve şekil 4.26. da fluent viscous ekranı gösterilmektedir.

Görsel 4.7. Fluent Enerji Ekranı

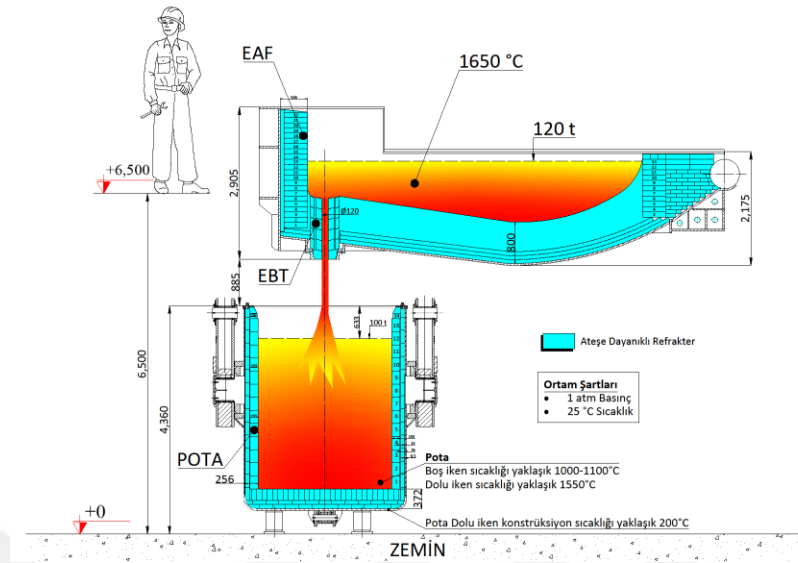


Görsel 4.8. Fluent Viscous Ekranı

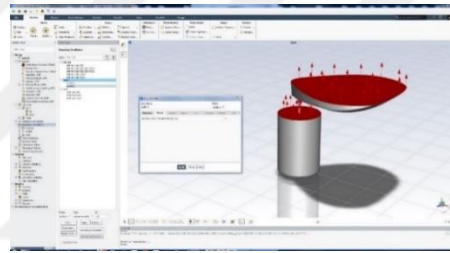


Boundary conditional olarak, akış şemasında iki adet outlet kısmı olduğu için, Outlet-1 EAO üst yüzeyi Outlet/Mixture olarak seçilmiş olup akış sıcaklığı olarak 1923 K (1650 °C) girilmiştir. Outlet-2 Pota üst yüzey Outlet/Mixture olarak seçilmiş olup akış sıcaklığı olarak 1273 K (1000 °C) girilmiştir. Diğer tüm yüzeyler ortam koşulları altında bırakılmıştır. Sıvı çelik sınır şartları şekil 4.27. de gösterilmiştir. Şekil 4.28. de fluent boundary conditional ekranı gösterilmektedir.

Şekil 4.19. EAO Sıvı Çelik Sınır Şartları

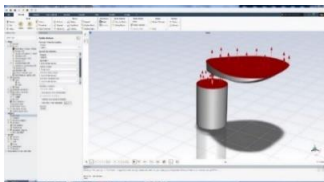


Görsel 4.9. Fluent Boundary Conditional Ekranı

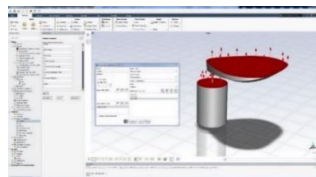


Method sekmesinde ise varsayılan ayarlara ek olarak Second order Upwind sekmeleri seçilmiştir. Çoğu durumlarda varsayılan ayarlar önerilir. Yerçekimin etkinleştirildiği doğal konveksiyon problemlerde, basınç ayrıklaştırması PRESTO olarak değiştirilmelidir. Second order şemalar yakınsama için önerilmektedir. Report definitions sekmesinde sonuç almak istediğimiz parametrelerin grafik ekranları oluşturulmuştur. Zamana bağlı olarak Akış Hızı, Tonaj ve Türbülans grafikleri çizdirilmiştir. Residual ve Converge ekranları aşağıdaki gibidir. Şekil 4.29. da fluent methos, şekil 4.30. da fluent report, şekil 4.31. de fluent residual ve converge ekranları gösterilmektedir.

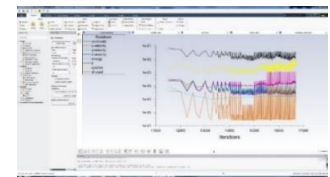
Görsel 4.10. Fluent Method Ekranı



Görsel 4.11. Fluent Report Definitions Ekranı

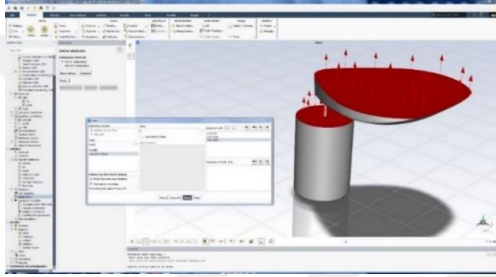


Görsel 4.12. Fluent Residual Ve Converge Ekranı

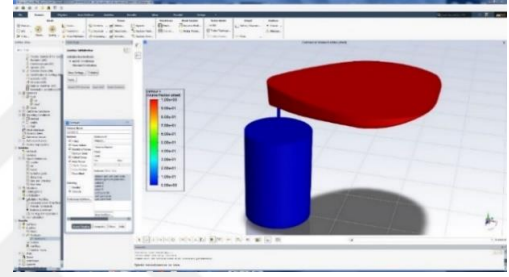


Sonuç ekranını kayıt işlemi olarak her 10 time stepte kayıt olarak girilmiştir. Bu tamamen dosya kayıt işlemi ile ilgilidir. Initialization ekranında ilk olarak Hybrid initialization işlemi yapılmış olup sonrasında Patch sekmesinden Steel/Volume fraction/Part steel seçilip value:1 olarak girilmiştir. Burada yapılan işlem sıvı çeliğin konum olarak çizim ekranında hangi body'e ait olduğunu belirtmektir. Hybrid initialization biraz gerçeklik payı vardır, ilk tahmini yapar uzun süre almaz. FMG tipi initialization uzun süre alır. Daha sonra Contour sekmesinden tüm yüzeyler seçilerek fraction olarak çizim ekranda görüntülenmiştir. Şekil 4.32. de fluent initialization, şekil 4.33. de fluent contour ekranları gösterilmektedir.

Görsel 4.13. Fluent Initialization Ekranı



Görsel 4.14. Fluent Contour Ekranı



Run calculation sekmesinde ise 1 time steps en az değer olan 20 iteration girilmiştir. 20 iterasyon en az girilmesi gereken iterasyon olarak öngörülmektedir. Aksi taktirde yanlış sonuçlar alınabilir. Time step zamanı ise ön görülen en alt değer(0.005) olarak 0.0049 girilmiştir. İşlemin uzun sürmesinden kaynaklı olarak çözümün tamamlanabilmesi için time steps yüksek değer girilmiştir.



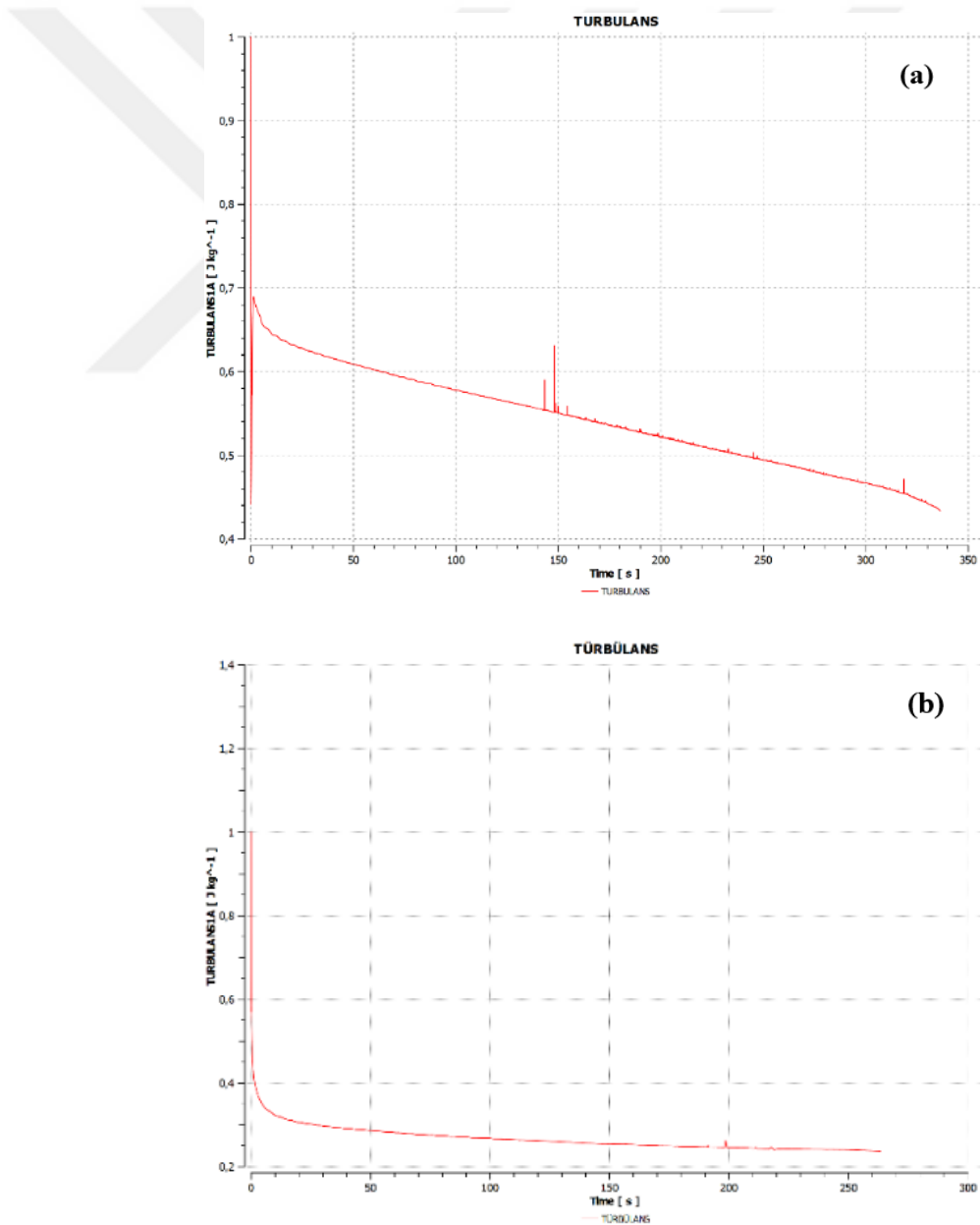
BEŞİNCİ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1.SİLİNDİRİK VE KONİK EBT SONUÇ GRAFİKLERİ

5.1.1. EBT Sıvı Çelik Türbülans Yoğunluk Grafikleri

Şekil 5.1. de iki farklı tipteki EBT'nin sıvı çelik türbülans yoğunluk sonuçları verilmektedir. Türbülans yoğunluğu bir kg çelikte akıştan kaynaklı olarak meydana gelen joule cinsinden ortaya çıkan enerji miktarıdır. Döküm süresi boyunca silindirik EBT de türbülans yoğunluğu 0.70-0.45 J/kg aralığında iken konik EBT de ise bu değer 0.40-0.25 J/kg aralığındadır. Grafiklerden de anlaşıldığı üzere konik EBT deki türbülans yoğunluğu silindirik EBT'ye göre daha düşüktür.

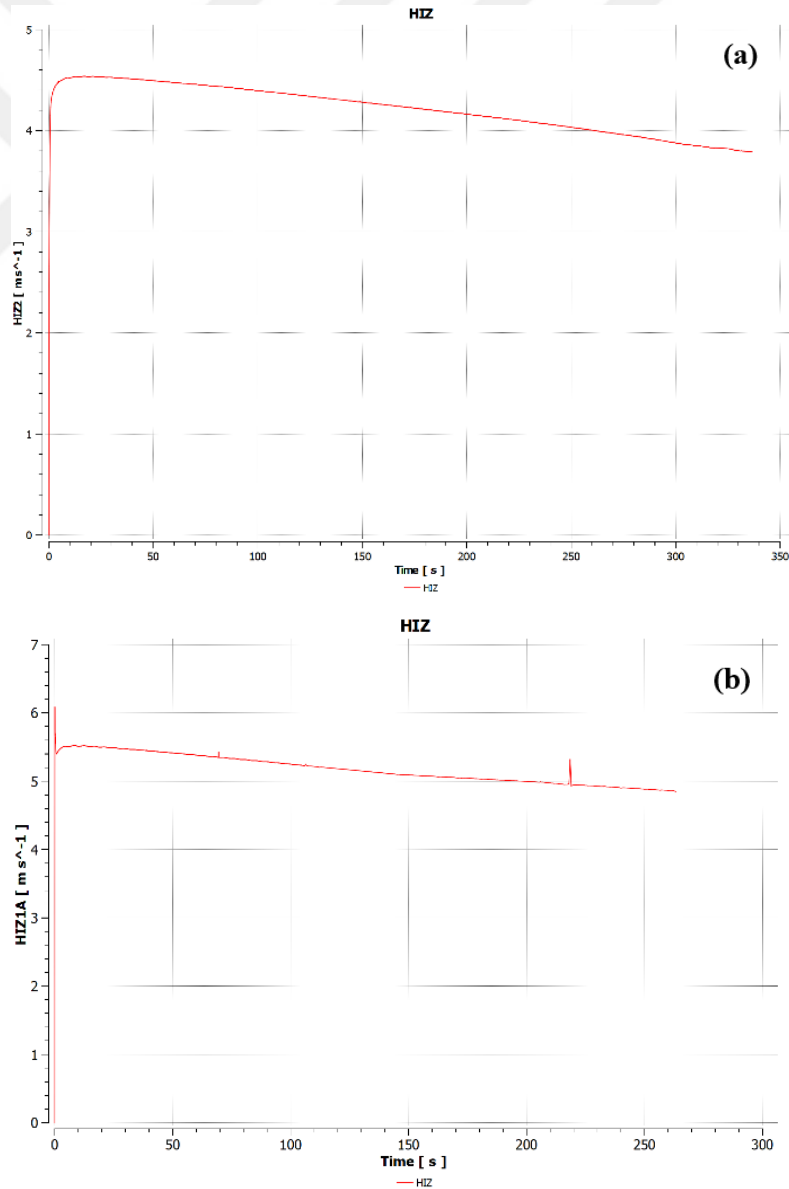
Şekil 5.1. EBT Sıvı Çelik Türbülans Yoğunluğunun Zamana Bağlı Değişimi (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT



5.1.2. EBT Sıvı Çelik Hız Grafikleri

Şekil 5.2. de iki farklı tipteki EBT'nin sıvı çelik döküm hızı sonuçları verilmektedir. -y yönünde 9.81 m/s^2 yerçekimi ivmesi etkisi altında ve eşit çıkış çaplarına sahip iki farklı EBT de döküm süresi boyunca silindirik EBT sıvı akış hızı -y yönünde ortalama 4.2 m/s iken konik EBT de ise bu değer -y yönünde ortalama 5.5 m/s civarındadır. Bunun sonucunda döküm işlemi silindirik EBT de 330 sn. de, konik EBT de ise 265 sn. de tamamlanmaktadır. Silindirik EBT de deliğin silindirik olmasından kaynaklı olarak akışta basınç kaybı oluşmaktadır. Basınç kaybı döküm deliği boyunca akış hızının düşmesine ve döküm süresinin artmasına neden olmaktadır.

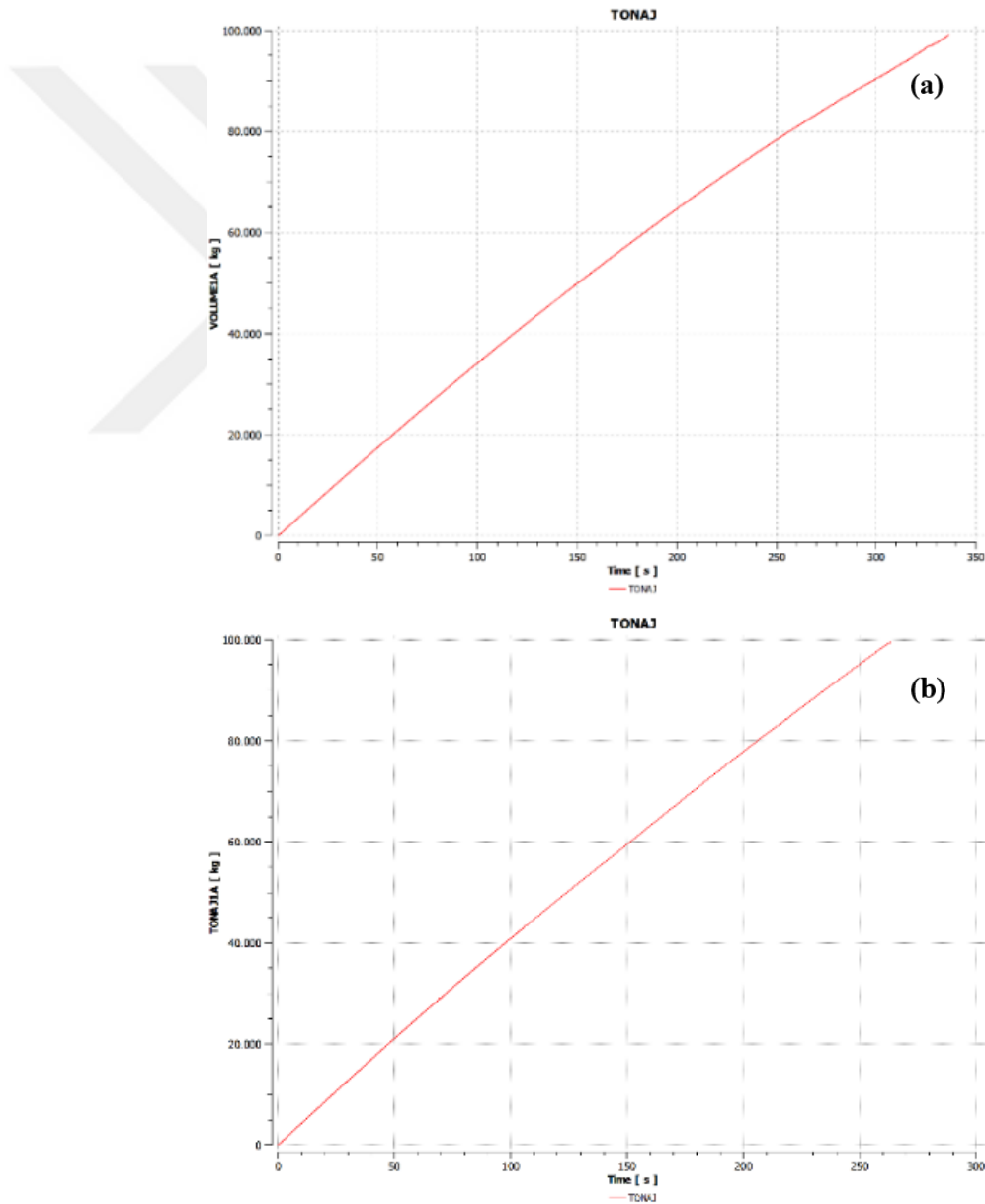
Şekil 5.2. EBT Sıvı Çelik Hızının Zamana Bağlı Değişimi (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT



5.1.3. EBT Sıvı Çelik Kapasite/Zaman Grafikleri

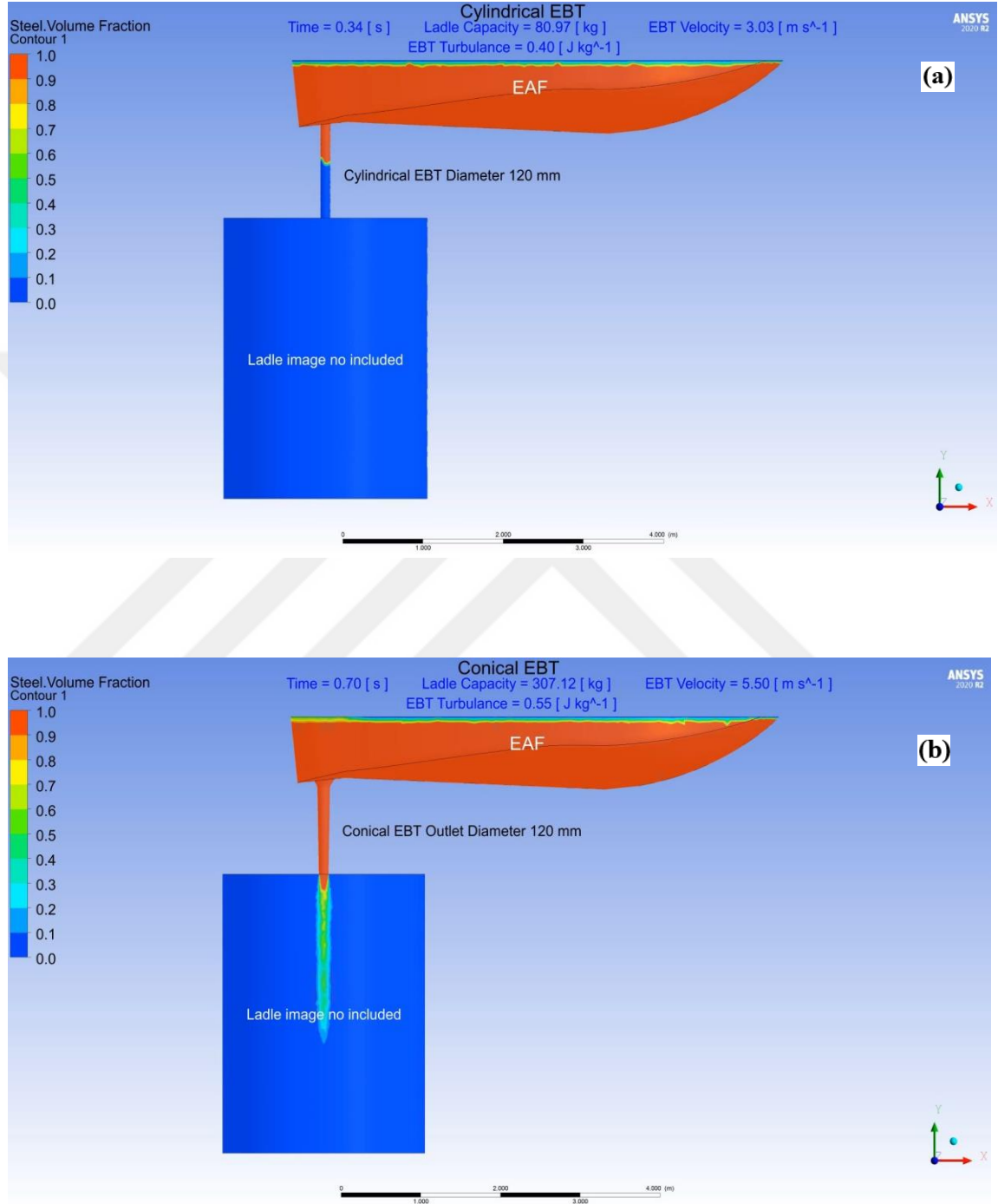
Şekil 5.3. de iki farklı tipteki EBT'nin zamana bağlı toplam sıvı çelik döküm sonuçları verilmiştir. Döküm süresi boyunca EBT'lerde meydana gelen türbülans, akış hızını büyük oranda etkilemiştir. EAO'da bulunan 120t sıvı çeliğin 100t'luk kısmını silindirik EBT ile döküm işleminde düşük hız ve yüksek türbülans nedeniyle 335 sn. gibi bir sürede potaya boşaltılırken, konik EBT ile döküm işleminde ise yüksek hız ve düşük türbülans nedeniyle yaklaşık 265 saniyede potaya boşaltılmıştır.

Şekil 5.3. Sıvı Çelik Boşalma Kapasitesinin Zamana Bağlı Değişimi (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT

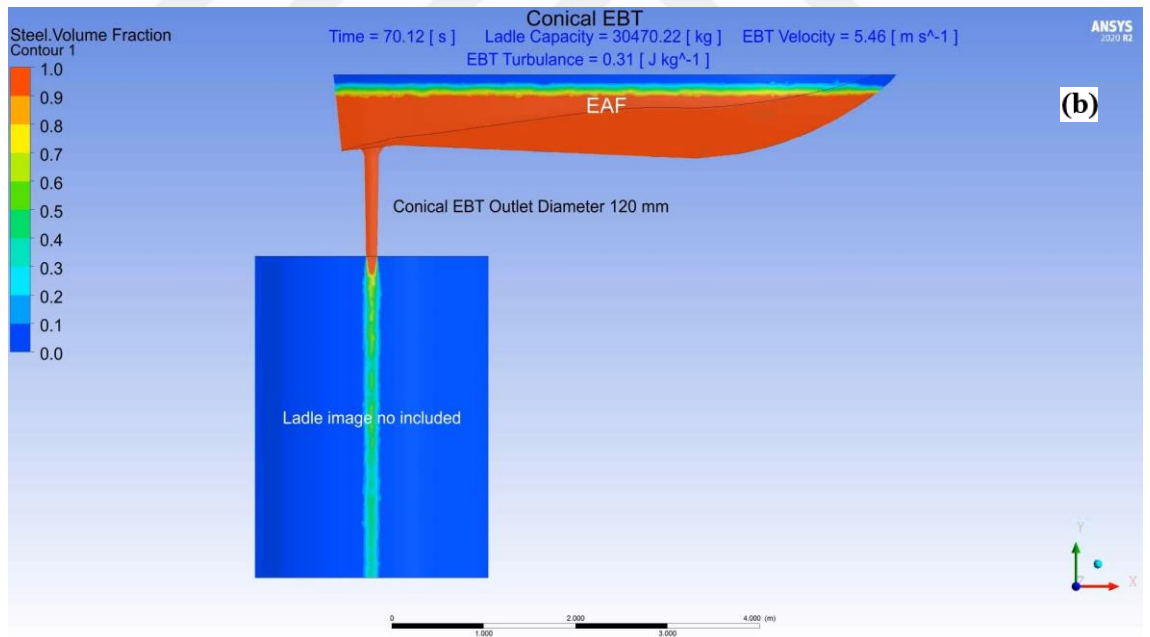
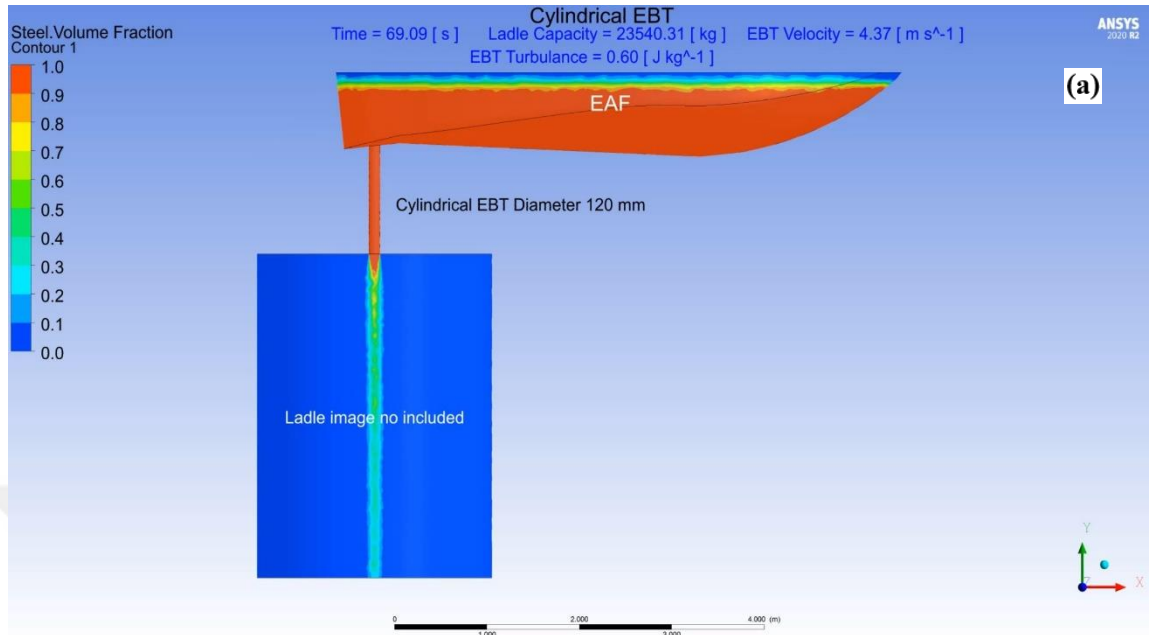


5.1.4. Silindirik ve Konik EBT Sıvı Çelik Simülasyon Görselleri

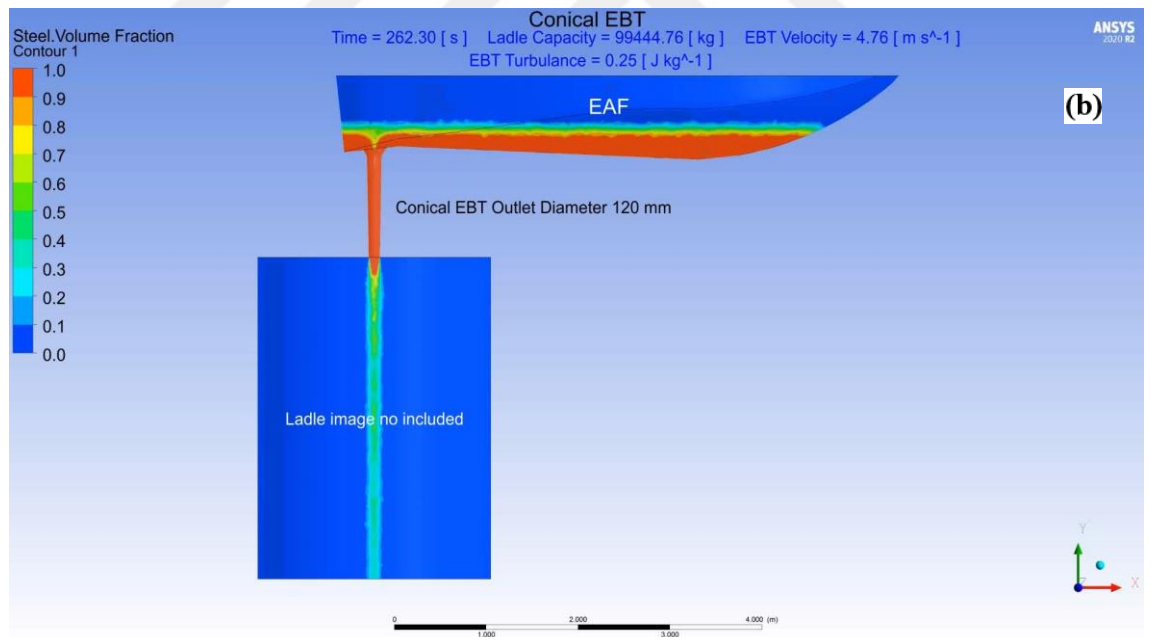
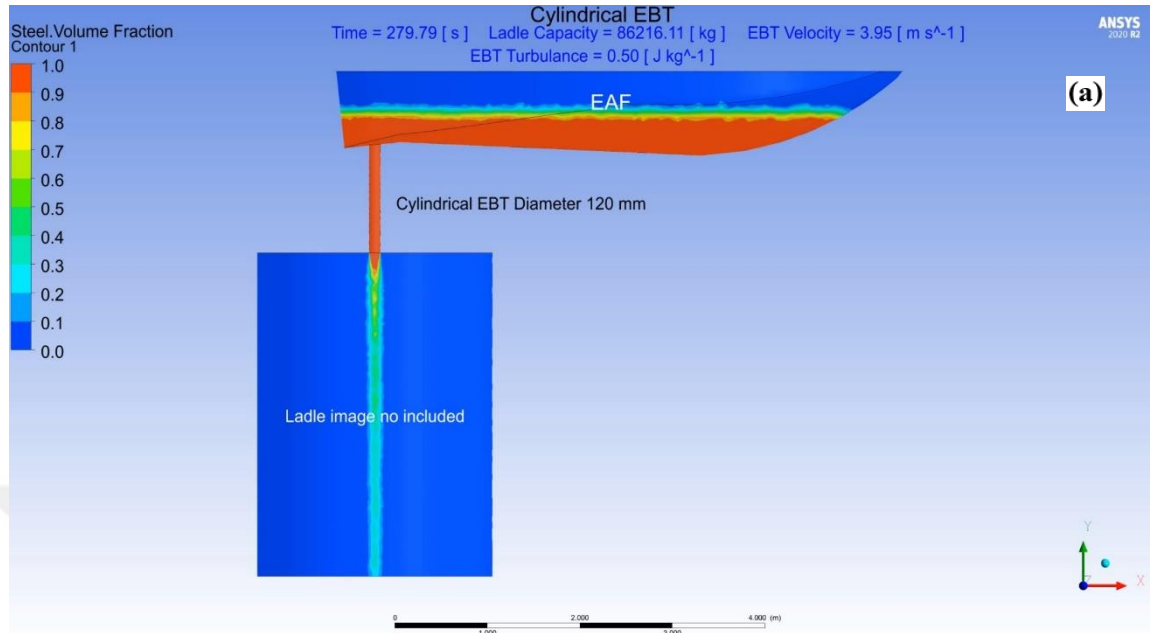
Görsel 5.1. 1. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT



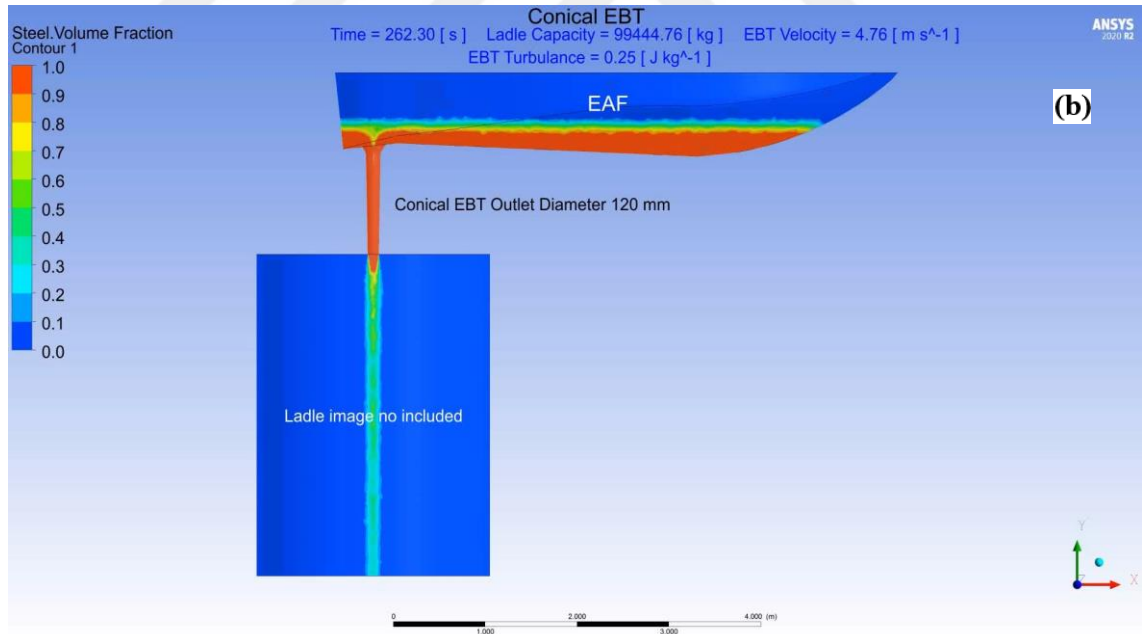
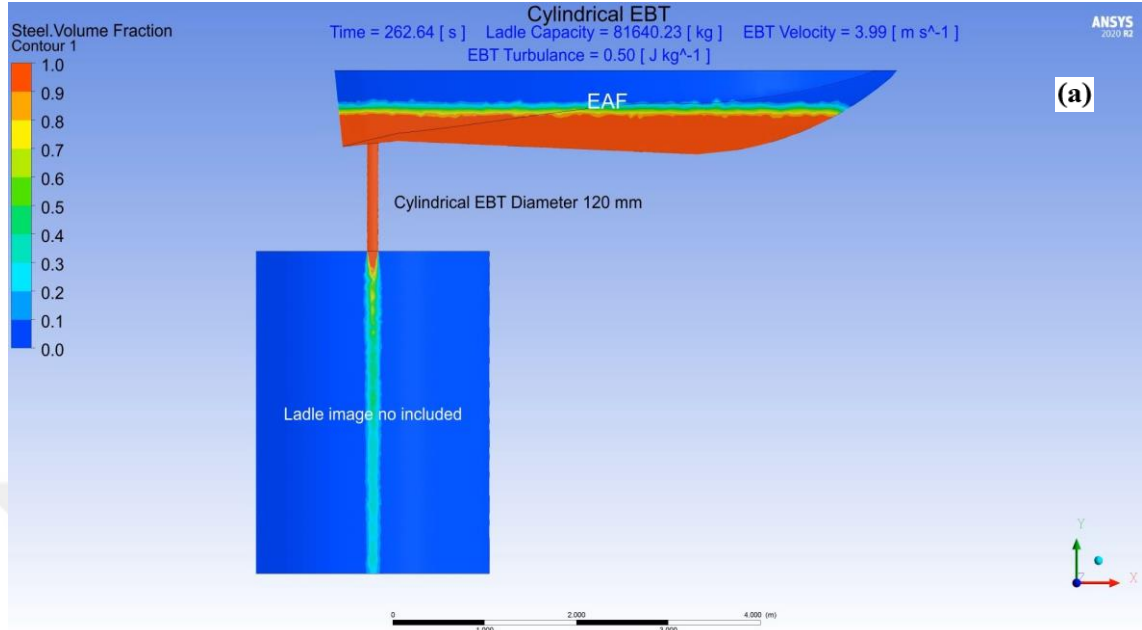
Görsel 5.2. 70. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT



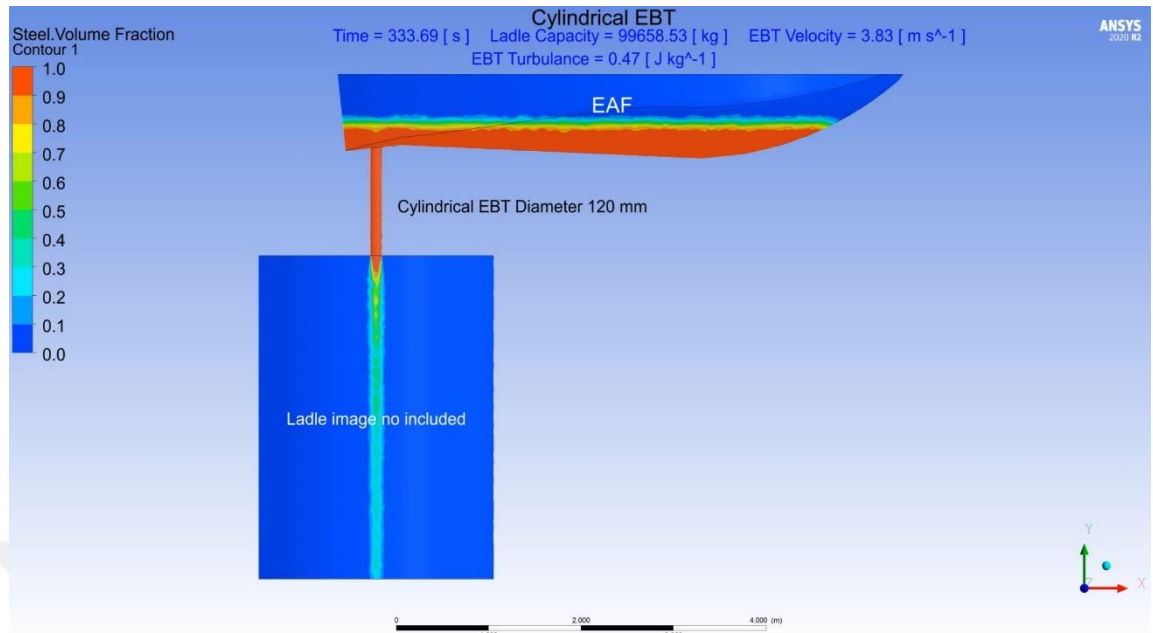
Görsel 5.4. 210. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türlülans Görselleri (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT



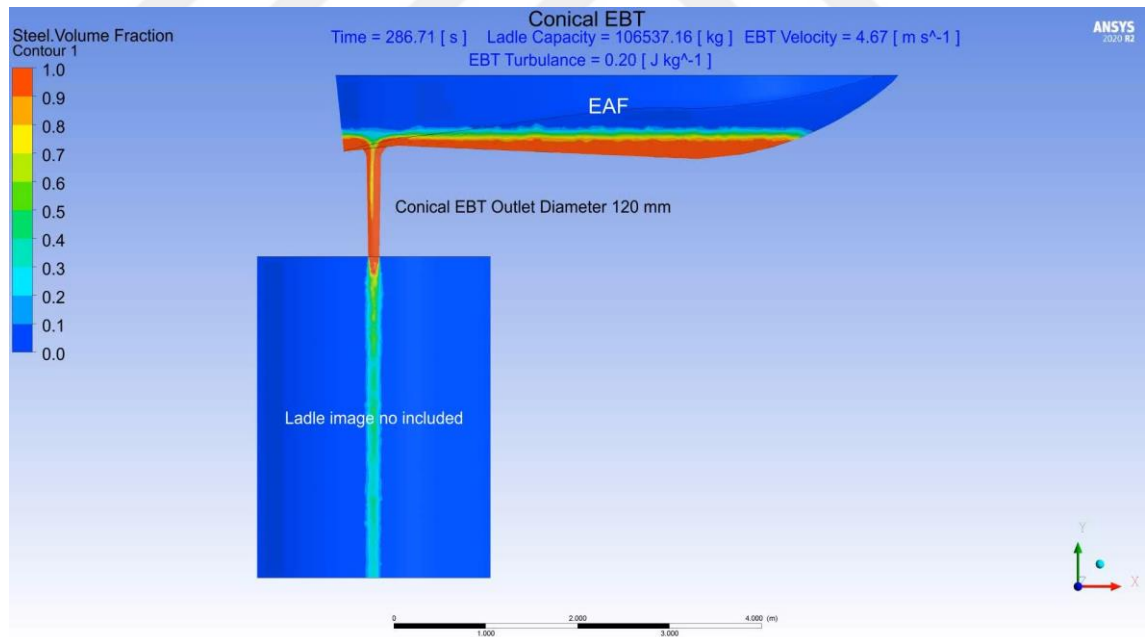
Görsel 5.5. 265. Saniye EBT Kapasite/Hız/Türlölans Görselleri (a) Silindirik EBT (b) Konik EBT



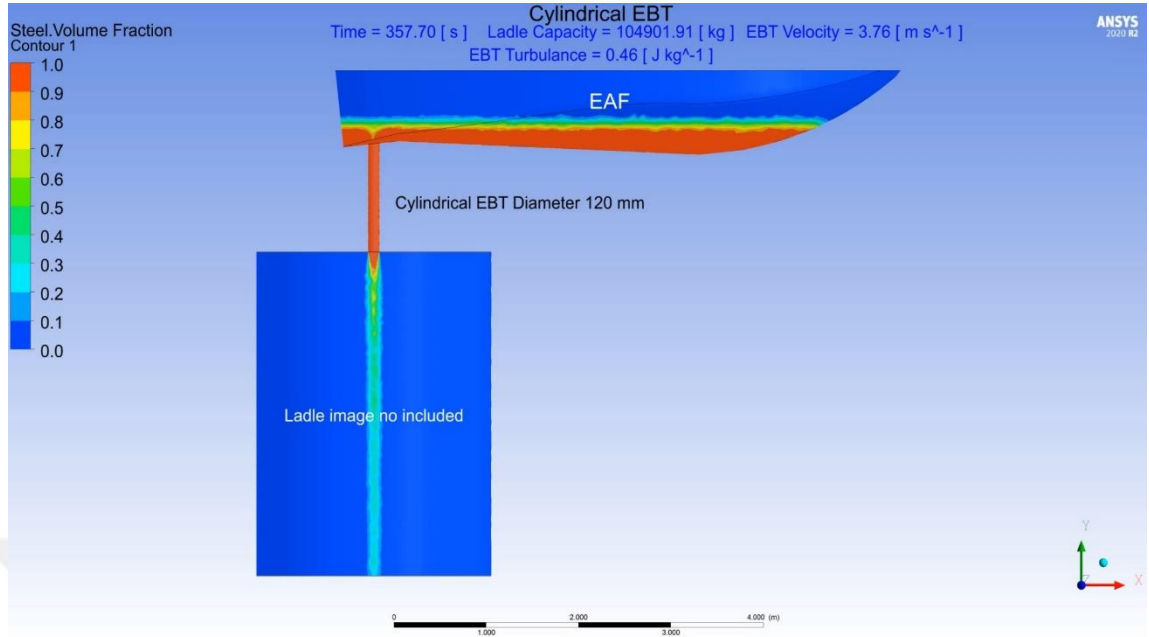
Görsel 5.6. 335. Saniye Silindirik EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri



Görsel 5.7. 286. Saniye Konik EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri



Görsel 5.8. 360. Saniye Silindirik EBT Kapasite/Hız/Türbülans Görselleri



Sonuç grafikleri Ansys CFD Post ekranında chart sekmesinde ayrı ayrı oluşturulmuştur. Grafikler XY-Transient tipinde oluşturulmuştur. Simulasyonlar CFD Post ekranında oluşturulmuştur.

X ekseninde Time parametresi tüm grafikler için seçilmiştir. Y ekseninde ise;

Türbülans için; $ave(TurbulenceKineticEnergy)@part\ ebt$

Hız için; $ave(Velocityv)@interior\ part\ ebt\ part\ pota$

Kapasite için; $Time*ave(Volume.Flow.Rate*Steel.Density)@interior\ part\ ebt\ part\ pota$

ifadeleri parametre olarak yazılıp grafikler çizdirilmiştir.



ALTINCI BÖLÜM
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6. SONUÇLAR

1. Konik EBT, silindirik EBT'ye göre düşük türbülanslı akış sağlar. Düşük türbülanslı akıştan dolayı tuğla aşınması azalır ve tuğla ömrünün artmasını sağlar.
2. Döküm işlemi silindirik EBT ile 335 sn. de konik EBT ile 265 sn. de gerçekleşir. Konik EBT silindirik EBT'ye göre yaklaşık 60 sn. daha hızlı döküm işlemi gerçekleştirir. Bu süre farkından dolayı potadaki sıvı çelik sıcaklık kaybı bir miktar önlenmiş olur.
3. Yaklaşık 140 döküm yapılabilen silindirik bir EBT, ortalama 50 dökümden sonra aşınmalarla birlikte konik EBT döküm hızına ulaşır. Fakat silindirik EBT de türbülans kaynaklı düzensiz aşınmalar nedeniyle 140 döküm boyunca bir ya da iki kez tamir harcı ile tamir yapılır. Konik EBT de daha düşük türbülanslı akış nedeniyle düzensiz aşınma olmadığı için tamir olmadan ortalama 140 dökümlük prosesini tamamlar. (M. Kirschen, C. Rahm, J. Jeitler, G. Hackl 2008).
4. Silindirik EBT'nin tamir süreleri de göz önüne alındığında; 140 dökümlük prosesin yaklaşık 70 dökümü konik EBT'ye göre 60 saniye daha uzun sürede gerçekleşir. Bir ocağın bir dökümlük prosesi 45-50 dk olup günde 30, yılda ise 10,800 döküm aldığı düşünülür ise yılda 10,800 dökümlük prosesin ortalama 5,400 dökümünde konik EBT 90 saat kazanç sağlamaktadır. Bu kazanç yılda yaklaşık EAO'nın 110 döküm daha fazla almasını sağlar. Ek olarak daha az iş gücü sağlamakta olup insan faktöründen kaynaklı hataları önler.
5. Konik EBT ile döküm yapılan bir çelik üretim tesisinde % 1 oranında kapasitenin artması Dünya Çelik Birliği tarafından açıklanan 2022 yılı verilerine göre yıllık 35 milyon ton çelik üretimi yapılan Türkiye'de 350,000 ton kapasite artmasını sağlar.
6. Konik EBT ile yapılan dökümlerde EAO, EBT ve pota kısımlarında bulunan çalışma astarı refrakter tuğlaları sıvı metal ile 60 sn daha az temas sağlamasına ve böylelikle çalışma astarı refrakter tuğla ömürlerinin artmasını sağlar.
7. Sıvı metalin ocaktan potaya dökümü esnasında; konik EBT daha kararlı ve düşük türbülanslı akışıyla silindirik EBT'ye göre sıvı çeliğin atmosfer ile daha az temasını sağlar. Bunun sonucunda atmosferde bulunan azot gibi istenmeyen elementlerin sıvı metale geçişinin azalmasını sağlar.
8. Konik EBT'nin tek dezavantajı yatırım ve üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

KAYNAKÇA

- ANSYS, Inc. (2011). Using the VOF Model. *ANSYS Fluent Tutorial Guide*, 839 - 867. Retrieved from : <https://www.yumpu.com/en/document/view/2459518/ansys-fluent-tutorial-guide>.
- Atik, H. (2021). Hava Aracı Tasarımında Türbülansın Önemi. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Mühendis ve Makine Dergisi*, 1(11), 40-44.
- Badr, K., Cappel, J., Kirschen, M., Rahm, C. (2009). Improvements in EAF by using a smart refractory system with conical tap holes. *Article in Stahl und Eisen Journal*, 129(11), 2-6.
- Chen, X., Liu, Y. (2018). *Finite Element Modelling and Simulation with ANSYS Workbench* (2nd ed.). Florida: CRC Press/Taylor&Francis Group
- Dubois, D., Hanna, A., Jandl, C., Kirschen, M., Mishra, S., Motkowicz, R., Strohmayer, G., Swickard, D. (2011). i-TAP: Performance Improvement of the BOF Tapping System at ArcelorMittal U.S.A. *AISTech 2011 - The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, U.S.A*, 1(1), 1083 – 1088. <https://www.researchgate.net/publication/276401427>
- Esen, A. N. (2022). Farklı Çalışma Parametrelerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu ile Kritik Isı Akısının Tahmini. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(22), 444-452.
- Henning, B., Le Grange, L.A., Shapiro, M. (2004). DC Furnace Containment Vessel Design Using Computational Fluid Dynamics. *Tenth International Ferroalloys Congress, South Africa*, 1(1), 565-572. <https://pyrometallurgy.co.za/InfaconX/032.pdf>
- Jadidi, M. (2020). CFD Tutorials. *ANSYS Fluent Basic Module 01-02-03-04-05-06-07-08-09*, 1-15. Retrieved from : <https://www.researchgate.net/publication/342232955>.
- Karataş, B. U. (2019). *Demir Çelik Sektöründe Kullanılan Mgo-C Pota Tuğlalarının Proses Hazırlık Evresinde Mekanik Ve Korozyon Dayanım Davranışlarının İncelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi) Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Hackl, G., Jeitler, C., Kirschen, M., Rahm, C. (2008). Steel Flow Characteristics In Cfd Improved EAF Bottom Tapping Systems. *Archives Of Metallurgy And Materials Journal*, 53(2), 2-8.
- Lecheler, S. (2022). *Computational Fluid Dynamics: Getting Started Quickly With ANSYS*. (1st ed.). Wiesbaden: Springer
- RHI AG, (2016). The Journal of Refractory Innovations. *RHI Journal*, 1(1), 1-79
- Şimşek, A. S. (2023). *Süpersonik Hızlar İçin Roket Burnu Etrafındaki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Sarioğlu, N., Sesver, A., Timuçin, M. (2013). Elektrik Ark Ocağı Çelik Cüruflarında Faklı Oranlarda MgO Doygunluğunda Mg-C Tuğlanın Çözünürlük Davranışı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1-5.
- Steenkamp, J. D., Gregurek D., Reynolds Q.G., Flores G. A., Joubert, H., Mackey, P. J. (2022). *Furnace Tapping 2022*. (1st ed.). Wiesbaden: Springer
- Engineering Academy. (2023). CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi. *Udemy Online Eğitim Kursları*. Erişim Adresi : <https://www.udemy.com/course/ansys-fluent-aks-analizleri-uygulamalaryla-cfd-egitimi/learn/lecture/22767529?start=0> - overview
- Yılmaz, H. (2012). *Ev Tipi Buzdolabı Kondenserinin Kabindibi Performansının Sayısal Araştırılması*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi) Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yılmaz, S. (2023). *Refrakter Malzemeler: Klasifikasyon-Ürünler-Özellikler-Standartlar-Bilgisayarlı Astar Tasarımı*. (1st ed.). İstanbul: İÜC Yayınevi.
- Zhang, Y., Deshpande, R. (2007). A Methodology for Blast Furnace Hearth Inner Profile Analysis. *Journal of Heat Transfer*, 1(129), 1729-1731.

DİZİN

-3-

3d, xiv, xvii, 8, 9, 31

-A-

Akış, vi, xi, xiv, 11, 25, 26, 27, 28, 31,
34

ANSYS, v, vi, vii, viii, 4, 22, 25, 28, 41

-E-

EAO, v, x, xi, xiv, xv, xvii, 3, 4, 8, 9,
10, 12, 13, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38,
40

EBT, V, VI, VII, VIII, v, vi, vii, viii, x,
xi, xii, xiv, xv, xvii, 3, 4, 7, 8, 10, 11,
12, 13, 30, 31, 32, 37, 38, 40

-H-

HAD, xvi, 4, 21

Hız, xii, xvi, 37, 38

-K-

Kapasite, xii, xv, 37, 38

Konik, vi, 10, 11, 30, 37, 38, 40

k-ε, xvi, 28

k-ω, xvi, 27, 28

-M-

Mesh, xi, xiii, xiv, xv, 22, 23, 24, 25,
31, 32

MgC-O, 7, 8

MgO, xiii, 7, 8, 9, 10, 41

-P-

Pota, 2, 3, 4, 8, 30, 32, 37, 40

-R-

Re, xvi, 26

Refrakter, v, x, xiii, 3, 7, 8, 42

-S-

Sıvı Çelik, xi, xii, xiii, xv, 31, 34, 37, 38

Silindirik, vi, 3, 10, 11, 30, 37, 38, 40

-T-

Tap hole, 2, 3

Tonaj, 34

Türbülans, 2, 3, 4, 10, 11, 26, 27, 28,
29, 30, 37, 38, 40