

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ERGİMİŞ METALİ POTADAN KUM KALIBA
DÖKME SÜRECİNDEKİ
TERMAL ETKİLEŞİMLER

DUYGU YALÇIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ERGİMİŞ METALİ POTADAN KUM
KALIBA DÖKME SÜRECİNDEKİ
TERMAL ETKİLEŞİMLER

DUYGU YALÇIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. İLYAS KANDEMİR

GEBZE
2017

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**THERMAL INTERACTIONS OF MOLTEN
METAL DURING THE TRANSFER FROM
THE LADLE TO THE SAND MOULD**

DUYGU YALÇIN

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. İLYAS KANDEMİR**

**GEBZE
2017**



GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/06/2017 tarih ve 2017/35 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29/06/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Duygu YALÇIN'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Doç. Dr. İLYAS KANDEMİR

ÜYE

:Doç. Dr. AHMET ZAFER ŞENALP

ÜYE

:Yrd. Doç. Dr. AHMET ZİYA SAYDAM

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada Sonlu Elemanlar yöntemi ile ergimiş metalin potadan kalıba aktarım sürecindeki termal etkileşimler incelenmiştir. Dökümhane koşullarında, dökümün akışı incelenmiş, fiziksel ölçümler yapılmış, pota ile kalıp arasındaki metalin ısı kaybı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Teorik olarak kalıba aktarılan ısı, metalin döküm sonundaki ısısı ve analiz sonunda elde edilen kayıp ısılar incelenmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı olarak Ansys-Transient Thermal ve üç boyutlu yazılım olarak Inventor-Autodesk kullanılmıştır. Kalıp içindeki akışı gözlemlemek için Magma-Soft yazılımından faydalanılmıştır.



Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Analizi, Gri Dökme Demir, Döküm, Isı Transferi.

SUMMARY

In this study thermal interactions of the molten metal during the transfer from the ladle to the sand mould is analyzed by using finite element method. Under the foundary conditions, the flow of the pouring is observed, physical measurements are done and heat losses are between the ladle and the sand mould is analyzed by using finite element methods. Heat is obtained with the summation of the teorical energy that is transfered to the mold, final heat of the metal and the loss heat that is calculated by the Ansys-Transient Thermal as a finite element analysis software and Inventor-Autodesk as a three dimensional software are used. To observe the pouring in the moulding, Magma-Soft software is utilized.

Key Words: Finite Element Analysis, Gray Cast Iron, Pouring, Heat Transfer.

TEŞEKKÜR

Başta yüksek lisans eğitiminde ve tez çalışmamda bilgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. İlyas KANDEMİR'e,

Çalışmam boyunca bilgisi ve tecrübeleri ile tezime katkı sunan Tuncay YELKENCİ'ye,

ve göstermiş oldukları desteklerden dolayı YALÇIN ailesine en içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. DÖKME DEMİR	4
2.1. Dökme Demirin Üstünlükleri ve Farkları	4
2.2. Gri Dökme Demir ve Özellikleri	6
2.2.1. Gri Dökme Demir Bileşimindeki Elementlerin Etkisi	7
2.2.2. Dökme Demirlerin Yapı Bileşenleri (mikro yapıları)	10
2.3. Döküm Aşamaları	14
2.3.1. Döküm hazırlığı	15
2.3.1.1. Model Yapımı	15
2.3.1.2. Yolluk Tasarımı	16
2.3.1.3. Maça Yapımı	20
2.3.1.4. Kalıp Kumu ve Kalıp Hazırlama	21
2.3.1.5. Ergitme	23
2.3.2. Döküm İşlemi	24
2.3.3. Döküm Sonrası	26
2.3.3.1. Katılaşma	26
2.3.3.2. Kalıp Bozma	27
2.3.3.3. Yüzey Temizleme	27
3. UYGULAMALAR	29
3.1. Kalıbın Dışında Isı transferi	29
3.2. Kalıbın İçinde Isı Transferi	36

3.2.1. Kalıp İçinde Hız Değişimleri	39
3.2.2. Ansys Transient Thermal Analizi	39
4. SONUÇLAR ve YORUMLAR	46
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	53



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
A	: Alan
α	: Isıl yayınım katsayısı
α	: Ferrit
AFS	: American Foundry Society (Amerikan Dökümcüler Derneği)
B	: Kalıp Sertliği
C	: Karbon
$^{\circ}C$	: Carbon Equivalent (Karbon Eşdeğeri)
CE	: Kükürt
c	: Özgül ısı
d	: Çap
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
δ	: Delta
E	: Enerji
ε	: Işıma neşretme katsayısı
Fe	: Demir
Fe – C	: Demir- grafit
Fe_3C	Sementit
$Fe_3C + \alpha$	: Perlit
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Yükseklik
h	: Isı transfer katsayısı
HB	: Brinell Sertliği
γ	: Gama
$\gamma - Fe$	: Östenit
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilâtı)
J	: Joule

K	: Kelvin
k	: Isı iletim katsayısı
kg	: Kilogram
kWh	: Kilowatt saat
L	: Katılma ısı
m	: Kütle
Mn	: Mangan
MnS	: Mangan Sülfür
μ	: Dinamik viskozite
n	: Katılma sabiti
ν	: Kinematik viskozite
P	: Basınç
P	: Fosfor
Q	Debi
q	: Isı
ρ	: Yoğunluk
r	: Yarıçap
Re	: Reynolds sayısı
Sn	: Kükürt
sn	: Saniye
Si	: Silisyum
cm^3	: Santimetreküp
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti
t	: Zaman
t_d	: Döküm zamanı
T	: Sıcaklık
W	: Watt
V	: Hız
3B	: 3 Boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Farklı tipteki dökme demirlerde karbon ve silisyum miktarları.	5
2.2: Mekanik özellikleri için en elverişli bir grafit yapısı.	6
2.3: Demir-Karbon Diyagramı.	11
2.4: TS EN ISO 945-1 Standardına göre yapraksı grafit tipleri.	12
2.5: Döküm aşamaları.	14
2.6: Çıkıcı ve besleyiciler.	16
2.7: Yolluk sistemi.	16
2.8: Havşa.	17
2.9: Yolluk girişi ve çıkışı.	20
2.10: Fren diski ve maçası kesiti.	20
2.11: İndüksiyon ocağı zamana bağlı ortalama sıcaklığı.	24
2.12: Akış rejimleri.	25
2.13: İnce ve kalın boyuttaki bilyelerin yüzeyde yarattığı etki.	28
3.1: Döküm potası.	29
3.2: Döküm esnasında kalıp ve döküm potası.	30
3.3: Pota ağzı ve havşa mesafesi.	31
3.4: a) Döküm anının resmi, b) Geometri.	31
3.5: a) Döküm anının 3B geometrisi, b) Geometrinin ısı transferi.	32
3.6: a) Havşanın ısı transferi, b) Metal ile dolu havşa.	35
3.7: Havşada radyal doğrultuda ısı transferi.	35
3.8: Döküm parçası ile kum kalıbın montajı.	40
3.9: Kum kalıp kesiti.	40
3.10: a) Kalıp kumu mesh geometrisi, b) Metal mesh geometrisi, c) Metal detay mesh geometrisi, d) Mesh geometrisi detay bilgileri.	41
3.11: Ansys-Transient Thermal analizinden alınan sıcaklık dağılımı.	42
3.12: Metal ve kum kalıbın sıcaklık değişimi.	43
3.13: Magma-Soft yazılımı analizi: Döküm sonu kum sıcaklık dağılımı.	43
3.14: Isı transferleri çeşitleri.	44
3.15: Metal ve kum kalıbın sıcaklık değişimi.	44
3.16: Toplam Isı Akısı.	45

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Gri Dökme Demir Bileşenindeki Elementlerin Yüzdesel Katkıları.	7
2.2: Döküm Aşamaları.	14
3.1: Döküm anının geometrisi.	32
3.2: Akış geometrisinin ısı transferi parametreleri.	34
3.3: Havşa geometrisinin ısı transferi parametreleri.	35
3.4: Konveksiyon ve ışıınım ile gerçekleşen ısı transferleri.	36



1. GİRİŞ

Türkiye, döküm sektörü üretiminde, dünyada ilk 10 içerisinde yer almaktadır. Bu üretimin % 70'ten fazlasını karşılayan gri dökme demir; 1350 – 1450 °C civarında ergitilerek dökülür. Bu denli yüksek sıcaklıkta yapılan ergitme işlemi, döküm işleminin toplam maliyetinin % 10'una denk düşmektedir. Ancak bu ısının bir kısmı, ergitilmiş metalin potadan kalıba aktarılması esnasında akışkanın hava ile teması ve kalıp içerisinde kumun ısınması ile kaybolmaktadır.

Döküm anındaki sıcaklığın pota içerisinde korunarak, akışkanın kalıba ilk giriş sıcaklığının belli bir değerin altına düşmemesi döküm kalitesi için önemlidir. Akışkanın kalıpta düzenli bir şekilde katılaşması için sıcaklık farklarının yüksek olmaması gereklidir. Hızlı bir sıcaklık değişimi malzemenin mikro yapısını bozmaktadır. Akışkanın potadan çıktıktan sonra en kısa zamanda kalıba dökümü sağlanmalıdır. En kısa zamanı belirleyecek önemli kriterler ise döküm yüksekliği, akışkanın döküm açısı, pota ağzı kesit alanı ve kalıp ağzı kesit alanıdır.

Çalışmada akışkanın potadan çıktıktan sonraki ilk geometrisi ile fiziksel koşullar ile belirlendikten sonra, akışın nasıl gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Kalıbın şeklini alan akışkan bu esnada sahip olduğu ısının bir kısmını kum kalıba aktarır. Döküm işlemi bittiğinde, akışkan kalıp boşluğunu doldurduğunda son sıcaklığı, ilk döküm sıcaklığından düşüktür. Çünkü ısının bir kısmını kalıba aktarmış bir kısmını da pota ile kalıp arasında havaya aktararak kaybetmiştir.

Teorik olarak döküm esnasında kaybedilen ısı hesaplanmış, analiz sonunda da kaybedilen ısı bulunmuştur. İlk durum ve son durum arasında ısıda farklar görülmüştür. Bu fark pota ile kalıp arasında gerçekleşen ısı kaybına eşit olacağı öngörülmüştür. Yapılan sonlu elemanlar analizinde bu ısı kaybının teorik hesap ile örtüşmesi incelenmiştir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Potadan kalıba aktarılan ergimiş metalin dökülmesi esnasında, döküm ürünlerinde pek çok problem ile karşılaşilmektedir. Özellikle ergimiş metalin sıcaklığının yüksek olması, 1350 – 1450 °C aralığında, bu sıcaklığın tehlike arz etmesi, döküm esnasında kontrolü sınırlamaktadır. Bu sıcaklıklardaki en ufak bir hata döküm sonucunu değiştirmekte, nihai üründe problemlere yol açmaktadır. Bu problemleri sınıflandırmak gerekirse; gaz hatası, kum düşme hatası, kum hatası, çöküntü hatası olarak sıralanabilir. Bu hataların sonucunda ürün fireli olarak nitelendirilebilmekte ve hurdaya ayrılmaktadır. Ürünü hurdaya ayıran bu hataların nedenleri ise gereğinden hızlı ve yavaş döküm, ihtiyaçtan fazla ve ya düşük sıcaklıkta döküm, fazla yüksekte yapılan döküm, fazla ve eksik metal ile döküm yapılması olarak sınıflandırılabilir.

Öte yandan döküm prosesinde nihai üründen belirli bir metalurjik yapıyı korunması beklenir. Akışkanın uzun süre potada bekletilmesi malzemenin metalurjik yapısında istenmeyen sonuçlara neden olabilmektedir. Örneğin akışkanın uzun süre potada beklemesi karbon miktarında düşüşe neden olacak, bu da nihai ürünün sertlik değerlerini değiştirecektir. Ayrıca akışkanı potada uzun süre bekletmemek için hızlı döküm gerçekleşmesi; akışkanın hızını ve akışkanın kalıp içerisindeki hareketini değiştirecektir. Döküm işleminin başarılı olabilmesi için, katılaşma başlamadan önce akışkanın kalıp boşluğuna sakın bir şekilde dolması oldukça önemlidir. Burada akışkanın hareketinden beklenti laminar akış şeklindedir. Ancak hızlı gerçekleşecek bir döküm akışta kaotik bir duruma, türbülansa sebebiyet verecektir. Ayrıca hızlı döküm akışkanın kalıba zarar vermesine, kalıptan parça koparma; kum düşmesi gibi hatalara, neden olabilmektedir. Bu da nihai üründe şekil bozukluğu anlamına gelmektedir.

Dökümün tüm aşamalarında ısı geçişleri incelenmiştir. Kalıp içindeki ısı geçişleri ve kalıp dışındaki hava ile termal etkileşim teorik olarak ve sonlu elemanlar analiz programı ile hesaplanmıştır.

Bu çalışmada ısı kayıp noktaları ve sebepleri belirlenerek döküm işleminin enerji kayıp noktaları incelenmiştir. Dökümhane koşullarında bu ısı kayıplarının bu ölçümlerin teknik yaklaşımla değil rastgele yapılıyor olması projenin bilimsel olarak da gerekliliğini ortaya koymaktadır. Türkiye’de henüz bu çalışmadaki yaklaşımın

yapılmaması, yenilikçi oluşu ve bilinmeyen bir noktayı aydınlatması projenin hem teknik hem de ticari açıdan getirisinin yüksek olacağını göstermektedir. Çalışmanın literatüre katkısı, döküm prosesinde karanlık bir noktayı aydınlatmak ve daha az enerji sarfıyatı ile dökümü yeniden tasarlamaya yol göstermek olarakır.



2. DÖKME DEMİR

Dökme demirler ergimiş sıvı demir ve alaşımlarından oluşan malzemelerin bir kalıp içerisine aktarılıp, kalıbın şeklini alması ve soğuyarak katılaşması ile oluşurlar [Web 1, 2017]. Dökme demirler bileşiminde % 2 ve daha fazla miktarda karbon bulunduran demir-karbon karışımlarıdır. Bileşiminde % 4'e kadar karbon ve % 3,5'e kadar silisyum bulunur [Cambell, 1991]. Dökme demirler, sıcak ve soğukta biçimlendirilmeye elverişli olmadığından yüksek sıcaklıkta ocaklarda ergitilip, döküldüğü şekilde soğutulan ve nihai haline ulaşan demir-karbon-silisyum alaşımıdır [Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi 1, 2011].

2.1. Dökme Demirin Üstünlükleri ve Farkları

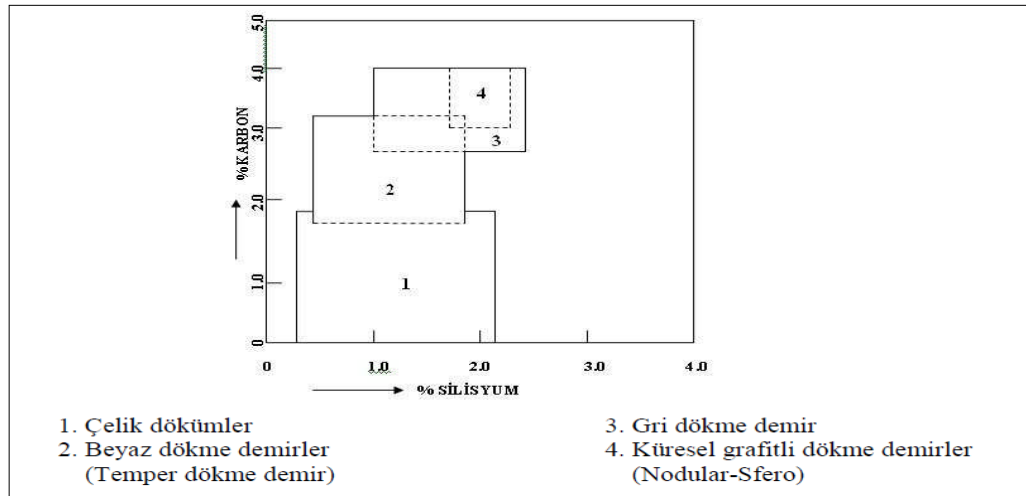
Dökme demirleri, diğer döküm türlerinden ayıran başlıca üstünlükleri vardır. Bu üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Dökme demirler düşük ergime sıcaklığına sahiptir. 1150 °C ile 1300 °C aralığında ergitme işlemi gerçekleştirilir. Bu sıcaklıklar çeliğin ergime sıcaklığına (1400 – 1550 °C) göre düşüktür.
- Dökme demirler döküldüklerin kabın şeklini kolayca alabilmeleri nedeniyle akışkanlık özellikleri iyi olarak değerlendirilir. Ayrıca çekme oranları düşüktür.
- Düşük ergime sıcaklığı sayesinde daha az enerjiye ihtiyaç duyulacağından, dökme demirlerin üretim maliyeti çeliğe göre daha düşüktür. Kum kalıpta yapılan döküm işlemi de diğer kalıp yöntemlerine (alçı, kokil, seramik vb.) daha kolay ve ucuza üretilir.
- Dökme demiri oluşturan kimyasal bileşenler oldukça geniş bir bileşen spektrumuna sahiptir. Bu da bileşen hazırlama işlemini daha kolay kılmaktadır.
- Dökme demirler torna, delme, kesme gibi talaşlı imalat işleme tekniğine elverişlidir. Ayrıca işleme esnasında harcanan enerji de oldukça düşüktür.
- Dökme demir alaşımını oluşturan metallerin eldesi kolay ve ucuzdur.
- Dökme demirlerin basma gerilmesi yüksektir. Yani kırılmaya karşı mukavemetli yapıya sahiptir.

- Dökme demirler aşınmaya ve korozyona karşı oldukça mukavemetli bir yapıya sahiptir [Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi 1, 2011], [Web 1, 2017].

Dökme demirler alaşımlarındaki kimyasal bileşenler ile farklı kimyasal özellikler kazanabilirler. Dökme demirlerin kimyasalına etki eden en önemli iki element ise karbon (C) ve silisyumdur (Si). Karbon ve silisyum metallerinin alaşım içindeki miktarı grafit oluşumunda etkilidir. Grafit yapısının oluşması kadar şekli ve miktarı da önemlidir. Grafit yapısı aşınma direncini arttırdığı, malzemeye kazandırdığı sertlik ile işleme kolaylığı sağladığı ve sürtünme direncini ve titreşimi azalttığı için dökme demirlerde tercih edilir. Karbon; demir karbür bileşiği, bileşik bağlı karbon, oluşturmak yerine dökme demirde serbest halde bulunarak grafit yapısının oluşmasını sağlar. % 2 ve üzerinde oluşan serbest karbon atomları demirde grafit yapısını oluşturur. Dökme demirde silisyum kullanılma nedeni ise silisyumun demir karbür oluşumunu azaltarak, grafit oluşumuna katkıda bulunmasıdır [Web 4, 2014], [Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi 1, 2011].

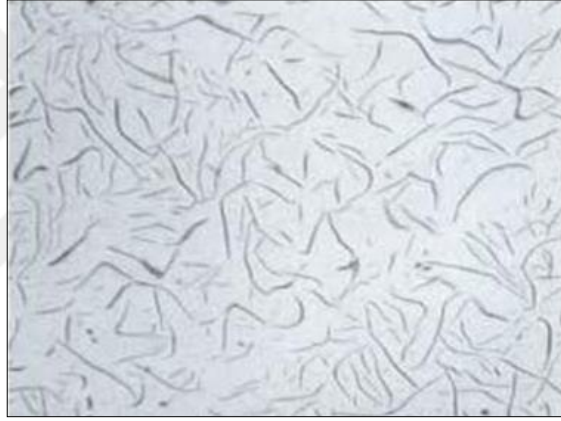
Dökme demirler yapılarındaki silis ve karbon miktarı arttıkça kimyasal yapıları değişeceği için, farklı bileşendeki dökme demirler farklı isimlerle adlandırılırlar. Şekil 2.1’de görüleceği gibi silis ve karbon miktarının değişimine göre çelik döküm, beyaz dökme döküm, gri dökme demir, temper dökme demir ve küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılırlar [Davis, 1996]. Endüstride kullanılan dökme demirlerin % 37’sini ise gri dökme demir oluşturur.



Şekil 2.1: Farklı tipteki dökme demirlerde karbon ve silisyum miktarları.

2.2. Gri Dökme Demir ve Özellikleri

Gri dökme demirlerin katılaşması ile yapısındaki serbest karbonun büyük çoğunluğu grafit yapraklarına dönüşür. Bu dökme demirlerin gri olarak adlandırılma nedeni; kırılma yüzeyindeki gri oluşumlardır. Yapısındaki grafit gri dökme demirin esmer renkli olmasını sağlar. Gri dökme demirin diğer dökümlerden bir farkı da ergimiş metalin yavaş soğumasıdır. Soğuyan metaldeki serbest karbon % 0,8'den daha küçüktür ve bu karbon, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi grafit yapı, yaprak şeklinde biçimlenir [Davis, 1996]. Bu grafit yapraklar, kalın kesitli döküm parçaların yapısında gözle görülebilecek niteliktedir [Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi 1, 2011], [Web 4, 2014], [Cambell, 1991].



Şekil 2.2: Mekanik özellikleri için en elverişli bir grafit yapısı.

Grafitin gerilme artırıcı etkisi ile gri dökme demirlerin çekme dayanımları düşüktür ve gri dökme demirler gevreklerdir. Ayrıca basma dayanımları ve sünekliği gayet iyidir. Bunlara ilaveten gri dökme demirlerin mukavemet derecesi, titreşim sönümlenme, termal yorulma direnci, kolay işlenmesi ve yağlanma kabiliyetleri ile gri dökme demirler makine parçaları üretiminde ve otomotiv sektöründe kullanıma elverişlidir. Sadece titreşim sönümlenme kapasitesine bakıldığında gri dökme demirler, çelikten 20 ila 25 kat daha iyidir. Gri dökme demirler özellikle fren sistemlerinde (fren ve debriyaj balatası, fren disk, kampana, şaft kaması, vb.), otomotiv motor blokları ve bağlantı parçaları, dişliler, vanalar, flanşlar ve borularda kullanılır [Santner and Goodrich, 2006], [Web 4, 2014].

Gri dökme demirlerde karbon ve silis dışında manganez, fosfor, kükürt, krom, vanadyum, molibden, nikel, bakır gibi elementler bulunur. Kükürt ve fosfor dökme demirde çok fazla istenmese de dökme demirin hammaddesi olan pikin içinde bulunmasından dolayı malzemeye karışırlar. Diğer elementler ise mikro yapıya istenen etkiyi sağlamak, grafitleşmeyi kontrol altında tutabilmek ve korozyona karşı direnç oluşturmak için ilave edilir [Web 4, 2014]. Tablo 2.1’de gri dökme demir bileşimindeki elementlerin yüzdesel katkıları verilmiştir [Santner and Goodrich, 2006].

Tablo 2.1: Gri dökme demir bileşimindeki elementlerin yüzdesel katkıları.

Element Adı	% Miktar
Karbon	2,00 – 4,50
Silisyum	1,00 – 3,00
Manganez	0,15 – 1,00
Fosfor	0,02 – 1,00
Kükürt	0,02 – 0,25

2.2.1. Gri Dökme Demir Bileşimindeki Elementlerin Etkisi

Gri dökme demirin beş ana bileşeni karbon, silisyum, manganez, fosfor ve kükürttür. Bu elementler dökme demirin mikro yapısında farklı etkilere sebep olur.

- Karbon

Karbon gri dökme demirde ergitilip soğutulduğunda iki farklı yapı ile gözlenir. Bunlar demir ile bileşik oluşturduğu sementit (Fe_3C) ve bileşime dahil olmayan serbest karbonların oluşturduğu grafitlerdir. Karbonun bileşen içinde istenen miktarı % 2,00 ile % 4,50 aralığındadır. Bileşendeki karbon oranı hesaplanırken grafit halindeki karbon yüzdesi ile bileşik haldeki karbon (sementit) yüzdesi toplanarak, toplam karbon miktarı bulunur. Yapıda grafitleşme tam olarak gerçekleşmişse grafit karbon toplam karbona eşittir ve bileşik halinde karbon oluşumu yoktur. Karbonun dökme demire gri dökme demirde karbon oranının yüksek olması istenir [Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi 1, 2011]. Çünkü karbon metalin erime sıcaklığını düşürür ve metalin akışkanlığını artırır [Behnam et al., 2010], [Web

2, 2017]. Karbon miktarının artması metalin sürtünme ve anma etkilerini azaltır [Buckley, 1977]. Karbon miktarının artması ile metalin ısı iletkenliği artacak ve böylece soğuma hızı artacaktır [Holmgren et al., 2007]. Karbon aynı zamanda metalin sertliğini azaltır, bu da malzemenin kırılmasını veya çatlamasını geciktirir. Ayrıca karbon döküm sonrası malzemede oluşacak büzülmeyi azaltır [Voort, 2004].

- Silisyum

Mikro yapıda yeterli grafitleme oluabilmesinde silisyum oldukça etkilidir. Silisyum oranı % 1 ile % 3 arasında değişim gösterebilir. Silis oranının artması demir-karbon matrisinin mukavemetini ve sertliğini azaltır. Bu azalma işlenebilirlik açısından elverişlidir. Ayrıca silisyum, gri dökme demirde korozyon direncini açığa çıkarır, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini arttırmada rol oynar [Web 2, 2017], [Web 3, 2017]. Silisyumun grafitleme üzerinde etkisi yüksek olmakla birlikte grafitlemeyi belirleyen bir diğer faktör metalin soğuma hızıdır [Davis, 1996]. Silisyum grafitlemeye daha kolay etki etsin diye metal ergitildikten sonra potaya alınma sırasında aı adı verilen yöntem uygulanarak ile potaya aktarılabilmektedir. Bu aşamada toz haldeki silisyum belirli bir oranla, ocaktan potaya dökülen metalin dökümü esnasında akışa eklenerek kullanılır. Ayrıca silisyum karbon gibi ergime sıcaklığını drmede de etkilidir [Ali, 2010]. Ergitme ocağının malzemesinde kullanılacak silikon ergitme için kullanılacak enerjinin % 5 ile % 20'si arasında tasarruf imkanı sağlamaktadır [Peaslee et al., 2012].

- Kükürt

Kükürt dökme demirde çok fazla tercih edilen bir element değildir. Silisyum ve karbonun aksine grafit oluşumunu engelleyici etkisi vardır. Kükürt, manganez ile birleştiğinde mangan sülfüre (MnS) dönüşür, bu bileşim cüruf ile birlikte metalden bertaraf edilir. Bu işlem gereksiz işçilik ve enerji kaybına sebep olmaktadır. Kükürtün diğer olumsuz etkileri ise dökümün sertliğini arttırmak, metalin akıkanlığını azaltmak olarak sıralanabilir [Ali, 2010]. Mangan bulunmadığı durumda grafit yüzeylerde istenmeyen demir sülfat (FeS) oluşumu gözlenir [Web 5, 2017], [Seidu, 2014].

- Mangan

Mangan kükürdün dökümde yarattığı olumsuz etkileri ortadan kaldıran bir elementtir. Sülfür ile bileşim oluşturarak, sülfürün miktarını kontrol altında tutar, sülfürün olumsuz etkilerinden döküm parçasını korur. Yüksek miktarlarda mangan gaz boşluklarına sebep olarak, döküm parçasında fire oluşturacaktır [Ali, 2010], [Web 2, 2017]. Mangan ve kükürt dökme demir içerisinde tek başlarına bulunduğu, grafit oluşumuna ters etkileri mevcuttur [Web 5, 2017]. Yüksek miktardaki mangan cüruf oluşumu ve metalde gaz kaçakları risklerine neden olur. En düşük sertlik ve mukavemet için istenen mangan miktarı aşağıdaki gibi tespit edilir [Web 2, 2017], [Seidu, 2014].

$$\% Mn = 1,7 \% Sn + 0,3 \quad (2.1)$$

- Fosfor

Fosfor, dökme demirin akıcılığını arttırdığı ve karbonun grafit halinde ayrılmasını sağladığı için tercih edilir. Az miktardaki fosfor metal penetrasyonunu artırır. Ayrıca metalin akışkanlığını artırdığı için de kullanılır. Ancak fazla miktardaki fosfor dökme demirin sertliğini ve kırılgenliğini artırdığı için fosfor oranı % 1 ve altında tutulur [Web 2, 2017], [Cambell, 1991],

- Diğer Elementler

Dökme demir içeriğinde bulunan ya da bulunabilecek diğer elementler bakır, alüminyum, nikel, vanadyum, molibden, titanyum, zirkonyum şeklinde sıralanabilir. Bu elementlerin bileşimde mekanik yapıyı kuvvetlendirmek için kullanılır. Grafitleşmeye olumlu etki sağlayan elementler en çoktan en aza doğru; titanyum, alüminyum, bakır, nikel ve zirkonyumdur. Grafitleşmeye olumsuz etki ise molibden ve vanadyum ilavelerinde görülür [Davis, 1996]. Bakır ve nikel ilaveleri dökme demirlerde benzer etkiler yaratabilmekte, mukavemeti arttırmaktadır. Nikel tokluğu artırır ve farklı kesit alanlarındaki sertlik farkını azaltır. Bakır ve molibden ile yapılan denemelerde her ikisinin de dökme demirdeki yarattığı etki çekme mukavemetinin ve sertliğin arttığı yönündedir. Alüminyumun fazla bulunması dökümde hava boşluklarına neden olabileceği gibi, eksikliği aş malzemesini etkisiz kılar. Vanadyum

sertliği ve aşınma direncini artırır. Titanyum ve zirkonyum akışkanlığa olumlu etkilidir [Cambell and Tiryakioğlu, 2006], [Voort, 2004], [Bihari et al., 2014].

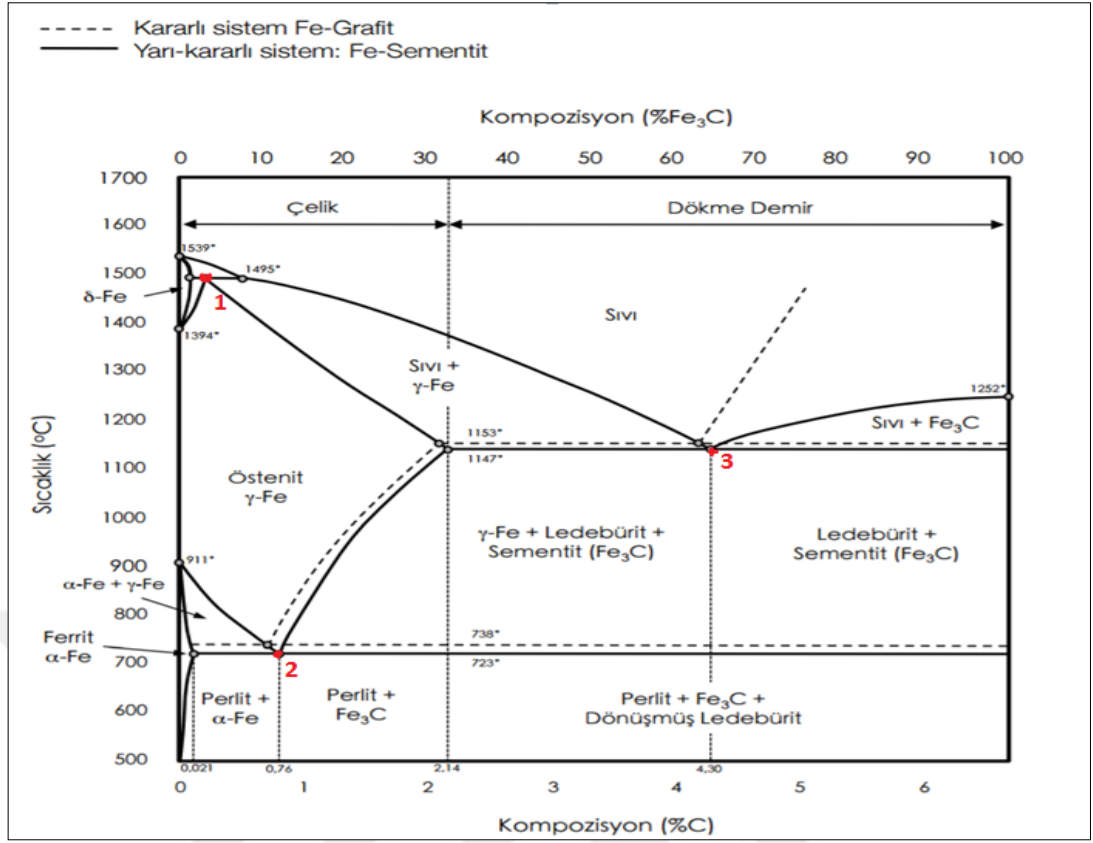
- Karbon Eşdeğeri

Karbon eşdeğeri (CE), dökme demirde ne kadar saf karbon bulunduğunu gösteren ifadedir. Dökme demirdeki silisyum ve fosfor karbon gibi davranarak demirin katılaşmasını etkilemektedir. Bu yüzden karbon eşdeğeri hesabında (Eşitlik (2.2)) silisyum ve fosfor yüzdeleri baz alınır [Davis, 1996].

$$\% CE = \% C + \frac{\% Si + \% P}{3} \quad (2.2)$$

2.2.2. Gri Dökme demirlerin yapı bileşenleri (mikro yapıları)

Bileşeninde % 2 ve üstü karbon ile oluşan dökme demirler, dökümün soğuma şartları ve bileşeninde bulunan silisyum ve mangan elementlerinin miktarları ile bağlantılı olarak mikro yapıda farklılıklar gösterir. Demirin soğuma ile yapısının değişmesi, yani sıcaklıkla mikro yapısının değişmesi durumu onun alotropik bir yapıya sahip olmasından kaynaklanır. Dökme demirin katılaşma şeklini kararlı ve yarı-kararlı sistem diye ikiye ayrılabilir. Kararlı sistem demir-grafit ($Fe - C$) oluşumu, yarı-kararlı sistem ise demir-sementit (Fe_3C) oluşumudur. Sıvı demir ve karbon alaşımının silisyum ilavesiyle ve yavaş yavaş soğutulduğunda, karbon; mikro yapıda grafit halinde gözlenir; demir ise kristalleşir. Bu yapıya kararlı yapı; demir-grafit oluşumu denir. Sıvı demir ve karbon alaşımı mangan ilavesiyle ve hızlı bir şekilde soğutulduğunda ise karbon, demire Fe_3C şeklinde bağlanır. Bu yapıya da yarı-kararlı yapı; Fe_3C oluşumu denir. Bu iki duruma bağlı olarak Şekil 2.3'te dökme demirin soğuması demir-karbon denge diyagramında gözlenir. Gri dökme demirlerin katılaşması ise kararlı sisteme örnektir. Mikroyapı mikroskopta incelendiğinde delta (δ), ostenit (γ), ferrit (α), perlit ($Fe_3C + \alpha$) ve grafit yapıları görülür [Cambell and Tiryakioğlu, 2006], [Voort, 2004], [Ali, 2010], [Web 6, 2017], [Web 7, 2017].



Şekil 2.3: Demir-Karbon Diyagramı.

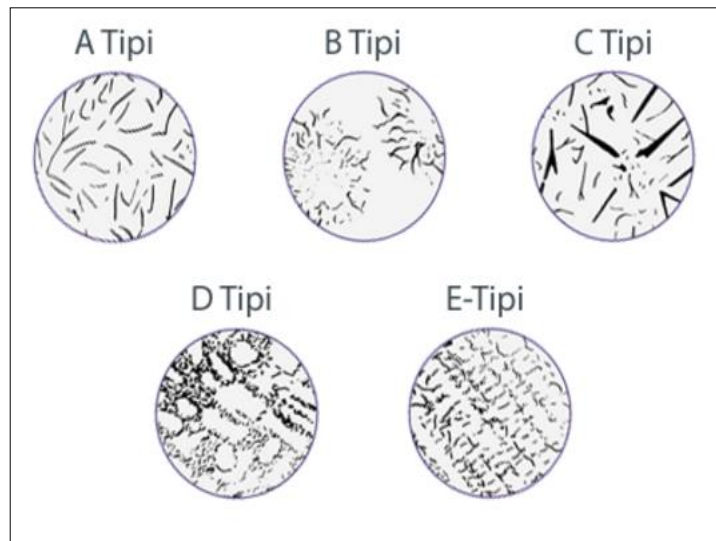
Demir karbon diyagramı yatayda karbon yüzdesini 0'dan başlatır ve karbon % 6,7 olduğunda sonlandırır. Karbon oranı % 2,14'ün altında olan malzeme çelik olarak nitelendirilirken, daha yüksek değerlerde “dökme demir” adını alır. Karbon % 6,7 miktarına ulaştığında yapının tamamı sementite dönüşmüştür denebilir. % 4,5 karbon üstündeki alaşımın veriminden bahsetmek zordur.

Diyagram dikey ekseninde sıcaklık değişimlerini gösterir. 1540 °C altında karbonun hiç bulunmadığı alaşımlarda delta fazı ile ilk kristalleşme başlar. 1400 °C'nin altında gama kristalleri ile birlikte delta fazı görülmeye başlanır. Karbon miktarı arttıkça aynı sıcaklıkta metalin sıvı halde olma durumu devam eder. Sıcaklık düşmeye devam ettiğinde demir karbon diyagramının en yumuşak yapısı olan ferrit gözlenir. Bu yapının tokluğu düşük, yumuşak ve dayanıklılık açısından da çok iyi değildir. Ferrit yapısının güçlendirilmesi için dökme demirlere silisyum ilavesi etkilidir. Karbon oranı arttığında gama demiri olarak adlandırılan ostenit yapı görülür. Ostenit maksimum % 2,11 karbon miktarına, yüksek tokluğa ve 120 Brinell sertliğine (*HB*) sahiptir. Ostenit yapının şekillendirilmesi kolaydır. Ostenit yapının sıcaklığı 720 °C'nin altına düştüğü durumlarda karışım yapı olarak bilinen perlit fazı gözlenir.

Perlit, ferrit ve sementit yapılarını bir arada bulunduran fazdır. Perlit, 225 *HB* düzeyi ile orta sertlikte, yüksek dayanımlı ve esnek bir yapıdır. Aşınmaya karşı dirençlidir. Bu özelliklerinden dökme demirlerde sıklıkla perlitik yapıya rastlanır. Östenit yapının daha yüksek karbon miktarlarında, bir diğer karışım yapı olan ledeburit fazı gözlenir. Bu faz ostenit ve sementit yapılarının birarada bulunduran fazdır. Ostenit oldukça sert ve mukavemetli bir yapıdır [Davis, 1996], [Web 6, 2017], [Web 7, 2017], [Web 8, 2017].

Şekil 2.3 Demir karbon diyagramında 1, 2, 3 ile numaralandırılmış üç önemli dönüşüm noktası mevcuttur. 1 noktası üç fazın (γ , δ ve sıvı) bir arada dengede bulunduğu peritektik noktasıdır. 1490°C sıcaklıkta karbon oranı % 0,25 civarındadır. 2 noktası östenitin en soğuk olduğu an, 720°C civarında, tek fazlı (γ) yapının çift fazlı ($\alpha + Fe_3C$) yapı ile birleştiği ötektoid noktasıdır. Bu noktanın altındaki sıcaklıkta östenit, perlit yapıya dönüşür. 3 noktası 1140°C civarında karbon oranının % 4,3 olduğu sıvı fazdan katı faza geçiş noktasıdır. Bu noktaya ötektik nokta adı verilir. Katı faza geçiş izotermal reaksiyon ile olur. Yani, katılaşmaya geçen alaşımın sıcaklığı reaksiyon sırasında çıkan ısı nedeniyle önce bir miktar yükselir, sonra soğuma devam eder. Gri dökme demirlerde katılaşmanın ötektik noktadan başlaması tercih edilir [Web 6, 2017], [Web 9, 2017].

Katılaşma sonrasında mikro yapıda soğumanın hızına ve karbon miktarına bağlı olarak gri dökme demirlerde farklı grafit boyutları gözlenir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: TS EN ISO 945-1 standardına göre yapraksı grafit tipleri.

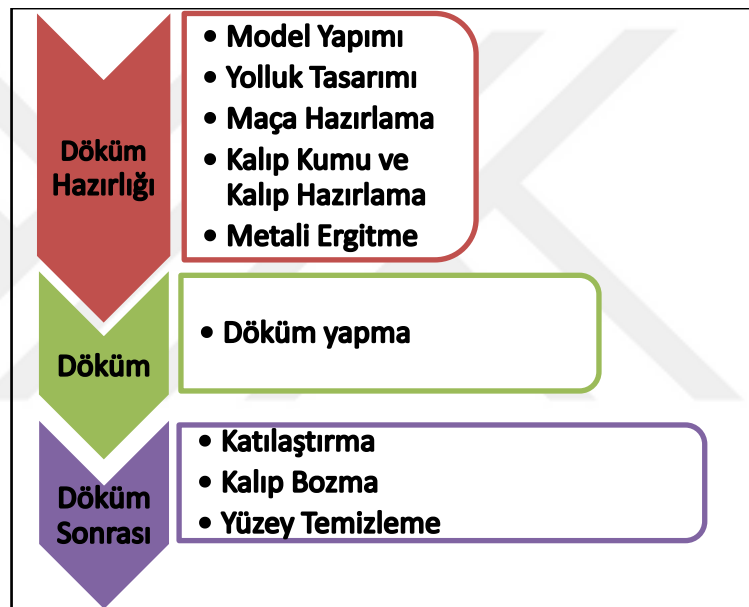
Şekil 2.4'te gösterilen A tipinde, grafitlerin yapısı homojen ve gelişi güzel dağılıma sahip yapraklar halindedir. Bu durum A tipine ait malzemenin aşırı şeklinin ve miktarının doğru, soğuma hızının ise düşük olduğu durumlarda gözlenmektedir. Grafit boyu ve dağılımı her bölgede eşittir. Metalde aşırı soğuma olmadığı tahmin edilebilir. Bu yapı dökme demirlerde yüksek mekanik özellikleri sebebiyle tercih edilir. B tipi modelin grafit dağılımından ötektik bir yapıya sahip olduğu gözlenir. A tipine kıyasla daha hızlı bir soğuma gerçekleşmiştir. Ayrıca aşılamanın yeterince etkin olmadığı söylenebilir. İnce kesitli parçalarda sıkça görülen bu yapının mukavemeti düşüktür. C tipi model karbonun yüksek olduğu modellerde hızlı soğumanın da etkisiyle gözlenir. Mukavemeti düşük, işlenebilme özellikleri kötüdür. Bu modelde grafit boyutları büyük, grafit yaprakları kalındır. Grafit miktarındaki bu fazlalık ısıyı iyi iletmesini sağlar, bu amaçla endüstrilerde kullanılır. D tipi grafit, silisyum oranının fazla olması ve soğumanın çok hızlı gerçekleşmesi ile ortaya çıkar. Bu yapıda ferritik ve perlitik oluşumlar gözlenir. E tipi grafit yapısı, D tipi gibi silisyum miktarı ve soğuma hızının aşırı yüksek olması ile oluşmuştur. Bu yapıda toplam karbon miktarı düşüktür, ayrıca yapının mukavemeti düşüktür [Web 7, 2017].

Gri dökme demirinde yapının çekirdeklenmesinde, ferrit ve sementit tabakaların kalınlıklarında ve grafit boyları ile miktarları, metalin soğuma hızına bağlıdır. Araştırmalar soğuma hızının artmasının ile grafit oluşumda ters etkisi olduğunu göstermektedir. Soğuma hızı arttıkça grafitlerin yaprakları arasındaki mesafeler azalmakta, ferrit ve sementit tabakaları artmaktadır. Ayrıca soğuma hızı ile malzemenin sertliği artmaktadır [Stefanescu, 2005].

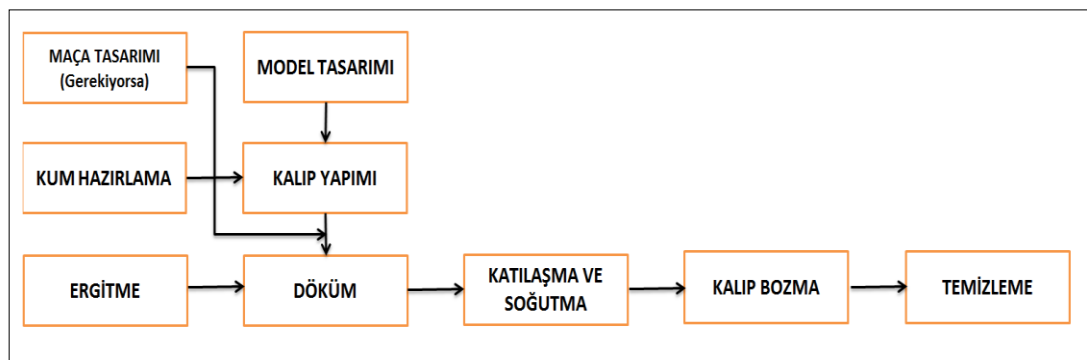
2.3. Döküm Aşamaları

Döküm aşamalarını döküm öncesi hazırlık, döküm işlemi, döküm sonrası olmak üzere üçe ayrılabilir (Tablo 2.2). Döküm öncesi hazırlık aşamaları sırasıyla model yapımı, yolluk tasarımı, maça yapımı, kalıp kumu ve kalıp hazırlama ve metali ergitme olmak üzere beş adım, döküm sonrası aşamalar ise katılaştırma, kalıp bozma ve yüzey temizleme olmak üzere üçe ayrılır. Döküm parçasını temizleme işlemi ile parça dökümhaneden çıkmaya hazırdır.

Tablo 2.2. Döküm aşamaları.



Döküm aşamalarının prosese nasıl dahil olduğu Şekil 2.5'te gösterilmiştir [Web 10, 2017].



Şekil 2.5: Döküm Aşamaları.

2.3.1 Döküm Hazırlığı

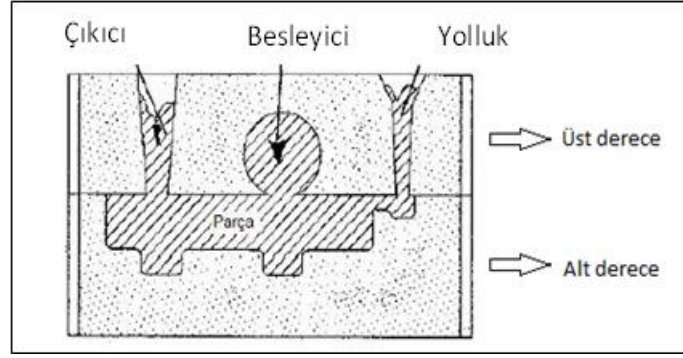
Döküm hazırlığı, metalin ocaktan alındığı zamana kadarki kısmı kapsar. Tablo 2.2 kapsamında, beş ana başlıkta ifade edilen bu süreçte model yapımı hariç, süreç her dökümde kendini tekrarlar.

2.3.1.1 Model Yapımı

Ahşap, plastik esaslı malzeme, metal, strafor vb. malzemeler ile içine dökülecek malzemenin dolduracağı boşluğu elde etmek için model yapılır. Ahşap modeller kolay şekillenmesi, kolay işlenmesi ve ucuz olması ancak çabuk kırılması sebebiyle az sayıda yapılacak dökümler için uygundur. Plastik esaslı modeller ahşap modele göre daha kolay hazırlanan, yüzey düzgünlüğü daha iyi olan malzemelerdir; 60000 kullanıma kadar uygundur. Metal modeller diğerlerine göre daha uzun ömürlüdür, ancak maliyeti daha fazladır. Hazırlanması daha uzun süren bu modeller seri üretimler için kullanımı elverişlidir. Strafor modeller büyük parçaların dökümü ve sadece bir seferlik kullanım için maliyeti az, hazırlanması kolay bir modeldir.

Model tasarımı yapılırken parçanın üç boyutlu resmi üzerinden model resmi çıkartılır. Kalıp yapma şekline göre modeller yatay veya dikey olarak iki ya da daha çok parçadan oluşabilir. Modellerin üst ve alt dereceye ait kısımları model arabasına monte edilerek model döküme hazırlanmış olur.

Model tasarımında dikkat edilecek en önemli nokta, metalin kalıp içerisinde soğuması bittikten sonra büzülerek boyut değiştirmesidir. Metalin tipine göre çekme payı hesaplanmalı, model çekme payı eklenerek tasarımı yapılmalıdır. Kalın kesitlerde çekme oranı, ince kesitlere göre daha fazla olmaktadır. Gri dökme demirlerde çekme payı 10/1000 mm kadar olabilmektedir. Kalın kesitlerde bu oran 7/100 mm kabul edilmektedir. Hızlı soğumaya bağlı olarak, gri dökme demirde döküm parçalarına ilave talaş payı (işleme payı) verilir. Ancak katılaşma sırasında oluşan büzüşmeler, çekme boşluklarına veya sıcak yırtılma ve iç gerilmelere neden olabilmektedir. Çekme boşluklarını önlemek için kalıp tasarımında çıkıcı ve besleyici adı verilen bölümler yer alır (Şekil 2.5). Bu bölümler katılaşma sırasında oluşabilecek çekme boşluklarını ergimiş metal ile besler [Aran, 2007], [Cerit vd., 1996], [Demircioğlu, 2013].

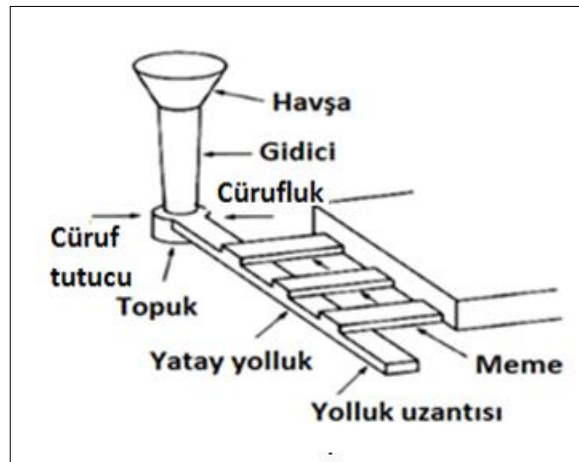


Şekil 2.6: Çıkıcı ve besleyiciler.

2.3.1.2 Yolluk tasarımı

Ergimiş metalin kalıbı doldurmak için yol almasını sağlayan, ona yol veren kanallarına, yolluk ya da yolluk sistemi denir. Yolluk tasarımı model tasarımı kadar önemlidir. Yolluk sistemi döküm parçasının adedine, biçimine ve boyutuna göre çeşitlilik gösterir. Döküm hatalarının pek çoğu yolluk sisteminin uygun tasarlanmamasından kaynaklanır. Bu hatalar, kum erozyonu, gaz boşlukları, çekintiler, eksik döküm ve soğuk döküm şeklinde sıralanabilir. Yolluk sistemindeki hatalar akışta istenmeyen türbülansa sebebiyet verir. Bu türbülans mekanik ve termal hareketleri tetikler. Türbülansa bağlı olarak nem; kum nem dengesi bozulabilir, maçalarda ve kalıpta kum erozyonuna sebep olabilir.

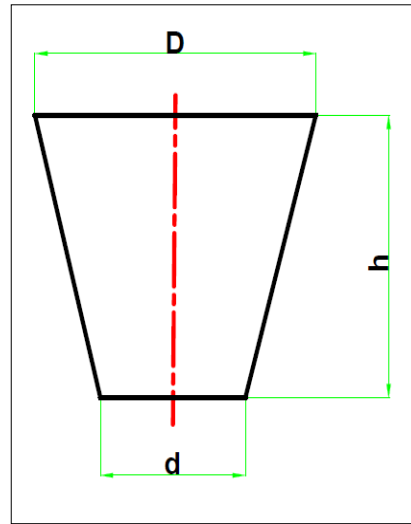
Yolluk sistemi elemanları Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi havşa, gidici (kolon), topuk, filtre, cüruf, cüruf tutucu, meme olarak adlandırılır [Vaghasia, 2009].



Şekil 2.7: Yolluk sistemi.

Yolluk sisteminde havşa, potadan dökülen ergimiş metalin ilk temas noktasıdır. Metalin kalıp dışına sıçramasını ve yayılmasını engellemek için huni şeklinde tasarlanması, döküm pratiği açısından uygundur. Ancak bu tasarımın dezavantajı konikliği nedeniyle akışa dönme etkisi yaratmasıdır. Havşa her zaman dolu tutulmalıdır. Böylece cürufun sahip olduğu yoğunluk farkı ile, kum oksit gibi malzemelerin geçişi mümkün olmaz. Yolluk sistemi metalin türbülanssız akacağı şekilde tasarlanmalı, Reynolds sayısı 20000'den küçük olmalıdır. Türbülans oluşumunu engellemek için havşa kesitinin dairesel ya da kare olması daha uygundur. Çünkü havşayı dolduran metal aktıkça her gelen metal bir dönme hareketi içerisine girecektir. Metalin bu hareketi yerçekiminin ve havşa içerisinde oluşacak santrifüj kuvvetlerinin etkisiyle metal hızlanır, dönerek akan metal ortamdan hava emer ve bu hava gaz sakatlarına sebebiyet verebilir. Bu dönme hareketi aynı zamanda akışta türbülansa sebep olur. Dairesel ve metal kesit dönme hareketi azalır. Ayrıca havşa içinde dönme olmazsa, havşa içindeki cüruf gibi yabancı maddeler metalin üstünde yüzer ve kalıba giremez.

Havşa tasarımı dikkat edilecek noktalar; havşa yüksekliği (h), havşa ağız çapı (D) ve havşa taban çapı (d) olacaktır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Havşa.

Havşa yükseklik aralığı havşa ağız çapının 1 ila 1,5 katı arasında değişir. Havşa taban çapı ise havşa ağız çapının $1/3$ ila $1/4$ 'ü arasındadır. Havşa yüksekliğinin havşa ağız çapından küçük olması metal sıçraması ve taşması olur. Ayrıca metalin akışına düzensizlik kazandırır.

Gidici, haşaya dolan sıvı metalin kalıba gitmesi için tasarlanan düşey silindir kanalıdır. Gidici kesit alanı, aşağı doğru artacak şekilde gidiciye eğim verilir. Yolluk sisteminin en kritik noktası metal akış hızının en yüksek olduğu nokta yani en küçük kesitli alanın nerede olması gerektiğidir. Bu en küçük alan ise havşa taban çapı yani gidicinin en üst kesit alanıdır. Kesit ne kadar azalır ise, hız o kadar artar. Debinin her noktada aynı olduğunu bu sistemde debi eşitliği

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2.3)$$

denkliği ile sağlanır. Denklem (2.3) “süreklilik denklemi” olarak tanımlanır. Denklemde Q , V_1 , A_1 , V_2 , A_2 sırasıyla debi, ilk hız, ilk kesit alanını, ikinci hız ve ikinci kesit alanını ifade eder. Daralan kesitte metalin basıncı artar, akış hızı artar.

Topuk, yarım küre şeklinde metalin kum erozyonu yapmasını engellemek için tasarlanır. Bu bölümde metal, düşmenin etkisiyle hızlanmış olup, çarptığı topukta yön değiştirir. Topuğun hacmi küçük olursa türbülans çok olur. Kare kesitli, silindirik ve yarım küre şeklinde tasarlanan topuklardan sıçramanın ve türbülansın en az görüldüğü topuk şekli kare şekilli olanıdır.

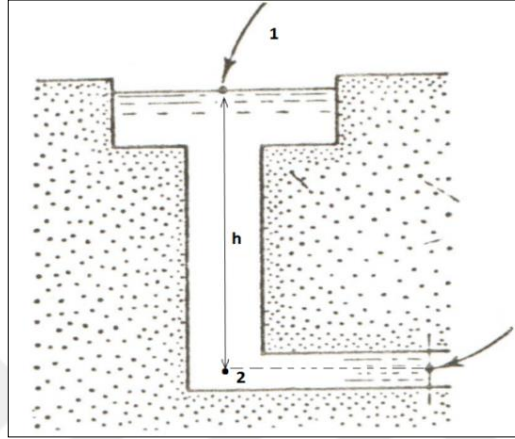
Topuk ile cürufluk arasına yatay veya dikey olarak yerleştirilebilen cürufluk metal dışı parçacıkları tutmanın yanı sıra, akışın laminar olması için destek sağlar. Kalıpta boşluk oluşumunu engelleyen filtrelerin seramik ve köpük filtre gibi çeşitleri mevcuttur. Yolluk sistemine gizlenen bu filtreler döküm malzemesine göre göz boyutları değişir. Gri dökme demirler için 1,0 – 1,5 mm göz aralığında filtreler elverişlidir.

Cürufluk, havşadan kurtulan cürufları tutmak için yatay şekilli kanalıdır. Cürufluk sıvı metali yatay istikametle memelere taşır. Basıncsız yolluk sistemlerinde (Şekil 2.6) cürufluk alt derecede yer alır. Cüruflukta, metali en kısa yoldan, en az ısı kaybı ve düşük hız ile taşınması beklenir.

Meme, yolluk sistemini kalıp boşluğuna bağlayan, metalin akmasını sağlayan kısımdır. Parça kalınlıkları meme kesitleri derinlikleri ile doğru orantılıdır. Memelerden akan metalin eşit olması ve eşit hızlarda olması kalıbın içinde akışın laminar olmasını sağlar. Ayrıca yolluk tasarımı yapılırken, yolluk parçasının döküm parçası ile katılaştıktan sonra kolayca ayrılması için meme kesitleri ince seçilir. Ancak debi her noktada eşittir. Bu akışın hızı, Bernoulli denklemi ile hesaplanabilir.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'te P , V , h , ρ ve g sırasıyla basınç, hız, yükseklik, yoğunluk ve yerçekimi ivmesini ifade eder. İndislerden 1; yolluk sistemi girişini, 2 ise yatay yolluk çıkış noktasını (temsili Şekil 2.9'daki gibi) göstermektedir.



Şekil 2.9: Yolluk girişi ve çıkışı

Basıncısız yolluk sisteminde sistem atmosfer basıncı altında iken, $P_1 = P_2$ durumuna göre Denklem (2.4) sadeleştirilir.

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad (2.5)$$

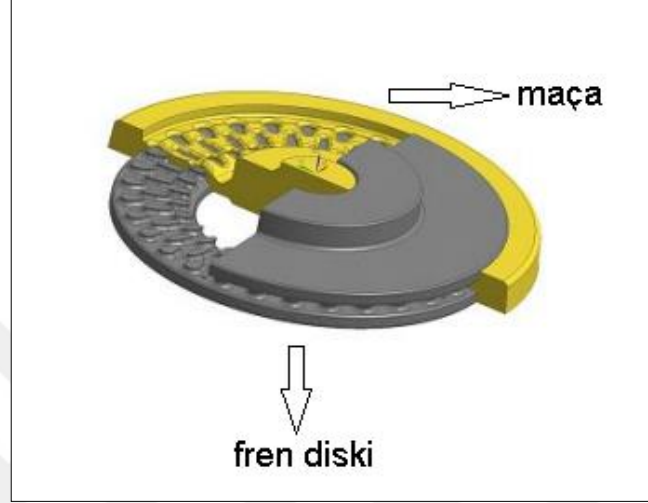
Düşey yolluk yüksekliği, $h = h_1 - h_2$ ve metalin ilk hızı serbest düşme hareketine göre $V_1 = 0$ kabul edilirse, Denklem (2.5) sadeleşir.

$$V_2 = \sqrt{2gh} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da belirtildiği gibi yolluk çıkışında yani meme girişindeki akışkanın hızı düşey yolluğun yüksekliği ve yerçekimi ivmesi ile orantılıdır. Ancak burada sürtünmenin olmadığı ve yolluk boyunca akışkanda sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi olmadığı varsayılmıştır [Vaghassia, 2009], [Web 11, 2017], [Aran, 2007], [Demircioğlu, 2013].

2.3.1.3 Maça Yapımı

Maçalar kum, metal, seramik gibi malzemeler ile yapılan, döküm parçası içinde boşluk oluşturmak için, döküm öncesinde kalıp boşlukları içerisine yerleştirilen parçalardır.



Şekil 2.10: Fren diski ve maçası kesiti

Şekil 2.10’da verilen kesit görüntüsünde gri dökme demir ile hazırlanmış olan fren diski ve fren diskinin hava kanallarını oluşturmak için tasarlanmış maça görülmektedir [Web 12, 2007]. Maça kalıpta alt derecenin üstüne yerleştirilir, üstüne de üst derece kapatılır. Ergimiş metal kalıba yolluk kanalı ile dökülüp soğumaya bırakıldığında Şekil 2.10’daki gibi fren diskinin döküm boşluklarının (hava kanalları) oluştuğu gözlenir.

Maçalar tamamen sıcak ergimiş metalin içine kalacakları için aşınma, kırılma, termal şok ve metal sızmasına dayanıklı olacak özelliklerde olmalıdır. Maçalardan diğer beklentiler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Gaz geçirgenliği iyi olmalı, böylece döküm esnasında gaz oluşumu olabildiğince az olsun.
- Yaş ve kuru dayanımı iyi olmalı, sıvı metal basıncına dayanabilsin ki kalıp içerisinde katılaşmaya kadar kendini muhafaza edebilsin.
- Metalin çekmesine uygun esnekliğe sahip olmalı, böylece metal soğuma aşamasında çektiğinde maça dağılmadan şeklini muhafaza edebilsin.

- Döküm sonrası kolay dağılabilmeli ki, soğuyan parçadan ayırmak, istenilen döküm boşluğunu yaratabilmek için fazladan işçilik gerektirmesin.
- Yüzey pürüzlülüğü iyi olmalı, döküm parçasında yarattığı boşluğun yüzey kalitesi iyi olsun.
- Pişirilme işlemi ve depolanma işlemleri kolay ve olmalı ki, seri üretimde üretimi aksatmasın.

Maçalarda en çok tercih edilen malzeme kumdur. Bu kum kalıp kumundan farklı içeriktedir. Maça kumunda, kalıp kumunda bulunan kil yerine organik ve inorganik bağlayıcılar bulunur. Organikler arasında yanıcılar (kömür tozu), maça yağı, reçine ve zift bulunabilir. İnorganikler ise ateş kili, bentonit, silis tozu ve demir oksitten oluşabilir. Bu bağlayıcılar, uygun miktarda kullanılan su ile etkinleşir. Kum esanslıların içerisinde tutuculuk için % 80 – 90 oranında silis, bağlayıcılık için % 2 – 5 bentonit kili, tanelerin şişmesi için % 3 – 5 oranında su, yanıcılık için % 8'e kadar kömür tozu, sertleşme için amin gazı ($50 - 100 \text{ cm}^3/100 \text{ kg}$ kum) ilave edilir. Maçalar kullanılacakları alana göre sıcak kutu, soğuk kutu ve kabuk maça yöntemleriyle üretilir.

Maçalar, temas yüzeylerinde döküm parçasının yüzeylerin pürüzsüzlüğü, gaz geçirgenliği ve ısıya dayanımı arttırmak gibi sebeplerden dolayı su bazlı ya da alkol bazlı boyalar ile boyama işlemine tabi tutulur. Maçalar boyandıktan sonra, bağlayıcılık özelliklerini ortaya çıkarmak ve sertleşmelerini sağlamak için uygun fırınlarda kurutulurlar. Kurutma sıcaklığı maçanın istenilen sertlik değerine ve içeriğinde bağlayıcı bulunma durumuna göre $100 - 250^\circ\text{C}$ aralığındadır. Bağlayıcılar maçanın daha düşük sıcaklıklarda kurumasını sağlar. Maçaların fırında kurutma dışında açık havada güneş altında kurutma ve bekletme ile sertleşmesi de sağlanabilir [Aran, 2007], [Cerit vd., 1996], [Ülker, 2006], [Web 12, 2007], [Ergen, 2008].

2.3.1.4 Kalıp Kumu ve Kalıp Hazırlama

Kalıp hazırlama işleminde metal malzeme veya kum malzeme kullanılabilir. Metal malzeme olarak çelik veya dökme demir ile hazırlanan bu kalıp üretimine “kokil kalıpcılığı” adı verilir. Kokil kalıp ile alüminyum, çinko, magnezyum ve bu metallerin alaşımlarına ait dökümler gerçekleşir. Dökme demir için kullanılacak kalıplama

yöntemi ise kum kalıpcılığı olacaktır. Kalıp kumu olarak silis kumu, zirkon kumu, kromit ve alüminyum silikatlar kullanılabilir. Bunlardan en yaygın kullanılan silis kumudur.

Kalıptaki silis kumunun niteliği ve niceliği döküm parçasının kalitesinde oldukça etkilidir. Silis kumunda silis oranı % 75 – % 85 dolaylarında bulunurken, kum malzemesine su, reçine, kömür tozu, bentonit ve kil ilaveleri yapılır. Silis kalıp kumu ile yapılan bir araştırmaya göre kalıp kumuna % 3,5 su, % 3 kömür tozu ve % 6 bentonit ilavesi döküm parçasının mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu göstermiştir [Yekinni et al., 2015]. Ancak bu oranlar dökümhane koşullarına döküm parçasının ağırlığına ve kalıba yapılan sıkıştırma basıncına göre değişkenlik gösterir.

Kum tesisinde hazırlanan bu kum, modelin üst ve alt derecelerinde pres makinası veya el ile sıkıştırma ve sonra modelden ayrılması ile kum kalıp şekline dönüşür.

Kalıp kumundan aşağıdaki özellikleri göstermesi beklenir.

- Kolay şekil alabilmesi,
- Sıkıştırılabilmesi,
- Gaz geçirgenliğinin iyi olması,
- Yüksek ısıya dayanabilmesi,
- Yeniden kullanılabilmesi,
- Tane biçiminin yuvarlak olması,
- Tanelerinin dağılımının homojen olması,
- Tane büyüklüğünün uygun olması.

İnce taneli kumlar parçanın yüzey kalitesine olumlu etki sağlarken, iri taneli kumlar ise yüzey geçirgenliğinde olumlu etkilidir. Kalıp kumlarının tane büyüklüğü AFS (American Foundry Society) birimi ile ifade edilir. En iyi kum orta taneli kum 50 – 60 AFS arası ve yuvarlaklığı en fazla olan kum olarak ifade edilebilir [Demircioğlu, 2013].

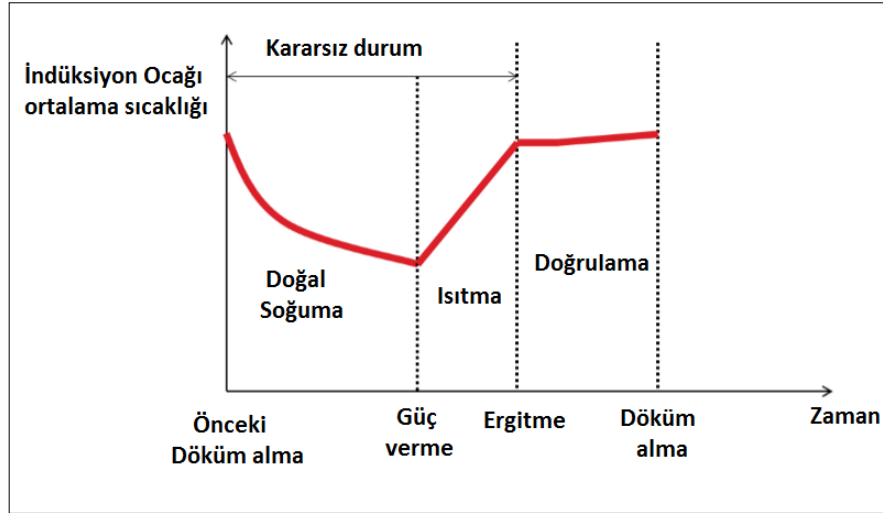
2.3.1.5 Ergitme

Metalin gerekli alaşım malzemeleri ile birlikte ergitilmesi, döküm sıcaklığına ulaşması için ergitme ocakları kullanılır. Ergitme ocaklarına güç elektrik, doğalgaz, kömür ya da akaryakıt ile sağlanabilir. Ergitme ocakları tasarıma, geometriye, yakıt tipine, üretilecek malzeme tipine ve ergitme kapasitesine göre çeşitlenir. Potalı ocaklar, kupol ocaklar, elektrikli ark ve ya indüksiyon ocaklar gibi çeşitlenir [9]. Bunlardan indüksiyon ocakları farklı malzemelerin dökümleri için yaygın kullanılmaktadır [Mehta et al., 2013]. İndüksiyon ocakları 60 *ton/saat* ergitme kapasitesine sahip modellere sahiptir. Küçük ocaklarda dahi, 700 – 1000 *kWh* arası yüksek güç yoğunluğu ile çalışılmaktadır [Canadian Foundary Association, 2003].

İndüksiyon ocaklarının dış cephesini çevreleyen içinden alternatif akım geçen bobinler elektromanyetik alan oluştururlar. Bu bobinlerin ocakta yarattığı girdap akımı ile ısı açığa çıkar. Bu girdap akım sayesinde metalin erimesi hızlı bir şekilde gerçekleşir. Ayrıca bu girdap malzemenin karışmasını sağladığı gibi, düzgün bir ısı dağılımı da sağlar. Metalin erirken karışması sonucu metal içerisinde cüruf olarak adlandırılan istenmeyen malzemeler yoğunluk farkı nedeniyle metalin üstüne çıkar. Metalin üstünde yüzen bu cüruf metal kalitesini iyileştirmek için ocaktan alınır [Cerit vd., 1996].

İndüksiyon ocağının verimli çalışması için astar malzemesinin ısı kayıplarına yol açmadan 200 – 400 defa kullanılması beklenir. Isıl yorulmayı önlemek ve geciktirmek için, gri dökme demir ergiten ocakların duvarlarında astar malzemesi olarak silisyum, alüminyum ve magnezyum esanslı, kuru dövme malzemeler kullanılır [Web 13, 2007].

İndüksiyon ocağında ergitme işleminde ocağa pik, hurda gibi hammaddeler ocağa yüklenir. Döngü malzemesi olan talaş ve yolluklar da bu esnada eklenebilir. Ayrıca bileşimde istenen ferro alyajlar ilave edilir. Ocağa güç verilerek ergitme işlemi başlatılır. Ergitme sağlanması halinde ocaktan numune alınarak analizin uygunluğu kontrol edilir. Ocak sıcaklığı istenen döküm sıcaklığının üstünde bir değere ulaştığında döküm alma işlemi için ocaktan potalara metal aktarılır. Ocaktaki tüm metal bittiğinde yeniden metal eklenmeyecekse ocak kendiliğinden soğuma için bırakılır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: İndüksiyon ocağı zamana bağlı ortalama sıcaklığı.

2.3.2 Döküm İşlemi

Ergitme ocaklarında ergitilen metal, potalara transfer edilerek kalıplara dökülmek üzere döküm potası ile döküm alanına taşınır. Potanın fazla soğuk olması metalin ısınıp düşürecek ve döküm hatalarına sebep olacaktır. Bu nedenle potaya bir miktar maden alınıp potanın ısınması sağlanır ardından bu maden tekrar ocağa boşaltılır.

Ocaktan potaya metal aktarma esnasında metale aşılama yapılır. Aşı çekirdeklenmenin kolay gerçekleşmesi, döküm sonrası yerel katılaşma olmaması yani metalin etkinliğinin uzun süre korunması için sıvı metal içerisine eklenir. Aşılama ocaktan potaya madenin 1/3 kadarı alındıktan sonra başlanır, madenin 2/3 kadarı alındıktan sonra aşılama tamamlanır. Ayrıca aşı yüksek çekinti oluşma ihtimalini ortadan kaldırır. Aşı malzemesinin içeriğini silis, magnezyum, alüminyum, kalsiyum, baryum, stronsiyum ve zirkonyum gibi malzemeler oluşturur.

Potanın dolumu ile öncelikle potanın sıcaklığı ölçülür. Ardından pota, döküm hattına transfer edilir. Döküm işlemi dökülecek parçanın boyutuna göre değişkenlik gösteren süre içerisinde tamamlanır.

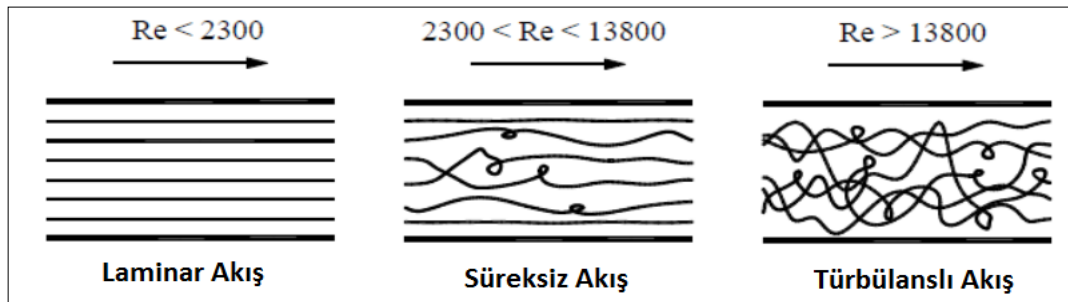
Döküm süresi hesaplanırken, döküm parçasının şekline ve kesitlerine, ağırlığına, ortalama et kalınlığına, malzeme cinsine pota sıcaklığına ve kum özelliklerine bakılmalıdır. İnce kesitli parçalar hızlı, kalın kesitliler yavaş dökülmelidir. Uzun döküm süresi, kalıp içerisinde nem yoğunlaşmasına (kalıbın kurumasına), kalıp içerisinde ısı iletim etkilerinin fazla olmasına, geniş yüzeyli parçalarda çöküntü ve yırtılmalara,

kalıp dolmadan oluşan katılaşmalar nedeniyle metalin birleşmemesine (katman oluşmasına), fazla ısı geçişinden dolayı kumun kuruyarak metale karışmasına neden olur. Kısa döküm süresi ise, debinin artması ile birlikte gazın dışarı yeterince hızlı çıkamaması (gaz hatası), sıcak yırtılma ve yüzeylerde çökmeye, kalıp çatlamasına, maça erozyonun ve iç çekintiye sebep olur. Tüm bu hataları azaltmak için metalin akış hızını kontrol altına almak gerekmektedir [Behnam et al., 2010], [Cambell, 1991], [Demircioğlu, 2013].

Döküm zamanının kısa ya da uzun olması, akışkanın nasıl bir rejim ile akacağını belirler. Yatay ve düşey yolluk sistemi tasarlanırken akışkanın kaotik ya da düzensiz akış olarak adlandırılan türbülanslı akış yerine daha düzenli rejim olan laminar akışta olması istenir. Türbülanslı akışta akışın hızı daha yüksek olduğu için yüksek moment içerir. Ayrıca türbülanslı akımda hız ve basınç değişimlerine sık rastlanır. Türbülanslı akış yolluk içinde santrifüj etkisi yaratabilir bu durum kum kalıpta kopmalara sürüklenmelere sebebiyet verebilir. Akışın rejimini hesaplamak için atalet kuvvetlerin viskozite kuvvetlerine oranını ifade eden Reynolds bağıntısı

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{V d}{\nu} \quad (2.7)$$

kullanılır. Burada Re Reynolds sayısını, ρ yoğunluğu, V akışkanın hızını, d akışkanın geçtiği borunun çapını, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ν akışkanın kinematik viskozitesini ifade eder. Dinamik viskozite ile kinematik viskozite arasında $\mu = \nu / \rho$ bağıntısı vardır. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi boru içerisinde, Re sayısının 2300 ve altındaki değerlerinde laminar akış, 2300 ile 13800 arasında geçiş akışı, Re sayısının 13800 ve üzerindeki değerlerinde ise türbülanslı akış gözlenir [Larsen, 2004]



Şekil 2.12: Akış rejimleri.

Metal ve kalıp arasında döküm işlemi esnasında ısı transferi gerçekleşir. Bu ısı transferi üç farklı yol ile gerçekleşir. Döküm yapılırken konveksiyon ve ışıınım ile ısı transferi gerçekleşirken, kalıp dolduktan sonra metal ile kum kalıp arasında kondüksiyon ile ısı transferi gerçekleşir. Kalıp dolduktan sonra metalin kum kalıba temas yüzeyindeki hava boşlukları aracılığıyla da ısı transferi gerçekleşir [Flori and Milostean, 2013].

2.3.3 Döküm Sonrası

Döküm işlemi sonrası döküm parçasının nihai halini alabilmesi, işlemeye hazır olabilmesi, için öncelikle döküm parçası soğuma, katılaşma, ardından kalıptan çıkarılma ve son olarak yüzeyinde kalan kalıp parçalarının temizlenmesi için yüzey temizleme işlemlerine tabii tutulur.

2.3.3.1 Katılaşma

Döküm işlemi bittikten sonra parça kum kalıp içerisinde katılaşma için bekletilir. Katılaşma süresi malzemenin tipine ve malzemenin kesitlerine göre değişkenlik gösterir. Alt dereceden dolum ile gerçekleşen sistemde en üstte kalan çıkıcı ve besleyiciler kalıpta katılaşan son parçalar olmalıdır. Yani katılaşma süreleri diğer bölgelere göre daha uzun olmalıdır. Katılaşmanın zamanı hacim alan oranı ile orantılı Chvorinov's kuralı ile tanımlanır [Angus, 1976], [Aran, 2007].

$$t = B \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de t, B, V, A ve n sırasıyla dökümün katılaşması için gerekli zaman, kalıp sabiti, dökümün hacmi, kalıp ile temas eden dökümün yüzey alanı, katılaşma sabitini ifade eder. Katılaşma sabiti 1,5 ve 2 arasında değer alır, çoğunlukla 2'dir. Kalıp sabiti malzemeye ve sıcaklığa göre değişebilmektedir.

$$B = \left(\frac{\rho_m L}{T_m - T_0} \right)^2 \left(\frac{\pi}{4k\rho c} \right) \left[1 + \frac{c_m \Delta T_s}{L} \right]^2 \quad (2.9)$$

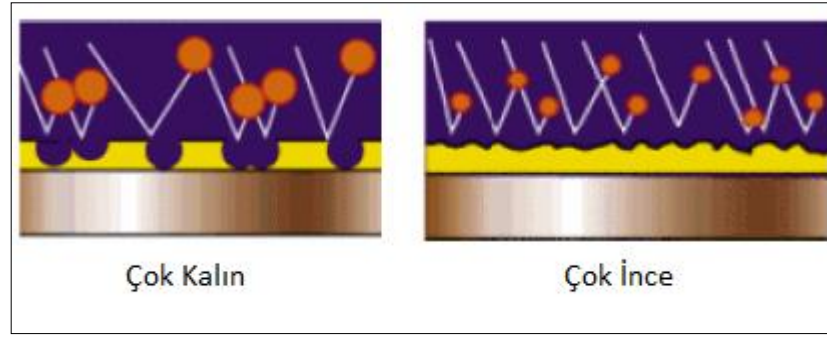
Denklem (2.9)'da; ρ_m metalin yoğunluğu, L katılaşma ısısı, T_m metalin ergime sıcaklığı, T_0 kumun dökümün ilk anındaki sıcaklığı, k kalıp malzemesinin ısı iletim katsayısı, ρ kumun yoğunluğu, c kalıp malzemesinin ısı iletim kapasitesi, c_m metalin ısı iletim kapasitesi ve $\Delta T_s = T_d - T_m$ iken T_d metalin döküm sıcaklığını ifade eder [Angus, 1976]. Denkleme göre dökümün katılaşmasında dökülen metalin hacmi, metalin kalıp ile temas yüzeyi, metalin ve kalıbın yoğunlukları ve ısı iletim kapasiteleri, kalıbın ısı iletim katsayısı, ilk sıcaklıkları, metalin döküm sıcaklığı ve ergime sıcaklığı etkilidir. Öyleyse geometri ve malzemelerin değişimi katılaşma süresinde ayrı ayrı etkilidir.

2.3.3.2 Kalıp Bozma

Döküm sonrası parçanın katılaşması gerçekleştikten ve parça soğuduktan sonra kalıp bozma işlemi yapılır. Bu işlem sarsma, elle bozma, parçayı presleme, basınçlı su ve parçacık püskürtme gibi yöntemler ile gerçekleştirilebilir. Yolluk ve çıkıcıları ayırmak için malzemeye zarar vermeyecek şekilde darbe ile kırma işlemi yapılır. Bir risk oluştuğunda işlenen yüzeyler taşlama, frezeleme keski ile ayırma yöntemleri ile temizlenir [Cerit vd., 1996].

2.3.3.3 Yüzey Temizleme

Parça yüzeyindeki ya da döküm boşluklarında (maça ile oluşturulan boşluklar) kalan kumu malzemedan ayırmak için yüzey temizleme işlemi yapılır. Bu işlem hava veya mekanik yollarla, kum veya metal parçaların püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Alternatif bir yöntem ise hava yerine su kullanarak yüzey temizlemedir. Ancak bu yöntem çokça atık su oluşumuna neden olur. Metal parça püskürtme yönteminde püskürtülen metal parçalar, bilyeler, uygun sertlikte ve uygun yarıçapta olmalıdır. Şekil 2.13'te olduğu gibi gereğinden büyük boyuttaki bilyeler dövme izi bırakabileceği gibi, ince bilyeler istenen temizliği sağlamayabilir [Granül, 2002].



Şekil 2.13: İnce ve kalın boyuttaki bilyelerin yüzeyde yarattığı etki.

Bilye, çarpma esnasındaki enerjisinin büyük bir kısmını malzemedeki yüzey kalıntısının giderilmesi için aktarır. Kalan enerji ise bilyenin sekmesi için kullanılır. Bilyenin sahip olduğu enerji, hızı ve kütlesi ile orantılıdır [Granül, 2002].

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'de E enerjiyi, m kütleyi, V hızı gösterirken, kütlenin açılımı denklem (2.11.a)'da ve denklem (2.11.b)'de gösterilmiştir [Granül, 2002].

$$m = V_k \rho \quad (2.11.a)$$

$$V_k = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2.11.b)$$

Denklem (2.11.a)'da V_k bilye parçasının hacmini, ρ yoğunluğunu ifade eder. Denklem (2.10) ve denklem (2.11.b) birleştirildiğinde parçacığın enerjisi aşağıdaki gibidir.

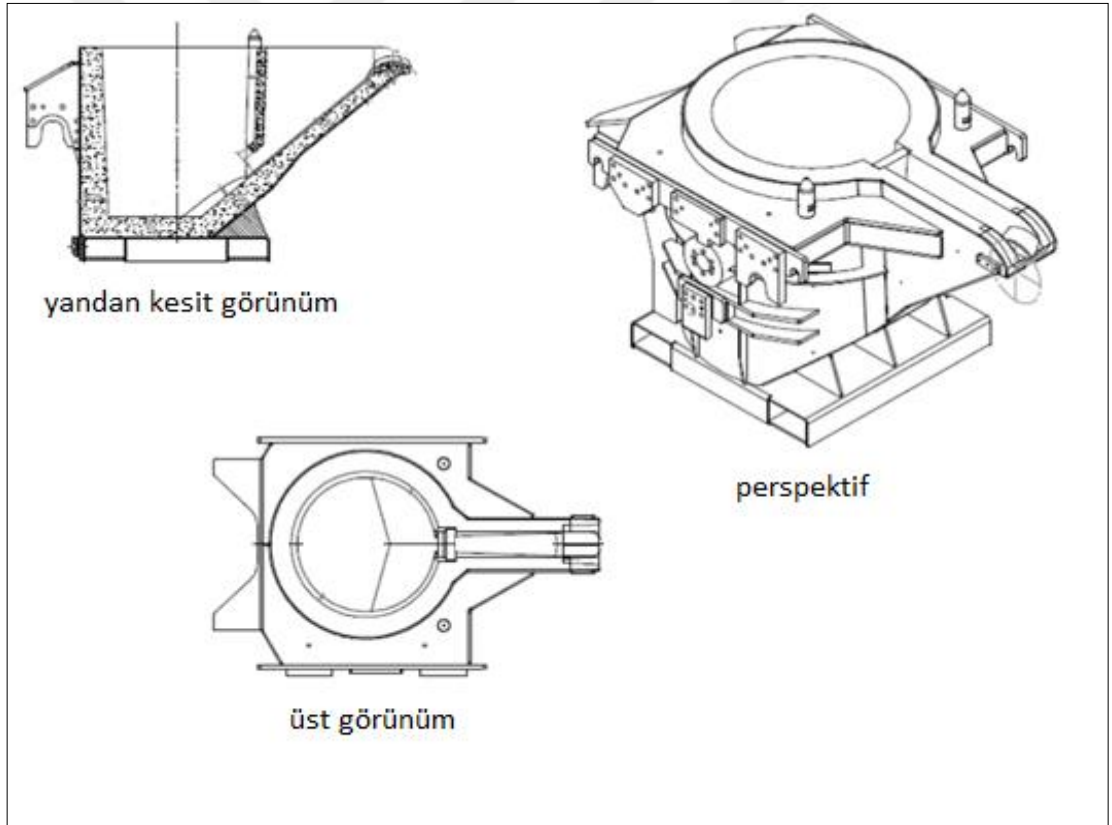
$$E = \frac{2}{3}\pi r^3 \rho V^2 \quad (2.12)$$

3. UYGULAMALAR

Potadaki metalin kalıba aktarıldığı ilk andan itibaren metal kalıba tamamen yerleşene dek metal havaya ve kuma ısı transferi yapmaktadır. Bu aşamalar kalıbın dışında ısı transferi ve kalıbın içinde ısı transferi olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

3.1. Kalıbın dışında ısı transferi

Dökümhane koşullarında yapılan döküm deneyinde döküm potasının (Şekil 3.1) kalıba döküm yaparken her bir döküm için döküm süreleri tutulmuş, döküm öncesi ve sonrası metalin sıcaklıkları ölçülmüş ve kalıbın potaya mesafesi ölçülmüştür.

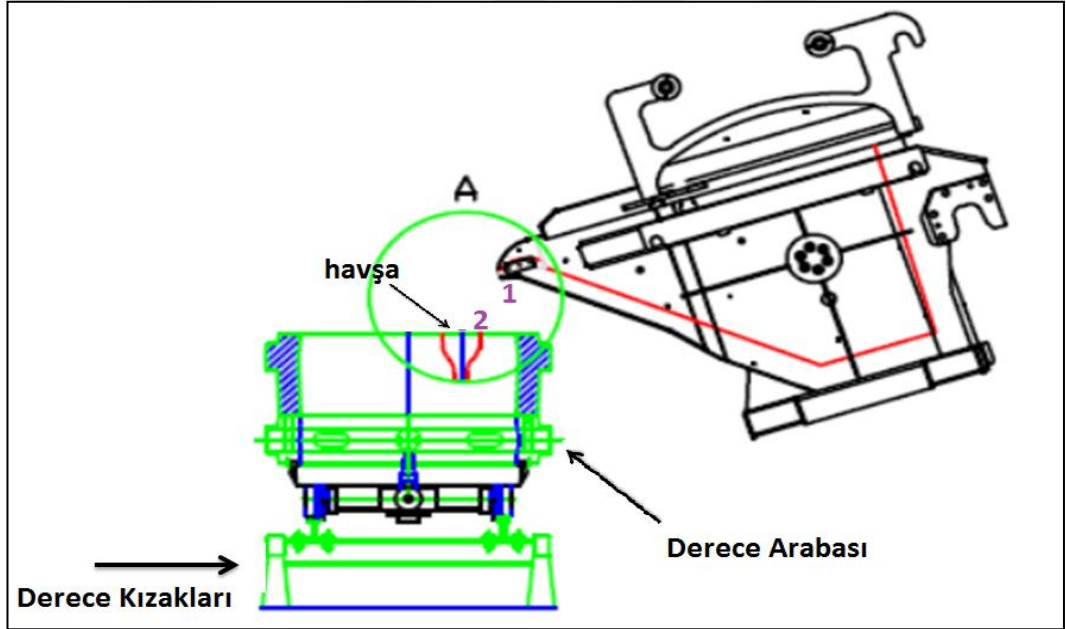


Şekil 3.1: Döküm potası.

Döküm potasının haznesi 1500 kg ergimiş metal alabilmektedir. Bir döküm potası, kalıbın iç ölçülerine göre değişkenlik göstermekle birlikte 9 – 10 kalıp arasında dolum yapabilmektedir. İlk döküm ile son döküm arasında pota metale doğru

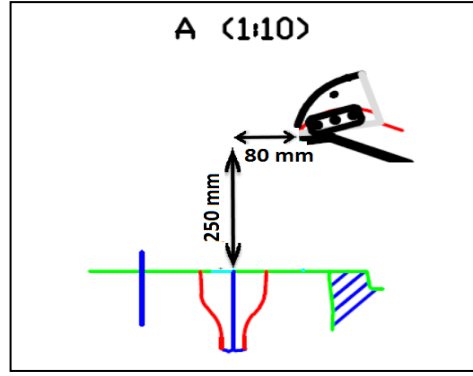
yatayda ve dikeyde yaklaşmakta, dökümün yapılabilmesi için potanın döküm eğimi artmaktadır. Derece arabasının içinde kum presten çıkan kum kalıp bulunmaktadır. Derece arabası derece kızakları ile döküm potasının paralelinde hareket etmektedir. Döküm potasının ağzından akan ergimiş metal havşanın merkezine gelecek şekilde, döküm potası uygun mesafede ve açıda konumlandırılır.

Deneyde bir pota, toplamda 9 döküm yaparak içindeki metali kalıba aktarmıştır. Başlangıçta ve bitişte pota ağzının, havşaya mesafesi farklı olduğundan, ortalama bir değere ulaşabilmek için, 5. kalıbın dökümü öncesi ve sonrasında potanın döküm mesafeleri ölçülmüş, teknik resme aktarılmıştır. Şekil 3.2’de döküm esnasında kalıp ve döküm potasının teknik resminde 1 noktası pota ağzını, 2 noktası havşayı göstermektedir.



Şekil 3.2: Döküm esnasında kalıp ve döküm potası.

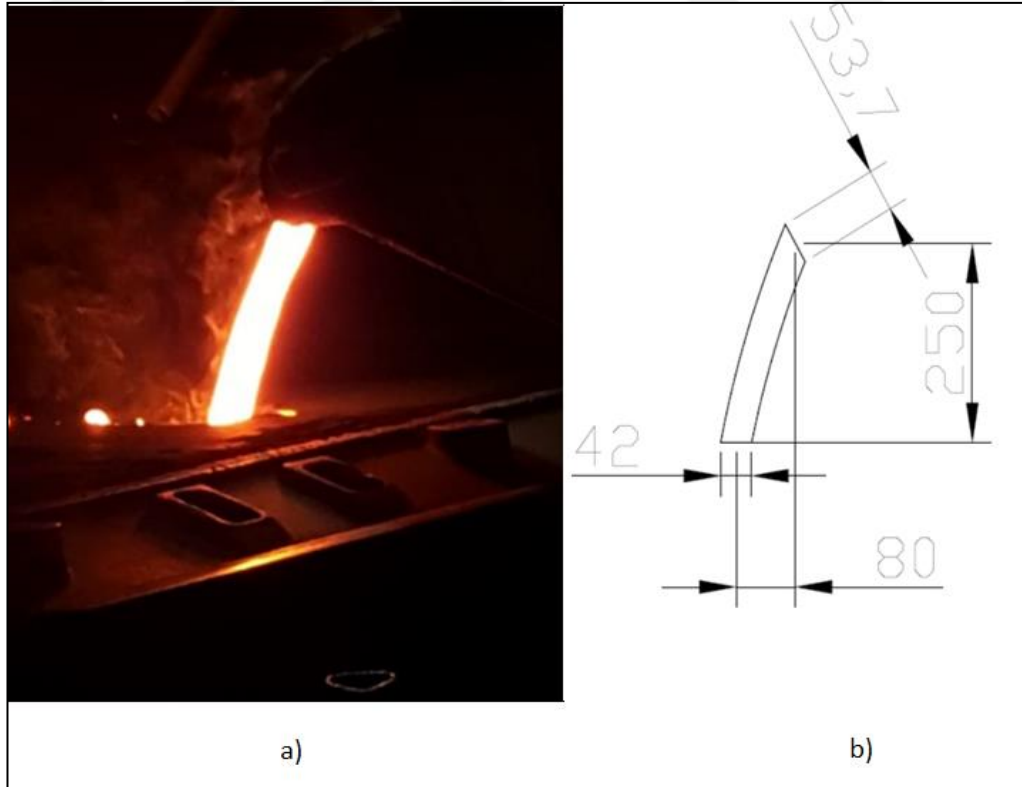
Şekil 3.2’de Döküm potası ve kalıbının döküm esnasındaki konumu görülmektedir. Döküm ağzının ve havşanın daha detaylı görüntüsü için Şekil 3.2 de “A” ile gösterilen bölge 1:10 oranında yakınlaştırılmıştır (Şekil 3.3). Pota ağzının havşanın merkezine mesafesi yatayda 80 mm, dikeyde 250 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.3: Pota ağzı ve havşa mesafesi.

Döküm süresi bir potanın tamamını döktüğü 9 kalıp için ayrı ayrı ölçülmüş. Ortalama döküm süresi 23 sn olarak belirlenmiştir.

Döküm işlemi kameraya alınmış, metalin potadan kalıba girişine kadar olan süre kameraya alınmış. Bu süre 0,4-0,5 sn aralığında olarak ölçülmüştür. Döküm anındaki dökümün yandan geometrisini oluşturmak için döküm fotoğrafları alınmış, aynı mesafeden alınan referans ölçüler ile kıyaslanarak geometri oluşturulmuştur (Şekil 3.4).

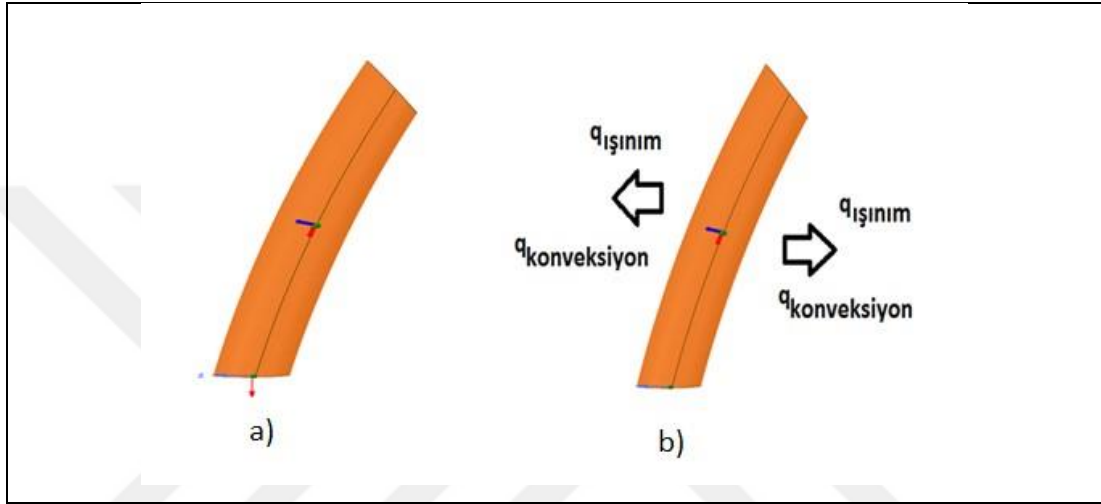


Şekil 3.4: a) Döküm anının resmi, b) Geometri.

Geometri Autodesk-Inventor yazılımı ile 3B (üç boyutlu) tasarlanmıştır (Şekil 3.5.a)). Yazılımdan tasarlanan geometrinin hacmi ve yanal alanı verileri çekilmiştir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1: Döküm anının geometrisi.

Yanal Alan	36.084 mm ²
Hacim	392.886 mm ³



Şekil 3.5: a) Döküm anının 3B geometrisi, b) Geometrinin ısı transferi.

Akışın gerçekleştiği ortamda akış hava ile temas halindedir. Metalden akışa gerçekleşecek ısı transferi (q); ışıınım ($q_{ışınım}$) ve konveksiyon ($q_{konveksiyon}$) şeklinde olacaktır (Şekil 3.5.b)). Zamana bağlı ısı transferi gerçekleşecek, metalin zamana bağlı ısı transferi havaya aktarılan ışıınım ve konveksiyon ile ısı transferine eşit olacaktır.

$$q = q_{ışınım} + q_{konveksiyon}$$

(3.1)

$$mc \frac{\partial T}{\partial t} = h_{air} A (T_d - T_{\infty}) + A \sigma \varepsilon (T_d^4 - T_y^4)$$

Denklem (3.1)'de m kütle (kg), c özgül ısıyı (J/kgK), h_{air} havanın ısı transfer katsayısı, A_y yanal alan (m^2), T_d metalin döküm sıcaklığı (K), T_{∞} havanın mutlak sıcaklığı (K), σ Stefan-Boltzmann sabiti, ε ışıınım neşretme katsayısı, T_y yüzeyin mutlak sıcaklığı (K) olarak sıralanabilir.

Potanın toplam aldığı kütle 135 kg , tüm döküm süresi $t_d = 23\text{ sn}$ olarak ölçülmüştür. Akışkan debisi ($\dot{m}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{m} = \frac{m}{t_d} \quad (3.2)$$

$$\dot{m} = \frac{135}{23} = 5,87\text{ kg/sn}$$

Gerçekte ise Şekil 3.5.a) geometrinin yani birim döküm geometrinin kütlesi için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$m_b = V\rho \quad (3.3)$$

$$m_b = 392.886\text{ mm}^3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{mm}^3} \cdot 6436 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,52\text{ kg}$$

Denklem (3.3)'de m_b birim kütleyi, V hacmi, ρ yoğunluğu göstermektedir.

Denklem (3.2) kullanılarak, birim dökümün ne kadar sürede gerçekleştiği hesaplanır.

$$t_b = \frac{2,52\text{ kg}}{5,87\text{ kg/sn}} = 0,43\text{ sn} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'de t_b birim döküm süresini göstermekte yani t_b zamanı tek bir akış geometrisinin gerçekte ne kadar süre boyunca görüldüğünün bilgisini vermektedir. Bu süre dökümhane denemesinde çıkan sonuç (04 – 05 sn aralığı) ile tutarlıdır. t_b anında referans geometri için gerçekleşen teorik ve aynı zamanda pratik süreden bahsedilmektedir. Toplam döküm süresinin 23 sn olduğu düşünüldüğünde referans geometriden bu süre zarfında $23/0,43 = 53,5$ defa gözlenecektir. Öyleyse temsili toplam süreyi 53,5 sn almak uygundur.

Tablo 3.2: Akış geometrisinin ısı transferi parametreleri.

h_{air}	$15 \text{ W/m}^2\text{K}$
σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
ε	$0,29$
T_d	1678 K
T_y	308 K
T_∞	298 K
c	$1,51 \cdot 10^2 \text{ J/kgK}$
A	$3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$
m	135 kg

Tablo 3.2 verileri denklem (3.1)'de yerine yazıldığında toplam ısı kaybına ulaşılır. Bu ısı kaybı q_1 olsun.

$$q_1 = \int_T^{T_d} mc \, dT = \int_0^t [hA(T_d - T_\infty) + A\sigma\varepsilon(T_d^4 - T_y^4)] dt$$

$$135 \text{ kg} \cdot 1,51 \cdot 10^2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} (1678 - T) =$$

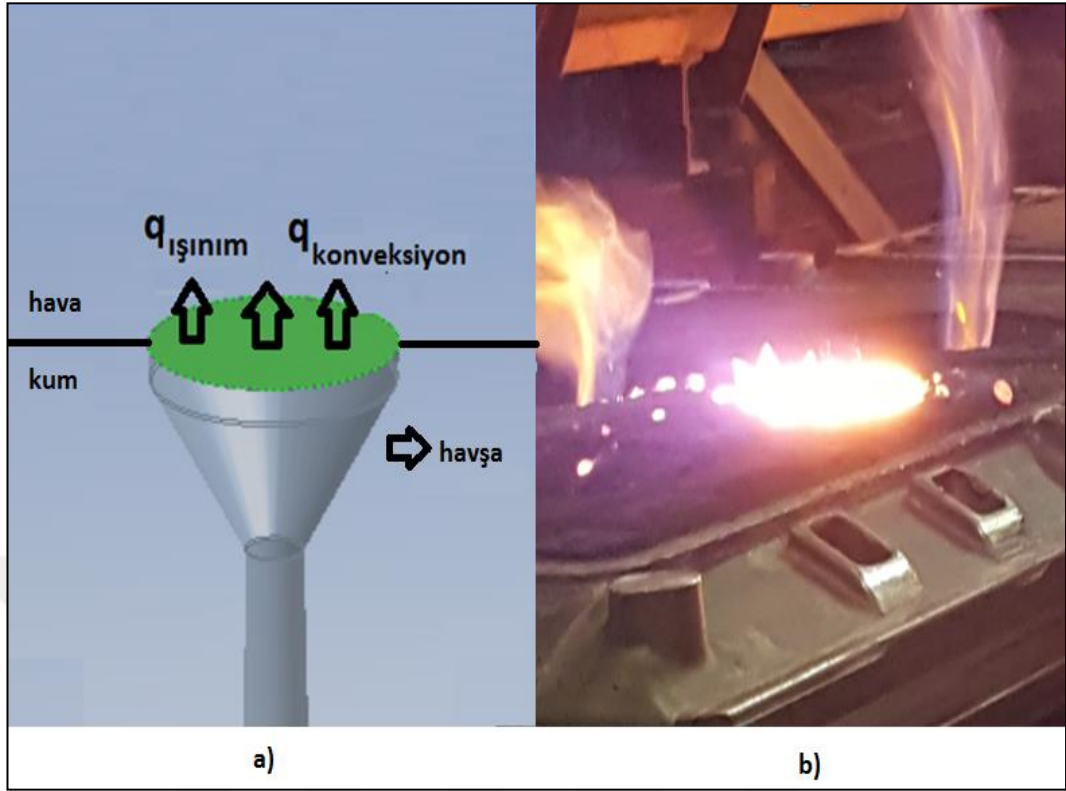
$$\left[15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 (1678 \text{ K} - 298 \text{ K}) + \right.$$

$$\left. 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot 0,29 (1678^4 - 308^4) \right] 53,5 \quad (3.5)$$

$$T = 1663,7 \text{ K} \Rightarrow \Delta T = 14,3 \text{ K} \Rightarrow q_1 = 290,6 \text{ kW}$$

Potadan kalıba aktarılan metalin havşayı doldurduğu anda; metal, hava ile temas etmeye devam eder. Bu bölgede metal ile hava arasında, havşanın hava ile temas ettiği üst yüzeyinde ısı transferleri gerçekleşmektedir. Bu ısı transferleri ışıınım ve konveksiyon şeklinde olacaktır. Şekil 3.6.a)'da havşadan yayılan ısı transferleri, Şekil 3.6.b)'de kalıp içerisine döküm yapıldıktan sonra, metal ile dolu havşanın fotoğrafı görülmektedir.

Dökümhane yapılan sıcaklık ölçümlerinde havşanın sıcaklığı ile potadaki metalin sıcaklığında $40 \text{ }^\circ\text{C}$ civarında fark çıkmıştır. Ancak dökümhanedeki akışın sabit olmaması bu yüzden metalin fazla beklemesi sıcaklık farkına neden olabilmektedir.



Şekil 3.6 a): Havşanın ısı transferi, b) Metal ile dolu havşa.

Denklem (3.1)'de olduğu gibi ısı transferi bağıntısı kullanılır Bu bölgedeki ısı transferi q_2 olsun.

Tablo 3.3: Havşa geometrisinin ısı transferi parametreleri.

h_{air}	$15 \text{ W/m}^2\text{K}$
σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
ε	0,29
T_d	$1663,7 \text{ K}$
T_y	308 K
T_{∞}	298 K
A	$1,48 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$
t	23 sn

$$q_2 = \int_0^t [h_{air}A(T_d - T_{\infty}) + A\sigma\varepsilon(T_d^4 - T_y^4)]dt$$

$$q_2 = \left[15 \frac{W}{m^2K} 1,48 \cdot 10^{-2} m^2 (1601,4 - 298) + 1,48 \cdot 10^{-2} m^2 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} 0,29 (1601,4^4 - 308^4) \right] 23 \quad (3.6)$$

$$q_2 = 43,4 \text{ kW}$$

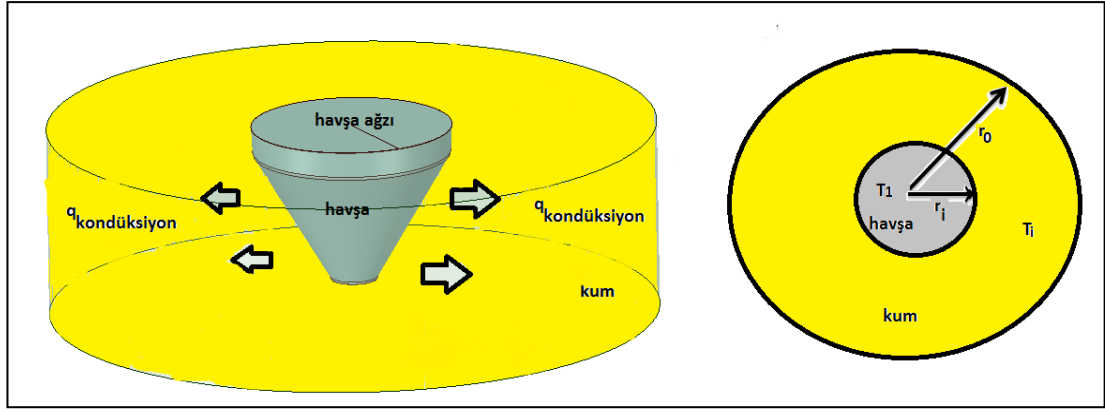
Akıştaki ısı transferi (q_1) ile havşadaki ısı transferinin (q_2) toplamı havaya yapılan toplam ısı transferi verecektir.

Tablo 3.3: Konveksiyon ve ışıınım ile gerçekleşen ısı transferleri.

	Akış anında	Havşada	Toplam ısı transferi
$q_{konveksiyon}$	39,9 kW	6,6 kW	46,5 kW
$q_{ışıınım}$	250,7 kW	36,8 kW	287,5 kW
Toplam ısı transferi	290,6 kW	43,4 kW	334 kW

3.2. Kalıbın İçinde Isı Transferi

Dökümün kalıp ile birleştiği ilk nokta havşa ağzı akışı kolaylaştırmak için aşağı doğru eğimli ters konik bir yapıya sahiptir. Havşaya giren metalin artık tek termal etkileşimi kum ile olacaktır. Bu etkileşim kuma kondüksiyon ile ısı aktarımı şeklinde olacaktır. Isı aktarımı esnasında sıcaklık değişimi radyal doğrultuda zamana bağımlı olarak çözülebilir.



Şekil 3.7: Havşada radyal doğrultuda ısı transferi.

Zamana bağlı silindirik koordinatlarda (r, θ, z) ısı iletimin genel denklemi

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

olarak bulunur[Kakaç, 1998]. Denklem (3.7)'de α ısı yayılım katsayısıdır. Isıl iletim katsayısı, malzemenin ısıl iletkenliğinin ısıl kapasitesine oranıdır [Pitts and Sissom, 1997].

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de k ısıl iletkenlik katsayısını ifade eder.

Denklem (3.7)'nin θ ve z 'den bağımsız hali şu şekilde olacaktır.

$$\alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.9)$$

Havşanın merkezinde ısı değişimi olmayacağı için problemin sınır koşullarından biri

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = 0 \quad r = 0, \quad t > 0 \quad (3.10)$$

şeklindedir. Isı geçişi kondüksiyon şeklinde olacağından diğer bir sınır koşulu Denklem (3.11)'deki gibidir.

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{-\alpha}{k} [T(r_0, t) - T_\infty] \quad t > 0 \quad (3.11)$$

Problemin başlangıç koşulu olarak başlangıç sıcaklığı alınır.

$$T(r, t) = T_1 \quad t \leq 0 \quad (3.12)$$

Sıcaklık dağılımı yarıçap (r) ve zamana bağlı olduğu için sıcaklık fonksiyonu, zamanın ($\Theta(t)$) ve yarıçapın ($R(r)$) bağıntısı olarak yazılabilir.

$$T = \Theta(t)R(r) \quad (3.13)$$

Denklem (3.13), denklem (3.9)'da yerine yazılır.

$$\begin{aligned} R(r)\dot{\Theta}(t) &= \alpha \Theta(t) \left[\ddot{R}(r) + \frac{1}{r} \dot{R}(r) \right] \\ \ddot{R}(r) + \frac{1}{r} \dot{R}(r) + \frac{\dot{\Theta}(t)}{\Theta(t)} R(r) &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'de $(\dot{\Theta}(t))/(\Theta(t))$ ifadesi sabit olacağı için $(\dot{\Theta}(t))/(\Theta(t))=c$ denilebilir.

$$\ddot{R}(r) + \frac{1}{r} \dot{R}(r) + cR(r) = 0 \quad (3.15)$$

Denklem (3.15) bu haliyle Bessel eşitliğine benzemektedir. İkinci dereceden homojen diferensiyel Bessel denklemi aşağıdaki gibidir [Rolle, 2000].

$$x^2 \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + x \frac{dw(x)}{dx} + (x^2 - v^2)w(x) = 0 \quad (3.16)$$

Bessel denklemi ile problemin analitik çözümüne ulaşılamaz. Bu çözüm için yazılım programları tercih edilmelidir.

3.2.1. Kalıp İçinde Hız Değişimleri

Döküm işlemi başladığında öncelikle havşa dolmaya başlar. Havşa aşağı doğru eğimli olarak tasarlanmıştır. Havşanın en dar kesiti metalin hızını belirler. Havşanın en dar kesit alanı havşanın çıkışı $\varnothing 32mm$ kesitidir. Metalin birim zamanda sabit hız ile aktığı bildiğimizden (denklem (3.2)) süreklilik teorisine göre en dar kesitli alanda metal en büyük hıza ulaşacaktır. Havşanın yüzeyinde metalin hızı sıfır olduğu için [Kakaç, 1998] metalin hızı Bernoulli prensibine göre yükseklik ile anlam kazanır. Metalin hızını düşüren kum ile sürtünmeler ise ihmal edilmiştir.

3.2.2. Ansys-Transient Thermal Analizi

Gri dökme demirin kalıbını oluşturan silis kumu, literatürde “green sand” adıyla tanımlanır. Dökümhane ortamında hazırlanan kum kalıp $1400\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 550\text{ mm}$ ’den oluşan dikdörtgenler prizması şeklindedir. İki adet kampana ve yolluk ile bağlanan modelden çıkarılarak oluşturulan kalıbın dolu hacmi ve ağırlığı ölçülen kumun yoğunluğu hesaplanır.

$$V_{\text{kum}} = 610 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3; \quad m_{\text{kum}} = 950 \text{ kg}$$

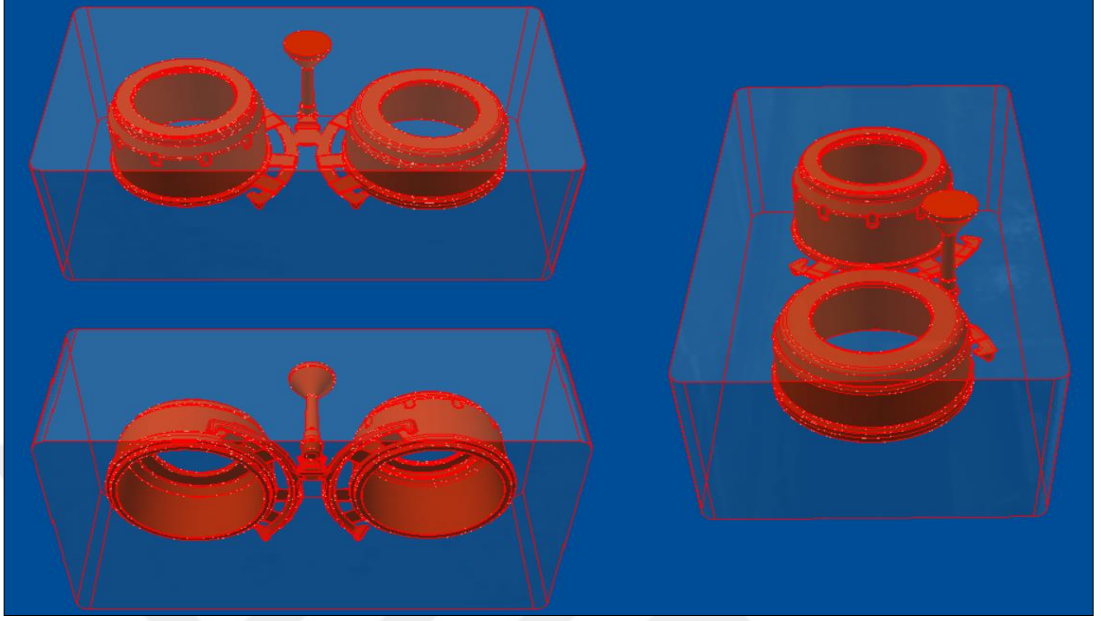
$$\rho = \frac{m_{\text{kum}}}{V_{\text{kum}}} \quad (3.17)$$

$$\rho = 1,55 \text{ kg/m}^3$$

Kumun yoğunluğu pratikteki uygulamadan edinilmiş, bu değer literatürdeki silis kumu yoğunluğu ($\rho = 1,49 \text{ kg/m}^3$) ile örtüştüğü görülmüştür.

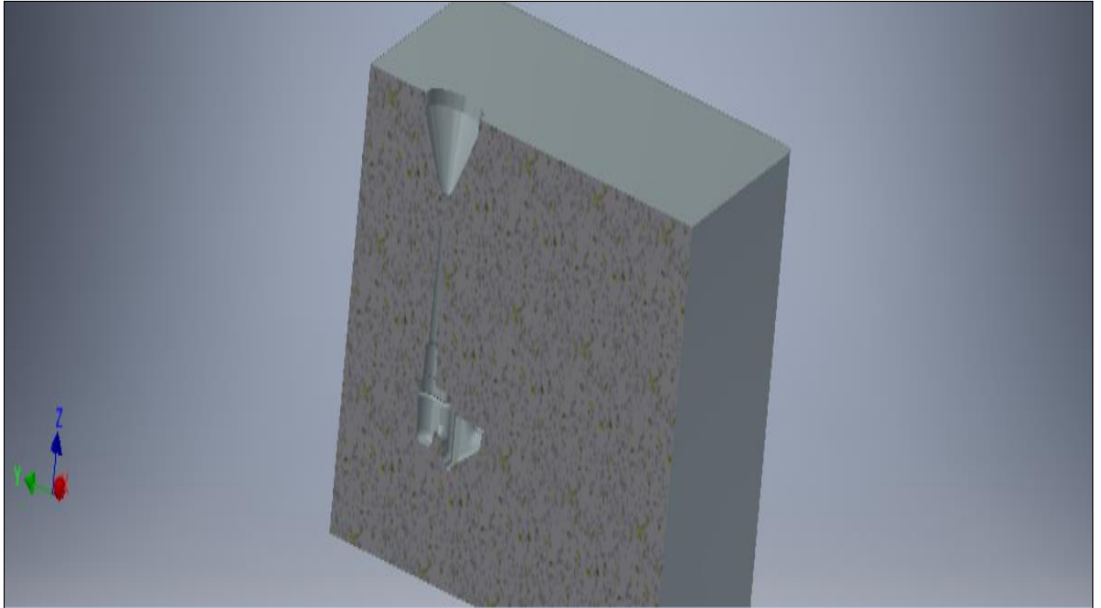
Geometrilere yazılıma, kum ve dökme demir olarak tanımlanmıştır. Kumun ilk sıcaklığı 35°C , metalin ilk sıcaklığı ise, Denklem (3.5) elde edilen değer $T = 1663,7 \text{ K} = 1390,7^\circ\text{C}$ olarak tanımlanmıştır.

Kum kalıp ve döküm parçasının birleşmiş hali Şekil 3.8’de üstten alttan ve yandan görüntüleri görülmektedir.



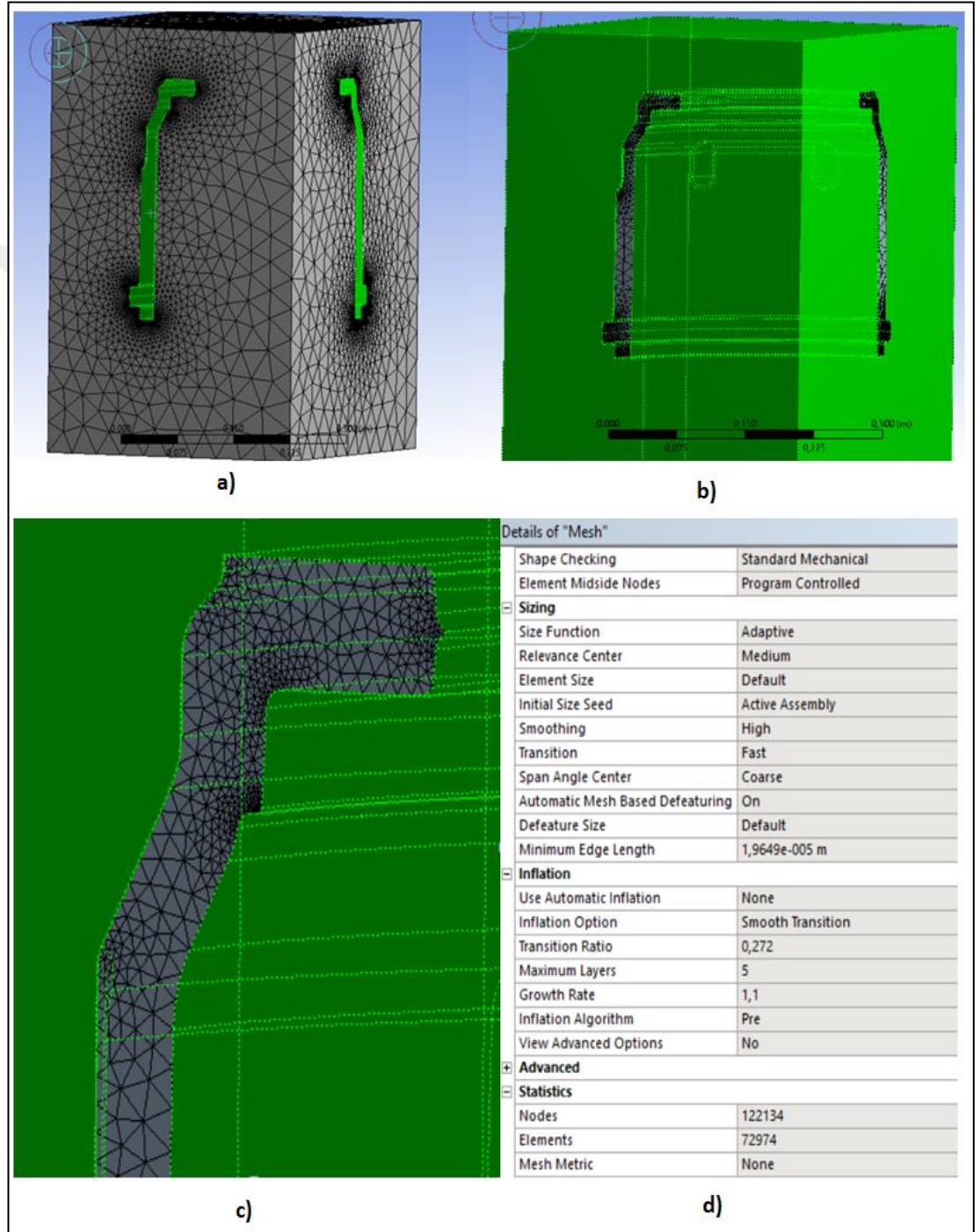
Şekil 3.8: Döküm parçası ile kum kalıbın montajı.

Döküm parçasının kalıp kumu içerisindeki yerleşimi kesit görüntüsü Şekil 3.9’daki gibidir. Kesit alanında havşa, dikey yolluk, topuk ve cürüflük bölgeleri görülmektedir.



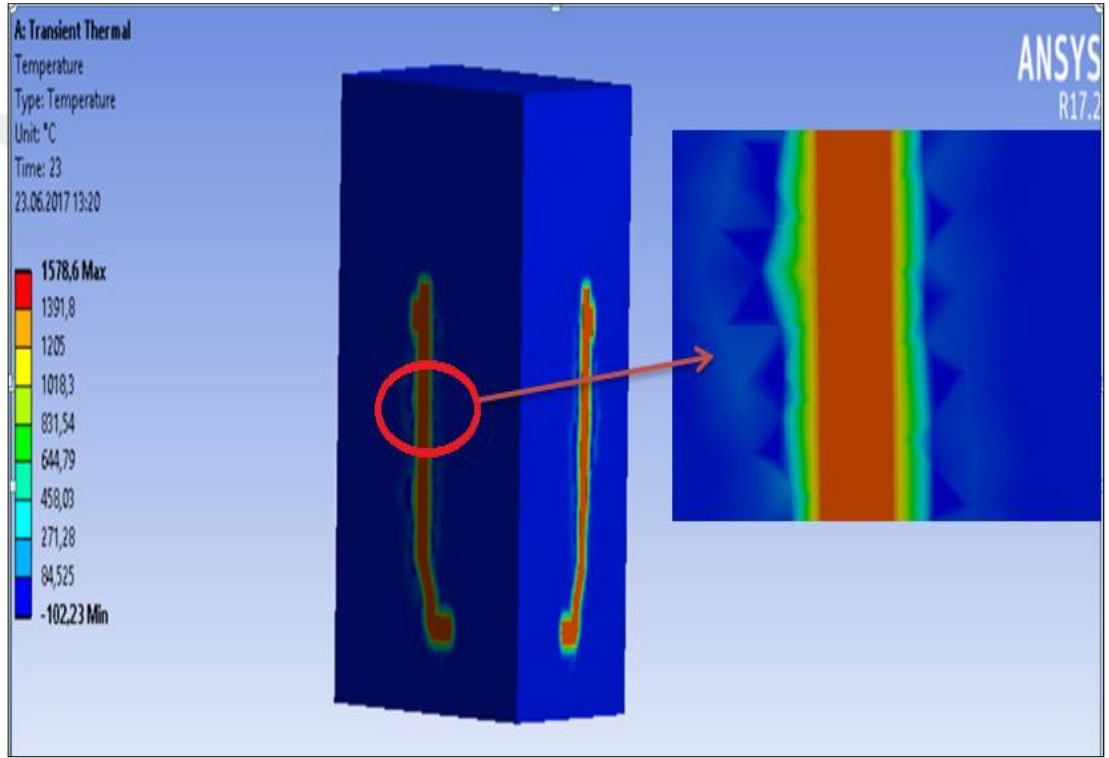
Şekil 3.9: Kum kalıp kesiti.

Ansys-workbench yazılımında geometrinin bir kısmı tanımlanarak Transient Thermal modülü ile çözümleme yapılır. Geometrinin tamamının seçilmeme nedeni mesh kalitesini arttırmak ve ısı transferinin yoğunlukla yaşandığı kampana bölgesinde çözümü görmektir. Bu yüzden kampananın $\frac{1}{4}$ kesiti üzerinden yeni geometri yazılıma tanımlanır.



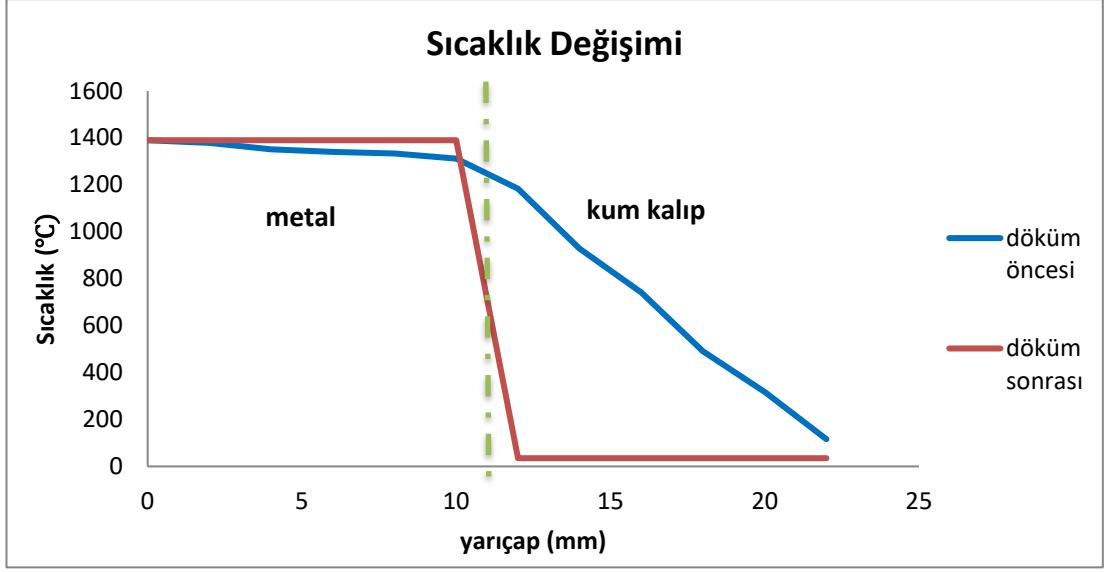
Şekil 3.10: a) Kalıp kumu mesh geometrisi, b) Metal mesh geometrisi, c) Metal detay mesh geometrisi, d) Mesh geometrisi detay bilgileri.

Şekil 3.10.a'da kum kalıp bölgesinin meshlerini gösterirken, Şekil 3.10.b'de metalin mesh dağılımını göstermektedir. Şekil 3.10.c'de metalin mesh geometrisinin yakın kesiti mevcuttur. Mesh yapısının dar kesitlerde sıklaştığı, geniş kesitlerde ise azaldı görülmektedir. Şekil 3.10.d'de mesh oluşumuna ilişkin detaylar mevcuttur. Sıcak olan bölgeye yani metale yaklaştıkça mesh dağılımı artmakta, uzaklaştığında mesh dağılımı azalmaktadır. Mesh geometrisinin büyüme oranı 1,1 alınmıştır. Problemi daha fazla mesh ile çözmek mümkündür ancak daha iyi gözlem yapmak için buna ihtiyaç duyulmamıştır.



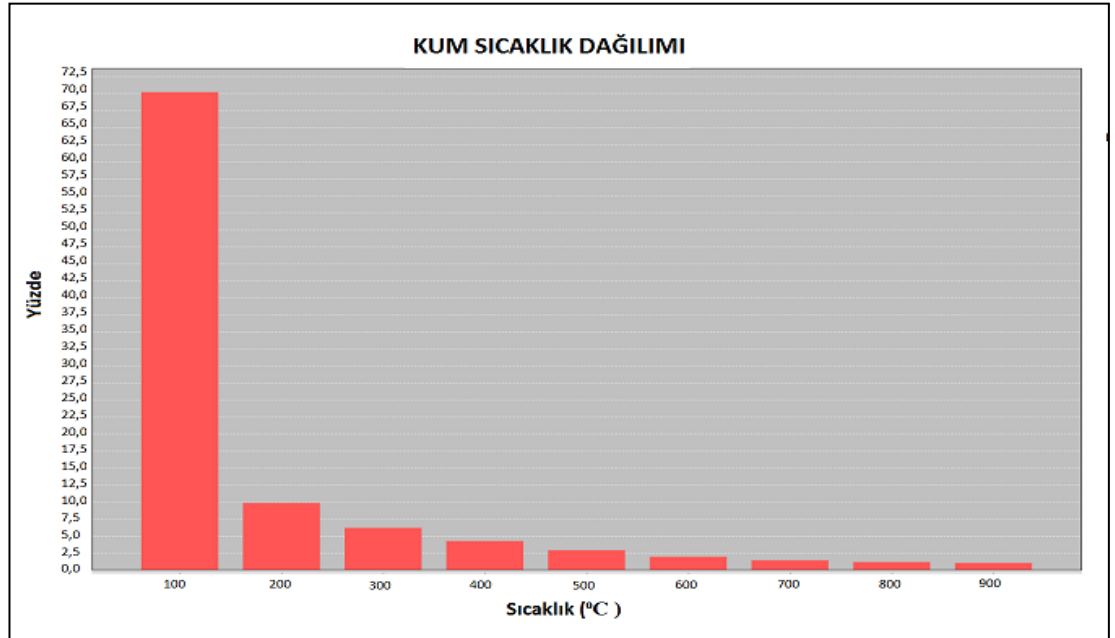
Şekil 3.11: Ansys-Transient Thermal analizinden alınan sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.11'de dökümün başlamasından itibaren 23 sn sonra tüm kalıp dolduğu anda metalin ve kumun sıcaklık değişimi görülmektedir. Şekil 3.11'de metale ve kuma ikiye minimetre aralıklarla yerleştirilen problardan alınan sıcaklık değerleri ile metalin merkezinden uzaklaştıkça sıcaklığın değişti tespit edilmiştir. Metalin kum ile temas ettiği yerlerde kumun sıcaklığının artışı içten dışa doğru azalan bir eğim ile olduğu görülmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Metal ve kum kalıbın sıcaklık değişimi.

Metalin farklı bölgelerine yerleştirilen problarda sıcaklığın başlangıç sıcaklığına göre ortalama 90 °C düştüğü gözlenmiştir. Başlangıçta 35 °C olan kum sıcaklığı metal ile temas ettiği yerlerde 1000 °C civarına kadar çıkabilmektedir. Isı önce metal ile kumun birleştiği noktalarda artış göstermektedir. Bu sonuç şaşırtıcı değildir. Magma-Soft yazılımından kumun sıcaklığında ani artışların bir anda olmadığı öngörülmüştü.



Şekil 3.13: Magma-Soft yazılımı analizi: Döküm sonu kum sıcaklık dağılımı.

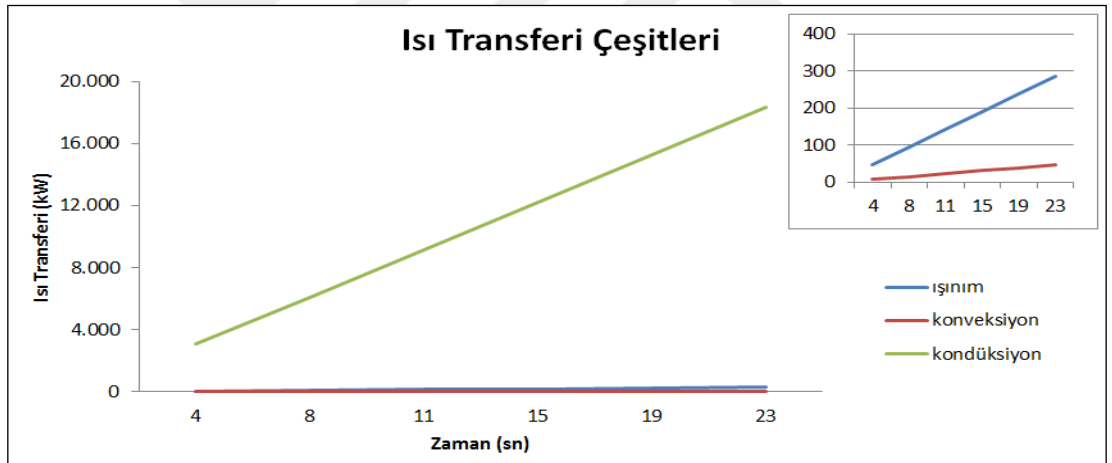
Şekil 3.13’de Magma Soft yazılımında kumun 23. sn sonundaki sıcaklık dağılımına bakıldığında kumun % 70 ine yakını 100 °C’nin altında kalırken; % 2’den daha az bir kısmı 900°C’ye ulaşabilmektedir.

Metalin toplam ısı kaybı bu sıcaklık değişimine göre teorik olarak da hesaplanabilir. Denklem (3.1), ısı denklemine ve Tablo 3.1’de verilen kütle ve ısı sığası verilerine göre, metalden kuma aktarılan ısı

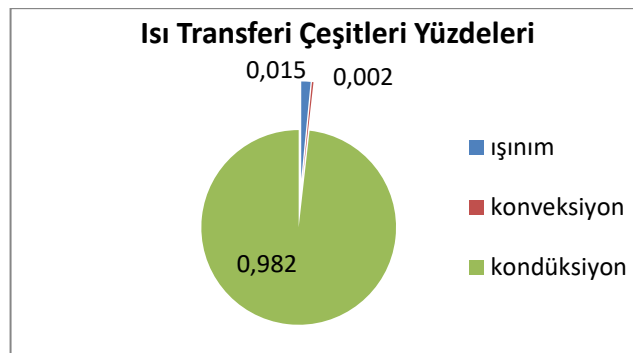
$$q_1 = \int_T^{T_d} mc \, dT = 135 \, \text{kg} \cdot 1.51 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 90 = 18.346 \, \text{kW} \quad (3.17)$$

olarak hesaplanır.

Analiz sonucuna göre metalden kuma yüklü miktarda ısı transferi gerçekleşmektedir. Denklem (3.17)’de elde edilen bu değer metalin diğer ısı transferlerine göre oldukça yüksektir (Şekil 3.14).

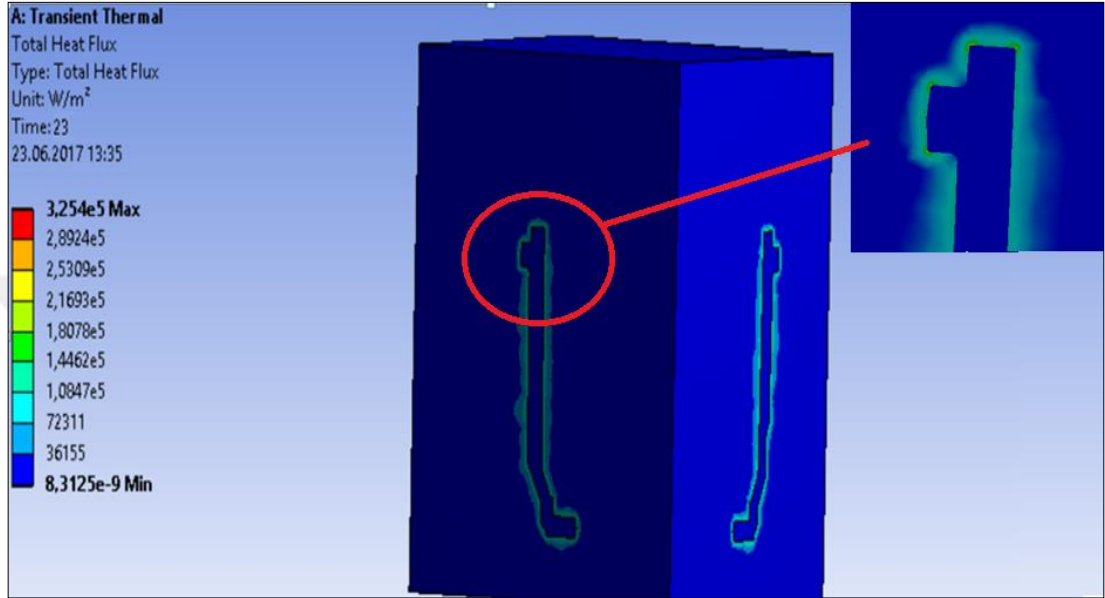


Şekil 3.14: Metal ve kum kalıbın sıcaklık değişimi.



Şekil 3.15: Metal ve kum kalıbın sıcaklık değişimi.

Şekil 3.15’de görülebileceği gibi metalden kuma ve havaya gerçekleşen tüm ısı transferleri çeşitlerine göre sınıflandırıldığında en büyük payı kum kalıp içerisinde gerçekleşen % 98 kondüksiyon ile ısı transferidir. Işınım ile ısı transferi toplam ısı transferinin % 0,015’ini kapsarken, konveksiyon ile ısı transferi toplam ısı transferinin % 0,02’sine tekabül etmektedir.



Şekil 3.16: Toplam Isı Akısı.

Şekil 3.16’da Ansys-Transient Thermal yazılımında kum ile metal arasında ısı akısı geometri üzerinden gözlenmektedir. Isı akısının kum ile metalin birleştiği yüzey bölgelerinde olduğu görülmektedir. Burada gerçekleşen ısı transferi kondüksiyon yoluyla gerçekleşmiştir. Alınan sonuçlar metalin kalıba tamamen dolduğu anda yani döküm başladıktan sonraki 23. sn’deki sonuçlar olduğu için, tüm kum kalıpta ısı transferi görülmemektedir. Yeterince beklenildiği takdirde metalden kuma ısı transferi sıcaklıkları eşitleninceye dek devam edecektir.

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada deneysel döküm analizi, teorik döküm analizi ve yazılımsal döküm analizi olmak üzere üç durum ardışık olarak incelenmiştir. Deneysel döküm analizinde dökümün fiziksel koşulları saptanmış, bu koşullar ile teorik ve yazılımsal analizler gerçekleştirilmiştir. Teorik ve yazılımsal analizler döküm koşullarında ne kadar ısı kaybı olduğunu belirlemek için yapılmıştır.

Deneysel döküm analizinde, dökümhane koşullarında bir döküm süreci baştan sona incelenmiştir. Bu sürece herhangi bir dış müdahalede bulunulmadığı gibi, rutini bozan durumların da olmadığından emin olunmuştur. Dökümün kalitesine etki eden durumlardan en önemlileri, dökümün süresi ve sıcaklığı olduğundan; özellikle bu verilerin standart dışında olmadığı kontrol altında tutulmuştur. Döküm parçası nihai ürüne dönüştüğünde incelenmiş, gözlemlere istinaden herhangi bir döküm firesine rastlanmamıştır. Yani standardına uygun yapılan bir döküm deneyi baz alınarak çalışmaya başlanmıştır. Döküm yapılan kalıbın ölçütleri, dökümün geometrisi, dökümün sıcaklığı ve döküm süresi, kalıp kumunun sıcaklığı ve yoğunluğu ve dökümün akış geometrisi ölçülmüş ve bilgisayar analizi için bu veriler hazırlanmıştır.

Dökümün akış geometrisi belirlenirken, döküm sıcaklığının yüksek olması ($1350 - 1400^{\circ}\text{C}$) ve düzensiz akış rejimi fiziksel olarak döküm akış geometrisini ölçmenin mümkün olmadığını göstermiştir. Döküm geometrisini belirlemek için öncelikle pota ağzı incelenmiştir. Pota ağzı kesit alanı ve kullanılmış potadaki katılaşmış metal incelenmiştir. Akışın önden geometrisinin dairesel olduğu belirlenmiştir. Akışın yandan geometrisini belirlemek için akışın yan görselleri alınmış ve döküm akış debisi süreklilik teoremine göre sabit kabul edilmiştir. Akışın yerçekimine bağlı olarak hızlanması beklenmekle birlikte; deneysel çalışmada akışın görsellerinde bu hızlanma, debi sabit iken kesitin incelenmesi ile gerçekleşmiştir. Döküm akış geometrisinde belirleyicilerden bir diğeri ise, pota ile kalıp arasında mesafe için, potanın yaklaşık yarısının dolu olduğu andaki pota ağzının havşanın merkezine yataydaki ve dikeydeki mesafeleri ölçülmüştür. Döküm akışının süresi gözlemlenerek ölçülmüş, aynı zamanda bu süre teorik olarak hesaplanmış, her iki değer kıyaslanmıştır. Bu süre akış esnasında metalin ne kadar ısı kaybettiğini hesaplamak için teorik aşamada kullanılmıştır. Kumun yoğunluğu kalıp içindeki mevcuttaki hacmi ve kütlesine göre hesaplanmış, bu yoğunluk yazılımsal analizlerde kullanılmıştır.

Ayrıca metaldeki ısı transferlerini gözlemleyebilmek için potadaki metalin ve potaya aktarıldıktan sonra havşadaki metalin sıcaklıkları ayrı ayrı ölçülmüştür. Teorik hesaplarda deneyselde ölçülen bu sıcaklıklar kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışmalar ile dökümün rutinindeki fiziksel koşulları belirlenmiş bu veriler teorik ve yazılımsal analizlerde kullanılarak ve kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmalar yapılmasaydı bu veriler literatür verileri ile veya tahmini yaklaşımlar ile edinilebilir ancak gerçeğe uygunluğu ispatlanmış olmazdı.

Teorik analizlerde metalin ne kadar ısı kaybettiğini belirlemek için ısı transferi çözümlemeleri yapılmıştır. Döküm sürecinin başından sonuna kadar üç çeşit ısı transferi gerçekleşmiştir. Bunlar konveksiyon, kondüksiyon ve ışımadır. Problem üç ayrı aşamada incelenmiştir. İlk aşama metalin akışı esnasında gerçekleşen ısı transferidir. Bu aşamada metal serbest düşme hareketi ile potadan kalıba doğru akar. Gerçekleşen ısı transferi metalden havaya, konveksiyon ve ışıyım ile ısı transferidir. İkinci aşamada ısı transferi kalıbı dolduran metalin hava ile temas ettiği en üst bölgesindeki yani havşadaki metalin hava ile ısı transferidir. Bu aşamada da gerçekleşen ısı transferi çeşitleri, konveksiyon ve ışıyım ile ısı transferidir. Son aşama ise döküm gerçekleştikten, kalıp dolduktan sonra metalden kalıba gerçekleşen ısı transferidir. Bu ısı transferi ise kondüksiyon ile ısı transferidir. İlk iki aşama için ısı transferi çözümlemeleri yapılmıştır. Ayrıca ikinci aşama, birincinin bitimi ile gerçekleştiğinden ilk aşamadaki ısı transferine bağlı değişen metal sıcaklığı kullanılmış, ikinci aşamada çözümlemesi yapılmıştır. İkinci aşamada sıcaklık 15°C düşmüştür. Üçüncü aşamada metal artık kalıp içerisinde. Metal ile kalıp arasında gerçekleşecek ısı transferi çeşidi kondüksiyon ile ısı transferidir. Bu aşamanın çözümlemesinde kalıp içindeki metalin sıcaklık fonksiyonu belirlenmiştir. Problemin sınır koşulları; merkezde sıcaklık değişiminin sıfır olduğu, zamana bağlı sıcaklık değişiminin ise radyal doğrultuda ve kondüksiyon ısı transferi ile gerçekleşeceği şeklinde belirlenmiştir. Problemin hem radyal doğrultuda olması, hem de zamana bağımlı olması Bessel yaklaşımını zorunlu kılmıştır. Ancak Bessel fonksiyonunun analitik çözümünü bir yazılım programı kullanmadan yapmanın, bu problem için mümkün olmadığı görülmüştür. Bu nedenle bu analitik çözüm yerine yazılımsal çözüm olarak sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılmıştır. Problemin zamana bağlı olması nedeniyle Ansys-Transient Thermal yazılımı ile çözümlemesi yapılmıştır.

Yazılımsal çözümlemede geometrinin simetrik olmasından faydalanılmış, çözümlemenin daha hızlı sonuç vermesi için; tek bir döküm parçasının dörtte bir

geometrisi, yazılımda analiz edilmiştir. Döküm parçası, sıcak metal, ile kum arasında gerçekleşecek ısı transferi yazılımda kondüksiyon olarak tanımlanmıştır. Geometrinin mesh tasarımı ince kesitli bölgelerde yoğun olacak şekilde yapılmıştır. Mesh sayısı olabildiğince fazla seçilmiş, daha fazlası seçilmesinde problemin sonuçlarında bir değişiklik olmayacağı saptanmıştır. Analizin sonunda metalin merkezinden dışa doğru proplar ile sıcaklıklar ölçülmüştür. Metalin kum ile temas ettiği yerlerde kum sıcaklığının artışı içten dışa doğru azalan bir eğim ile gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu gözleme göre metalin sıcaklığı ortalama 90 °C düşmektedir. Metalin kum ile temas ettiği noktalarda ise kum sıcaklığının 1000 °C'ye kadar çıkabildiği gözlenmiştir. Analiz sonunda kumun sıcaklığının arttığı bölgeler kumun metal ile temas halinde olduğu bölgelerdir. Kumun sıcaklığının birden artmadığı ısı geçişinin kademeli olduğu görülmüştür. Bu sonuç Magma-Soft yazılımında yapılan döküm analizi sonucunda kum sıcaklık dağılımı grafiklerinin belirttiği gibi olmuştur. Dökümün 23. sn'sinde Magma-Soft analizinden çekilen kum verilerine göre; kumun % 70'ine yakını 100 °C'ye ulaşırken; % 2'den daha az bir kısmı 900°C'ye ulaşabilmektedir. Yani kum sıcaklığı Ansys-Transient Thermal analizi ile uyumludur.

Bu çalışmada metalin dökümü boyunca ısı transferleri ardışık olarak deneysel çalışma, nümerik metodlar ve yazılımsal analizler ile incelenmiş ve tüm aşamalar bir diğeri ile kıyaslanmıştır. Dökümhane koşulları, Ansys-Thermal Transient yazılımı ve Magma-Soft yazılımının birbirlerini teyit etmesi ile çalışma kendi içinde tutarlılık göstermiştir.

Çalışmada metalin kalıp içerisinde ve potadan kalıba dökülürken oluşabilecek sürtünmeler ve sıçramaların yaratabileceği düzensizlikler ihmal edilmiştir. Ayrıca sıcak metalin nemli kum ile etkileşimi esnasında açığa çıkan gazlar ihmal edilmiştir.

Tüm analizlerin sonunda analitik ve yazılımsal ısı transferleri değerlendirildiğinde görülmüştür ki, dökümün gerçekleştiği 23 sn boyunca en büyük ısı transferi kum ile metal arasında gerçekleşen kondüksiyon ile gerçekleşmiştir. Işınım ile ısı transferi % 1,5 pay alırken, konveksiyon ile ısı transferinin payı ise % 0,2 ile oldukça düşüktür.

Dökümhanelerin kıt kaynaklar ile yaptığı döküm işlemlerinde, metalin ergitilmesi için gerekli olan ısı, endüstriyel ürünün maliyetini arttırdığı için gerekli en az ısı ile döküm işleminin yapılması, ısıdan tasarruf edilebilmesi gereklidir. Bu çalışmada metalin dökümü boyunca ısı transferleri ardışık olarak deneysel çalışma, nümerik metodlar ve yazılımsal analizler ile incelenmiş ve tüm aşamalar bir diğeri ile

kıyaslanmıştır. Bu ısı transferlerinin hepsini ısı kaybı olarak nitelendirmek doğru olmayacaktır. Çünkü metalin kum kalıp içerisinde ısınısını kademeli olarak azaltarak kuma aktarması, bu sayede ürünlerini, fireye sebep olmadan kaliteli olarak üretime yol verir. Ancak bu ısı aktarımı fazla hızlı olduğunda yapısal problemler oluşturacağı için, nihai üründe fireye sebep olmayacak bir hız ile gerçekleşmelidir. Isı kayıpları ise metalin hava ile temas ettiği bölgelerde gerçekleşir. Bu ısı kayıpları çalışmanın analitik çalışmaları kısmında incelenmiş, yapılan bu çalışma iyileştirme çalışmaları için kullanılabilir. Isı kayıplarını azaltmak metalin potadan kalıba aktarılırken kalıba konumunu yaklaştırmak ile mümkün olabileceği gibi, daha yakından yapılan döküm akışta oluşabilecek türbülansa sebebiyet vermeyecektir. Bu sayede metalin düzenli akışı sağlanacak, aksi durumda yaşanan kumdan parça kopma, akışkanın içine hava sıkışma vb. durumlar olmayacak, olası fireler ortadan kalkacaktır.

Yapılan deneysel çalışma sonunda incelenen döküm parçalarında fireli ürüne rastlanılmadığı için çalışmada referans alınan koşulların benzer çalışmalar için kullanılabilir. Çalışmanın nümerik ve yazılımsal analizleri ise benzer çalışmalar ya da ısı kayıplarını azaltmak için yapılacak başka çalışmalar için yöntem belirlemede referans olarak kullanılabilir. Geometride veya diğer fiziksel koşullarda değişiklik olsa dahi, uygulanacak yöntemler belirlendiğinden zaman ve enerji anlamında fayda sağlanabilir. Ayrıca çalışma dökümhane koşullarında deneysel çalışmalar, nümerik ve analitik yaklaşımlar ile tüm döküm sürecinin ısı kayıplarını tespit ederek bu konuda döküm işlemi için yapılan özgün bir çalışmadır. Çalışmanın devamı niteliğinde döküm fireleri veya mikroyapının, ısı kayıpları ile ilişkisini irdeleyerek; ayrıntılı çalışmalar tasarlanabilir. Döküm parçasının soğuma sürecini irdeleyerek sürecin kısılması için, metalden kuma ısı transferinin daha hızlı olabileceği ancak fireye sebebiyet vermeden, seri üretimi hızlandırabilecek yaklaşımlara üzerinde çalışmalar ile yöntem geliştirilebilir. Bu sayede döküm sektörüne daha az enerji tüketimi ile firesiz alternatif üretim metodları kazandırılabilir.

KAYNAKLAR

Cambell J., (1991), “Casting”, 2nd Edition, Butterworth Heinemann.

Mesleki Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi 1, (2011), “Gri (Esmer) Dökme Demir”, Baskı No:521MMI271.

Web 1, <http://www.haddemetal.com/tr/download/dokmedemirler.pdf> (Erişim Tarihi: 25/03/2017).

Davis J. R., (1996), “Cast Irons” 5th Edition, ASM International.

Santner J. S., Goodrich G. M., (2006), “Iron Alloys”, Journal of Cast Source Directory, 17, 17-22.

Behnam M. M. J., Davami P., Varahram N., (2010), Effect of Cooling Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron”, Journal of Material Science and Engineering, 528, 583-588.

Web 2, (2017), http://www.foundrysolution.com/pemsil/intfondus.nsf/V5_WebDL/30EEB29999E7962BC1256AAF0052A36B?OpenDocument&, (Erişim Tarihi: 12/02/2017).

Buckley D. H., (1977), “Effects of Carbon Content on Friction and Wear of Cast Irons” Technical Paper No: NASA 1052, Lewis Research Center Cleveland, Ohio.

Holmgren D., Dioszeg A., Svensson I. L., (2007) “Effects of Carbon Content and Solidification Rate on Thermal Conductivity of Gray Cast Irons”, Journal of China Foundry, 4 (3), 2010-2014.

Voort G. F. V., (2004), “Metallography and Microstructures of Cast Iron”, 9th Edition, ASM International.

Web 3, (2017), <http://www.atlasfdry.com/grayiron-composition.htm>, (Erişim Tarihi: 13/02/2017).

Ali A. H., (2010) “Metallurgy of Gray Cast Iron” The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 10 (1), 89-96.

Peaslee K., Richards V., Jeffrey S., (2012) “Melting efficiency Improvement”, Technical report No: DE-FC36-04GO14230, Missouri University, Rolla Missouri.

Web 4, (2014), http://www.oerlikon.com.tr/files/dokme_demirler_ve_dokme_demirlerin_kaynagi.pdf, (Erişim Tarihi: 27/11/2014).

Web 5, (2017) <http://docplayer.biz.tr/43209698-3-gri-dokme-demir-otektik-alti-gri-dokme-demirlerin-yavas-sogutulmasi.html>, (Erişim Tarihi: 19/03/2017).

Seidu S. O., (2014), “Effects of Compositional Changes on the Mechanical Behaviour of Gray Cast Iron”, Journal of Metallurgical Engineering, 3 (2), 92-95.

Cambell J, Tiryakioğlu M. (2006), “Modelling Microstructure and Properties: The Contributions of Grain Size, DAS and Bifilms”, Materials Science Forum, 519, 1453-1460.

Bihari B., Kumar R., Singh A.K., (2014), “Effects on the Mechanical Properties of Gray Cast Iron with Variation of Copper and Molybdenum as Alloying Elements”, International Journal of Engineering Research & Technology, 3 (5), 81-84.

Web 6, (2017), <http://akgunalsaran.com/doc/11-fec-6628.pdf>, (Erişim Tarihi: 13/02/2017).

Web 7, (2017), https://dokumhane.net/2015/07/06/dokme-demirde-sogumaegrismi%20analizi%20nin-temelleri_ (Erişim Tarihi: 16/02/2017).

Web 8, (2017), http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48936/31456/fefe3c_diyagram%C4%B1-sunu.pdf, (Erişim Tarihi: 17/02/2017).

Web 9, (2017), <http://www.metalurjix.com/DEMIRKARBON-DENGEDIYAGRAMI-terimi-217.html>, (Erişim Tarihi: 17/02/2017).

Stefanescu D. M., (2005), “Solidification and Modeling of Cast Iron-A Short History of the Defining Moments” Journal of Materials Science and Engineering, 413&414, 322-333.

Web 10, (2017), http://me.emu.edu.tr/me364/ME364_casting_processes.pdf , (Erişim Tarihi: 27/03/2017).

Aran. A., (2007), “Döküm Teknolojisi İmal Usülleri Ders Notları”, İstanbul.

Cerit A. M, Esin A., Albayrak K., Bayram B., (1996) “Üretim ve Tasarım Cilt 2”, Baskı No: 170, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği.

Demircioğlu N. S., (2013) “Dökümcülük ve Modelcilik Teknolojisi-1”, 1. Baskı, Pozitif Matbaacılık.

Vaghasia D., (2009), “Gating System Design Optimization for Sand Casting”, M.Tech Dissertation, 07310032, Indian Institute of Technology Bombay.

Web 11, (2017), <http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/dokum-yontemleri-irfan-ay.pdf> , (Erişim Tarihi: 22/04/2017).

Web 12, (2007), <https://ankirosfoundrycongresstr.files.wordpress.com/2014/09/dem-isac59f-kazc4b1m-kubat.pdf> (Erişim Tarihi: 29/03/2017).

Ülker A., (2006), “Kum Kalıba Dökümde Farklı Yolluk, Besleyici Tasarım Yöntemlerinin Kıyaslanması”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.

Ergen E., (2008), “Disamatik Kalıplamada Yolluk Sistemi ve Kalıp Gözlerinin Doldurulmasının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Yekinni A. A., Bello S. K., Animanhaun L.A., Olaiya K.A., (2015), “Assessment of Mechanical Properties of Foundry Moulding Sands”, International Journal of Engineering Innovation & Research, 4 (2), 365-372.

Canadian Foundry Association, (2003), “Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries”, M92-262/2003E, Natural Researches Canada.

Web 13, (2007), https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/Brochures/Turkish/Furnace-Linings-Ferrous_tr.pdf.downloadasset.pdf, (Erişim Tarihi: 12/04/2017).

Valencia, J. J., Quested P. N., (2008) “Thermophysical Properties”, ASM Handbook, 15, 468-481.

Çelik Granül, (2002), Teknik Bülten Sayı 2, Çelik Granül Sanayi A.Ş.

EERE, (2005), “Metal Casting Industry of Future Fiscal Year Annual Report “, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy.

Mehta N. C., Raiyani A.D, Gondalia V.R, (2013) “Thermal Fatigue Analysis of Induction Melting Furnace Wall for Silica Ramming Mass”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3 (2), 357-362.

Angus, H. T., (1976), “Cast Iron: Physical and Engineering Properties”, 2nd Edition, Butterworths.

Larsen, P., (2004), “Iron Melt Flow in Thin Walled Sections Cast in Vertically Parted Green Sand Moulds”, Doctoral Thesis, Technical University of Denmark.

Flori M., Milostean D., (2013) “Heat Transfer Simulation in Mold During Die Casting of Steel”, University Politehnica Timisoara, Faculty Of Engineering Hunedoara, 4, 101-104.

Kakaç S., (1998), “Isı Transferine Giriş 1”, 2. Baskı, Tıp & Teknik Yayıncılık.

Rolle K. C., (2000), “Heat and Mass Transfer”, 1st Edition, Prentice Hall

ÖZGEÇMİŞ

Duygu YALÇIN 1987 yılında Kocaeli’nde doğdu. 2005 yılında başladığı Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği lisans programından 2011 yılında mezun oldu. Aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES) projesinde görev aldı. Nisan 2014’den bu yana ECU Fren Döküm San. A.Ş.’de Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaktadır.

