

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

**BATARYA KALIPLARINDA DÖKÜM-KALIP ISI TRANSFER
KATSAYISI HESAPLANMASI VE YOLLUK TASARIMI İLE KALIP
ISI DAĞILIMININ OPTİMİZE EDİLMESİ**

Murat Can NİŞANCI

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ali YURDDAŞ**



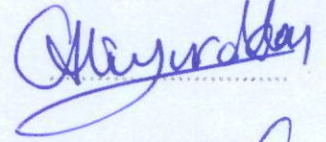
MANİSA-2019

TEZ ONAYI

Murat Can NİŞANCI tarafından hazırlanan "**Batarya Kalıplarının Döküm-Kalıp Isı Transfer Katsayısı Hesaplanması ve Yolluk Tasarımı ile Kalıp Isı Dağılımının Optimize Edilmesi**" adlı tez çalışması 02/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

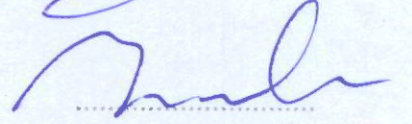
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali YURDDAŞ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



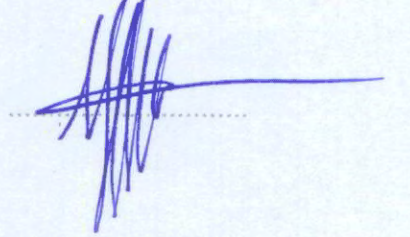
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Yunus ÇERÇİ
Adnan Menderes Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Yiğit AKSOY
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Murat Can NİŞANCI



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VII
DENKLEM DİZİNİ.....	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Döküm Tarihçesi	3
2.2. Döküm Tekniği.....	4
2.3. Basınçlı Döküm Yöntemi	5
2.3.1. Üretim Yöntemine Göre Uygulama Yöntemleri	7
2.3.1.1. Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi	7
2.3.1.2. Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi	8
2.3.1.3. Vakum Döküm Yöntemi	9
2.3.1.4. Sıkıştırma Döküm Yöntemi	10
2.3.2. Basınçlı Döküm Kalıpları	10
2.3.3. Basınçlı Dökümünde Kullanılan Kalıp Malzemeleri.....	18
2.3.4. Basınçlı Döküm Prosesinde Kullanılan Alaşımalar	19
2.3.4.1. Alüminyum ve Alaşımaları.....	20
2.3.4.2. Bakır ve Alaşımaları	20
2.3.4.2.1. Pirinç Alaşımı (Bakır – Çinko)	21
2.3.5. Basınçlı Dökümde Oluşan Hatalar	22
2.3.5.1. Gaz Boşluğu Hatası.....	22
2.3.5.2. Çekme Hatası	23
2.3.5.3. Soğuk Birleşme Hatası.....	23
2.4. Basınçlı Döküm Prosesinde Etkili Olan Parametreler	23
2.5. Döküm Prosesine Ait Termal Yaklaşımlar.....	24
2.5.1. Metal-Kalıp Ara Yüzey Direnci	25
2.5.2. Döküm-Kalıp Ara Yüzey Teması ve Isı Transferi.....	26
2.5.3. Döküm Prosesinde Isı Transferine Etkisi Olan Parametreler	30
2.5.3.1. Kalıp Malzemesi ve Kalınlığının Isı Transferine Olan Etkisi.....	30
2.5.3.2. Kalıp Sıcaklığının Isı Transferine Olan Etkisi.....	32
2.5.3.3. Kalıp Kaplamasının Isı Transferine Olan Etkisi	33
2.5.3.4. Döküm Alaşımında Ki Kompozisyonun Isı Transferine Olan Etkisi	34
2.5.3.5. Döküm Sıcaklığının Isı Transferine Olan Etkisi.....	36
2.5.3.6. Döküm Basıncının Isı Transferine Olan Etkisi	37
2.6. Ara Yüzey Isı Transferinin Belirlenmesi	38
2.6.1. Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısı.....	38

2.6.2. Matematiksel Model	39
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	41
3.1. Materyal.....	41
3.1.1. Batarya.....	41
3.1.2. Batarya Kalıbı	44
3.1.3. Alçak Basıncılı Döküm Tezgahı.....	46
3.1.4. Termokupl.....	46
3.1.5. Ölçüm Kayıt Cihazı	49
3.1.6. Simülasyon ve Analiz Programları	50
3.2. Yöntemler	53
3.2.1. Proses Anında Sıcaklık Belirlenmesi.....	53
3.2.2. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi	59
3.2.3. Simülasyonun Yapılması	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	61
4.1. Termal Analiz ile Isı Transfer Katsayısının Hesaplanması	61
4.2. Belirlenen Isı Transfer Katsayısı ile Simülasyon Optimizasyonu.....	66
4.3. Simülasyon Sonuçları ile Deneysel Üretimdeki Hataların Karşılaştırılması ..	93
4.4. Yeni Tanımlanan Isı Transfer Katsayısı ile Yolluk Tasarımı Değiştirilen Modele Simülasyon Yapılarak Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	98
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR	105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
Mg	Magnezyum
Cu	Bakır
Zn	Çinko
Pb	Kurşun
Fe	Demir
Si	Silisyum
Sn	Kalay
CuZn39Pb1Al-C	Döküm prosesi için Pirinç Hammaddesi
CuCoNiBe	Kalıp için Bakır Berilyum Hammaddesi
T_c	Döküm sıcaklığı
TM	Kalıp sıcaklığı
Q_x	Isı enerjisi
A	Alan
L	Genişlik
k	Malzemenin ısı iletim katsayısı
α	Isı yayılım katsayısı
k	Isı iletim katsayısı
ρ	Yoğunluk
c	Özgül ısı
T	Sıcaklık
t	Zaman
x	Cartesian koordinatı
kc	Döküm için ısı iletim katsayısı
ρc	Döküm için yoğunluk
cc	Döküm için özgül ısı
l	Ergime gizli ısı
f_s	Sıvı metalin katı oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Ottmar Mergenthhaler tarafından 1890 yılında geliştirilen, matbaa harflerinin tek bir parça halinde dökümünü sağlayan dizgi makinesi	3
Şekil 2.2. Döküme hazır bir kapalı kum kalibi kesiti	4
Şekil 2.3. Bazı döküm parçalar	6
Şekil 2.4. Basınçlı dökümde çok kullanılan bazı alaşımların kimyasal kompozisyonları	7
Şekil 2.5. Düşük basınçlı döküm makinesi	8
Şekil 2.6. Basit bir yüksek basınçlı döküm makinesi	9
Şekil 2.7. Sıkıştırma döküm prosesi	10
Şekil 2.8. Soğuk kamara basınçlı döküm kalibi.....	11
Şekil 2.9. Çekirdeklere işlenen göz tipleri	12
Şekil 2.10. Sabit kalıp hamili örneği	12
Şekil 2.11. Kılavuz kolonları ve yatakları	13
Şekil 2.12. Taralı kısımlar itici plakası ile hareketli tarafı göstermektedir	13
Şekil 2.13. Paraleller	14
Şekil 2.14. İtici sistemi	14
Şekil 2.15. İtici pimleri	15
Şekil 2.16. Dişi ve maça yerleşimlerine örnekler	15
Şekil 2.17. Dağıtıcı çeşitleri	16
Şekil 2.18. Giriş kanallarının kalıp üzerindeki tipik konumları	16
Şekil 2.19. Taşma ve tahliye kanalına örnek dişi kalıp yerleşimi	17
Şekil 2.20. Taşma ve tahliye kanalına örnek parça yerleşimi	17
Şekil 2.21. Soğutma kanallarına örnek kalıp kesiti	18
Şekil 2.22. Cu-Zn Faz diyagramı	21
Şekil 2.23. Kalıp içindeki döküm parçasının katılaşması süresince ısı transfer hızını kontrol eden ısı dirençlerinin etkisini gösteren sıcaklık eğrisi	25
Şekil 2.24. Metal-Kalıp Ara Yüzeyinde Temasın İlerlemesi.....	27
Şekil 2.25. Döküm-Kalıp ara yüzeyinde sıcaklık değişimi A) Mükemmel temas B) Uyumsuz temas	29
Şekil 3.1. Batarya örnekleri	41
Şekil 3.2. Parçada oluşan hata örnekleri	42
Şekil 3.3. Pareto analizi yapılarak hangi hatalara odaklanılması gerektiğini gösteren çalışma	43
Şekil 3.4. Kokil kalıp örneği.....	44
Şekil 3.5. Çeşitli metallerin ısı iletkenliklerini gösteren örnek.....	45
Şekil 3.6. Termokupl çeşitlerinin limitleri.....	47
Şekil 3.7. Termokupl çeşitlerinin izolasyon tipleri.....	48
Şekil 3.8. Eleman teli montaj şekilleri.....	48
Şekil 3.9. Ölçüm kayıt cihazının ekran görüntüsü.....	49
Şekil 3.10. Ölçüm kayıt cihazının teknik özellikleri.....	50
Şekil 3.11. Simülasyon modeline ait iş akış grafiği.....	52
Şekil 3.12. Kalıp modeli	53
Şekil 3.13. Alt kalıp ve termokupl noktaları.....	54
Şekil 3.14. Üst kalıbı ve termokupl noktaları	54
Şekil 3.15. 3D Modelde yapılan termokupl yerleşimlerinin projede kullanılacak kaliba da uygulanması	55
Şekil 3.16. 3D Modelde yapılan termokupl yerleşim noktalarının projede kullanılacak kaliba da uygulanması.....	55

Şekil 3.17. Termokuplların kalıba montajının yapılması	56
Şekil 3.18. Yapılan ikinci deneysel üretimden görüntü.....	56
Şekil 3.19. Yapılan ikinci deneysel üretimdeki ölçüm değerleri.....	57
Şekil 3.20. Yapılan İkinci Deneysel Üretimden Alınan Ölçüm Sonuçları	59
Şekil 4.1. Modellenen Geometri a) Kontrol Hacmi b) Kalıp Geometrisi c) Akış Hacmi.....	62
Şekil 4.2. Analiz geometrisinin mesh görüntüsü	63
Şekil 4.3. Parametrik termal analiz kombinasyonları	65
Şekil 4.4. Optimizasyon sonucu oluşan simülasyon versiyonları.....	69
Şekil 4.5. Simülasyon sonucu uygun çıkan versiyonlar	70
Şekil 4.6. Sonucu uygun olan versiyonda deneysel üretim sıcaklık eğrisi (mavi) ile simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi (kırmızı).....	71
Şekil 4.7. Simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi (mavi) ile deneysel üretim sıcaklık eğrisi (kırmızı).....	72
Şekil 4.8. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi)	73
Şekil 4.9. Optimizasyon kurgusu sonucu ortaya çıkan simülasyon versiyonları.....	74
Şekil 4.10. Simülasyon sonucu en uygun çıkan versiyonlar.....	74
Şekil 4.11. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	75
Şekil 4.12. Deneysel ölçüm verilerinin tekrardan bir üretim döngüsüne göre düzenlenmesi	76
Şekil 4.13. Simülasyon Sonucuna En Uygun Versiyonlar	77
Şekil 4.14. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)	77
Şekil 4.15. Simülasyon sonuçlarındaki en uygun versiyon	78
Şekil 4.16. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	79
Şekil 4.17. Simülasyon sonuçlarında ki en uygun versiyon	81
Şekil 4.18. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	82
Şekil 4.19. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	82
Şekil 4.20. Simülasyon sonucunda ki en uygun versiyonlar	83
Şekil 4.21. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	84
Şekil 4.22. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	84
Şekil 4.23. Simülasyon sonucunda ki en uygun versiyonlar	85
Şekil 4.24. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	86
Şekil 4.25. Simülasyon sonucunda ki en uygun versiyonlar	87
Şekil 4.26. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	87
Şekil 4.27. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	88
Şekil 4.28. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	89
Şekil 4.29. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	90

Şekil 4.30. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	91
Şekil 4.31. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi).....	92
Şekil 4.32. Yapılan son çalışmanın sıcaklık ve ısı transfer katsayı değerlerinin Magma programında yeni bir isimle tanımlanması	93
Şekil 4.33. Magma programında yapılan son çalışmanın hot spot analizi.....	94
Şekil 4.34. Magma programında yapılan son çalışmanın porosity analizi	94
Şekil 4.35. Magma programında yapılan son çalışmanın porozite analizi (parçanın kartuş ayakları dediğimiz bölgedeki hatalar).....	95
Şekil 4.36. Magma programında yapılan son çalışmanın porozite analizi (parçanın kartuş yan duvarları dediğimiz bölgedeki hatalar)	95
Şekil 4.37. Deneysel üretimde ıskartaya ayrılan parçanın hatası (kartuş dış duvarı)	96
Şekil 4.38. Deneysel üretimde ıskartaya ayrılan parçanın hatası (kartuş iç duvarı)..	96
Şekil 4.39. Deneysel üretimde ıskartaya ayrılan parçanın hatası (kartuş ayaklarının damlacıkları)	97
Şekil 4.40. Hata karşılaştırması	97
Şekil 4.41. Lavabo bataryasının üretimi devam eden yolluk tasarımı.....	98
Şekil 4.42. Isı dağılım analizi	99
Şekil 4.43. Hot Spot analizi	100
Şekil 4.44. Porozite analizi	100
Şekil 4.45. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyon denemesi	101
Şekil 4.46. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyonun ısı dağılımı	101
Şekil 4.47. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyonun Hot Spot analizi	102
Şekil 4.48. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyonun Porozite analizi	102

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Analiz setup adımları	63
Tablo 4.2. Hava, parça ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri	64
Tablo 4.3. Kritik Olarak Belirlenen Parça ve Kalıp Sıcaklıkları.....	64
Tablo 4.4. Hesaplanan ısı transfer katsayı değerleri.....	66
Tablo 4.5. Yapılan simülasyon çalışmalarına girilen ısı transfer katsayı değerleri...	67
Tablo 4.6. Yapılan simülasyonlarda ki parça-kalıp arası girilen ısı transfer katsayıları	68



DENKLEM DİZİNİ

	Sayfa
Denklem 2.1	266
Denklem 2.2	300
Denklem 2.3	38
Denklem 2.4	38
Denklem 2.5	39
Denklem 2.6	39
Denklem 2.7	39
Denklem 2.8	39
Denklem 2.9	40
Denklem 2.10	40
Denklem 2.11	40
Denklem 2.12	40
Denklem 2.13	40
Denklem 2.14	40

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyerek, lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi ve manevi her yönden yanımda olan, bilgi ve tecrübeleri ile beni aydınlatıp yol gösteren, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali YURDDAŞ' a, yüksek lisans eğitimim süresince desteklerini her zaman hissettiğim değerli çalışma arkadaşlarıma ve projemin her aşamasında araştırmamda ve çalışmamda gerekli olan alet, teçhizat, yazılım vb gibi imkanları veren Türkiye'mizin değerli kuruluşlarından E.C.A. Valfsel Armatür Sanayi A.Ő. ' ye ve yine öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak hep arkamda olan aileme ve bütün tez süreci boyunca her zaman desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşime yürekten teşekkür ederim. Ayrıca bu tez çalışması 3170587 Proje Numarası ile Tübitak-Teydeb tarafından desteklenmiştir. Çalışmamızı desteklemesi sebebiyle de Tübitak kurumuna teşekkür ederim.

Murat Can NİŞANCI
Manisa, 2019

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Batarya Kalıplarında Döküm-Kalıp Isı Transfer Katsayısı Hesaplanması ve Yolluk Tasarımı ile Kalıp Isı Dağılımının Optimize Edilmesi

Murat Can NİŞANCI

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali YURDDAŞ

Sıhhi tesisat sistemlerinden sıcak ve soğuk suyu istenilen oranlarda karıştırarak akıtılabilen armatürlere batarya denir. Günümüzde kullanılan bataryaların hammaddesi genelde pirinç alaşımıdır ve alçak basınçlı döküm yöntemi ile sıcak dövme yöntemi kullanılarak üretimleri gerçekleştirilir. Alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilen batarya gövdelerinde doldurmazlık, çekme, gözenek-gaz boşluğu, çatlak, süngerimsi yapı, maça kaçıklığı gibi hatalar görülmektedir. Bu hatalar parçanın ıskartaya ayrılmasına neden olmaktadır. Hataların nedenleri incelendiğinde ise genel anlamda ısı kaynaklı hatalar olduğu anlaşılmaktadır. Bu tip hatalar nedeniyle; basınçlı döküm metodunda, döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesi döküm parçasının kalitesi için oldukça önemlidir. Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı, kalıp sıcaklığına, döküm sıcaklığına, enjeksiyon basıncına, enjeksiyon hızına, kalıp yüzey pürüzlülüğüne, kalıp tasarımına, alaşım türüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu çalışma da batarya kalıbına bağlanan termokupllar ile deneysel üretim gerçekleştirilerek, proses anında ki oluşan sıcaklık değerleri kayıt altına alınmıştır. Elde edilen sıcaklık değerleri ile Ansys programında Fluent modülü kullanılarak termal analiz yapılmıştır. Termal analiz ile nümerik olarak ara yüzey ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı transfer katsayısı Magma programına tanımlanarak döküm simülasyonu çalıştırılmış ve simülasyon sonucu oluşan hata analizleri incelenmiştir. Belirlenen ısı transfer katsayı değerleri kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarının sıcaklık eğrileri ile deneysel üretim anında elde edilen sıcaklık eğrileri arasında yakınsama sağlanmıştır. Daha sonra simülasyon sonucu oluşan hatalı bölgelerin yerleri ve değerleri deneysel üretimi gerçekleştirilen parçalarda ki hatalar ile karşılaştırılmış ve hatalar örtüşmüştür. Bunun sonucunda da mevcut üretimde oluşan hatalar ile simülasyon hatalarının yakınsama göstermesiyle birlikte başka bir modelde yolluk tasarımı değiştirilerek simülasyon tekrarlanmıştır ve simülasyon sonucu oluşan hatalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Armatür, Alçak Basınçlı Döküm, Isı Transfer Katsayısı

2019, 110 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Calculating the Heat Transfer Coefficient of the Casting-Mold in the Mold of the Faucet and Optimize the Heat Distribution with New Design of the Feeder

Murat Can NİŞANCI

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali YURDDAŞ

The faucets in the sanitary tapware can mix Hot and cold water with the desired proportions and can drain. Today, the raw material of the faucets is generally brass alloy and is produced by using low pressure die casting or hot forging method. The seen mistakes in the faucet produced by the low pressure die casting method are shrinkage, pore, gas gap, crack, spongy structure etc. These mistakes cause the part to be scrapped. When the cause of faults are examined, it is understood that there are general faults caused by heat. Due to such mistakes; In the pressure casting method, the determination of the heat-transfer coefficient of the die-casting interface is very important for the quality of the cast. The heat transfer coefficient of the casting-mold interface varies depending on the mold temperature, the casting temperature, the injection pressure, the injection speed, the mold surface roughness, the mold design and the alloy type. In this study, the experimental production was realized and the temperatures of the experimental production in the process time had recorded by the thermocouples which are connected to the mold of the faucet. Thermal analysis was performed by using Fluent module in Ansys program. The heat transfer coefficient of the interface was calculated numerically by thermal analysis. The calculated heat transfer coefficient was defined in the Magma program and the casting simulation was run. The temperature curves of the simulation studies using the determined heat transfer coefficient values and the temperature curves obtained during the experimental production were converged. Then, the locations and values of the faulty zones formed as a result of the simulation were compared with the mistakes in the experimental production and the mistakes were overlapped. As a result, with the mistakes in the current production and the simulation mistakes, the simulation was repeated by changing the gating design in another model, and the mistakes resulting from the simulation were examined.

Keywords: Faucet, Low Pressure Die Casting, Heat Transfer Coefficient

2019, 110 pages

1. GİRİŞ

Su insan hayatı içinde en önemli gereksinimlerden biridir. Geçen zaman, gelişen medeniyetler, oluşan ihtiyaçlar ve bunların çeşitliliği suya olan ihtiyacı geçen zaman dilimlerinde daha da arttırmıştır. Geçmişte insanlar yerleşim alanlarını ya suyun kenarına kurmuşlar ya da suyu yerleşim alanlarına getirmişlerdir. Su miktarının sınırlı olması ve medeniyetlerin gelişimi ile suya olan ihtiyaç ve su kullanımının önemi de artmıştır. Suyu en iyi şekilde kullanmak için çeşitli yöntemler geliştirmek zorunda kalan insanlar, başta ağaç kabukları, yapraklar, taş, çamur gibi nesnelere kullanıp oluk biçimine getirerek suyu kontrol etme, yönlendirme ve suyun taşınması özelliklerini geliştirmişler, daha sonraları teknolojinin gelişmesi ile de kurşun, bakır ve demir borular yardımı ile suyu yerleşim alanlarına getirmeye başlamışlardır [1]. Gelişen teknoloji, büyüyen medeniyetler ile su kullanımının artışı ve su kaynaklarının sınırlı miktarda oluşu, su akışını kontrol eden elemanların bulunması ihtiyacının doğmasına neden olmuştur. Su akışını kontrol eden bu elemanlar -musluklar- hayatımızı büyük ölçüde kolaylaştırmış ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte musluklar da değişime uğramış, sıhhi tesisat armatürleri doğmuştur.

Kaynaktan alınan suyun her yapıya temiz olarak ulaştırılıp pis suyun boşaltılması ve kullanılan pis suyun dışarı atılması için kullanılan sıhhi tesisat sistemlerinden, sıcak ve soğuk suyu istenilen oranlarda karıştırarak akıtabilen armatürlere batarya denir. Tabii ki bu su taşıma araçlarının insan sağlığı açısından önemi ve üretici açısından maliyeti büyük önem taşımaktadır. Günümüzde en yaygın su taşıma aracı olarak kullanılan bataryaların hammaddesi genelde pirinç alaşımıdır. Bu alaşımın kullanılmasının en temel sebebi ise insan sağlığına herhangi bir zararının olmamasıdır. Diğer tercih sebebi de emsal yöntemlerle üretilen alaşımlara göre maliyetinin daha düşük olmasıdır.

Bataryaların üretim yöntemlerinden bahsedecek olursak, temel üretim yöntemleri Alçak Basıncılı Döküm Yöntemi ve Sıcak Dövme Yöntemidir. Seçilen üretim yönteminin akabinde devam eden üretim basamakları ise otomat tezgahlarında üretim, CNC- torna tezgahlarında üretim, üretilen parçalara polisaj

yapılması ve krom kaplanmasıdır. Son olarak da tüm parçaların montajlanarak son kullanıcıya iletilmesidir.

Endüstride yaygın olarak tercih edilen Alçak Basıncılı Döküm Yöntemi, seri bir şekilde hassas toleranslarda, düzgün yüzey kalitesinde parça üretimine izin veren, üretim maliyetlerinde tasarruf sağlayan bir üretim tekniğidir. Basıncılı dökümle küçük, karmaşık yüzey özelliklerine sahip ve seri üretimle yüksek miktarlarda üretilen parçalar, otomotiv ve diğer endüstriler tarafından çok fazla miktarlarda kullanılmaktadır [2]. Bu üretim özelliklerinden dolayı, batarya üretiminde de Alçak Basıncılı Döküm Yöntemi kullanılmaktadır. Alçak basıncılı döküm yöntemi, kokil döküm kalıplarına sıvı metalin hava basıncı yardımıyla dökülmesi prensibine dayanan döküm yöntemidir. Kokil döküm kalıplarının malzemesi de genellikle ısı transferinin etkinliği nedeniyle bakır-berilyum (Cu-Be) dan yapılmaktadır.

Batarya üretiminde yaşanan temel problemler üretim prosesinin ilk adımı olan dökümde yaşanmaktadır. Dökümde ortaya çıkan hatalar doldurmazlık, çekme, gözenek-gazboşluğu, çatlak, süngerimsi yapı, maça kırık, maça çatlak, maça kaçıklığıdır. Bu tip hatalar nedeniyle; basıncılı döküm metodunda, döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesi döküm parçasının kalitesi için oldukça önemlidir. Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı, kalıp sıcaklığına, döküm sıcaklığına, enjeksiyon basıncına, enjeksiyon hızına, kalıp yüzey pürüzlülüğüne, kalıp tasarımına, alaşım türüne bağlı olarak değişim göstermektedir [3].

Bu çalışmanın amacı, Valfsel Armatür A.Ş. de alçak basıncılı döküm yöntemi ile üretilen bir bataryada döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısını belirleyerek, simülasyon programına tanımlamak ve böylece simülasyon ortamında oluşacak hataların tespiti üretim öncesinde yapılabilmesini sağlamaktır. Mevcut üretimde oluşan hatalar ile simülasyon hatalarının yakınsama göstermesiyle birlikte başka bir modelde yolluk tasarımı değiştirilerek simülasyon tekrarlanacak ve simülasyon sonucu oluşan hatalar incelenecektir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Döküm Tarihçesi

Arkeolojik bulgular, döküm yönteminin M.Ö.4000 yıllarında başlayan bir geçmişi olduğunu göstermektedir. Önceleri tek parça açık kalıplarla yapılan döküm yöntemi M.Ö.2000 yıllarından itibaren iç boşlukların elde edilmesi için maça yöntemi kullanılmasıyla birlikte iki parçalı kalıplara geçilmiştir. Giderek gelişim gösteren döküm yöntemi, M.Ö.1500 yılından başlayarak özellikle Mezapotamya ve Çin’ de çok geliştirilerek karmaşık parçaların üretimi için çok parçalı kalıpların kullanıldığı görülmüştür.

Görüldüğü üzere döküm yöntemi çok eski zamanlara dayanan bir üretim yöntemidir. Günümüz döküm tekniklerine aslında rehber olan ve döküm teknikleriyle ilgilenen en eski bilim adamlarının arasında olan Reaumur (1683-1757) dökümhanelerde önemli çalışmalara liderlik etmiştir (Guomirig Li, 2000). Bununla birlikte 1849’da Sturges, 1852’de Barr, 1856’da Helize ve 1877’de Dusanbury tarafından el tipi döküm makinelerinin patentleri alınmıştır. Bu gelişmelerin arkasından Ottmar Mergenthhaler, Linotip makinesini geliştirerek bu alandaki önemli bir ilerleme sağlamıştır.

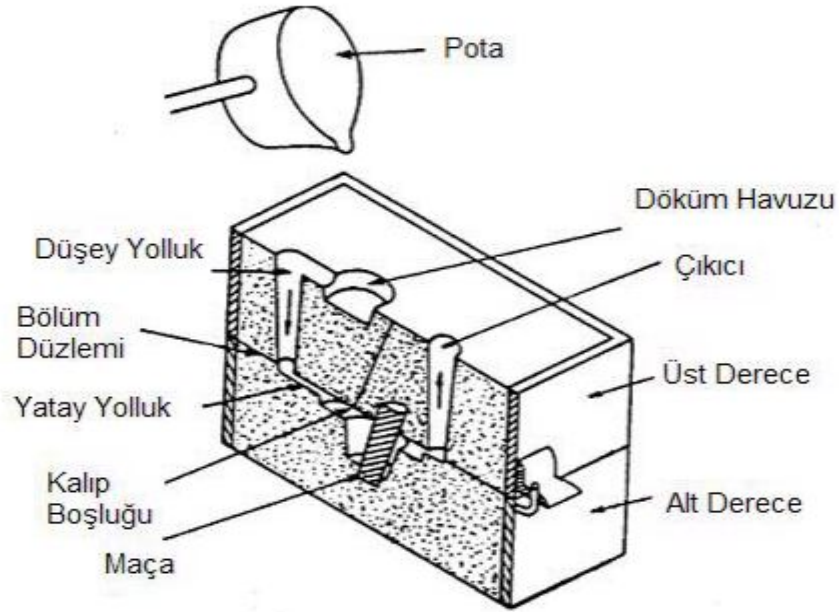


Şekil 2.1. Ottmar Mergenthhaler tarafından 1890 yılında geliştirilen, matbaa harflerinin tek bir parça halinde dökümünü sağlayan dizgi makinesi

80'li yılların sonuna kadar kullanımı devam etmekte olan bu makinenin çalışma prensibinden yararlanılarak ilk basınçlı döküm makinesi patenti H.H. Doehler tarafından 20. Yüzyılın başlarında alınmıştır. Linotip makinesinin geliştirilmesi ve Doehlerin patentiyle birlikte başlayan basınçlı döküm çalışmalarını, bu konudaki ilk endüstriyel uygulama niteliğinde sayılabilecek kurşun ve kalay alaşımlarından motor yataklarının dökümü takip etmektedir. Bu uygulamanın getirdikleriyle daha iyi mekanik özelliklere sahip alaşımların dökümleri üzerinde çalışmalar başlatılmıştır [2].

2.2. Döküm Tekniği

Döküm işlemi, sıvı metalin kalıplara doldurulması işlemidir. Kalıplarda, üretilmek istenen parçanın şekil boşluğu bulunmaktadır ve doldurulan sıvı metal kalıp içinde katılaşıp bu şekli alır. Sonucunda da elde edilmek istenen parça üretilmiş olur. Kalıplar, açık ve kapalı kalıp olarak bulunabilir. Fakat döküm teknolojisinde yaygın olarak kapalı kalıplar kullanılmaktadır. Kapalı kalıplarda sıvı metalin kalıba doldurulması için bir yolluk sistemi bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Döküme hazır bir kapalı kum kalibi kesiti [4]

Kalıplar değişik ısı dirençleri bulunan malzemelerden yapılır, bunlar kum, alçı, seramik ve metal olabilir. Bazı kalıplarda, katılaşılan parçayı çıkartmak için kalıbı bozmak gerekir (kum kalıp gibi) ve bu tarz kalıplar bir defa kullanılabilir. Bazılarında ise kalıplar kalıcıdır ki bu da birden fazla parça üretimi için ideal olan yöntemdir (metal, kokil kalıplar gibi).

Döküm öncesinde metal eritilir ve döküm sıcaklığına çıkarılır. Kalıba dolan metal soğumaya başlar, sıcaklık belirli bir değere düştüğü zaman katılaşma başlar ve katılaşma tamamlandığında hala sıcak olan parça oda sıcaklığına kadar soğur. Bu sırada önemli miktarda ısı uzaklaştırılır ve biçimi yanında malzemenin iç yapısı ve dolayısıyla özellikleri belirlenir. Döküm sonrasında parça kalıptan çıkarılır, parçaya ait olmayan kısımlar uzaklaştırılır, yüzey temizlenir, varsa ısı işlem yapılır ve gerekli kontrollerden sonra imalat tamamlanmış olur [4].

2.3. Basınçlı Döküm Yöntemi

Eriyik metalin belli bir basınç altında kalıba doldurulması yöntemi basınçlı döküm yöntemidir. Basınç altında kalıba doldurması sebebiyle metal kalıba (kokil) döküm yöntemine benzemekle birlikte kokil döküm yönteminde yer çekiminin etkisinin dolunu gerçekleştirmesinden dolayı fark bulunmaktadır [5].

Basınçlı döküm, metal bir kalıbın dolmasını gerçekleştirmek amacıyla sıvı metale hız vererek hidrolik enerjinin bir kaynağı ile adapte edilir. Kalıp basınçlı dökümün gerilmelerini absorbe ederek döküm metalinin sıcaklığını dağıtır. Bunun sonucunda da bir sonraki çevrim için şekillendirilmiş parçanın kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırır. Basınçlı dökümdeki hidrolik enerji, kalıp boşluklarını dolduran ve katılaşılan metal üzerinde hız, akış optimizasyonu ve kuvvet fonksiyonlarının kontrolüne izin veren bir sistem tarafından sağlanır.

Basınçlı döküm yönteminin avantajları ise;

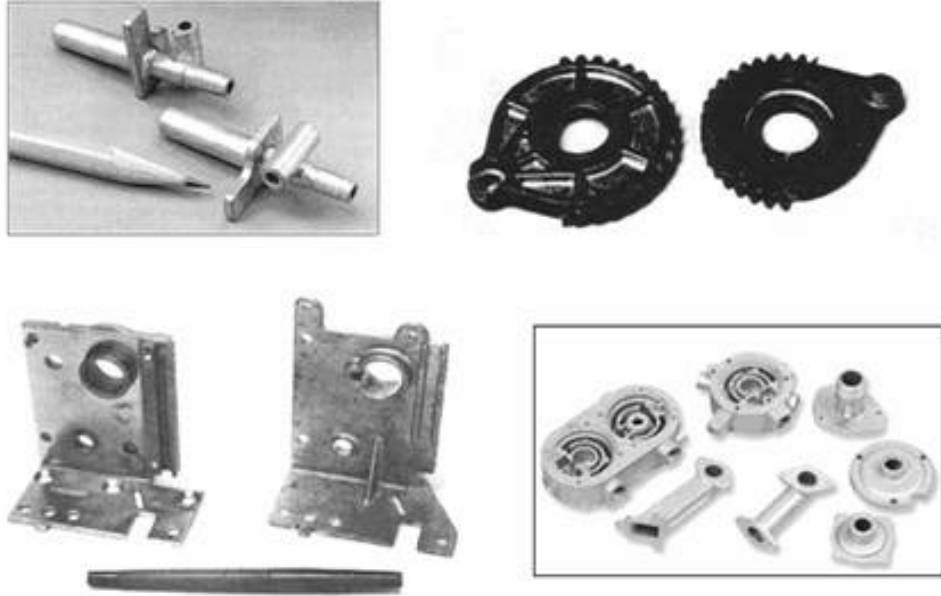
- Karmaşık şekilli parçaların kolay üretilebilmesi
- Sıvı metalin kalıba basınç yardımıyla doldurmasından dolayı diğer döküm yöntemlerine göre daha ince kesitli parçaları üretilebilmesi ve bu sebeple daha az hammadde kullanımı ile maliyet avantajı sağlaması
- Döküm parçaların boyutsal özelliklerinin daha fazla kontrol edilebilmesi

- Seri üretime uygun olması
- Kalıptan çıkan parçaların yüzey kalitesinin çok fazla işleme gerek duymaması
- Bazı alaşımların bu yöntem ile üretimlerinin sonucunda yüksek mekanik özelliklerine sahip olması

Basınçlı döküm yönteminin dezavantajları ise;

- Basınç döküm tezgahlarının özelliklerine göre parça boyutlarının sınırlanması
- Kalıp tasarımında yolluk ve hava ceplerinin çok önem arz etmesi
- Ergime sıcaklıkları Cu ve alaşımlarının ergime sıcaklıklarından daha yüksek olan alaşımlar bu yöntemle üretilmemesi [5]

Bu döküm yöntemi otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Gövdeler, bağlama elemanları, flanşlar vb. gibi parçalar bu yöntemin başlıca üretim parçalarıdır [6].



Şekil 2.3. Bazı döküm parçalar

Basınçlı dökümde 4 temel alaşım çok sık olarak kullanılır. Bu alaşımlar Alüminyum, Çinko, Magnezyum, Bakır alaşımlarıdır.

Alaşım	Alaşımların elementleri (%)								
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Si	Sn	Zn
Alüminyum alaşımları									
A360	mm	0.60	1.0	0.40-0.60	—	—	9.0-10.0	—	0.40
A380	mm	3.0-4.0	1.0	0.10	—	—	7.5-9.5	—	2.9
A383	mm	2.0-3.0	1.0	0.10	—	—	9.5-11.0	—	2.9
A384	mm	3.0-4.5	1.0	0.10	—	—	10.5-12.0	—	2.9
B290	mm	4.0-5.0	1.0	0.5-0.65	—	—	16.0-18.0	—	1.4
A413	mm	1.0	1.0	0.10	—	—	11.0-13.0	—	0.40
538	mm	0.25	1.1	7.6-8.5	—	—	0.35	—	0.15
Diğer alaşımları									
C1500	0.25	57 mm	0.90	—	0.25	1.5	0.25	1.90	31 mm
C8700	0.15	63 mm	0.40	—	0.15	0.25	0.75-1.25	0.25	mm
C2300	0.15	80 mm	0.15	0.01	0.15	0.15	3.75-4.25	0.25	mm
Magnezyum alaşımları									
AZ91E	3.3-9.7	0.35	—	mm	0.13	—	0.50	—	0.13
AM60A	5.5-6.5	0.35	—	mm	0.13	—	0.50	—	0.22
AS41A	3.5-5.0	0.06	—	mm	0.20	—	0.50	—	—
Çinko alaşımları									
AC43A	3.9-4.3	0.10	0.035	0.025-0.05	—	0.004	—	0.002	mm
AO43A	3.5-4.3	0.25	0.10	0.02-0.05	—	0.005	—	0.002	mm
Alloy 7	3.9-4.3	0.75-1.25	0.075	0.03-0.06	—	0.004	—	0.002	mm
ILZRO 16	3.5-4.3	0.75-1.25	0.10	0.03-0.06	—	0.005	—	0.002	mm

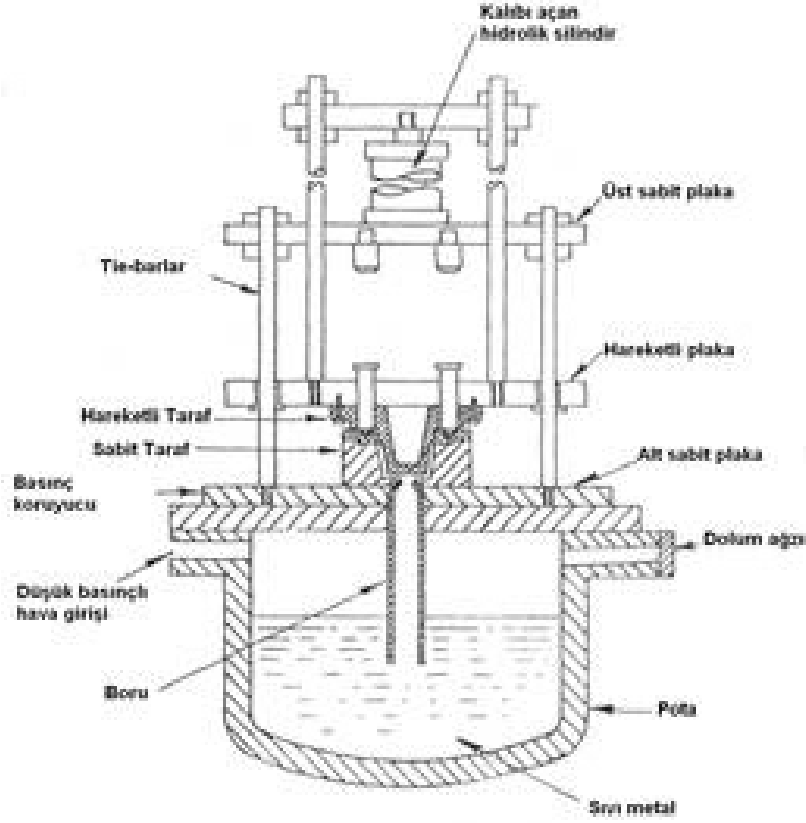
Şekil 2.4. Basınçlı dökümde çok kullanılan bazı alaşımların kimyasal kompozisyonları [6]

2.3.1. Üretim Yöntemine Göre Uygulama Yöntemleri

2.3.1.1. Alçak Basıncı Döküm Yöntemi

Alçak basınçlı yöntemde, eriyik metal yüzeyinin altına daldırılmış ve aşağıya kadar uzanan bir besleme borusuyla birlikte kalıbın altında hava geçirmeyen bir fırın kullanılmaktadır. Hava veya asal gaz atmosfer basıncının biraz üstünde uygulanarak fırında bulunan eriyik metale baskı uygulanır. Bu baskı sonucunda eriyik metal kalıbı doldurmak üzere yukarı doğru hareket eder. Bu yöntemi Al ve alaşımları çoğunlukla kullanılmaktaysa da diğer alaşımlarda bu yöntemi ile üretilebilmektedir. Alçak basınç prosesi ile küçük boyutlarda parçalar ile 22 kg ağırlığında ki büyük parçalar da üretilebilmektedir. Parçanın boyutlarına göre 50-500 parça/saat üretim yapılabilmektedir [5,7].

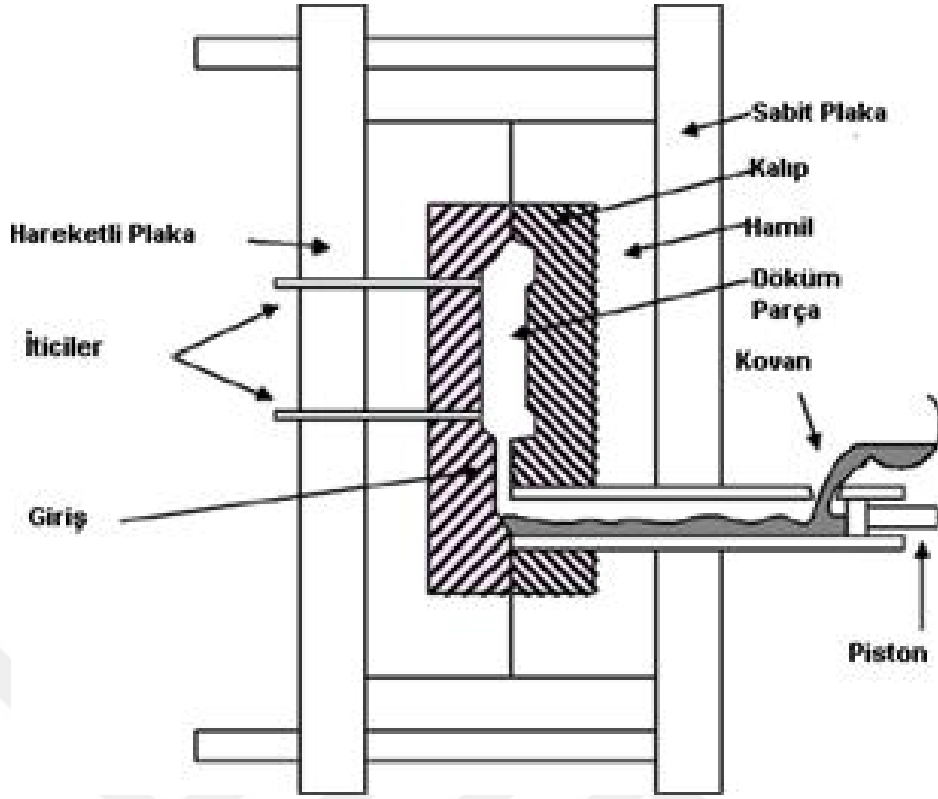
Alçak basınçlı döküm yöntemi gravite döküm ile enjeksiyon ve katılaşma sırasında kalıp içinde metalde pozitif bir basınç uygulanması yönünde ayrılmaktadır. Sıcak ve soğuk kamaralı döküm yöntemlerindeki 100-1000 MN/m² basınç aralığından farklı olarak alçak basınçlı döküm yöntemi (şekil2.2) 4kN/m² basınç uygulaması olan bir yöntemdir [7].



Şekil 2.5. Düşük basınçlı döküm makinesi [7]

2.3.1.2. Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi

Yüksek ergime sıcaklıklarına sahip Al, Mg ve Cu alaşımlarının ergitme fırınından hazneye doldurulması ve bir piston aracılığı ile basınç altında kalıba doldurularak yapılan üretim yönetime yüksek basınçlı döküm yöntemi denir [5].



Şekil 2.6. Basit bir yüksek basınçlı döküm makinesi [8]

Bu döküm yönteminde iki dikey plaka bulunmaktadır. Bu plakalar kalıbı tutan ve destekleyen hamiller üzerinde bulunur. Sabit plaka ve hareketli plaka olarak ayrılmaktadırlar. Eriyik metal kalıba 3 fazda ve hidrolik olarak hareket sağlayan piston yardımıyla doldurulur. Katılaşmanın tamamlanmasından sonra hareketli plakada bulunan kalıp açılır ve iticiler sayesinde kalıptan parça çıkarılır [8].

2.3.1.3. Vakum Döküm Yöntemi

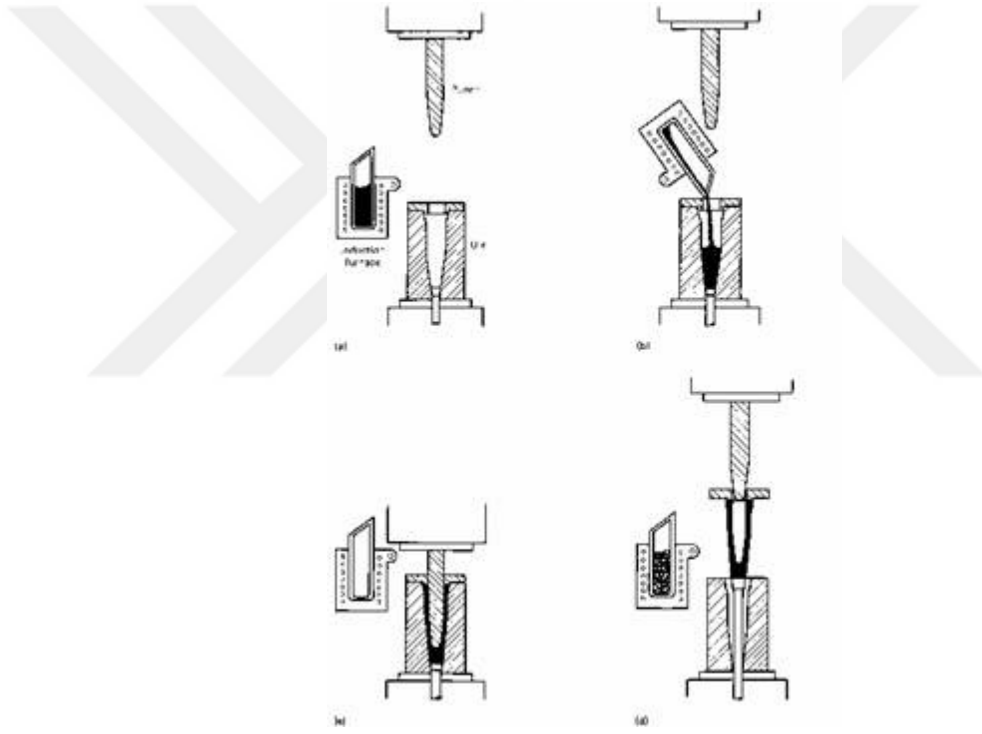
Kalıbın içinde bulunan basıncın bir vakum pompasının yardımı ile düşürülmesi ve buna istinaden oluşan basınç farklılığı sonucu eriyik metalin kalıba dolmasını sağlayan yöntem Vakum Döküm Yöntemi denir. Bu nedenle de basınçlı döküm yöntemine benzer bir yöntemdir.

Vakum döküm yönteminde kalıp içinde türbülans daha az olduğundan dolayı diğer yöntemlere göre gaz boşluğu daha az görülmektedir. Bu yöntem daha

sonra ısıl işlem görebilecek parçalar için özel bir yöntem olarak kullanılabilir [8].

2.3.1.4. Sıkıştırma Döküm Yöntemi

Sıkıştırma döküm yönteminde eriyik metal açık bir kalıba dökülmektedir. Kalıbın kapanmasıyla eriyik metal sıkışarak kalıbı tamamen doldurmaktadır. Kalıbın içinde metalin hareketi az olduğundan, eriyik metal için gereğinden fazla akışkanlık gerektirmez. Bu sebeple normal yöntemle dökülemeyen dövme alaşımları bu yöntem ile dökülebilir. Yöntemde önemli nokta metal hacmi, sıcaklığı ve uygulama basıncıdır (50-140MPa) [8,9].



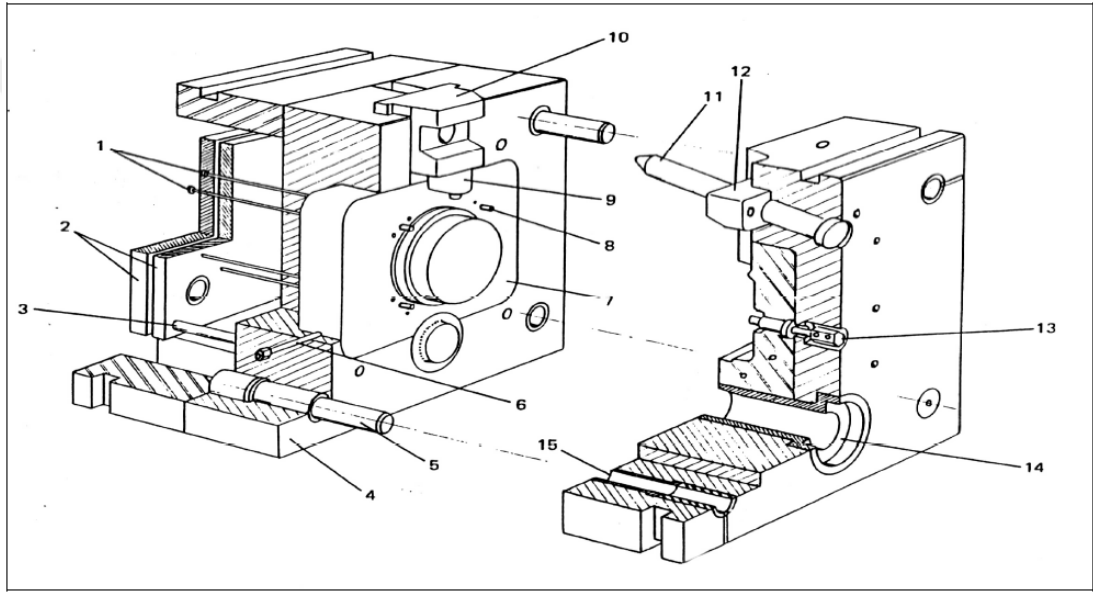
Şekil 2.7. Sıkıştırma döküm prosesi [8]

2.3.2. Basınçlı Döküm Kalıpları

Basınçlı döküm kalıpları, her biri dökülecek parçanın geometrisine göre islenmiş iki yarım kalıptan meydana gelmektedir. Makineye monte edilen bu kalıp bloklarından biri sabit (hareketsiz) kalıp yarımı, diğeri hareketli kalıp yarımı olacak şekilde düzenlenmektedir. Ergimis metal kalıp boşluğuna, sabit kalıp yarımında

bulunan besleme memesi vasıtasıyla akmaktadır. Hareketli kalıp yarımında ise dökülen parçanın sekline bağlı olacak yolluklar veya kanalları bulunmaktadır [2].

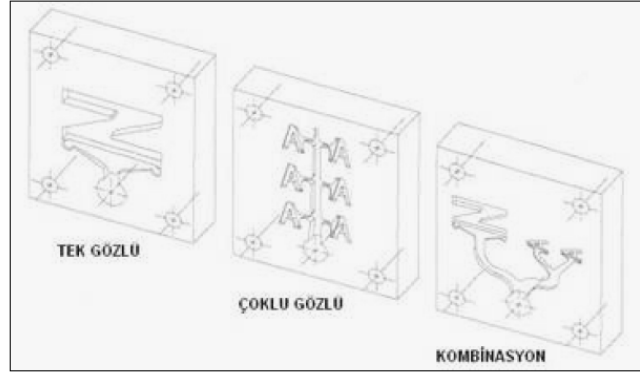
Basınçlı döküm prosesinde parça kalitesinin yüksek olması için üretilecek parçanın kontrüksiyonu iyi yapılmalıdır. Parçaların şekillendirilmiş kısımları mümkün olduğu kadar doğrusal olmalıdır, sivri uçlardan kaçınılmalıdır, 1.5 mm' den 4 mm' ye kadar aynı kalınlıkta bir cidar kalınlığı sağlanmalıdır, gerekli koniklik miktarı 1°' den aşağı olmamalıdır, muhtelif yerlere konacak boşluk, delik ve cep gibi yerlere konacak maçalardaki koniklik 1.5°' nin altında olmamalıdır [10].



Şekil 2.8. Soğuk kamara basınçlı döküm kalibi

(1-İtici pim, 2-İtici plakası, 3-Geri itici pimleri, 4-Kalıp seti, 5-Merkezleme pimleri, 6-Soğutma kanalı, 7-Çekirdek, 8-Sabit maça, 9-Hareketli maça, 10-Maça yatağı, 11-Maça sürücüsü, 12-Maça kilidi, 13-Maça soğutma kanalı, 14-Metal girişi (Yolluk), 15-Burç Basınçlı döküm kalıpları kendini oluşturan elemanlar açısından aşağıdaki gruplara ayrılabilir) [9]

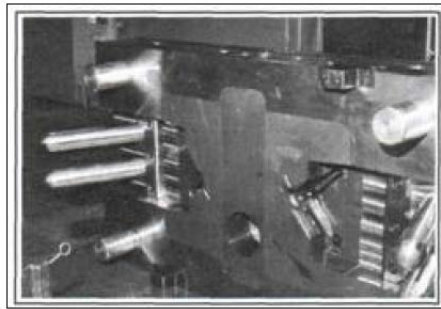
1- Çekirdek: Kalıp yarımlarının açılması ile bölünen ve parçanın şeklini veren kısımlara çekirdek denir. Çekirdekler birden çok forma sahip olabilir. Bu da kalıbın bir veya birden fazla göze sahip olmasını neden olur.



Şekil 2.9. Çekirdeklere işlenen göz tipleri [9]

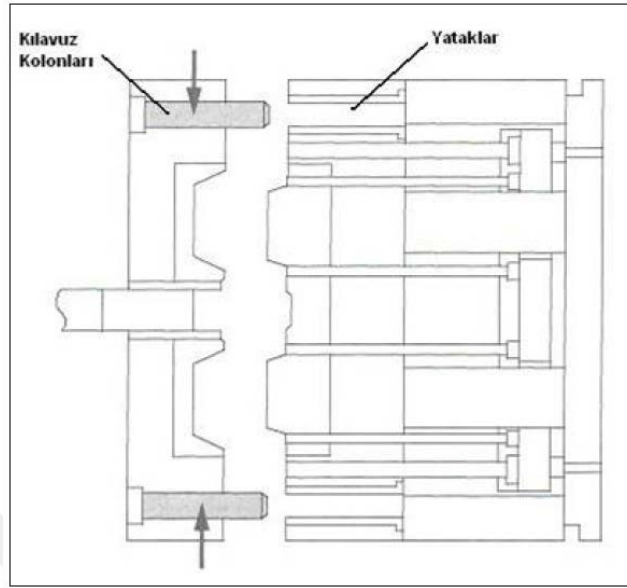
2- Kalıp Hamilleri: Kalıbın bütün elemanlarını ve parçalarını bulandıran kalıbın ana bölümüdür. Kalıp yarımlarından oluşmasından dolayı kalıpta ayrılma yüzeyi olarak bilinen kısmı da oluşturur. Bir kalıpta sabit ve hareketli kalıp hamili olarak iki hamil bulunur.

Sabit kalıp yarısı eriyik metalin kalıba basıldığı enjeksiyon sistemi tarafında bulunan kalıba denir. Hareketli kalıp yarısı ise tezgahın hareketli tarafındaki sistem sayesinde kalıbın açılıp kapanmasını sağlayarak üretimi yapılan parçanın kalıptan çıkmasına yarayan kalıp yarısıdır.



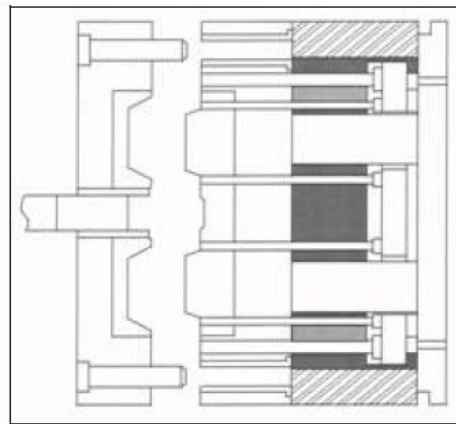
Şekil 2.10. Sabit kalıp hamili örneği [9]

- 3- Kılavuz Kolonları: Kalıp kapandığı zaman sabit ve hareketli kalıp yarılarına yataklama yaparak merkezleme sağlamaktadır.



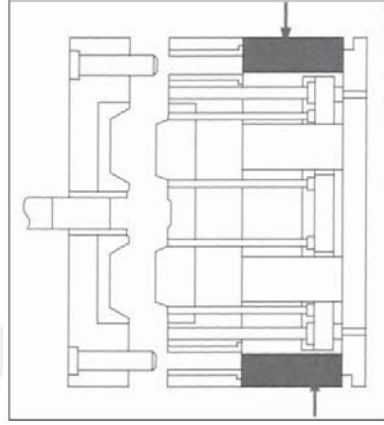
Şekil 2.11. Kılavuz kolonları ve yatakları [9]

- 4- İtici Plakası: İtici sistemini üzerinde bulunduran kısımdır. Kalıbın hareketli kısmını kalıp kapama ve itici kuvvetine karşı koruma görevi de yapmaktadır.



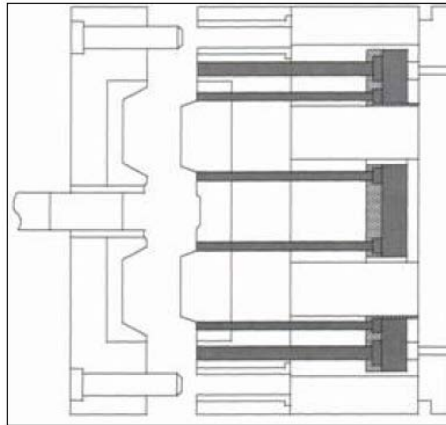
Şekil 2.12. Taralı kısımlar itici plakası ile hareketli tarafı göstermektedir [9]

- 5- Paraleller: Paraleller hareketli hamilden makinenin hareketli tarafına kilitleme veya kilitleme plakasına ulaşmak için erişebilen ve genellikle AISI 1020 gibi çeliklerden üretilen; bağlantı yüzeyleri paralel olan elemanlardır. (Şekil 2.13) Baskılara karşı yeterli sertlikte olmalıdır. Kalıbın bütün kilitleme kuvvetleri paraleller tarafından taşınır [10].



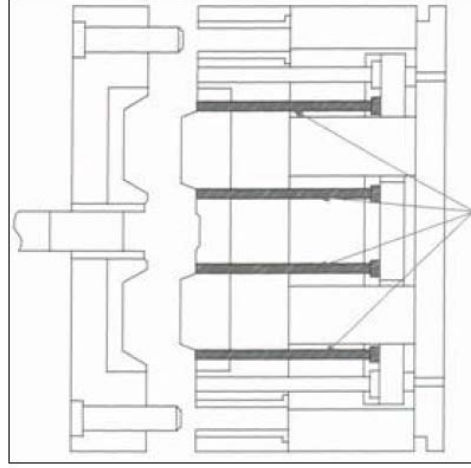
Şekil 2.13. Paraleller [10]

- 6- İtici Sistemi: Katılaştan döküm metalinin kalıptan çıkmasını sağlayan sistemdir.



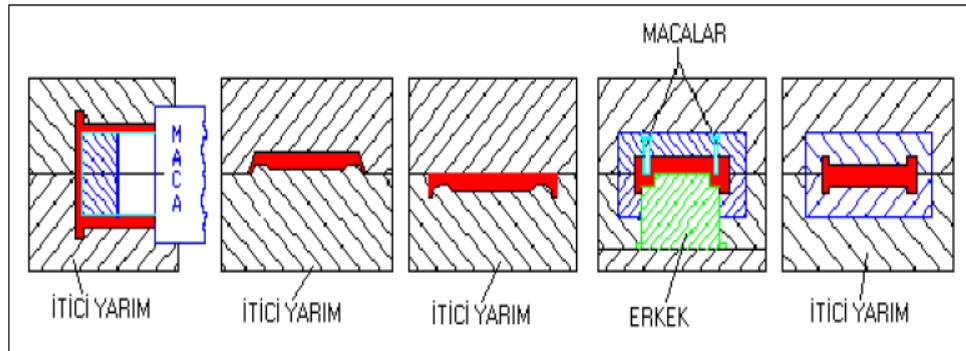
Şekil 2.14. İtici sistemi [10]

- 7- İtici Pimleri: İtici plakalarından döküm metaline kadar uzanan parçalardır. Döküm parça kalıptan çıktıktan sonra itici pimlerinin izleri parça üzerinde kalır. Bu izlerin yükseklik ölçüleri değişebilmektedir.



Şekil 2.15. İtici pimleri [9]

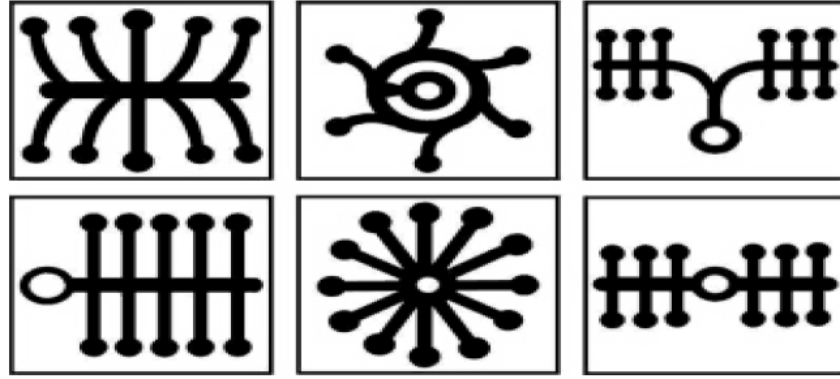
- 8- Maçalar: Dökülecek parçadaki delik, oluk ve iç detayları oluşturmak için kullanılır. Maça malzemeleri prosesin cinsine göre değişkenlik gösterebilir.



Şekil 2.16. Dişi ve maça yerleşimlerine örnekler [10]

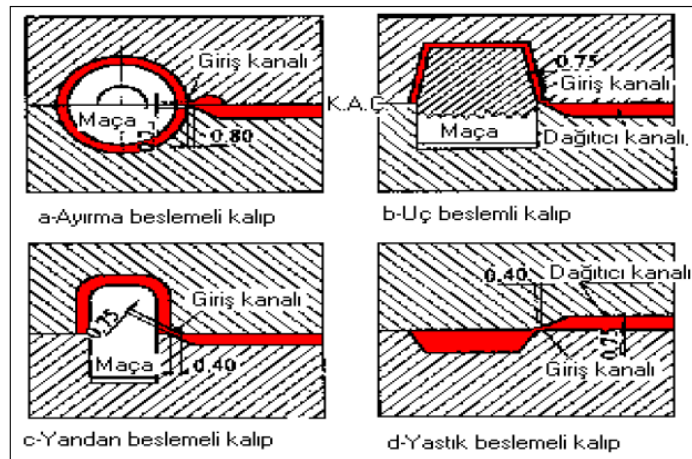
- 9- Dağıtıcılar: Dağıtıcılar yolluk burcundan giren ergimiş alaşımın, basınçlı döküm kalıbına ayırma yüzeyinden kalıbın içine dolmasını sağlayan geçiş kanallarıdır. Derinlikleri 4.5 mm'den 8 mm ye kadar değişir. Genişlikleri ise iş parçasının

ağırlığına ve dış biçimine göre tayin edilirler. Basınçlı döküm kalıplarında girişlerin yani dağıtıcı memelerinin geniş aralıklı tiplerinde ölçü 1.25 mm üzerindedir. İnce aralıklar ise 0.625 mm civarındadır. Çok büyük parçaların meme aralığı 2.25 mm veya daha fazla aralıkla yapılır.



Şekil 2.17. Dağıtıcı çeşitleri [10]

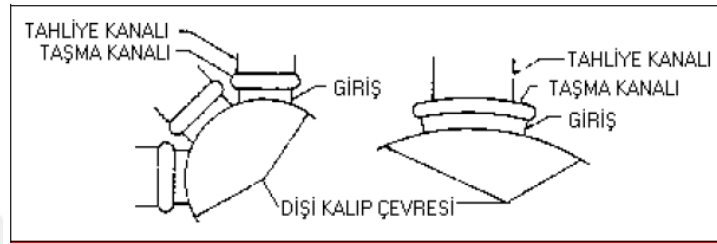
İnce kesitli girişli dağıtıcıların bulunduğu kalıpta iyi yüzey kalitesi elde edilmesine rağmen yoğun bir döküm yapılamaz. Büyük girişliler de ise yüzey kalitesinin düzgün olmasıyla birlikte yoğun bir döküm yapılabilir.



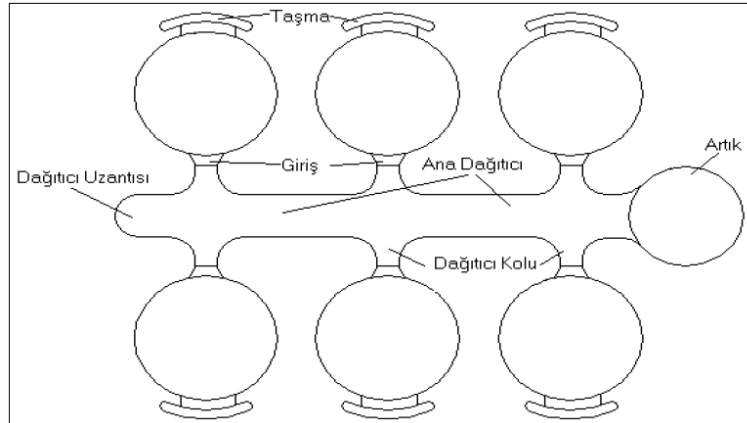
Şekil 2.18. Giriş kanallarının kalıp üzerindeki tipik konumları [10]

10- Gaz Çıkışları: Hava tahliye veya gaz tahliye kanalları kalıp yüzeylerine işlenerek, döküm sırasında eriyik metalin havayı sıkıştıracağı bölgelere yapılır. Bazı durumlarda bu kanallar hareketli maçaların ve iticilerin üzerine de açılabilir.

11- Taşma Kanalları: Taşma kanalları, basınçlı dökümde tahliye sisteminin önemli bir parçasıdır. Doldurulması güç olan kalıpların çukurlarına eriyik metalin akmasını sağlar.



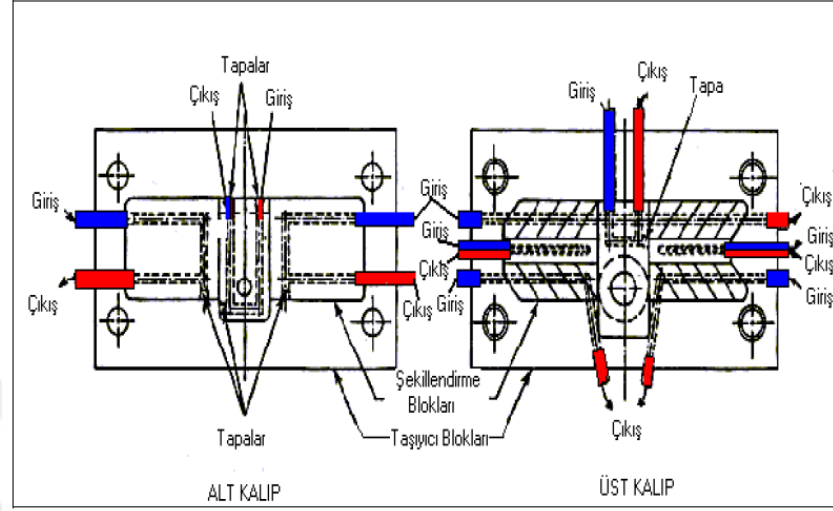
Şekil 2.19. Taşma ve tahliye kanalına örnek dişi kalıp yerleşimi [10]



Şekil 2.20. Taşma ve tahliye kanalına örnek parça yerleşimi [10]

12- Soğutma Sistemleri: Döküm tezgahlarında; parça üretim adedi, zamanı ve ısı dayanımları her ne kadar önceden belirlenmiş ve ona göre ayarları yapılmış olsa da her kalıp aynı parçayı dökmediği için farklı tepkiler oluşturarak bazı bölgeleri belirlenen şartlar dışında ısınabilir ve deformasyon oluşturabilir. Bu nedenle kalıpta soğutma kanalları açılarak sıkıntılı bölgelerdeki sıcaklığı uygun seviyeye

getirmesi sağlanır. Bu kanallar sayesinde parça kalitesi istenilen seviyeye çekilir. Döküm prosesinde ki sıcaklık bazlı bölgesel hataları telafi etmekte kullanılan soğutma kanalları basınçlı döküm yöntemi için önemlidir.



Şekil 2.21. Soğutma kanallarına örnek kalıp kesiti [10]

2.3.3. Basınçlı Dökümünde Kullanılan Kalıp Malzemeleri

Basınçlı döküm prosesinde kullanılan kalıbın tasarımı ve malzemesi, parçanın kalitesini ve prosesin problemsiz çalışmasını büyük oranda etkilemektedir. Kalıba basınç etkisi altında eriyik metalin dolmasından dolayı kalıp malzemesinin ısıl ve mekanik özelliklerinin prosese uygun olması gerekmektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip kalay, kurşun ve çinko gibi alaşımlar için düşük maliyetli ve uzun ömürlü kalıplara sahip olmak mümkündür. Fakat yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımlar için bunu söylemek mümkün olmadığından dolayı özel kalitede kalıplar ile üretim yapmak daha sağlıklıdır. Bu yüzden basınçlı döküm kalıp malzemelerinin yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışmasından dolayı kalıpta bir süre sonra Çökme, Çatlama, Kırılma, Korozyon, Erozyon ve Isıl yorulma gibi problemler ortaya çıkabilir. Bu problemler ile minimum oranda karşılaşmak için kalıp malzemelerinde olması gereken özellikler şu şekildedir;

- Yüksek sıcaklıklarda ısıl arızalanmalara karşı dayanım
- Kolay işlenebilme özelliği,

- Moleküler çatlamalara karşı sağlamlık,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Çok küçük ısı genleşme katsayısı,
- Yapısal sağlamlık ve homojenlik,
- Deformasyonlara karşı yeterli sertlik ve mukavemet,
- Döküm alaşımının aşındırıcı etkisine karşı yüksek dayanım,

2.3.4. Basınçlı Döküm Prosesinde Kullanılan Alaşımlar

Birçok alanda kullanılan parçaların üretim metodunun basınçlı döküm yöntemi olması sebebiyle bu proseste kullanılan metallerin ve alaşımların fiziki ve kimyasal şartlara dayanım sağlaması için çalışılmıştır. Bununla birlikte bir kullanım alanı için son derece uygun olan bir alaşım başka bir işte uygunluk sağlamayabilir. Örnek olarak, insanların sürekli temas halinde bulunduğu lavabo, eviye, banyo armatürleri gibi bir üründe estetik, buna bağlı olarak da kaplanabilme özelliği ön planda iken; kuvvet iletiminde kullanılan bir dişlide esas problem malzemenin dayanımıdır. Bu nedenle malzeme seçiminde dikkat edilmesi gerekenler şunlardır;

- Parçanın dayanım, sertlik ve şekilde değiştirme gibi mekanik özellikleri,
- Yaşlanmanın fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi,
- Isı etkisinin dayanım özelliklerine etkisi,
- Dökülebilirlik, akışkanlık, soğuma çekmesi gibi yönlerden basınçlı döküme uygunluğu,
- Talaşlı işleme uygunluğu,
- Polisaj, kaplama ve boyama gibi işlemlere uygunluğu,
- Korozyon dayanımı,
- Kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı dayanımı,
- Parça ağırlığı (kullanım yerine göre),
- Parça maliyeti (kullanılan yere göre).

Basınçlı döküm prosesinde kullanılan alaşımların özellikleri;

- Keskin ve ince hatların iyi dökülebilmesi için alaşımın yeterli bir akıcılığı olmalıdır.
- Hızlı soğumaya rağmen çöküntü ve iç boşluklar meydana gelmemelidir.

- Kalıp içerisindeki engellere rağmen çatlama ve iç gerginlikler oluşmamalıdır.
- Eritme potasındaki hiçbir kristal ayrışımı olmamalıdır.
- Katılaşma olayının belirli bir sıcaklıkta oluşması gerekir. Bu nedenle ötektik alaşımlar ve saf madenler basınçlı döküme elverişli değildirler.

Yukarıdaki özellikleri göz önünde bulundurularak basınçlı döküm için uygun olan çinko, kurşun, kalay, alüminyum, magnezyum ve bakır esaslı alaşım arasında en uygun olanını seçmesi gerekmektedir.

2.3.4.1. Alüminyum ve Alaşımları

Düşük yoğunluk, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, bazı şartlara göre korozyon dayanımının bulunmasının yanında kolay eritilebilmesiyle alüminyum alaşımları iyi bir döküm malzemesidir.

Döküm hammaddesi olarak kullanılmış alüminyum alaşımlarında genellikle gözenek hatası meydana gelmektedir. Bu hatanın da en büyük sebebi alüminyum alaşımlarının içinde bulunan gazları katılaşma sırasında açığa çıkarmasıdır. Bu tarz hatalarla mümkün olduğunca karşılaşmamak için elektrikli ocaklar kullanılarak, gaz giderme proseslerinin uygulanması önemlidir.

Alüminyum hammaddeli parçaların üretim yöntemlerinde basınçlı döküm tekniği sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu prosesler için özel ve sektörüne göre birçok alaşım geliştirilmiştir. Bu alaşımların içeriğinde %1 Fe bulunması ile parçanın demir esaslı kalıplara yapışmasını önleyerek, parçayı; gözenek hatasının en az gözlemlendiği malzemeler haline dönüştürür [10].

2.3.4.2. Bakır ve Alaşımları

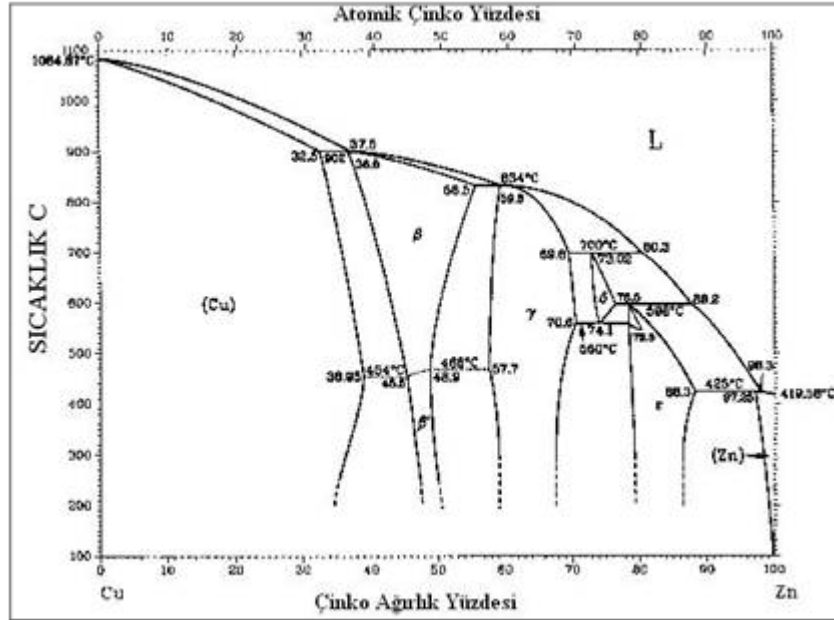
Dünya da genellikle bakır saf ve alaşım olarak elektrik ve ısı iletiminde çok az miktarlarda kullanıldığı için döküm gibi proseslerde pirinç ve bronz alaşımları kullanılmaktadır.

Sıvı veya katı yakıt kullanan potalı ocaklarda eritilen bakır ve alaşımlarında, eriyiğin içinde gaz oluşması proses sonunda hatalı parça üretimine sebep olabilir. Bu

sebeple bu tip ocak kullanan tezgahlarda döküm sıcaklığının minimum seviyede olmak üzere ortam şartlarının da çok iyi ayarlanması gereklidir [10].

2.3.4.2.1. Pirinç Alaşımı (Bakır – Çinko)

Bileşimde en az %53 bakırın bulunduğu Cu-Zn alaşımları olan pirinçlerde, artan çinko miktarı ile dayanım, sertlik ve kopma uzaması artar, döküm sıcaklığı ise düşer. Belirli bir çinko yüzdesinden sonra malzeme gevreklemeye başlar. %36'ya kadar çinko içeren α -pirinçleri plastik şekil vermeye uygundur. Dökme pirinçlerde ise bileşimdeki çinko miktarı %36...43 arasında seçilerek, (α - β)- içyapısının yüksek dayanımından yararlanır. Pirinçlerin katılma aralığı dar olduğundan, mikrosegregasyon ve gözeneklilik tehlikesi azdır [6,11].



Şekil 2.22. Cu-Zn Faz diyagramı [6]

Al, Pb, Fe, Mn, Si gibi alaşım elementleri katılarak dayanım ve korozyon özellikleri geliştirilmiş değişik özel dökme pirinçler de mevcuttur [6].

2.3.5. Basınçlı Dökümde Oluşan Hatalar

Basınçlı döküm proseslerinde en çok gaz boşlukları, çekme ve soğuk birleşme hataları ile karşılaşmaktadır. Ayrıca yüzeyde oluşan hatalar, kırılmalar, çapaklanma gibi diğer hata türleri de görülmektedir.

2.3.5.1. Gaz Boşluğu Hatası

Eriyik metalin içinde açığa çıkan gazların kalıptan atılamaması nedeniyle parçanın içinde veya yüzeyinde boşluklar oluşur. Bu problemin ortaya çıkmaması için kalıp tasarımı yapılırken hava tahliye kanalları da tasarıma mutlaka dahil edilmelidir. Fakat bazı durumlarda bu kanallar da yetersiz kalarak hatanın ortaya çıkmasına engel olunamaz ve parçalar ıskartaya ayrılabilir [12].

Sun ve ark.,2019 çalışmasında düşük basınçlı döküm yöntemi ile üretilen motor karterinin üst yüzeyinde ki gaz gözenekleri incelenmiştir. Oluşan gaz gözenek hatasının nedenlerini mikrografik analiz ve simülasyon yaparak incelemiştir. Çalışma sonucunda gaz gözenek hatasının döküm metalinin kalıp içinde türbülans hareketinden dolayı oluştuğunu doğrulamıştır. Kalıp tasarımında ki geçitlerin boyutları kıvrımlar sıvı metalin türbülansa uğramasına neden olarak havanın sürüklenerek kıvrımlı veya geçit boyutunun daraldığı kısımlarda sıkıştığını, bunun da gözenek olarak parça da hataya yol açtığını göstermiştir [13].

2013'te daha sonra, Jiang ve ark.,2013 farklı döküm işlemleriyle üretilen A356-T6 alüminyum alaşımının döküm kalitesini ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Harcanabilir kalıp kabuk döküm işleminin vakum ve düşük basınçla ürettiği döküm, yerçekimi döküm ve kayıp köpük döküm işlemlerinden daha az homojenliğin yanı sıra daha homojenleştirilmiş mikro yapı ve daha iyi mekanik özellikler ve daha az gözeneklilik göstermiştir. Ayrıca, gaz akış hızı, vakum ve düşük basınçlı döküm işlemi ile harcanabilir kalıp kabuğunun dökümünün doldurma kabiliyetinin ve iç kalitesinin artırılmasında önemli bir rol oynamıştır [14].

2.3.5.2. Çekme Hatası

Proses anında sıvı olan metal ısı kaybederek soğumaya ve hal değiştirerek katılaşmaya başlar. Katı haldeyken parçanın tam katılaşmayarak sıcak kalan bölgelerinde ısı farkı nedeniyle boşluklar oluşur. Bu boşlukları gidermek için proses basıncı ve sıcaklığı değiştirilerek optimum döküm şartları sağlanmaya çalışılır [12].

2.3.5.3. Soğuk Birleşme Hatası

Kalıp içinde katılan bölgelere sıcak eriyik metalin gelmesiyle katı ve sıvı birleşmesinin gerçekleşmediği durumlardır. Bu tarz problemler ile karşılaşıldığında kalıp tasarımında ki yolluk sisteminin yetersizliği, besleme hızı, döküm sıcaklığı ve cidar kalınlıklarının yetersizliği düşünülmeli ve bu parametreler değiştirilmelidir [12].

2.4. Basıncılı Döküm Prosesinde Etkili Olan Parametreler

Basıncılı döküm prosesinde üretimin ve parçanın kalitesini enjeksiyon hızı ve basıncı, kalıp sıcaklığı döküm sıcaklığı, soğutma hızı ve şekli gibi parametreler etkilemektedir. Bu parametreleri önceden bilip üretimi ona göre yapmak çoğu zaman zordur. Aynı zaman da döküm metalinin kalıp içindeki davranışları genellikle beklenen şekilde olmamaktadır. Bu yüzden proseste oluşan problem ve hatalara göre üretim parametrelerini değiştirerek üretim yapmak ve optimum sonuca hangi parametreler ile ulaştığını belirlemekle gereklidir.

Geçmiş çalışmalar araştırıldığı zaman, ilk defa 1932’de Frommer sıvı metalin kalıp içerisindeki hareketinin grafiğini çizmiştir. Bu grafiği çeşitli parametrelere göre çizmiş ve buna göre bir teori geliştirmiştir. Frommer çalışmasını dikdörtgen prizması şeklinde döküm boşluğuna sahip bir kalıpta incelemiştir. İncelemede parametre değişkenlerinin döküme etkisini ve kalıp içinde oluşan durumları araştırmıştır. Bu araştırmaya göre sıvı metal, yolluk girişinden kalıba fişkırmaya yaparak girmekte ve kalıp boşluğunun duvarına çarpıp akışta türbülans oluşuncaya kadar akışına devam etmektedir. Yolluk girişinin karşı tarafında sıvı metal birikmeye başlayarak kalıbı dikey olarak doldurmaktadır. Kalıpta biriken metalde, fişkırmaya giren metalin etkisiyle girdap ve anaför meydana gelir. Bu olay kalıp dolana kadar devam etmektedir. Kalıp içinde katılma ilk olarak yan duvarlarda başlamaktadır. Bunun nedeni ise yolluktan kalıba sıvı metalin fişkırmaya girmesi ve karşı duvarda biriken

metale sürekli girdap etkisi yaratmasıdır. Sonuç olarak homojen bir şekilde kalıp doldurulur ve en son yolluk giriş kısmı dolarak işlem bitirilir [15, 16, 17].

1937'de başka bir çalışmayı ise W.Brandt yapmıştır. Bu çalışmada dikdörtgenle prizması şeklindeki kalıbın döküm boşluğuna belli mesafeler ile elektrikli kontaklar yerleştirilmiş ve sıvı metalin kalıba dolumu bu şekilde incelenmiştir. Kalıbın dolun şeması, sıvı metalin kalıba dolumu yan duvarlara temas etmesinden sonra kalıp yüzeylerini takip ederek yükselmesi suretiyle kalıbı aşağıdan yukarıya doğru doldurduğu şeklinde çıkarılmıştır. Bu çalışma Frommer'in çalışmasına benzemekle birlikte bir noktada ondan ayrılmaktadır. Frommer kalıp dolununun yukarıdan aşağıya doğru gerçekleştiğini ispat etmeye çalışmış, W.Brandt ise çalışma sonunda kalıbın aşağıdan yukarıya doğru dolduğunu açıklamıştır [3].

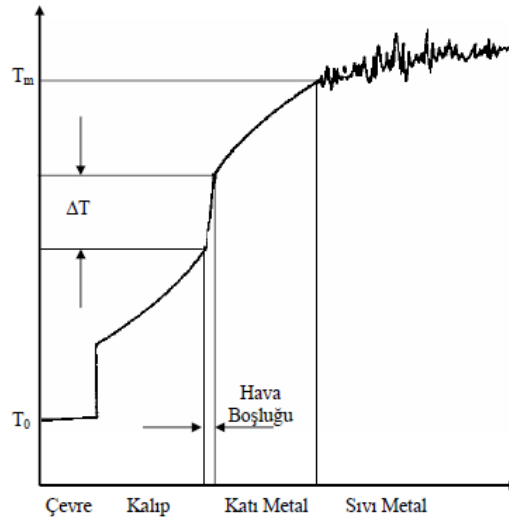
Koester ve K.Goehring'in çalışmasında ise ısıya dayanıklı camdan bir kalıp yapılarak metalin kalıba dolun şekli belirlenmiştir. Dolun şeklini belirleyebilmek için cam kalıbın dışına fotoğraf makinesi yerleştirilmiş ve saniyede 3500 fotoğraf çekilerek kalıbın dolun şekli incelenmiştir. Kalıbın şekli Frommer ve W.Brandt 'ın çalışmasındaki kalıp şekline benzer bir kalıptır. Çalışmada döküm metali olarak özel bir alaşım olan Wood metali kullanmışlardır [15, 16, 17].

Koester ve Geohring 'in araştırma sonuçları Frommer'in çalışma sonuçları ile yakın çıkmıştır. Frommer metal havuzunun, memenin karşı tarafta oluşu ve bunun hemen hepsinin metal jeti tarafından tutulması, yan çeperlerdeki ön akmaların, sürtünme nedeniyle sınırlı olan hareketinin, çoğalan metal miktarıyla birlikte ilerleyerek kalıbın dolduğu ifade edilmiştir. Fakat Koester ve Geohring, gerçek akışta, Frommer'in sürtünme ve donma etkisinin daha az olduğunu, ön akmaların bu sebepten dolayı daha uzun periyotta gerçekleştiğini, sürecin belirli bir zaman sonunda ise ön akmaların metal jetine girişte temas ederek kalıbın dolma sürecinin aşağıdan da başlatılabileceğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak ta iki çalışma arasında ki farklılık ise sürtünme kayıpları ve türbülans konularında ortaya çıkmıştır [3].

2.5. Döküm Prosesine Ait Termal Yaklaşımlar

Döküm yöntemlerinin neredeyse hepsinde ısı akış rejimi düzgün değildir. Bunun nedeni döküm metalinin sıcaklığının yüksek, kalıp sıcaklığının ise düşük

olmasından dolayıdır. Böyle bir proseste de sıvı metal katılaştırırken özgül ısısı ve ergime ısısı bir takım termal dirençler sayesinde kalıba geçer (Şekil 2.23). Termal dirençler sıvı metalde, katılaştıran metalde, metal-kalıp ara yüzeyinde, kalıpta ve kalıp-çevre arasında meydana gelmektedir. Bir döküm prosesinde ki sıvı metalin katılaştımasını sağlayan en önemli faktör döküm metalinin ısıyı kalıptan daha fazla iletmesidir. Bu da katılma hızının kalıbın ısı özelliklerine bağlı olmasıyla alakalıdır [18, 19].



Şekil 2.23. Kalıp içindeki döküm parçasının katılma süresince ısı transfer hızını kontrol eden ısı dirençlerinin etkisini gösteren sıcaklık eğrisi [19]

Basınçlı döküm prosesi, termal parametrelere bağlıdır. Kalıbın en verimli haliyle çalışması için, kalıptan çekilen ısı enerjisinin homojen ve etkili olarak dağıtılması gerekmektedir. Kaliteli bir üretim yapılabilmesi için kalıp çok büyük öneme sahiptir [3].

2.5.1. Metal-Kalıp Ara Yüzey Direnci

Kalıbın dolumu sırasında eriyik metalin ısısı kalıba ve sonra da kalıp tarafından çevreye transfer olmaktadır. Bu nedenle genellikle metalin ısısının transferinde kalıp, döküm-kalıp ara yüzeyi veya döküm parçasının kendisi etkilidir. Örneğin; kalıbın ısı iletimi düşük ise ısı transferi kalıp tarafından kontrol edilirken, döküm metalinin ısı iletimi düşükse döküm metali tarafından kontrol edilir. Her iki

malzemenin de ısı iletim özelliklerinin iyi olması halinde ise de ısı transferi döküm-kalıp ara yüzeyi tarafından kontrol edilmektedir [20].

Isı transferinin ara yüzey tarafından kontrol edildiği durumda ara yüzeyin ısı direnci hem ısı transferini hem de soğuma hızını etkiler. Bu ara yüzey ısı direnci ısı transfer katsayısı, h ile ifade edilir. Zamana bağlı olarak değişen ısı transfer katsayısı döküm metalinden kalıba doğru olan ısı akışında ara yüzeyin gösterdiği ısı dirence göre belirlendiğinden, proseste gerçekçi olarak belirlenmesi zordur.

Kokil kalıp kullanan ve basınçlı döküm yöntemi ile üretim yapılan yerlerde ısı transfer katsayısı çok önemlidir.

$$\dot{q} = h(T_C - T_M) \quad (\text{Denklemler 2.1})$$

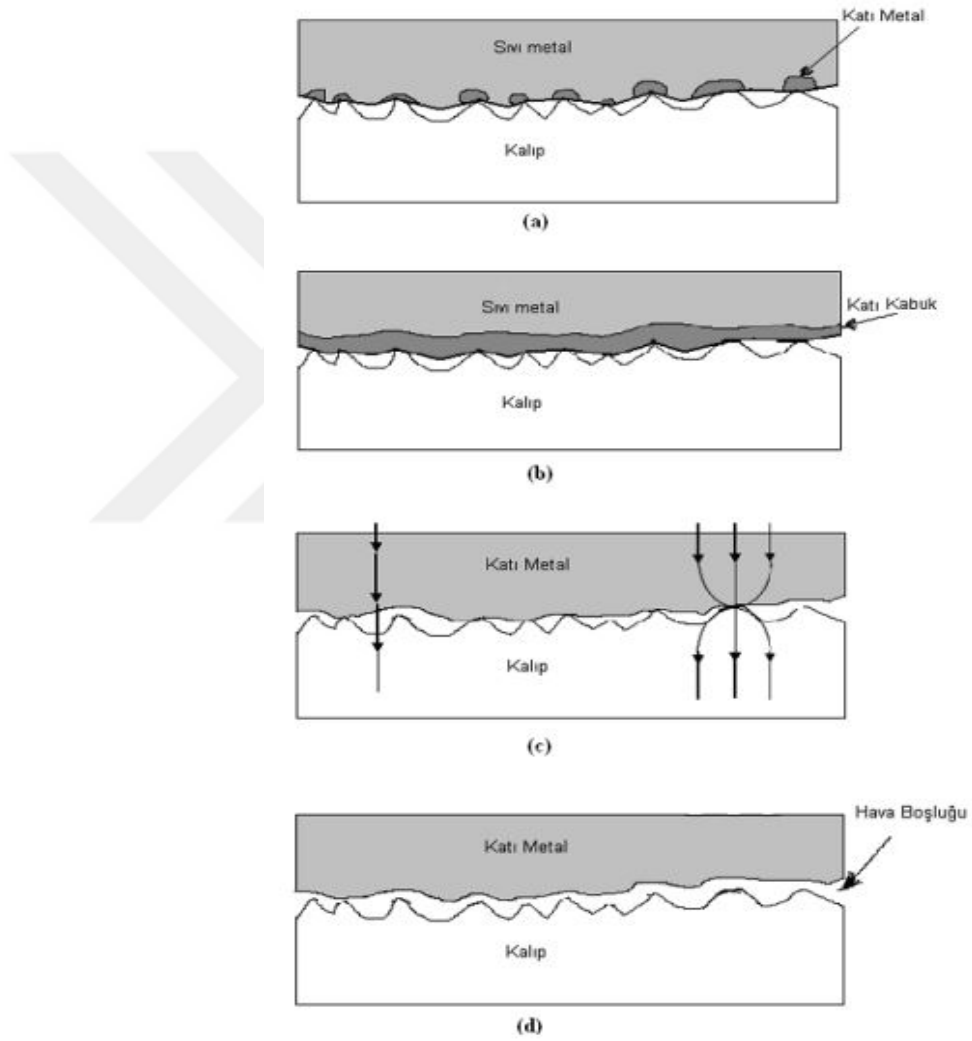
Ara yüzey direnci ile ısı transferinin gerçekleştiği bir proseste tek boyutlu ısı akışı yukarıda ki gibi hesaplanır.

2.5.2. Döküm-Kalıp Ara Yüzey Teması ve Isı Transferi

Döküm kalıplarının hepsinde kalıp duvarı pürüzlüdür. Kum kalıplarda, kumun tane büyüklüğü bunu belirlerken, kokil kalıplarda belirleyicilik ise kalıp duvarının yüzey işlem kalitesine göre pürüzlülük oluşmasıdır. Yapılan deneysel çalışmalar dökülen sıvı metalin kalıp duvarına ulaştığı zaman bile sadece belli noktalarda kalıp ile temas ettiğini göstermiştir [21]. Bu çalışma neticesinde de metal-kalıp ara yüzeyinde önemli bir bölümün aslında temas etmediği anlaşılmaktadır.

Sıvı metal kalıba ilk döküldüğü anda sıvı metalin ısılatma kabiliyeti, metalin statik basıncı ve kalıp yüzeyinin pürüzlülük genişliğine ve derinliğine bağlı olarak kalıp yüzeyi ile temas eder. Temas noktalarında oluşan metalden kalıba ısı akışının çok yüksek olmasından dolayı soğuma olur. Ani ve aşırı soğuma temas noktalarındaki sıvı metalde pre-dentritik çekirdek oluşmasına neden olur (şekil a).

Pre-dentritik çekirdek oluşmasının ardından hızlı bir şekilde büyümeye başlar ve ara yüzeyde çok ince bir kabuk oluşturur (şekil b) [21, 22]. Oluşan kabuk yani katı metal visko-plastik davranış gösterdiği ve sıvı metalin statik basıncını yenecek kadar dayanıma sahip olmadığı için temas noktalarından ayrılma gerçekleşmez. Temas noktalarında gerçekleşen bu olaya uyumlu temas denir ve ara yüzeydeki en yüksek temasın olduğu zaman aralığıdır. Bu süreç kısa bir zaman aralığına sahiptir ve metalin ara yüzeyindeki katı kabuk kritik kalınlığa ulaştığı zaman uyumlu temas sona erer.



Şekil 2.24. Metal-Kalıp Ara Yüzeyinde Temasin İlerlemesi

Kritik kalınlığa ulaşan sıvı metalde oluşan çekirdeklenmeden sonra katılaşma ile birlikte metal çeker ve bu esnada da kalıp ısındığı için genişir. Akabinde,

katılaşan metalin mikro boyutlarda kalıptan bölgesel olarak ayrılmasına neden olur. Isıl gerilimin etkisi altında katılaşan metal kabuk, kalıpta çarpılma ve hareketler oluşur. Oluşan arpılma ve hareketler neticesinde başlangıçtaki uyumlu temas bozulur. Uyumlu temasın bozulmasından dolayı sadece bazı noktalar da temas devam eder. İkinci aşamadaki metal-kalıp temasına da uyumsuz temas denir (şekil c).

Döküm parçanın çekme oranı kalıbın genleşmesinden çok büyüktür. Bunun da nedeni katılaşma ve soğumanın sürekli ve metal-kalıp geometrisine bağlı olmasındandır. Metalin ekme oranının, kalıbın genleşmesinden çok daha büyük olması Metal-kalıp ara yüzeyinin tamamen ayrılmasına neden olabilir. Metal-kalıp ara yüzeyinin tamamen ayrılması nedeniyle metal-kalıp arasında hava boşluğu olarak adlandırılan bir boşluk oluşur. Hava boşluğu oluşumu üç faktörden etkilenir. Bunlarda; döküm parça ve metal kalıp yüzey etkileri, döküm ve kalıp malzemesindeki dönüşümler ve son olarak geometrik etkilerdir.

Ara yüzeydeki ısı transferi ısı transfer katsayısı, h , tarafından belirlenir. Ara yüzeyde mükemmel temas olduğu zaman döküm (T_c) ve kalıp (T_m) yüzey sıcaklıkları birbirine eşit olur (şekil2a). Fakat bu durum gerçek anlamda mümkün değildir. Daha önce de anlatıldığı üzere ara yüzeyde çok az bir alanda temas bulunmaktadır. Bu yüzden iki yüzey arasında bir sıcaklık farkı oluşur (şekil2b). Oluşan sıcaklık farkının nedeni de ara yüzeyde gerçekte var olan gaz boşluklarıdır.

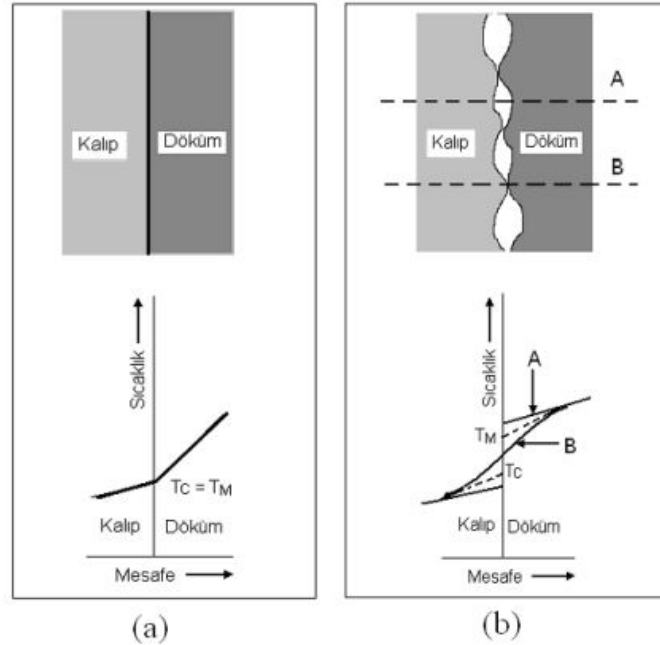
Temas noktalarında gaz boşluklarından daha fazla ısı transferi olacaktır. Bu durum aslında ara yüzeyden uzakta ısı akısının tek boyutlu olmasına rağmen metal-kalıp ara yüzeyinde iki farklı sıcaklık meydana getirecektir. Sıcaklık farkları döküm ve kalıbın her iki yüzeyinde sıcaklık dağılımında belirgin bir farka sebep olacak ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı her iki yüzeydeki ortalama sıcaklıkların belirlenmesi ile bulunabilecektir.

Long ve ark.,2011 çalışmasında metal-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısını belirlemek için motoru taşması için yapılan kiriş kalıbına K tipi termokupl yerleştirerek ölçüm almıştır. Daha sonra aldığı ölçümler ile Magma programında simülasyon oluşturmuştur. Oluşturulan simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmış ve istediği sonuçları elde etmiştir. Simülasyon modeli için elde ettiği

ısı transfer katsayısı ile döküm hatalarını daha iyi tahmin edebileceğini savunmuştur [23].

Susac ve ark.,2015 çalışmasında ise döküm ile üretim yönteminin son 10 yılda hızla artış göstermesi sebebinden dolayı döküm-çekirdek ve döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayılarını belirlemiştir. Çalışmasını hem deneysel hem de sayısal olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmasında döküm metali olarak Al-%7Si-Mg alaşımını kullanmıştır. Çalışma sonucunda ise istediği ara yüzey ısı transfer katsayısını döküm-çekirdek ve döküm-kalıp ara yüzeyleri için belirleyebilmiştir [24].

Taha ve ark.,2013 çalışmasında dökümün katılaşması sırasında oluşan büzülme ile döküm-kalıp arasındaki hava boşluğunun oluşumu incelemiştir. Oluşan hava boşluğu sayesinde ara yüzey ısı transfer katsayısının değişimi de belirlenmiştir. Döküm metali olarak Al ve Al-Si alaşımları kullanılmış ve basit bir dikdörtgen kalıpta deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda oluşan hava boşluğunun ısı transfer katsayısını farklı yüzeyler için farklı değerler ile gerçekleştirdiğini belirtmiştir [25].



Şekil 2.25. Döküm-Kalıp ara yüzeyinde sıcaklık değişimi A) Mükemmel temas [26]
B) Uyumsuz temas [27]

Temas için makroskobik ortalama ara yüzey ısı transferi katsayısını aşağıdaki denklem 2.2 ile hesaplayabiliriz;

$$h = \frac{\dot{q}}{T_C - T_M} \quad (\text{Denklem 2.2})$$

2.5.3. Döküm Prosesinde Isı Transferine Etkisi Olan Parametreler

2.5.3.1. Kalıp Malzemesi ve Kalınlığının Isı Transferine Olan Etkisi

Döküm prosesinin bulunan kalıbın dolması, metalin katılaşması ve soğuması aşamalarında ergiyik metalin ısı kalıba geçer [28]. Sıvı halde olan metalin katılaşma hızı, döküm metalinin çekirdek yapısına bağlıdır. Kalıbın iletim hızı ise kalıp malzemesinin ısı iletim özelliğine bağlıdır [28, 29].

Akar yaptığı bir çalışmada H13 çeliği ile saf bakır malzemeden yapılan kalıplara Al-Si alaşımı dökerek ısı transfer katsayılarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda saf bakırın yüksek ısı iletiminin yüksek olmasına rağmen H13 çeliği ile olan dökümde daha yüksek ısı transfer katsayısı bulmuştur [30, 31].

Bamberger ve Stupel de kalıp malzemesinin ısı transfer katsayısı üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma da ise kalıba sıvı halde metal girişinden sonra çelik malzemeli kalıbın döküm yüzeyine yakın bölgelerinde sıcaklığın ani olarak arttığını ve uzak bölgelerinde de sıcaklık artışının azaldığını görmüşlerdir. Aynı deneyi bakır malzemeli kalıp ile yaptıklarında döküm ara yüzeyine mesafesi farketmeksizin ısı dağılımının düzenli bir şekilde olduğunu gözlemlemişlerdir [32].

Garcia ve Muojekwu yaptığı bir çalışmada ısı transfer katsayısının kalıp malzemesinin ısı iletim özelliğinin yüksek olması ile arttığını görmüşlerdir [33, 34, 35, 36].

Garcia [33, 34, 35], Kumar [37], Gafur [28] ve Meneghini [38] kalıp kalınlığının ısı transfer katsayısına olan etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma sonucunda Kumar en yüksek ısı akısının döküm metalinin hal değiştirerek katılaşma

başlangıcında ve en yüksek ısı akı değerinin kalıp kalınlığı ile ısı yayılımına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Garcia 'nın görüşüne göre [33, 34, 35] kalıp kalınlığının azalması ile ısı transferi artmaktadır. Bunu da kalıp kalınlığının azalması ile katılaşmanın başlangıcında kalıp sıcaklığı çok hızlı yükselmektedir. Bu sebeple kokil kalıp genişir. Sıvı halden katı hale geçmeye başlayan döküm metalinde katı kabuk kalınlığının kalıp kalınlığına bağlı olmadığından dolayı ara yüzeyden aynı derecede metal çekilmesi olmaktadır. Bu da ısı transfer katsayısının artmasına neden olmaktadır.

Meneghini [38] bir çalışmada bakır malzemeli kalıp kalınlığının artması ile ısı transfer katsayısının arttığını fakat alüminyum veya dökme demir malzemeli kalıpların kalınlığının artmasının ısı transferini artırmadığını açıklamıştır.

Hadala ve ark.,2017 çalışmasında su soğutmalı bir inkonel plakanın ısı transfer katsayı dağılımını belirlemek için bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemde öncelikle deneysel çalışmanın yapılacağı plakanın üst yüzeyinin 2mm altına 25 adet termokupl yerleştirilmiştir. Deneysel olarak yapılan çalışmada plaka öncelikle 920°C'ye ısıtılmış ve daha sonra su püskürtülerek soğutulmuştur. Soğutulma işlemi sırasında ölçülen sıcaklık değerleri ile ısı transfer katsayısını hesaplamıştır. Çalışma sonucunda su püskürtme nozulunun akış eksenini değiştikçe ısı transfer katsayısının değiştiğini göstermiştir [39].

Bazhenov ve ark.,2017 çalışmasında ise Al döküm metali ile GMZ (düşük kül grafit) dereceli bir grafit kalıp arasındaki ara yüzey ısı transfer katsayısını belirlemiştir. Çalışmada kullanılacak Kalıp CNC tezgahında işlenerek üretilmiştir. Daha sonra Bazhenov ve arkadaşları, ara yüzey ısı transfer katsayısını, bir kalıptaki dökümün dökülmesi, katılaştırılması ve soğutulması sırasında dökümde meydana gelen deneysel ve simüle edilmiş sıcaklıklar arasındaki farkın oluşması ile bu farkı yansıtan hata fonksiyonunun en aza indirilerek hesaplandığını belirtmiştir. Çalışma sonucunda ise 1000, 660, 619 ve 190°C'lik kalıp sıcaklığına göre sırasıyla 1100, 4700, 700 ve 100 W/m²K ısı transfer katsayı değerlerini elde etmiştir. Ayrıca eriyik metalin 1000 ° C'den (dökme sıcaklığı) 660 ° C'ye (alüminyum erime noktası)

soğutulurken, ısı transfer katsayısının 1100 W/m²K 'den 4700 W/m²K 'ye yükseldiğini ve kalıp yüzeyinde döküm metalinin katı deri oluşturmasından sonra sıcaklığı azaldıkça ısı transfer katsayısının azaldığını belirtmiştir. Çalışmanın bir diğer sonucu ise, 660 ° C'nin altındaki döküm yüzeyi sıcaklıklarında ara yüzey ısı transfer katsayısındaki bir düşüş, dökümün doğrusal büzülmesinden dolayı kalıp yüzeyleri ve döküm arasında hava boşluğu oluşumu ile ilişkilidir. Kalıp parçaları (grafit-grafit) arasındaki ısı transfer katsayısı sabittir, 1000 W/m²K. Grafitin havaya ısı transfer katsayısı, 600 ° C'ye kadar kalıp yüzey sıcaklığında 12 W/m²K olarak açıklamıştır [40].

Bu çalışmaların çoğunda kalıp malzemesinin ve kalınlığının ısı transferine önemli bir etkisinin olduğunu açıklanmasına karşın; Akar ve arkadaşlarının yaptığı araştırmalarda kalıp kalınlığının ısı transfer katsayısına etkisinin yüksek olmadığını belirtmişlerdir. Bu araştırmaya göre kalıp kalınlığının sadece maksimum ısı transfer katsayısını etkilemekte olduğu ve de katılaştıran metalin ara yüzeyden ayrılmasının geciktiğini açıklanmıştır [41]. Gafur 'da [42] Akar ve arkadaşları gibi kalıp kalınlığının ısı transfer katsayısına etkisinin önemli derecede olmadığını açıklamıştır.

2.5.3.2. Kalıp Sıcaklığının Isı Transferine Olan Etkisi

Kalıp sıcaklığı ısı transferi için en önemli parametrelerden birisidir. Kokil kalıplar seri üretimde kullanılmasında dolayı sürekli sıcak madenle temas halindedir ve böylelikle de kalıp sıcaklığı yükselir. Bu konuda birçok araştırma yapılmıştır [20].

Srinivarsan yaptığı bir çalışma da gri dökme demir için 250°C 'de kalıp sıcaklığında ısı transfer katsayısını ölçmüştür. Daha sonra kalıp sıcaklığını 150°C'ye düşürdüğünde ısı transfer katsayısı da düşmüştür. Çalışma sonucunda kalıp sıcaklığındaki 100°C 'lik düşüşün ısı transfer katsayısını yaklaşık 2 kat düşürdüğünü belirtmiştir [43].

Michel ise kalıbın kaplama kalınlıkları ve farklı alaşımlar ile kalıp sıcaklığını değiştirerek yaptığı çalışmada ısı transferinin değişimini incelemiştir. Çalışmasının sonunda kalıbın kaplama kalınlığı arttıkça alaşım türü farketmeksizin ısı transfer katsayısının da arttığını görmüştür. Kalıpta kaplama kullanılmadan yapılan ölçümlerde ise kalıp sıcaklığını 200° C'den 300°C'ye yükseltmiş ve ısı

transferinin Al-%6Si alaşımında artmasına rağmen, Al-%13Si alaşımında düştüğünü bildirmiştir [44].

Gozlan ve Bamberger yaptıkları araştırma kullanacakları kalıbın yüzeyini grafit ile kaplamıştır. Kalıbın başlangıç sıcaklığını ise 225-400°C arasında tutmuşlardır. Kalıp malzemesi olarak AISI H-19 çeliği kullanmışlar ve döküm metali olarak alüminyum bronzu kullanmışlardır. Çalışma sonucunda maksimum ısı transferini 300°C elde etmişlerdir [45].

Hallam ve Griffiths, çalışmalarında kalıp yüzeyini kaplayarak 30-300°C arasında ön ısıtma yaparak kalıba Al-%13Si alaşımı dökerek ısı transferinin değişimini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ise ısı transferinin kalıp sıcaklığının artması ile arttığını belirtmişlerdir [46].

2.5.3.3. Kalıp Kaplamasının Isı Transferine Olan Etkisi

Döküm prosesinde kalıp yüzeyinin kaplanması sıvı halde olan metalin erken katılaşmasını engellemek, katılaşma yönünü ve hızını kontrol etmek, kalıp yüzeyinin aşınıp döküm metalinin kalıba yapışmasını engellemek ve oluşan gazların dışarı kolay tahliye edilebilmesi için yapılmaktadır [20].

Kokil kalıpların malzemeleri genellikle yüksek termal özelliklere sahip olduğundan dolayı proses anında erken katılaşma ile yaşanan problemlerin önüne geçmek açısından iyi bir izolasyon aracıdır. Kalıp boşluğundaki farklı bölgeler de kaplama kalınlığı değiştirilerek sıvı halden katı hale geçen metalin kontrolü daha kolay yapılabilir. Bunun sayesinde ise daha kaliteli ve ıskartasız parçalar üretilmiş olur [48, 49].

Hamasiid ve ark.,2008 yaptığı bir araştırma da kalıbın yüzey kaplama kalınlığının ısı transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Araştırma da kalıp kaplama malzemesi olarak grafit bazlı bir kaplama ile TiO₂ bazlı kaplama kullanmışlardır. Ayrıca kalıp yüzeyinde ki kaplama kalınlığının artması ile ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığını ve grafit bazlı kaplamanın TiO₂ bazlı kaplamaya göre daha yüksek ara yüzey ısı transfer katsayısı değeri elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Bohacek ve ark.,2018 Çalışmasında kalıp kaplamasının ara yüzey termal dirence ve ısı transfer katsayısına olan etkisini incelemiştir. Çalışma da farklı kalıp kaplama kalınlıkları ve solidus sıcaklıkları için sayısal testler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda ise ısı transfer katsayısının, kalıp kaplama malzemesinin termal iletkenliğine ve kalınlığına eşit olduğunu belirtmiştir [50].

2.5.3.4. Döküm Alaşımında Ki Kompozisyonun Isı Transferine Olan Etkisi

Akar ve Yalçın çalışmalarında Al-Si alaşımında Si değerini %3-%5-%7 olarak döküm gerçekleştirmiş ve her Si oranında ara yüzey ısı transfer katsayısının değişimini gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda Al-Si alaşımındaki Si oranı arttıkça ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığını bildirmişlerdir [51].

Goulart ve ark.,2006 ise Al-Si alaşımındaki Si oranını %5-%7-%9 olarak değiştirmiş ve ısı transfer katsayısına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kalıp malzemesi olarak 1010 çeliği kullanmışlardır. Çalışma sonucunda ise Al-Si alaşımındaki Si oranının artması ile ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığını bildirmişlerdir [52, 53].

Akar ve Yalçın yaptıkları çalışmalarında Goulart ve arkadaşlarının araştırmalarında ki sonuç ile aynı sonuca ulaşmışlardır. Akar ve Yalçın'ın çalışmalarında ise Al-Si alaşımında Si değerini %3-%5-%7 olarak döküm gerçekleştirmiş ve her Si oranında ara yüzey ısı transfer katsayısının değişimini gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda Al-Si alaşımındaki Si oranı arttıkça ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığını bildirmişlerdir [51].

Ferreira ve ark.,2008 ise Sn-Pb alaşımı içindeki Pb oranının değişimi ile ara yüzey ısı transfer katsayısının değişimini incelemişlerdir. İnceleme sonunda alaşımın içindeki Pb oranının artması ısı transfer katsayısının azalmasına neden olduğunu bildirmişlerdir [54].

Muojekwu'da çalışmasında Al-Si alaşımında ki Si oranını değiştirerek, Si oranının ısı transfer katsayısına olan etkisini incelemiştir. Çalışmaya göre alaşımında ki Si oranını azaltılmış ve ısı transfer katsayısının arttığını bildirmiştir. Bu artışın

nedenini ise alaşımda ki Si oranının azaltılması ile döküm alaşımının yüksek döküm sıcaklığına ihtiyacının olması ve ısı iletkenliğinin de döküm sıcaklığı ile orantılı olarak artması, olarak göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçlarını destekleyen çalışmaları Michel [44], Fortin [55] ve Garcia [56] da yapmıştır. Fakat Taha bu çalışmaların aksi bir sonuç bildirmiştir. Taha'nın çalışmasında [57] Al-Si alaşımındaki Si oranının artması ile ara yüzey ısı transfer katsayısının da arttığını belirtmiştir. Bu çalışmaya göre Taha, alaşımın kompozisyonuna bağlı olarak ara yüzeyde oluşan temasın değiştiğini ve Si oranının artması ile ara yüzeyde oluşan temasın arttığını bildirmiştir. Ara yüzey temasının artması da ısı transfer katsayısının artmasına sebep olduğunu bildirmiştir.

Garcia araştırmasında yandan soğuma şartlarında saf Sn, Sn-%5Pb, Sn-%10Pb, Sn-%20Pb ve ötektik Sn-Pb ve Saf Al, Al-%4.5Cu, Al-%15Cu ve ötektik Al-Cu alaşımlarının ısı transfer katsayısı profillerini belirlemiştir. Isı transfer katsayısı profillerinin döküm metalinin katılma karakteristiği, metalin kalıba ıslatabilme kabiliyeti ve katılma ve soğuma sırasında meydana gelen toplam çekme miktarından etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Katılma sıcaklık aralığının genişlemesi ile ısı transfer katsayısının arttığını bildirilmiştir. Katılma sıcaklık aralığının genişlemesi ile dentritler arası sıvının, metal kalıp ara yüzeyindeki sıvının daha uzun süre kalmasını sağlaması ile birlikte katılma çekmesini daha iyi besleyerek ara yüzey temasını geliştirmesini genel bir eğilim olarak vermiştir. Daha dar katılma sıcaklık aralığına sahip Al-%15Cu alaşımının, ısı transfer katsayısının, başlangıçta Al-%4.5Cu alaşımından daha yüksek olduğu fakat daha sonra azaldığı, bunun sebebinin ise başlangıçta Al-%15Cu alaşımının kalıba ıslatabilme kabiliyetinin daha baskın bir faktör olması ile açıklamışlardır [33, 34, 35, 56, 58, 59, 60, 61].

Krishan ve Sharma yaptıkları araştırmalarında LM24 (Al-%9.5Si-%3.58Cu) alaşımı ile LM6 (Al-%11.49Si) alaşımının ısı transfer katsayılarını karşılaştırmışlardır. Bu araştırmaya göre LM24 alaşımı ile daha yüksek ısı transfer katsayısı elde etmişlerdir. Aynı araştırmacıların yaptıkları diğer çalışmalarında ise teorik [26] ve deneysel [62] olarak döküm metalinin yüzey gerilimi ve kalıp yüzeyine temas açısının ısı transfer katsayısına olan etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda ise yüzey gerilimi ve ara yüzey temas açısının azalmasının ısı transfer katsayısını arttırdığını bildirmişlerdir.

2.5.3.5. Döküm Sıcaklığının Isı Transferine Olan Etkisi

Döküm sıcaklığının artması ile ısı transfer katsayısının arttığı literatürlerde belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak da ara yüzey temasının artması gösterilmiştir. Ara yüzey temasının artmasında ki en büyük etkenin döküm sıcaklığının yükselmesinin, sıvı haldeki metalin akıcılığının artmasına sebep olması ve böylelikle de kalıp yüzeyini ıslatabilirlik özelliğinin artmasıdır [33, 34, 41, 46, 57, 63, 64].

Döküm sıcaklığı prosesteki birçok parametreyi etkilediği gibi ısı transferini de etkilemektedir. Döküm sıcaklığının yükselmesi daha düzgün bir yüzey oluşmasını sağlayarak ısı transferini artırmaktadır [20].

Akar ve ark.,2008 yaptıkları bir araştırma da ötektik Al-Si alaşımının ergime sıcaklığından 100°C, 150°C ve 200°C daha yüksek sıcaklık değerleri ile döküm yapmışlardır. Akar ve arkadaşları, bu araştırma sonucunda da döküm sıcaklığının artması ile ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir [41].

Döküm sıcaklığının artması ve katılaşma yönünün ısı transfer katsayısı üzerine etkisini Taha [57] ve Garcia [33, 34, 35]'da yaptıkları çalışmalar ile incelemişlerdir. Taha da yaptığı araştırmada katılaşmanın her yönünde döküm sıcaklığının artışının ısı transfer katsayısını da artırdığını belirtmiştir [57]. Garcia ise katılaşma yönünün yan taraftan olması ile döküm sıcaklığı artışının ısı transferinin artmasına fakat katılaşma yönünün alt taraftan olması ile döküm sıcaklığı artışının ısı transfer katsayısının azalmasına sebep olduğunu bildirmiştir [34].

Taha'ya göre Garcia'nın çalışması sonucunun nedeni döküm prosesindeki katılaşmanın yönünün alt taraftan olması ısı transfer katsayısının döküm sıcaklığı ile daha belirgin bir etkiye sahip olmasıdır. Bununda sebebi metalik statik basıncının kalıbın alt tarafında daha fazla etkili olması olarak açıklamıştır [20].

El-Mahallawy ve Assar [65] ve Taha ve ark.,1992 [66] çalışmalarında yüksek döküm sıcaklığının ısı transfer katsayısının artışına sebep olduğunu ve de bu artışın ara yüzey boşluk kalınlığını azalttığını deneysel olarak kanıtlamışlardır. Deneyin sonucunda ise sıvı halde ki metalin döküm sıcaklığının artışına bağlı olarak akıcılığının artması kalıp yüzeyine daha iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Aynı çalışmaları ve bulguları Muojekwu [36], Todoroki ve ark.,1997 [67] da yapmışlar ve aynı sonuçlara ulaşmışlardır.

Wang ve Matthys 'in araştırmalarında döküm sıcaklığını ergime sıcaklığından 39°C 'den 176°C 'ye kadar yükselterek farklı sıcaklıklarda döküm işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma sonucunda ise döküm sıcaklığının artması ile ara yüzey temasının 3 kat artması ve temas süresinin 4 kat artmasına sebep olmuştur. Bu artış da ısı transfer katsayısını artırmıştır [63].

Wang ve Matthys 'in diğer bir araştırmasında da katılma hızının ve döküm sıcaklığının artırılması ile ara yüzey temasının artması ve bu nedenle de katılma başlangıcına kadar olan ısı transfer katsayısının döküm sıcaklığı ile birlikte kalıp yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu açıklamışlardır [64].

Gafur'un yaptığı çalışma da döküm malzemesi olarak saf alüminyumu kullanmışlardır. Çalışma şartları olarak döküm sıcaklığını 705°C'den 800°C'ye çıkartmışlardır. Bu sıcaklık değişimi ile ısı transfer katsayısında 900 W/m²K'den 2100W/m²K 'ye artış gözlemlenmiştir. Bu artışın nedenini ise döküm sıcaklığının artışı ile daha fazla oluşan ara yüzey temasının sıvı metal akıcılığını artırması olarak bildirmişlerdir [42].

2.5.3.6. Döküm Basıncının Isı Transferine Olan Etkisi

Sıvı halde olan metale katılma anında dış basınç uygulaması ile ara yüzey teması üzerinde bir etkiye sahiptir. Basınç değişimlerinin çalışmaları incelendiğinde ısı transfer katsayısında belli bir artış gerçekleştiği görülmüştür. Fakat bu artış takiben ısı transfer katsayısı hızlı bir şekilde azalır. Bu azalmanın sebebi ise basıncın sıvı metale olan etkisi ile katılma sonrasında oluşan kabuk oluşumuyla açıklanabilir. Döküm metalinin katılmasıyla elastik durumdan plastik duruma geçmesi basıncın metale etkisini azaltarak dayanım kazanmasını sağlamaktadır [27, 55].

Sun ve ark.,2011 yaptıkları çalışmada 30 MPa, 60 MPa ve 90 MPa sıkıştırma basınçlarının ara yüzey ısı transfer katsayısına olan etkisini incelemişlerdir. Bu

çalışma sonucunda da basınç artışıyla birlikte ısı transfer katsayısının arttığı belirtilmiştir [68].

Griffths ve Kawai 'nin çalışmalarında ise sıkıştırma basıncı 7 MPa'dan 14 MPa'ya yükseltmiştir. Basıncın yükseltilmesi ile ısı transfer katsayısında %20 lik bir artış gözlemlenmiştir. Daha sonra basınç 7 MPa 'dan 21 MPa'ya çıkarıldığında ise ısı transfer katsayısında %40 artış olduğu belirtilmiştir.

Hamasaiid ve ark.,2008 araştırmalarında AZ91D alaşımının yüksek basınçlı döküm şartlarında ısı transfer katsayısının değişimi araştırılmıştır. Sıkıştırma basıncı ile birlikte 1. Ve 2. Kademe piston hızlarında ki değişimin ara yüzey ısı transfer katsayısı incelendiğinde 2. Kademenin hızının artmasıyla ısı transfer katsayısının artışı gözlemlenmiştir [69].

Nishida ve Matsubara 'nın araştırmasında ise kokil kalıp ve dikey olarak yapılan dökümde 250kg ile 30000 kg arasında basınç uygulaması yapılarak ısı transfer katsayısı değişimi gözlemlenmiştir. Deney sonucunda ise artan basıncın ısı direnci düşürdüğünü açıklamışlardır. 30000 kg pres basınç uygulanan dökümde ara yüzey ısı transfer katsayısının önemli derecede arttığını ve katılaşma zamanının basınç uygulanmamış döküme göre %50 azaldığı belirlenmiştir [70].

2.6. Ara Yüzey Isı Transferinin Belirlenmesi

2.6.1. Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısı

Kalıp ile döküm metali ara yüzeyinde ki ısı akısı, ortalama ara yüzey ısı transfer katsayısı, h (W/m^2K) ile belirlenebilir. Isı transfer katsayısını bulmak için denklem 2.3 kullanılır.

$$\dot{q} = h(T_C - T_M) \quad (\text{Denklem 2.3})$$

Kalıp-döküm ara yüzeyinde ki ortalama ısı akısı ise, döküm yüzeyindeki T_C ve kalıp yüzeyinde ki T_M nin hesaplanan sıcaklıklarıdır. Bu iki durum içinde ayrı ayrı olarak denklem 2.4 ile ısı akısı belirlenir.

$$\dot{q} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Denklem 2.4})$$

Sıvı veya katının ara yüzeyinde iletimle akan ısı, ara yüzeydeki ve bir gerisinde ki noktalar arasında ki sıcaklık farkları ($\Delta T=T_M-T_{M-1}$ ve $\Delta T=T_C-T_{C-1}$) ve aynı şekilde bu noktalar arasındaki mesafe Δx ile hesaplanabilir.

2.6.2. Matematiksel Model

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile ara yüzey ısı transfer katsayısı Sonlu Hacimler Metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Çözümlerimizde kullanılan Kütlenin Korunumu, Süreklilik, Momentum ve Enerji Denklemleri aşağıda ifade edilmiştir.

Reynolds transport teoreminin uygulanmasıyla kontrol hacmi için kütlenin korunumuna ait bir Kontrol Hacmi (KH) ve Kontrol Yüzeyi (KY) için kütlenin korunumu;

$$\int_{KH} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{KY} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (\text{Denklem 2.5})$$

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Denklem 2.6})$$

Momentum Denklemleri:

x bileşeni;

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Denklem 2.7})$$

y bileşeni;

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Denklem 2.8})$$

z bileşeni;

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Denklem 2.9})$$

Enerji Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{c}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (\text{Denklem 2.10})$$

k_{eff} etkin iletkenlik olduğunda ve $(j_j) \vec{}$, j türlerinin difüzyon akısıdır. Denklem 10'nun sağ tarafındaki ilk üç terim sırasıyla iletim, tür difüzyonu ve viskoz dağılımından dolayı enerji transferini temsil eder. S_h , kimyasal reaksiyonun ısısını ve tanımladığımız diğer hacimsel ısı kaynaklarını içerir.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (\text{Denklem 2.11})$$

Mantıklı entalpi h'nin ideal gazlar için tanımlandığı,

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (\text{Denklem 2.12})$$

ve sıkıştırılmaz akışlar için,

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (\text{Denklem 2.13})$$

Denklem 5.2-3 ve 5.2-4'te Y_j , j türünün kütle kesridir ve

$$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j} dT \quad (\text{Denklem 2.14})$$

Basınç temelli çözücünde, $T_{\text{ref}} 298.15 \text{ K}$ 'dir.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

3.1.1. Batarya

Sıhhi tesisat sistemlerinden sıcak ve soğuk suyu istenilen oranlarda karıştırarak akıtabilen armatürlere batarya denir. Gerektiğinde sadece soğuk veya sıcak su akıtılabilir [1].

Bataryalar kullanıldıkları yerlere göre lavabo, banyo, eviye, duş, bide bataryası adlarını alır.



Şekil 3.1. Batarya örnekleri

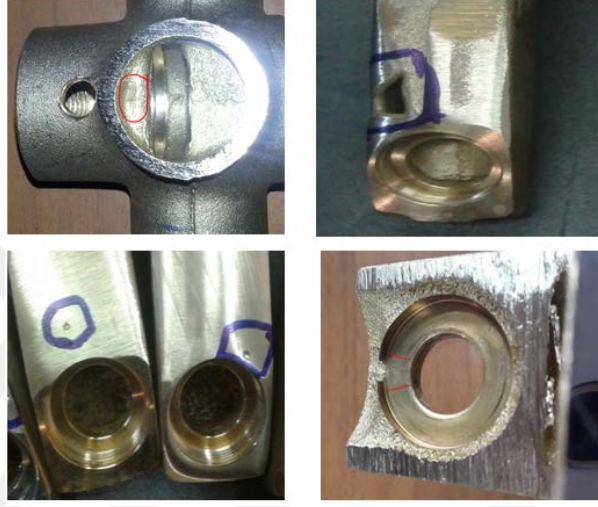
Tek gövdeli ve çift gövdeli olarak imal edilir. Duvara veya zemine monte edilen duvar tipi ve ankastre tipi bataryalar vardır.

Batarya yapımında çeşitli maden alaşımları kullanılmıştır. Döküm tekniğiyle yapılan bataryalarda önceleri bakır-kalay alaşımı kullanılarak bronz bataryalar, daha sonraları ise ucuz olan bakır-çinko alaşımı kullanılarak pirinç bataryalar elde edilmiştir. İnsan sağlığına herhangi bir zararının olmaması da pirinç alaşımının tercih edilmesinin sebeplerinden biridir.

Bataryaların temel üretim yöntemleri alçak basınçlı döküm yöntemi ve sıcak dövme yöntemidir. Daha sonraki üretim basamakları ise otomat tezgahlarında üretim,

CNC- torna tezgahlarında üretim, üretilen parçalara polisaj yapılması ve krom kaplanması, son olarak da tüm parçaların montajlanarak son kullanıcıya iletilmesidir.

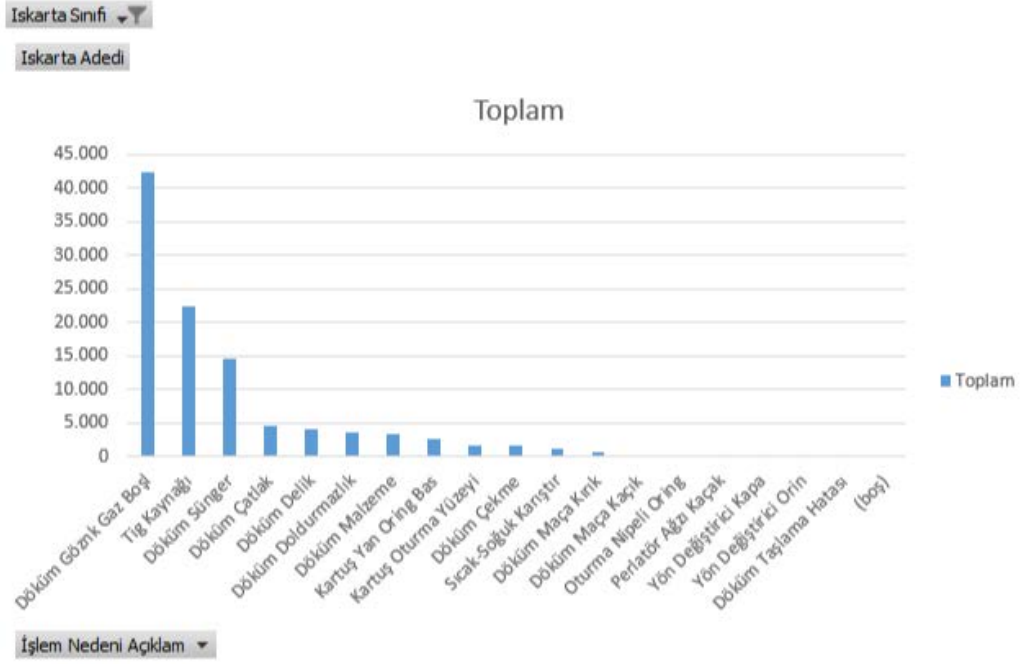
Batarya üretiminde yaşanan temel problemler üretim prosesinin ilk adımı olan dökümde yaşanmaktadır. Dökümde ortaya çıkan hatalar doldurmazlık, çekme, gözenek-gazboşluğu, çatlak, süngerimsi yapı, maça kırık, maça çatlak, maça kaçıklığıdır.



Şekil 3.2. Parçada oluşan hata örnekleri

Bu çalışmada ise kullanılacak batarya tipini belirlemek için kurumsal kaynak planlaması programından alınan üretim adetleri ve ıskarta oranları incelenerek, işletmenin yıl bazlı ıskarta performansı raporlanmıştır. Sonrasında döküm menşeli parçaların ıskartaya ayrılma sebepleri incelenmiş, bu incelemede yapılan Pareto Analizi neticesinde “Gözenek Gaz Boşluğu” ve “Sünger” hatasına odaklanılması kararlaştırılmıştır.

Iskarta Sınıfı	Döküm			
Satır Etiketleri	Iskarta Adedi	Iskarta Nedeninin Toplam Iskarta Adedindeki Payı	Kümülatif Toplam	
Döküm Gözük Gaz Boş	42.487	41%	41%	Seçilen Iskarta Nedenleri
Tig Kaynağı	22.356	22%	63%	
Döküm Sünger	14.685	14%	77%	
Döküm Çatlak	4.709	4,5%	81%	
Döküm Delik	4.003	3,9%	85%	
Döküm Dolduramazlık	3.678	3,5%	89%	
Döküm Malzeme	3.384	3,3%	92%	
Kartuş Yan Oring Bas	2.694	2,6%	94%	
Kartuş Oturma Yüzeyi	1.661	1,6%	96%	
Döküm Çekme	1.574	1,5%	98%	
Sıcak-Soğuk Karıştır	1.107	1,1%	99%	
Döküm Maça Kırık	718	0,7%	99%	
Döküm Maça Kaçık	279	0,3%	100%	
Oturma Nipel Oring	139	0,13%	100%	
Perlatör Ağız Kaçık	98	0,09%	100%	
Yön Değiştirici Kapa	97	0,09%	100%	
Yön Değiştirici Orin	25	0,02%	100%	
Döküm Taşlama Hatası	15	0,01%	100%	
Genel Toplam	103.709			



Şekil 3.3. Pareto analizi yapılarak hangi hatalara odaklanılması gerektiğini gösteren çalışma

Son olarak incelenip iyileştirmek üzere bu hatanın en çok ortaya çıktığı parçalar üretim adedi, satış tahminleri, ıskarta adedi ve ıskarta maliyeti gözetilerek

belirlenmiştir. Yapılan üretim ve ıskarta analizleri sonucunda belirlenen banyo bataryası gövdesi üzerine bu çalışmanın yapılması kararlaştırılmıştır.

3.1.2. Batarya Kalıbı

Metalden yapılma form iki veya daha fazla parçadan oluşur. Metalin ısı iletmesi kumdan daha büyük olduğundan dökülen parça daha çabuk soğur. Bundan dolayı daha sıkı ve molekül yapısı daha ince malzeme oluşur. Bu da döküm parçasının mukavemet değerini daha da artırır. Bu metotla dökülen parçalar ya talaşlı işleme tabi tutulmadan veya çok az işlenerek kullanılırlar.



Şekil 3.4. Kokil kalıp örneği

Tabiatta bulunan çeşitli metallerin, değişik özellikleri vardır. Yapacağımız işe göre bu metallerin özelliklerini değerlendirip, seçim yapabiliriz. Bunu yaparken belli bir mekanik özelliğin olması da şarttır.

Tabloda çok çeşitli metallerin ısı iletkenlik özellikleri verilmiştir. Buna göre en yüksek ısı iletkenliği olan metal gümüştür. Ama fiyatı nedeniyle kimse kullanmak istemez.

Gümüş kadar yüksek ısı iletkenliği olmasada, ortanın üstü bir seviyede ısı iletkenliği olan, ama belli bir düzeyde mukavemeti olan berilyumlu bakır alaşımı özellikle batarya kalıplarında idealdir.

Çeşitli Metal ve Alaşımın ısı iletkenlik Değerleri	
Malzeme	Isı iletkenliği (W/m-K)
Saf Gümüş	428
Saf Bakır	398
Oksijensiz Bakır, OFE	391
ETP Bakır	391
Saf Altın	317.9
Saf Alüminyum	247
Berilyumlu Bakır	222
Alüminyum Alaşımı (Al 2024-O)	193
Alüminyum Alaşımı (Al 6061-O)	180
Alüminyum Alaşımı (Al 6061-T6)	167
Saf Tungsten	160
Saf Magnezyum	155
Alüminyum Alaşımı (Al 2024-T6)	151
Alüminyum Alaşımı (Al 7075-T6)	130
Pirinç	121
Saf Çinko	113
Saf Nikel	82.9
Saf Demir	80.4
Saf Kobalt	69.04
Saf Kalay	62.8
Alüminyum Bronzu	55
1020 Karbon Çeliği	51.9
Saf Kurşun	33.6
Nikel Bronzu	29
Paslanmaz Çelik	28.7
316 Tip Paslanmaz Çelik	16.2
Saf Titanyum	11.4

Şekil 3.5. Çeşitli metallerin ısı iletkenliklerini gösteren örnek

Batarya kalıplarından beklenen özellikler ise;

- Isı iletkenliği yüksek olmalı
- Isı iletimi üniform olmalı
- İşleme rahat olmalı
- Korozyona dayanımlı olmalı
- İç gerilmelerin oluşumu az olmalı

Bu çalışma da ise kullanılacak olan kokil kalıbı da bakır berilyum alaşımından üretilmiştir. Kalıbın simülasyon ve analiz çalışmalarında kullanılacak termal ve mekanik özellikleri de aşağıda ki değerlere göre yapılmıştır.

3.1.3. Alçak Basıncı Döküm Tezgahı

Bu çalışma da kullanılacak döküm tezgahı KWC marka alçak basınçlı döküm tezgahıdır. Hareketli manifoldu bulunan tezgahıyla döküm işlemi 1 bar'a kadar basınç ile yapılmaktadır. Döküm prosesi yaklaşık 1 dk sürmektedir. Bu sürede kalıba maça yerleştirilmesi, kalıbın ergimiş metal kazanına gelerek dolunun gerçekleşmesi, kalıbın kazandan ayrılarak parçayı itici pimleri ile tablaya düşürmesi ve kalıp soğuması için grafit havuzuna dalarak tekrardan aynı işlemlerin gerçekleşmesi için maça yerleştirme bölgesine geri gelmesi ile tamamlanmaktadır.

3.1.4. Termokupl

Günümüzde sıcaklık ölçümleri giderek artan oranda önemli bir konu haline gelmiştir. Çok çeşitli fiziksel özellikleri etkileyen bir parametre olması nedeniyle ölçülmesi gereken önemli bir değişkendir. Sıcaklık ölçümü için çok çeşitli yöntemler vardır. Bunlar içinde elektronik dünyanın en çok kullandığı sensörlerden birisi termokupldur. Termokupllarla -200°C'den +2320°C'ye kadar ölçüm yapılabilir.

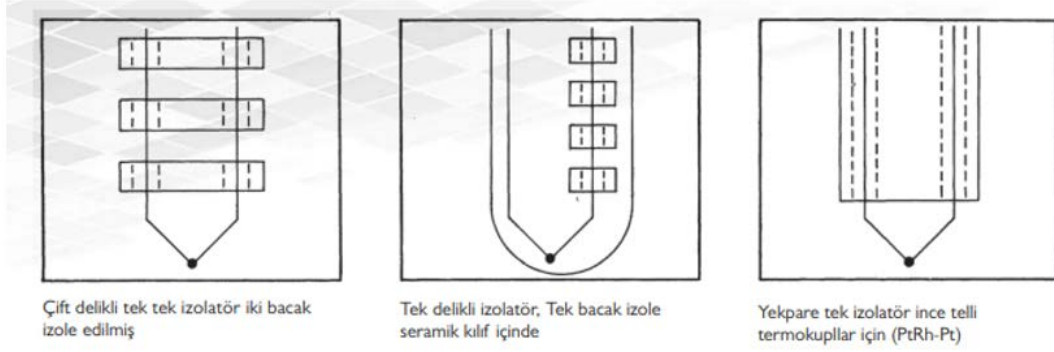
1) Cu-Const (CuNi)	Bakır-Konstantan
2) Fe-Const (CuNi)	Demir-Konstantan
3) Cr-Al	Kromel-Alümel
4) NiCr-Ni	Nikelkrom-Nikel
5) Nikrosil-Nisil	Nikelkrom Silikon-Nikelsilisyum magnezyum
6) Pt%10Rh-Pt	Platin Rodyum-Platin (%10)
7) Pt%13Rh-Pt	Platin Rodyum-Platin (%13)
8) Pt%18Rh-Pt	Platin Rodyum-Platin (%18)
9) Tn-Tn%26Re	Tungsten-Tungsten %26 Renyum

DIN 43710	DIN 43710 IEC 60584	SICAKLIK ARALIĞI		
1) Cu-Const	T	-200	...	300 °C
2) Fe-Const	J	-200	...	800 °C
3) Cr-Al	K	-200	...	1200 °C
4) NiCr-Ni	K	-200	...	1200 °C
5) Cr-Const	E	-200	...	1200 °C
6) Nikrosil-Nisil	N	0	...	1200 °C
7) Pt%10Rh-Pt	S	0	...	1500 °C
8) Pt%13Rh-Pt	R	0	...	1600 °C
9) Pt%18Rh-Pt	B	0	...	1800 °C
10) Tn-Tn%26Re	W	0	...	2000 °C

Şekil 3.6. Termokupl çeşitlerinin limitleri

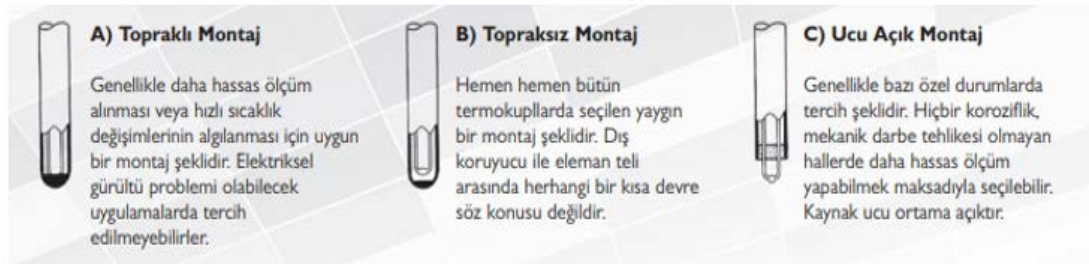
Termokupl iki farklı alaşımın ucunun kaynaklanması ile oluşturulan basit bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Kaynak noktası sıcak nokta, diğer açık iki uç soğuk nokta (veya referans noktası) olarak anılır. Termokupl olayı sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından doğar.

Termokupllar (ısı çifti) endüstride sıcaklık ölçümlerinde çok geniş uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Termokupl aslında iki farklı metal veya alaşım tel olmasına rağmen genelde prosese çıplak olarak daldırılmazlar. Çeşitli mekanik darbeler, fiziksel ve kimyasal aşındırıcı özellikler göz önüne alınarak belli özel koruyucu kılıflar içinde kullanılırlar. İki farklı eleman teli farklı kutuplarda oldukları için birbirlerinden izolatör yardımıyla izole edilirler. İzolatörlerin seçiminde yine ortam şartlarının, sıcaklık limitlerinin önemi büyüktür. Gerek eleman tellerinin gerekse koruyucu tüplerin cinsleri termokuplların ömürlerine direkt etki etmektedir.



Şekil 3.7. Termokupl çeşitlerinin izolasyon tipleri

Eleman tellerinin uçları kaynak yapıldıktan ve izolatör geçirildikten sonra koruyucu kılıf içine yerleştirilir. Uygulamanın durumuna göre topraklı-topraksız ucu açık tipte olmak üzere çeşitli şekillerde koruyucu kılıf montajı söz konusudur.



Şekil 3.8. Eleman teli montaj şekilleri

Termokupl eleman tellerinin dayanabileceği sıcaklık limitleri eleman teli çapına bağlıdır. Çap kalınlaştıkça çıkabileceği max. Sıcaklık arttığı gibi, kalın çaplı tel inceye nazaran daha uzun ömürlü olabilecektir.

Bu çalışmada kullanılan termokuplın özellikleri ise;

- K tipi,
- Topraklı montaj,
- Termokupl çapı Ø3 mm,
- Termokupl boyu 200 mm
- Kablo boyu yanmaz 7 m.

3.1.5. Ölçüm Kayıt Cihazı

Bu çalışmada kullanılan ölçüm kayıt cihazı Elimko marka E-PR-110 serisi cihazdır. Bu tip cihazlar mikrokontrolör kullanılarak tasarlanmış kağıtsız kayıt ve kontrol cihazlarıdır. Üniversal giriş ve çıkışların kullanıcı tarafından programlanabildiği 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ve 24 kanal giriş, 12 Röle çıkışı, 64 sayısal giriş/çıkış, programlama gerektirmeyen kolay takılıp çıkartılabilen I/O kartlarıyla endüstrinin her alanında kullanılan bir cihazdır. Çalışma da 6 kanal girişli bir cihaz kullanılmıştır. Ölçüm kayıt cihazı Sıcaklık, basınç, seviye, debi, akım, gerilim gibi fiziksel birimlerin sayısal ortamda kayıt edilmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 3.9. Ölçüm kayıt cihazının ekran görüntüsü

Ethernet bağlantısı, USB port imkanı ve yüksek kapasitede dahili veri depolama özelliği ile çok fonksiyonlu bir kayıt ve kontrol cihazı olması kullanım kolaylığı da sağlamaktadır. Bu çalışma da kayıt cihazında ki ölçümü alınan verilerin Ethernet bağlantısı ile bilgisayara aktarımı sağlanmıştır.

Doğruluk Sınıfı	0.5
Ekran Tipi	5.7" TFT ekran, 640×480 çözünürlük, 18 bit renkli, Dokunmatik
Röle Çıkoşları	SPST-NO; 250 V AC, 5 A
Röle Çıkış Sayısı	Maks. 12 Röle Çıkış (Seçilen konfigürasyona bağıdır)
Analog Sayısal Çevirici	16 bit (Her kanal için izole)
Analog Giriş Sayısı	Maks. 24 Analog Giriş (Seçilen konfigürasyona bağıdır)
Giriş Tipleri	TC (B, E, J, K, L, N, R, S, T, U), RT (Pt-50, Pt-100, Pt-500, Pt-1000, Ni-100, Ni-200, Ni-500, Ni-1000), 0/20 mA, 4/20 mA, -2000 mV/2000 mV, 0/10 V
Sayısal Giriş Sayısı	Maks. 64 Sayısal Giriş (Seçilen konfigürasyona bağıdır)
Sayısal Çıkış Sayısı	Maks. 64 Sayısal Çıkış (Seçilen konfigürasyona bağıdır)
Güç Tüketimi	30 W maks.
Örnekleme Süresi	100 ms (Tüm kanallar için)
Şifre Koruması	Ayarlanabilir farklı yetkiler (En fazla 5 kullanıcı için)
Koruma Sınıfı	Ön Panel: IP65, Arka Panel: IP20
Çalışma Ortam Sıcaklığı	-10°C ... 50°C
Veri Depolama Hafızası	8 GB Micro SD Flash Internal
Çalışma Gerilimi	85-265 V AC; 50-60 Hz / 85-375 V DC
İletişim	10-100 Mbit Ethernet, RS-485, 1 USB Host
Ağırlık	1,6 kg

Şekil 3.10. Ölçüm kayıt cihazının teknik özellikleri

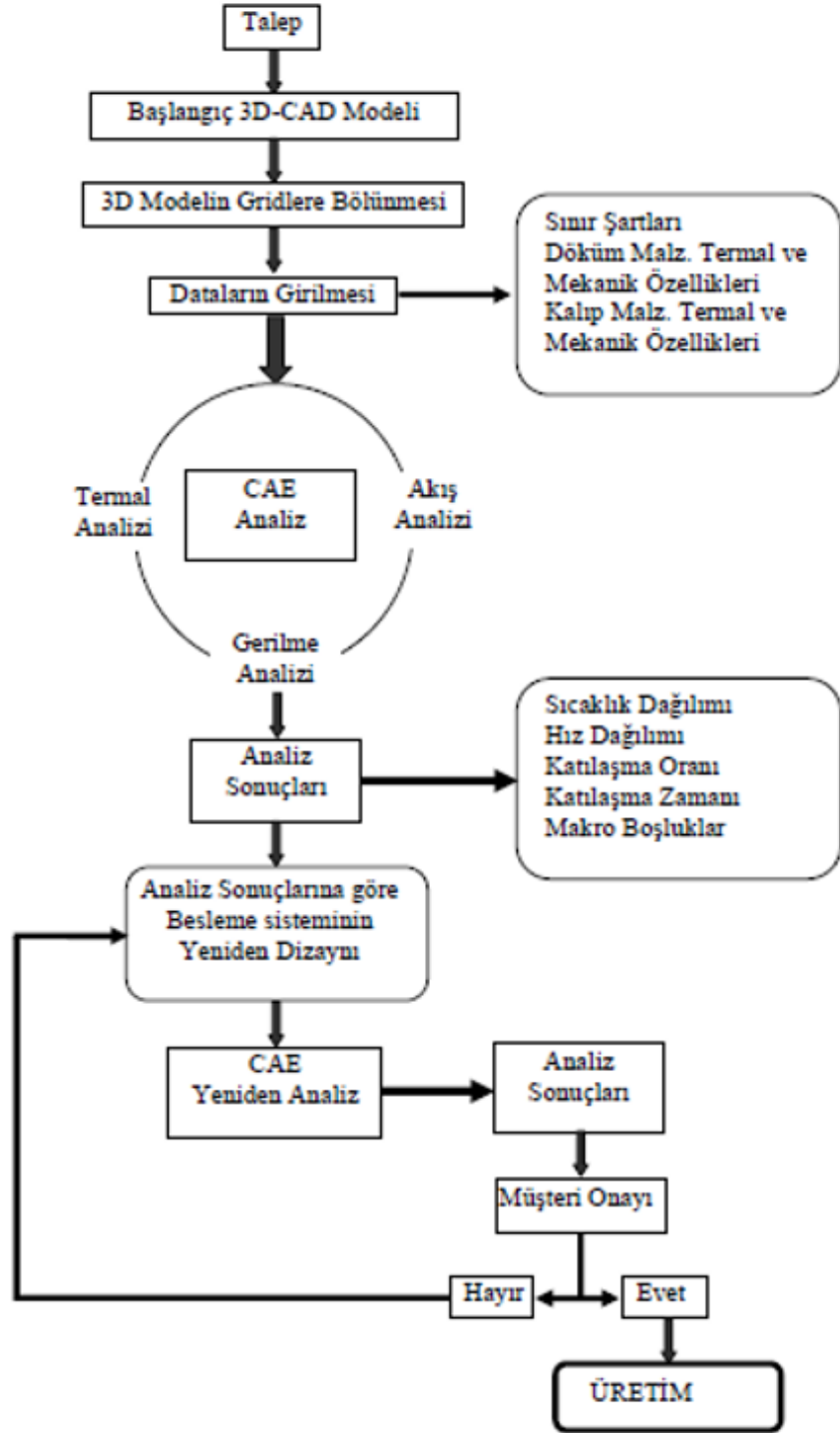
3.1.6. Simülasyon ve Analiz Programları

Döküm prosesi, birçok değişkene sahip olması ve bu değişkenlerinde sonuca direk etki ettiği bir üretim yöntemidir. Yıllar içinde deneme yanılma yöntemleri ile döküm prosesi hakkında ve kalıp tasarımı hakkında biriken bilgiler sayesinde diyagram ve tablolar hazırlandı. Bu sayede de kaliteli ürünler döküm yöntemi ile üreilmeye başlandı. Fakat gelişen teknoloji ve yaygınlaşan bilgisayar kullanımı ve bilgisayar yazılım, donanımları da birçok sektörde etkili rol almaya başladı [2].

Teknolojide ki bu gelişmeler sayesinde bilgisayar destekli tasarım, modelleme yapılabilen ve bu yazılımlar ile döküm simülasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Bu tarz döküm simülasyonunu gerçekleştirebilen programlarda bazı parametrelerin programa işlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler genellikle kalıp ve döküm malzemesinin ısı iletim katsayısı, özgül ısı, yoğunluğu, ergime gizli ısı, sınır şartları, akış özellikleri ve ara yüzey ısı transfer katsayısıdır. Bu parametreler doğru bir şekilde belirlenip programa işlenirse, elde edilen simülasyon sonuçları da bir o kadar güvenilir olur. Bu sebeple de deneysel veriler ile elde edilebilecek kalıp sıcaklık dağılımı, ısı akısı ve döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı gibi parametrelerin tespit edilmesi son derece önemlidir [3].

Döküm simülasyon programı kullanıldığında parça sıcaklık dağılımı, ısı akısı, gözeneklilik, döküm yoğunluğu, gaz boşluğu, çekme boşluğu, ayrılma, çekme çatlağı, soğuk birleşme, katılma oranı, katılma zamanı ve dolum hızı, basıncı gibi birçok sonuç elde edilebilir. Aynı zamanda kalıp ile ilgili sıcaklık dağılımı, yolluk tasarımı vb gibi sonuçlar da elde edilebilir. Bu tarz verilerin elde edilmesi sayesinde parça, kalıp ve yolluk tasarımı optimum şekilde yapılabilen ve buna istinaden de tasarım aşamasında birçok hatanın oluşmasını engelleyerek döküm ve kalıp imalatı yapan firmalara zaman ve para tasarrufu sağlamaktadır [71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80].

Yukarıda anlatılan ve günümüzde döküm sektöründe giderek kullanımı artan yazılımların bazıları Procast, Magma-Soft, FLOW3D, Novacast, Solidcast, Dynacast, Diana, Mavis, Solstar, Simulor, Stefan Software, Abaqus, Ansys vb. şeklindedir. Bu simülasyon programlarını kullanan firmaların iş akış grafiği genel anlamda aşağıda ki şekildedir;

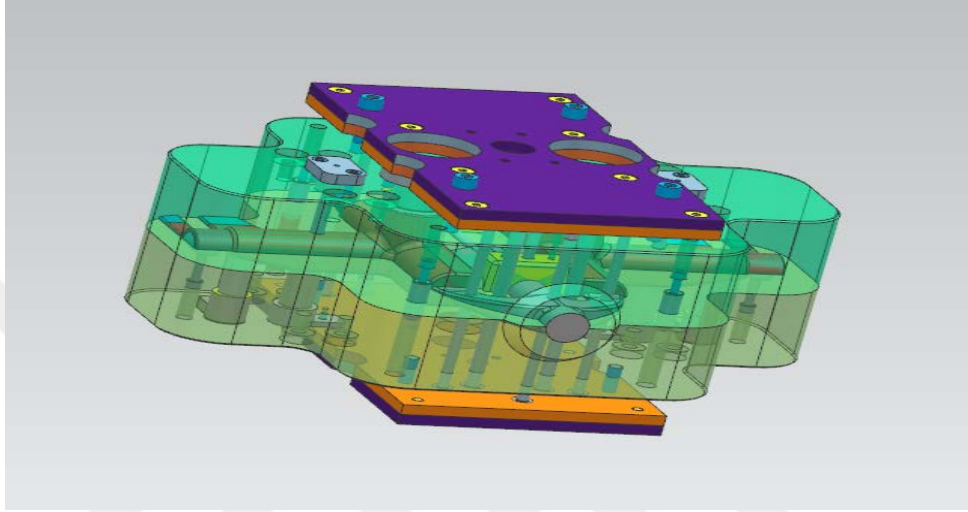


Şekil 3.11. Simülasyon modeline ait iş akış grafiği [81]

3.2. Yöntemler

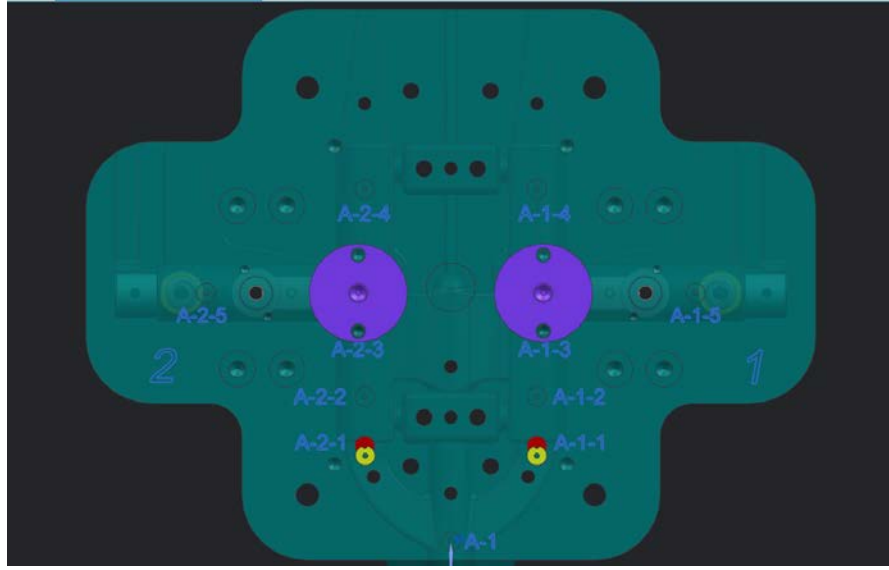
3.2.1. Proses Anında Sıcaklık Belirlenmesi

Bu çalışma da proses anında sıcaklıkların belirlenmesi için öncelikle çalışmanın yapılacağı parçanın kalıp tasarımı Şekil 3.12'deki gibi 3D modelleme programı olan NX yazılımı ile yapılmıştır.

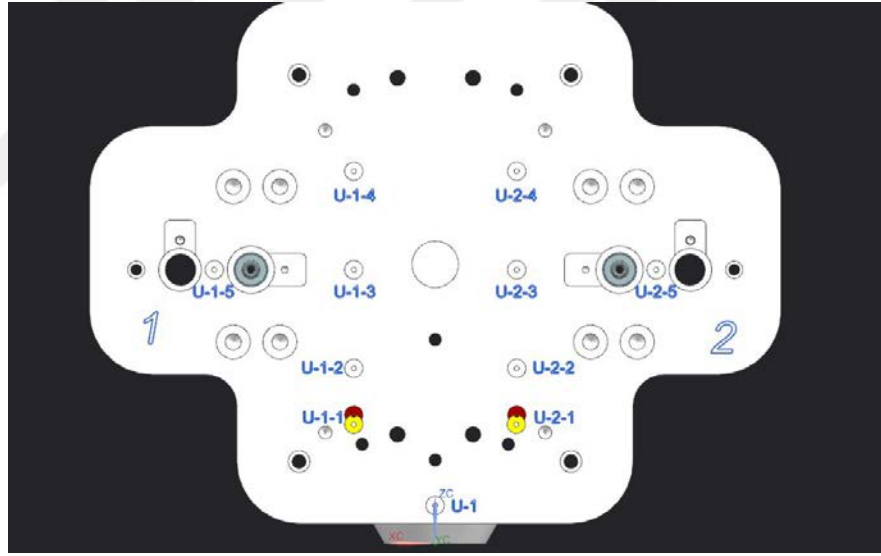


Şekil 3.12. Kalıp modeli

Bu tasarım yapılırken sıcaklık değerlerinin termokupl ile ölçüleceği noktalara karar verilmiştir. 3D model üzerinde termokupl noktaları işaretlenerek Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'teki gibi isimlendirme yapılmıştır. Bu sayede kayıt altına alınan değerlerin daha rahat kontrol edilmesi planlanmıştır.

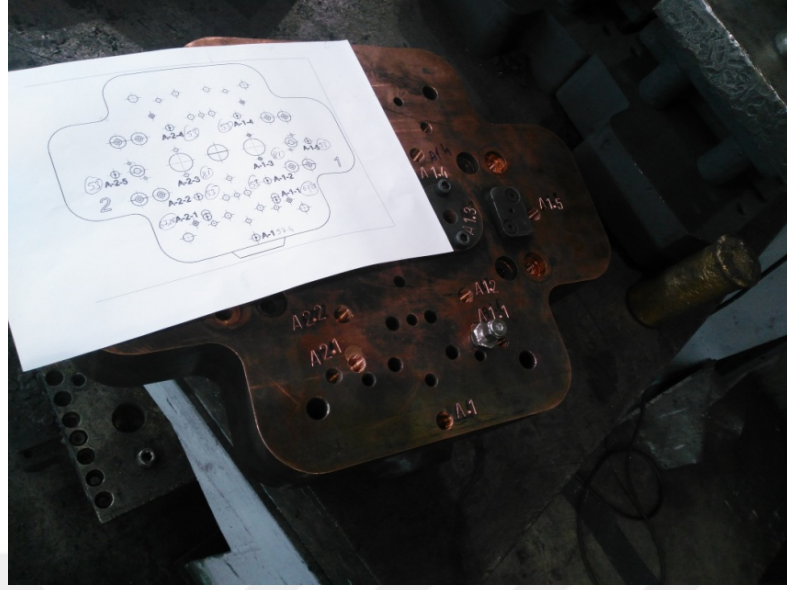


Şekil 3.13. Alt kalıp ve termokupl noktaları



Şekil 3.14. Üst kalıbı ve termokupl noktaları

Termokupllar kalıbın döküm yüzeyine 5mm et kalınlığı kalacak şekilde modellenmiştir ve daha sonra kalıbın da üretilmesi sağlanmıştır. Kalıp üretiminin tamamlanmasının ardından firmanın kalıp takım bölümünde termokupl montaj noktalarına daha önceden belirlediğimiz isimler Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'daki gibi damgalanmıştır.

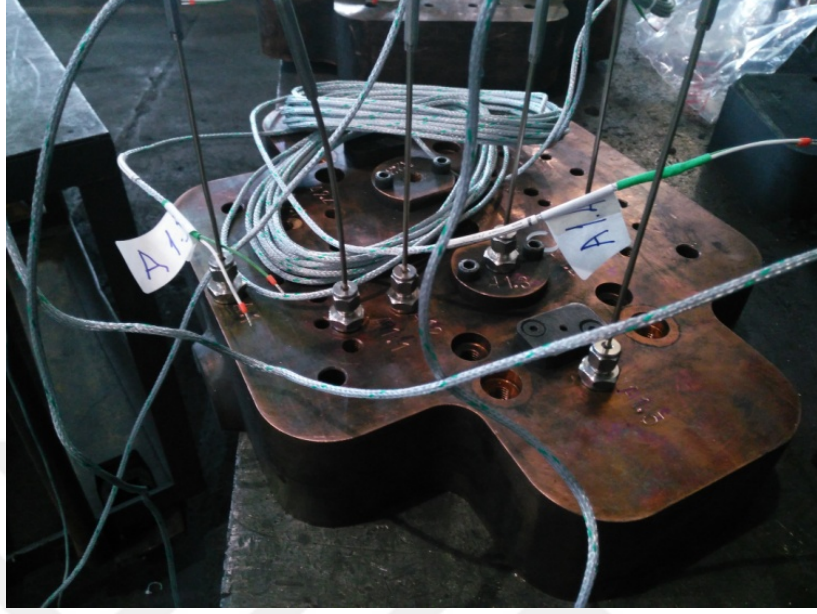


Şekil 3.15. 3D Modelde yapılan termokupl yerleşimlerinin projede kullanılacak kaliba da uygulanması



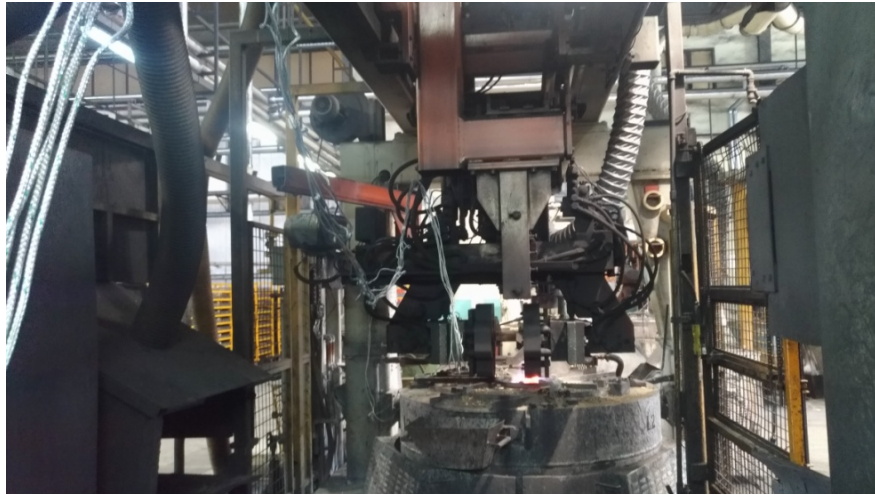
Şekil 3.16. 3D Modelde yapılan termokupl yerleşim noktalarının projede kullanılacak kaliba da uygulanması

Üretime hazır olan kalıba son olarak termokuplların montajı Şekil 3.17'deki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Termokuplların kalıba montajının yapılması

Çalışmanın deneysel üretim aşamasının son adımın ise kalıp tezgaha montajı yapılarak bir vardiya boyunca ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler kayıt cihazı ile kayıt altına alınmıştır.



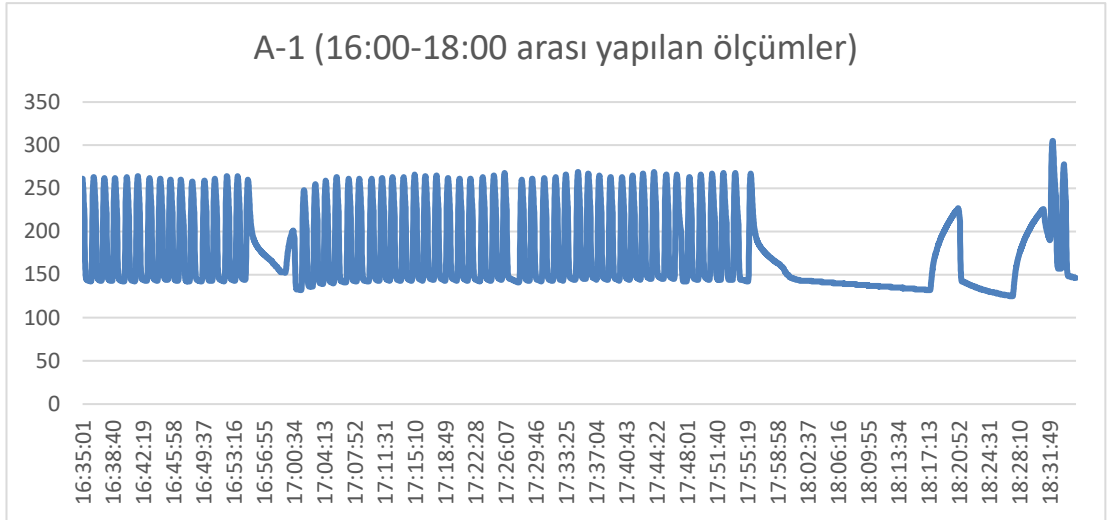
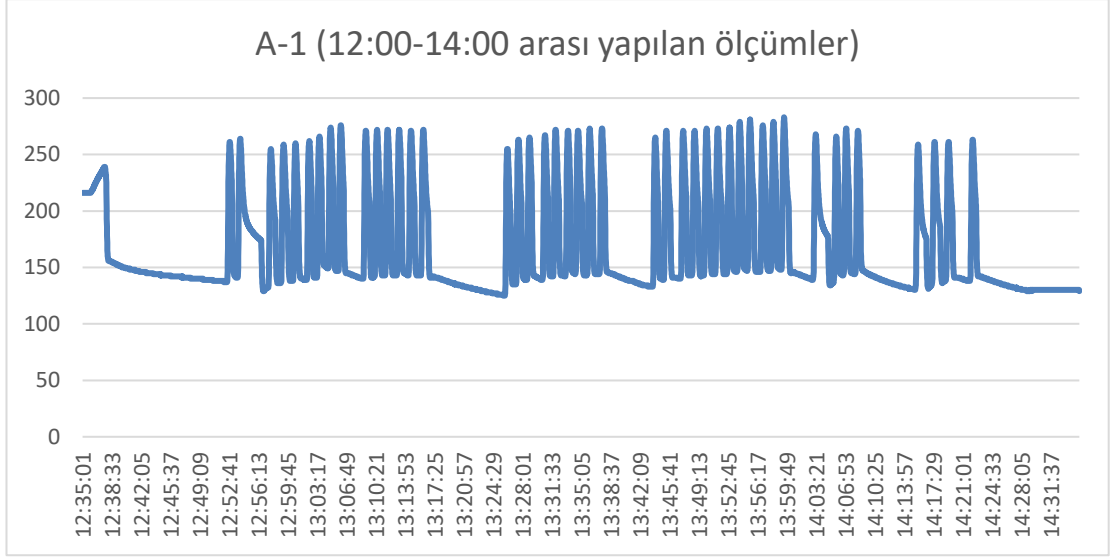
Şekil 3.18. Yapılan ikinci deneysel üretimden görüntü

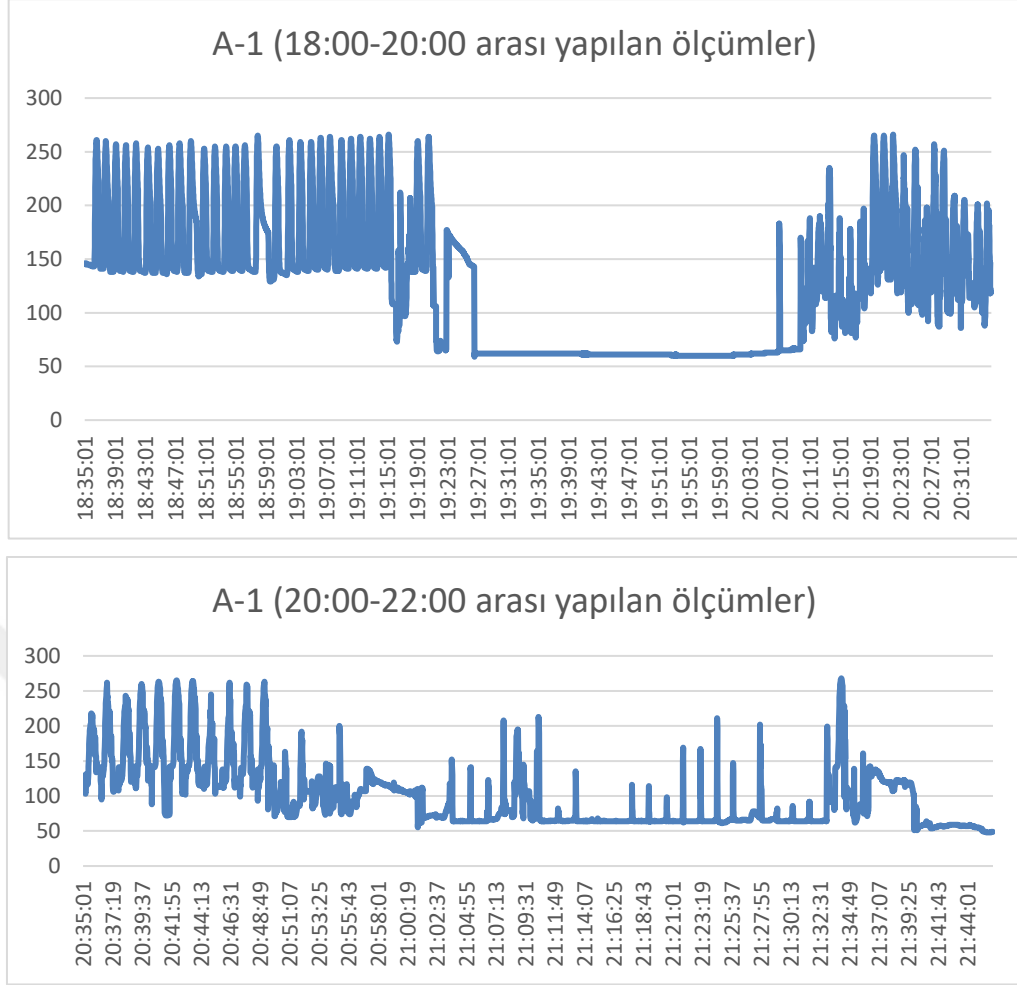


Şekil 3.19. Yapılan ikinci deneysel üretimdeki ölçüm değerleri

Proses anında sıcaklıkların belirlenmesinin amacı ise döküm işleminin gerçekleşmesi ve parçanın katılaşma sırasında ki sıcaklık değişimlerini belirlemektir. Bu değişimler neticesinde CuZn39Pb1Al-C alaşımının CuCoNiBe malzemeli kalıp arasındaki ısı transferini belirlemektir. Bu sayede Magma-Soft yazılımı ile yapılan simülasyonda sıcaklık dağılımlarını kontrol ederek oluşabilecek ısı kaynaklı hataları tasarım aşamasında belirlemek ve çözümlerini gerçekleştirmektir.

Yapılan deneysel üretim sonrasında Şekil 3.19'daki gibi kayıt altına alınan ölçümlerin grafiği Şekil 3.20'deki gibidir.





Şekil 3.20. Yapılan İkinci Deneysel Üretimden Alınan Ölçüm Sonuçları

3.2.2. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Deneysel üretim sonrasında kayıt altına alınan sıcaklık değerleri ile Ansys programının Fluent modülü kullanılarak ısı transfer katsayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ansys programının Fluent modülünde termal analiz yapılmasına karar verilmiştir.

Döküm prosesinde döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının nümerik olarak hesaplanması için termal analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler parametrik olarak, farklı döküm ve kalıp sıcaklıkları için yapılmıştır.

3.2.3. Simülasyonun Yapılması

Magma-Soft programının literatüründe döküm hammaddesi olarak kullandığımız CuZn39Pb1Al-C Alaşımın tanımlı olarak bulunmamasından dolayı girilen parametrelerin en önemlilerinden biri olan ısı transfer katsayısı sıcaklığa bağlı olarak girilememektedir. Bu nedenle programın simülasyon aşamasında sabit olarak girilen ısı transfer katsayısı simülasyonun sonuçlarını önemli derecede etkilemektedir.

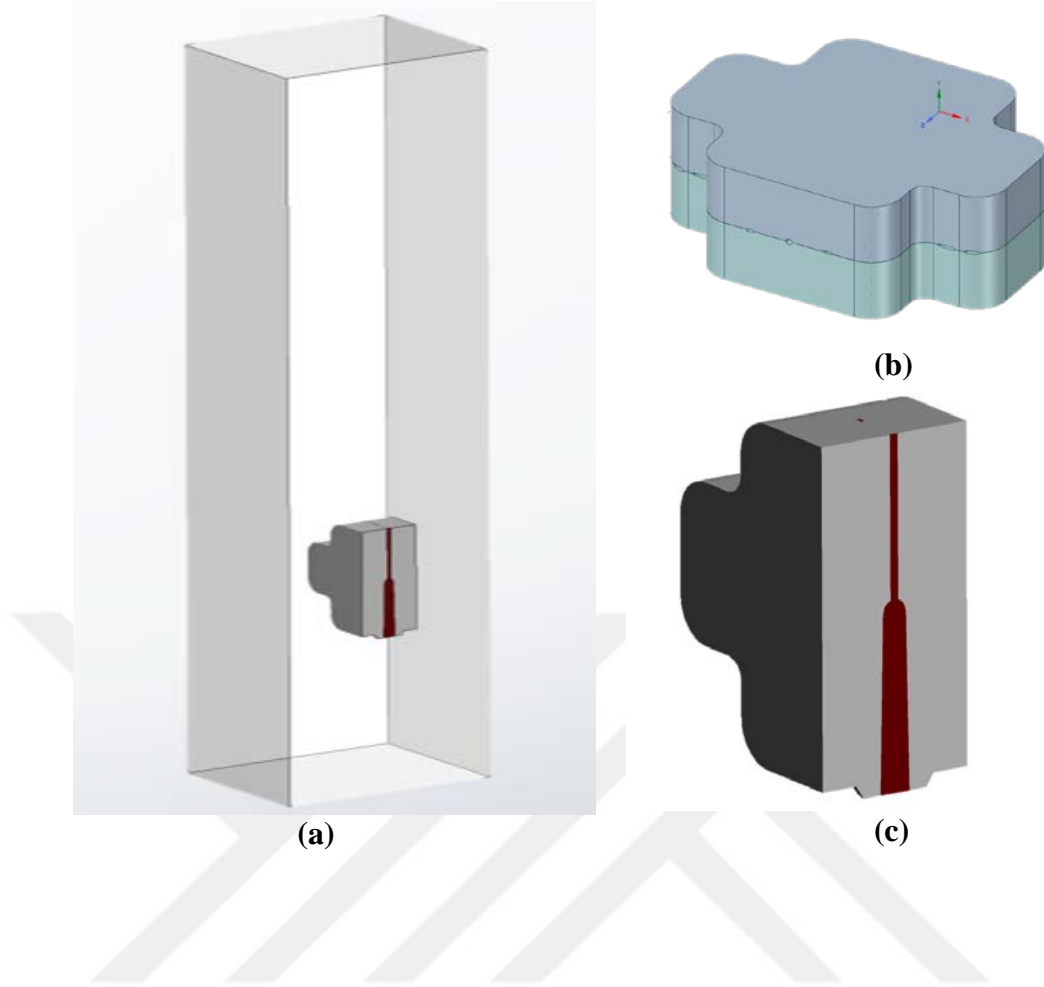
Isı transfer katsayısının Ansys programı ile belirlenmesinin ardından Magma-Soft programına sıcaklığa bağlı değişen ısı transfer katsayısının grafiği tanımlanarak simülasyon tekrardan çalıştırılacak ve yapılan deneysel üretim ile sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Döküm simülasyonu için firmamızda kullanılan Magma-Soft programı kullanılacaktır. Magma programı ile döküm prosesi tamamen simüle edilebilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

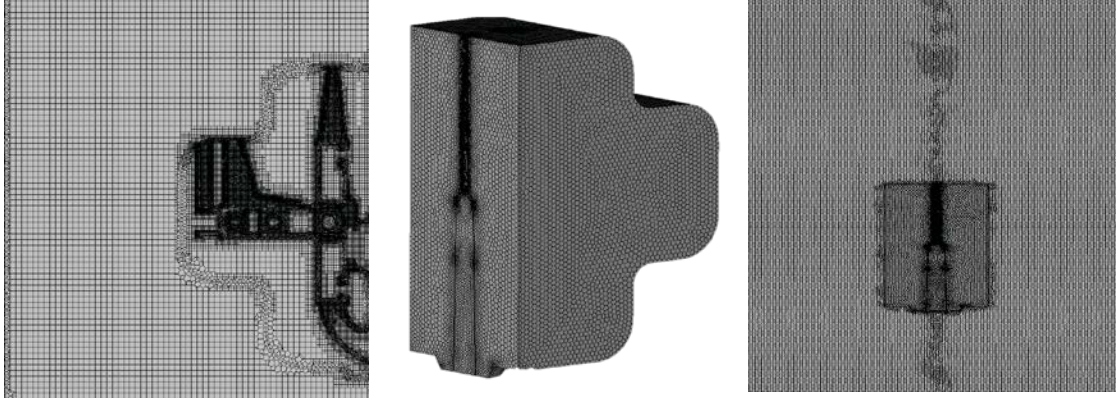
4.1. Termal Analiz ile Isı Transfer Katsayısının Hesaplanması

Deneysel üretim gerçekleştirilerek elde edilen sıcaklık verilerinden kalıp sıcaklığının proses anındaki değişimleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Bu veriler ışığında Ansys programının Fluent modülü kullanılarak termal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen termal analiz ile nümerik olarak döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Analizler parametrik olarak, farklı döküm ve kalıp sıcaklıkları için yapılmıştır. Kalıp ve parça için duvar sınır şartı tanımlanmış olup, belirtilen sıcaklık değerleri tanımlanmıştır. Döküm sıcaklığının 1010, 990, 970, 950, 930, 910, 890°C değerleri ile 140, 200, 260, 320, 380°C kalıp sıcaklıklarının oluşturduğu kombinasyon ile ara yüzey ısı transfer katsayısı nümerik olarak hesaplanmıştır. Yapılan parametrik analizde öncelikle Şekil 4.1 (b)’de gösterilen kalıp geometrisinden Şekil 4.1 (c)’de gösterilen akış hacmi çıkarılmıştır. Termal analizin doğal taşınım analizi olmasından dolayı akış hacmi Şekil 4.1 (a)’da ki gibi oda içerisinde modellenmiştir.



Şekil 4.1. Modellenen Geometri a) Kontrol Hacmi b) Kalıp Geometrisi c) Akış Hacmi

Modellenen Kalıp tasarımının iki gözlü olması ve gözler arası fark olmamasından dolayı simetrik model ile analiz gerçekleştirilmiştir. Bir oda içerisinde modellenen analiz geometrisine Fluent Meshing ortamında poly-hexcore “mosaic” mesh yöntemi kullanılarak Şekil 4.2.’te gösterildiği gibi sayısal ağ oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal ağın eleman sayısı 6054015’tir.



Şekil 4.2. Analiz geometrisinin mesh görüntüsü

Doğal taşınım modellenmesi için yerçekimi ivmesi aktif hale getirilmiştir ve analizlerde kararlı durum incelemesi yapılarak, Viskoz model laminar olarak seçilmiştir. Ayrıca diğer durumlarda Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Analiz setup adımları

Analiz	Gravitiy (m/s^2)	Viscous Model	Solver	Solution Method
Doğal Taşınım	-9,81(Z axis)	Laminar	Steady	Coupled

Doğal taşınım çözümü yapıldığından dolayı havanın yoğunluğu incompressible-ideal-gas olarak tanımlanmıştır. Analizin sınır şartlarına girilen hava, parça (CuZn39Pb1Al-C), kalıp (CuCoNiBe) malzemelerinin termal özellikleri Tablo 4.2’deki gibidir.

Tablo 4.2. Hava, parça ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri

	Hava	Parça	Kalıp
Density (kg/m ³)	İncompressible-ideal-gas	88	8800
Specific Heat (J/kg-K)	1006,43	381	420
Thermal Conductivity (W/m-K)	0,0242	387,6	230
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05	-	-

DeneySEL üretim ile elde edilen sıcaklık değerlerinde kritik olarak belirlenen sıcaklıklar Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Kritik Olarak Belirlenen Parça ve Kalıp Sıcaklıkları

Parça Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı
1010	140
990	200
970	260
950	320
930	380
910	
890	

Tablo 4.3'deki sıcaklık değerleri ile Şekil 4.12'te gösterilen birden fazla kombinasyonlu parametrik analiz tablosu oluşturulmuştur.

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - parca-sicaklik	P2 - kalip-sicaklik	P3 - htc-parca	<input type="checkbox"/> Retain	Retained Data	Note
2	Units	K	K	$W m^{-2} K^{-1}$			
3	DP 0 (Current)	1283	413	5001.6	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
4	DP 1	1263	413	4987.9	<input type="checkbox"/>		
5	DP 2	1243	413	4973.6	<input type="checkbox"/>		
6	DP 3	1223	413	4958.7	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
7	DP 4	1203	413	4943.2	<input type="checkbox"/>		
8	DP 5	1183	413	4926.9	<input type="checkbox"/>		
9	DP 6	1163	413	4909.9	<input type="checkbox"/>		
10	DP 7	1283	473	4656.7	<input type="checkbox"/>		
11	DP 8	1263	473	4635.8	<input type="checkbox"/>		
12	DP 9	1243	473	4614.1	<input type="checkbox"/>		
13	DP 10	1223	473	4591.4	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
14	DP 11	1203	473	4567.7	<input type="checkbox"/>		
15	DP 12	1183	473	4543	<input type="checkbox"/>		
16	DP 13	1163	473	4517.1	<input type="checkbox"/>		
17	DP 14	1283	533	4311.7	<input type="checkbox"/>		
18	DP 15	1263	533	4283.7	<input type="checkbox"/>		
19	DP 16	1243	533	4254.5	<input type="checkbox"/>		
20	DP 17	1223	533	4224.1	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
21	DP 18	1203	533	4192.3	<input type="checkbox"/>		
22	DP 19	1183	533	4159.1	<input type="checkbox"/>		
23	DP 20	1163	533	4124.3	<input type="checkbox"/>		
24	DP 21	1283	593	3966.8	<input type="checkbox"/>		
25	DP 22	1263	593	3931.6	<input type="checkbox"/>		
26	DP 23	1243	593	3895	<input type="checkbox"/>		
27	DP 24	1223	593	3856.8	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
28	DP 25	1203	593	3816.9	<input type="checkbox"/>		
29	DP 26	1183	593	3775.2	<input type="checkbox"/>		
30	DP 27	1163	593	3731.5	<input type="checkbox"/>		
31	DP 28	1283	653	3621.9	<input type="checkbox"/>		
32	DP 29	1263	653	3579.6	<input type="checkbox"/>		
33	DP 30	1243	653	3535.5	<input type="checkbox"/>		
34	DP 31	1223	653	3489.5	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
35	DP 32	1203	653	3441.4	<input type="checkbox"/>		
36	DP 33	1183	653	3391.2	<input type="checkbox"/>		
37	DP 34	1163	653	3338.7	<input type="checkbox"/>		
*					<input type="checkbox"/>		

Şekil 4.3. Parametrik termal analiz kombinasyonları

Şekil 4.3'teki analiz sonucunda belirli parça yüzey sıcaklığı ile kalıp yüzey sıcaklığı arasında oluşan ısı transfer katsayı değerleri Tablo 4.4'de görüldüğü şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Hesaplanan ısı transfer katsayı değerleri

413 (K) Kalıp Sıcaklığı		473 (K) Kalıp Sıcaklığı		533 (K) Kalıp Sıcaklığı		593 (K) Kalıp Sıcaklığı		653 (K) Kalıp Sıcaklığı	
Parça Sıcaklık (K)	HTC (W/m ² K)	Parça Sıcaklık (K)	HTC (W/m ² K)	Parça Sıcaklık (K)	HTC (W/m ² K)	Parça Sıcaklık (K)	HTC (W/m ² K)	Parça Sıcaklık (K)	HTC (W/m ² K)
1283	5001,6	1283	4656,7	1283	4311,7	1283	3966,8	1283	3621,9
1263	4987,9	1263	4635,8	1263	4283,7	1263	3931,6	1263	3579,6
1243	4973,6	1243	4614,1	1243	4254,5	1243	3895	1243	3535,5
1223	4958,7	1223	4591,4	1223	4224,1	1223	3856,8	1223	3489,5
1203	4943,2	1203	4567,7	1203	4192,3	1203	3816,9	1203	3441,4
1183	4926,9	1183	4543	1183	4159,1	1183	3775,2	1183	3391,2
1163	4909,9	1163	4517,1	1163	4124,3	1163	3731,5	1163	3338,7

4.2. Belirlenen Isı Transfer Katsayısı ile Simülasyon Optimizasyonu

Parametrik termal analiz sonucunda ortaya çıkan Tablo 4.4’de ki ısı transfer katsayıları ile Magma programında sıcaklık eğrilerinin yakınsaması için simülasyon çalışmalarına başlanmıştır.

Yapılan Simülasyon çalışmalarında katılma eğrileri yakınsatılmaya çalışılmıştır. Bu yüzden kontrol edilen ve incelenen eğriler katılma eğrileridir. Bunun nedeni ise parça da oluşan hataların neredeyse hepsi katılma sırasında gerçekleşmesinden dolayı, çalışmamızda ki incelemelerin hepsi katılma eğrilerinin yakınsatılması üzerinedir.

Tablo 4.4’te elde edilen ısı transfer katsayıları ile 15 adet simülasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve 15. Simülasyonda eğriler arasında ki yakınsama 1°C’ye kadar inmiştir. Yakınsama arasında ki fark çok az olduğundan dolayı simülasyon çalışması burada sonlandırılmıştır.

Yapılan çalışmalar genel hatlarıyla incelendiğinde ise Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 ortaya çıkmaktadır. Tablo 4.5’te yapılan simülasyonlarda Magma programına girilen parça-kalıp, kalıp-kalıp, parça-maça ve kalıp-maça arası ısı transfer katsayıları girilmiştir. Bu değerlerde bütün proses boyunca sabit kalan ısı transfer katsayısı ile sıcaklığa bağlı olarak değişen ısı transfer katsayı tipleri kullanılmıştır. Tablo 4.6’te ise simülasyonlarda ki parça-kalıp arası girilen ısı transfer katsayıları bulunmaktadır.

Tablo 4.5. Yapılan simülasyon çalışmalarına girilen ısı transfer katsayı değerleri

	<u>Sabit Tutulan HTC</u> <u>(W/m²-K)</u>	<u>Değişen HTC</u> <u>(W/m²-K)</u>		<u>Sabit Tutulan HTC</u> <u>(W/m²-K)</u>	<u>Değişen HTC</u> <u>(W/m²-K)</u>		<u>Sabit Tutulan HTC</u> <u>(W/m²-K)</u>	<u>Değişen HTC</u> <u>(W/m²-K)</u>	
1. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	6. ANALİZ	Parça-Kalıp (3500-4000 W/m ² -K)		11. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	
	Kalıp-Kalıp (2500 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (300 W/m ² -K)		
	Kalıp-Maça (800 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (800 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)		
	Parça-Maça (800 W/m ² -K)			Parça-Maça (800 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)		
2. ANALİZ	Parça-Kalıp (4200 W/m ² -K)		7. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	12. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	
	Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (300 W/m ² -K)		
	Kalıp-Maça (800 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)		
	Parça-Maça (800 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)		
3. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	8. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	13. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	
	Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)				Kalıp-Kalıp (0-300 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (300 W/m ² -K)	
	Kalıp-Maça (800 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)		
	Parça-Maça (800 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)		
4. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	9. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	14. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	
	Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (300 W/m ² -K)		
	Kalıp-Maça (800 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)		
	Parça-Maça (800 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)		
5. ANALİZ	Parça-Kalıp (4160-4220 W/m ² -K)		10. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	15. ANALİZ		Parça-Kalıp (Sıcaklığa bağlı değişken)	
	Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (0 W/m ² -K)			Kalıp-Kalıp (300 W/m ² -K)		
	Kalıp-Maça (800 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)			Kalıp-Maça (200 W/m ² -K)		
	Parça-Maça (800 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)			Parça-Maça (400 W/m ² -K)		

Tablo 4.6. Yapılan simülasyonlarda ki parça-kalıp arası girilen ısı transfer katsayıları

Parça Sıcaklığı (°C)	HTC (W/m ² -K)															
	-	1. Analiz	2. Analiz	3. Analiz	4. Analiz	5. Analiz	6. Analiz	7. Analiz	8. Analiz	9. Analiz	10. Analiz	11. Analiz	12. Analiz	13. Analiz	14. Analiz	15. Analiz
1010	5000	5000		4950	4950			4700	4600	4700-4800-4900-5000	4700	4500	4700	4800	4800	4800
1000	-	-		-	-			4600	4500	4500	4600	4400	4600	4500	4600	4600
990	-	-		-	-			4500	4400	4400	4500	4300	4500	4400	4500	4500
980	-	-		-	-			4400	4300	4300	4400	4200	4400	4300	4400	4400
970	-	-		-	-			4300	4200	4200	4300	4100	4300	4200	4300	4300
960	-	-		-	-			4200	4100	4100	4200	4000	4200	3500	4000	3900
950	-	-		-	-			4100	4000	4000	4100	3900	4100	3400	3400	3300
940	-	-		-	-			4000	3900	3900	4000	3800	4000	3300	3200	3000
930	-	-		-	-			3900	3800	3800	3900	3700	3900	3200	3000	2900
920	-	-		-	-			3800	3700	3700	3800	3550	3800	3000-3100	2900	2800
910	3903	3800-4000		4220	4000-4400			3700	3600	3600	3700	3400	3700	2900	2700-2800	2500-2600
900	-	-		-	-			3500	3500	3500	3550	3000	3500	2800	2700	2400
890	2815	2500-3000		3485	3900-4000			3400	3400	3400	3400	2000	3400	2700	2600	2300
880	-	-		-	-			400	3300	3300	1000-1500	1000-1500	2700-3000	2500	2600	2300
870	-	-		-	-			0	3200	3200	1000	1000	2500	2300	2500	2200
860	-	-		-	-			-	3100	3100	500	1000	2300	2000	2300	2100
850	-	-		-	-			-	3000	3000	500	500	2000	1700	2000	2000
840	-	-		-	-			-	2900	2900	100	-	1700	1500	1700	1700
830	-	-		-	-			-	2800	2800	100	-	1500	1000	1500	1500
820	-	-	4200	-	-	4160-4180-4200-4220		-	2700	2700	100	-	1000	500	1000	1000
810	-	-		-	-			-	2600	2600	100	-	500	100	500	500
800	-	-		-	-			-	2500	2500	100	100	100	0	100	100
790	-	-		-	-			-	2400	2400	100	0	0	0	0	0
780	-	-		-	-			-	2300	2300	100	-	-	-	-	-
770	-	-		-	-			-	2200	2200	100	-	-	-	-	-
760	-	-		-	-			-	2100	2100	100	-	-	-	-	-
750	-	-		-	-			-	2000	2000	100	-	-	-	-	-
740	-	-		-	-			-	1900	1900	100	-	-	-	-	-
730	-	-		-	-			-	1800	1800	100	-	-	-	-	-
720	-	-		-	-			-	1700	1700	100	-	-	-	-	-
710	-	-		-	-			-	1600	1600	100	-	-	-	-	-
700	-	-		-	-			-	1500	1500	100	-	-	-	-	-
690	-	-		-	-			-	1400	1400	100	-	-	-	-	-
680	-	-		-	-			-	1300	1300	100	-	-	-	-	-
670	-	-		-	-			-	1200	1200	100	-	-	-	-	-
660	-	-		-	-			-	1100	1100	100	-	-	-	-	-
650	-	-		-	-			-	1000	1000	100	-	-	-	-	-
625	-	-		-	-			-	500	500	100	-	-	-	-	-
600	-	-		-	-			-	100	100	100	-	-	-	-	-

Tablo 4.5'deki 1. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'deki 1. Analiz sütunundaki değerlerdir. Simülasyon optimizasyon şeklinde kurulmuştur.

Kritik olarak belirlenen sıcaklıklardan biri olan 910°C'de ısı transfer katsayısı 3800 W/m²K olarak başlayacak ve 50 W/m²K artarak 4000 W/m²K değerine kadar simülasyona devam edilecektir. Aynı şekilde diğer bir kritik sıcaklık olan 890°C de ise ısı transfer katsayısı 2500 W/m²K olarak başlayacak ve 50 W/m²K artarak 3000 W/m²K değerine kadar simülasyona devam edecektir. Bu şekilde kurgulanan optimizasyon sonucunda 55 adet simülasyon versiyonu Şekil 4.4'te ki gibi oluşmuştur.

Design ID	Cast Alloy / Permanent Mold - Temperature Dependent HTC Variation, Y1 (W/m ² K)	Cast Alloy / Permanent Mold - Temperature Dependent HTC Variation, Y2 (W/m ² K)
1	2500.0	3800.0
2	2550.0	3800.0
3	2600.0	3800.0
4	2650.0	3800.0
5	2700.0	3800.0
6	2750.0	3800.0
7	2800.0	3800.0
8	2850.0	3800.0
9	2900.0	3800.0
10	2950.0	3800.0
11	3000.0	3800.0
12	2500.0	3850.0
13	2550.0	3850.0
14	2600.0	3850.0
15	2650.0	3850.0
16	2700.0	3850.0
17	2750.0	3850.0
18	2800.0	3850.0
19	2850.0	3850.0
20	2900.0	3850.0
21	2950.0	3850.0
22	3000.0	3850.0
23	2500.0	3900.0
24	2550.0	3900.0
25	2600.0	3900.0
26	2650.0	3900.0
27	2700.0	3900.0
28	2750.0	3900.0
29	2800.0	3900.0

Number of designs: 55 Unfeasible: 0

Şekil 4.4. Optimizasyon sonucu oluşan simülasyon versiyonları

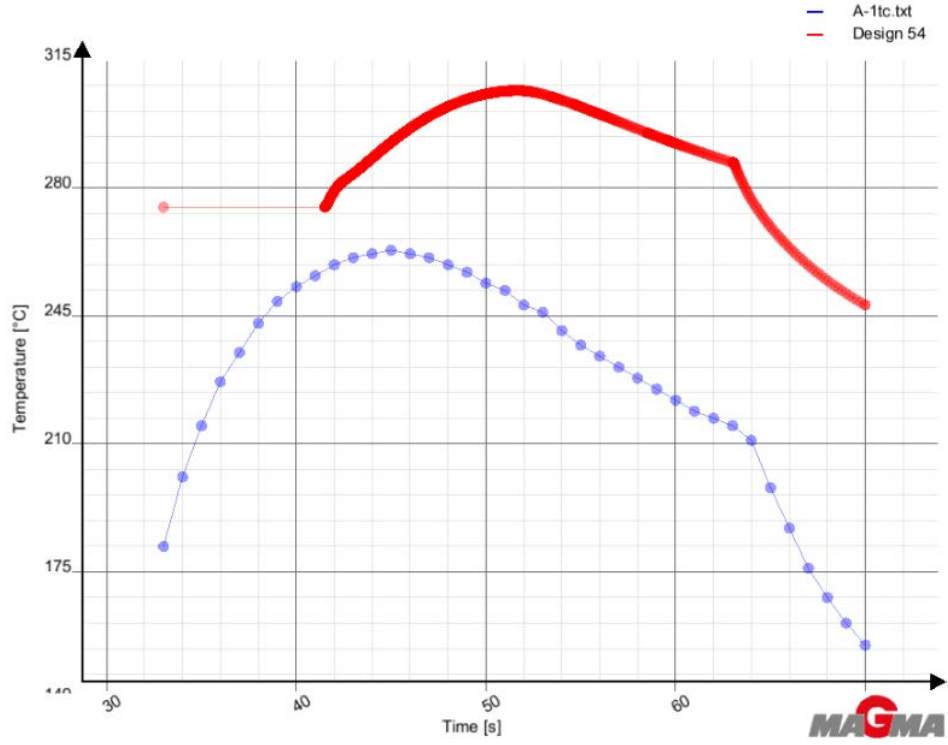
Oluşan 55 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Rank	Design	Objective1 (-)	Objective2 (-)
Rank 1	Design 54	18.33	1690.62
Rank 2	Design 55	18.08	1719.35
Rank 3	Design 53	18.56	1673.01
Rank 4	Design 33	18.24	1709.08
Rank 5	Design 11	18.34	1699.82
Rank 6	Design 52	18.74	1661.99
Rank 7	Design 41	18.74	1662.01
Rank 8	Design 39	19.25	1612.61
Rank 9	Design 42	18.59	1679.03
Rank 10	Design 21	18.52	1686.62
Rank 11	Design 22	18.35	1703.76
Rank 12	Design 40	19.02	1638.15
Rank 13	Design 32	18.44	1695.85
Rank 14	Design 29	19.06	1635.64
Rank 15	Design 9	18.8	1663.1
Rank 16	Design 28	19.31	1613.83
Rank 17	Design 18	19.2	1625.09
Rank 18	Design 51	18.96	1649.15
Rank 19	Design 20	18.77	1667.73
Rank 20	Design 6	19.44	1602.55
Rank 21	Design 30	18.89	1657.3
Rank 22	Design 38	19.52	1595.72
Rank 23	Design 50	19.22	1627.17
Rank 24	Design 19	19.01	1649.12
Rank 25	Design 7	19.24	1626.52
Rank 26	Design 27	19.56	1595.35
Rank 27	Design 31	18.78	1672.48
Rank 28	Design 16	19.61	1590.83
Rank 29	Design 48	19.73	1579.77
Rank 30	Design 8	19.05	1647.37
Rank 31	Design 4	19.92	1562.09
Rank 32	Design 17	19.41	1612.6
Rank 33	Design 25	20.1	1546.81
Rank 34	Design 37	19.79	1578.0
Rank 35	Design 5	19.69	1588.4
Rank 36	Design 15	19.88	1571.27
Rank 37	Design 35	20.31	1530.13
Rank 38	Design 26	19.86	1574.49
Rank 39	Design 36	20.07	1555.24
Rank 40	Design 2	20.44	1520.6
Rank 41	Design 14	20.12	1551.87
Rank 42	Design 12	20.68	1500.17
Rank 43	Design 10	18.62	1704.39
Rank 44	Design 3	20.21	1548.05
Rank 45	Design 13	20.44	1526.67

Generated: 55 Calculated: 55 Duplicate: 0

Şekil 4.5. Simülasyon sonucu uygun çıkan versiyonlar

Şekil 4.5'e göre en uygun olarak belirlenen versiyonların grafikleri incelendiğinde ise kullandığımız ısı transfer katsayıları neticesinde deneysel üretim sıcaklık eğrisi ile simülasyon sıcaklık eğrisi arasında yaklaşık 50°C'lik fark, Şekil 4.6'te görülmektedir.

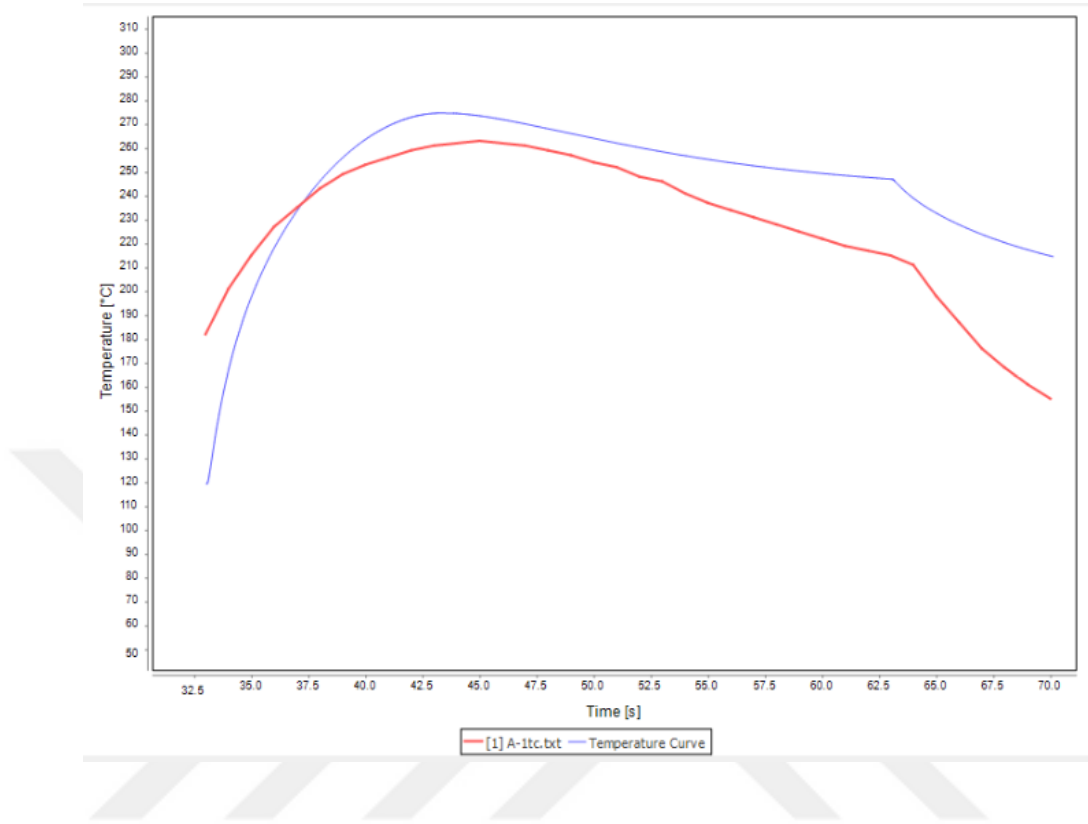


Şekil 4.6. Sonucu uygun olan versiyonda deneysel üretim sıcaklık eğrisi (mavi) ile simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi (kırmızı)

Tablo 4.5'deki 2. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 2. Analiz sütunundaki değerlerdir. Simülasyona optimizasyon kurgusu kurulmamıştır. Bu çalışmada Tablo 4.6'nın 2. Analiz sütununda tek bir ısı transfer katsayısı bulunmaktadır. Bu değer simülasyona bütün sıcaklıklar için sabit bir ısı transfer katsayısı olarak $4200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinin girildiğini göstermektedir. Bütün proses boyunca $4200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri ile analiz hesaplamaları gerçekleşecektir. Aynı zamanda kalıp-kalıp arası ısı transferi ise iki kalıbında aynı malzeme olmasından dolayı herhangi bir ısı taşınımı olmayacağı düşünülerek $0 \text{ W/m}^2\text{K}$ yani Merge Material olarak girilmiştir.

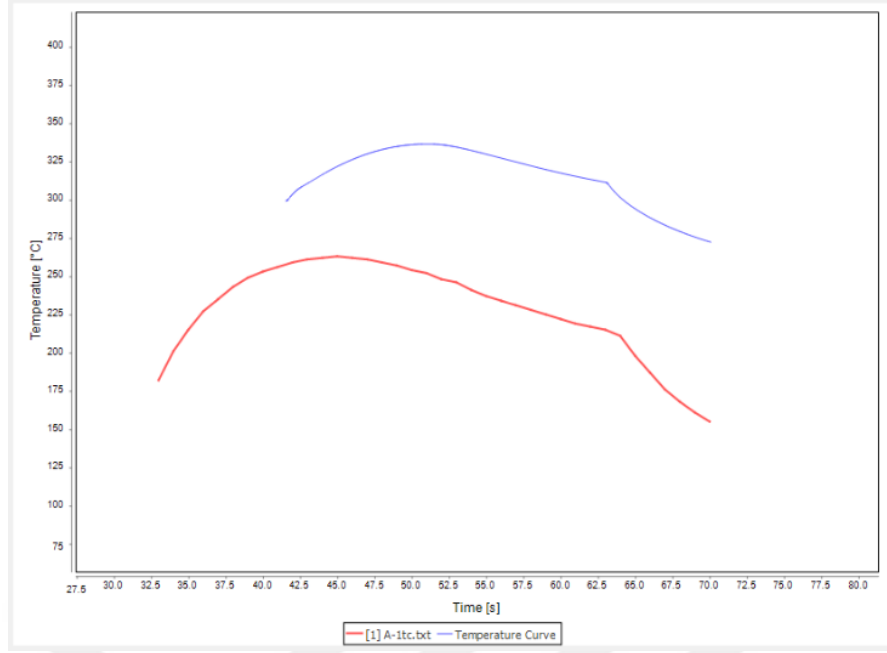
Şekil 4.7'da görüldüğü üzere eğriler 10°C 'ye kadar yakınsamaktadır. Fakat yapılan simülasyon da girilen $4200 \text{ W/m}^2\text{K}$ ısı transfer katsayısı Tablo 4.4'de ki parametrik analiz sonuç değerlerinin ortalaması olarak girilmiştir. Bunun nedeni sıcaklık eğrilerini ne kadar yakınsatabileceğini görmek istenilmiştir. Yakınsamasının

gerçekleşmesi ile constant olarak çalıştırılan simülasyonun sıcaklığa bağlı değişen ısı transfer katsayı versiyonu için çalışma yapılmıştır.



Şekil 4.7. Simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi (mavi) ile deneysel üretim sıcaklık eğrisi (kırmızı)

Tablo 4.5'deki 3. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.4'deki 3. Analiz sütunundaki değerlerdir. Şekil 4.7'da yapılan çalışma sonucunda oluşan eğrilerin yakınsaması nedeniyle parça-kalıp arası ısı transfer tipini sıcaklığa bağlı değişken olarak değiştirilerek yeni bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde oluşan yakınsamalar Şekil 4.8'de incelenmiştir. Şekil 4.8'e göre eğrilerde ki yakınsamanın tekrardan artması ile sonuçlanmıştır. Eğriler arasındaki fark yaklaşık 70°C olmuştur.



Şekil 4.8. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi)

Tablo 4.5’deki 4. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6’deki 4. Analiz sütunundaki değerlerdir.

Şekil 4.8’de eğriler arasındaki yakınsamanın tekrardan azalması ve aradaki farkın artması ile yeni bir optimizasyon kurgusu kurularak en uygun ısı transfer katsayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Optimizasyon kurgusunda kritik olarak belirlenen sıcaklıklardan biri olan 910°C’de ısı transfer katsayısı 4000 W/m²K olarak başlayacak ve 100 W/m²K artarak 4400 W/m²K değerine kadar simülasyona devam edilecektir. Aynı şekilde diğer bir kritik sıcaklık olan 890°C de ise ısı transfer katsayısı 3900 W/m²K olarak başlayacak ve 100 W/m²K artarak 4000 W/m²K değerine kadar simülasyona devam edecektir. Bu şekilde kurgulanan optimizasyon sonucunda 10 adet simülasyon versiyonu Şekil 4.9’te ki gibi oluşmuştur.

Design ID	Cast Alloy / Permanent Mold - Temperature Dependent HTC Parametric Function, Interval 1, Y1 (W/m ² K)	Cast Alloy / Permanent Mold - Temperature Dependent HTC Parametric Function, Interval 1, Y2 (W/m ² K)
1	3900.0	4000.0
2	4000.0	4000.0
3	3900.0	4100.0
4	4000.0	4100.0
5	3900.0	4200.0
6	4000.0	4200.0
7	3900.0	4300.0
8	4000.0	4300.0
9	3900.0	4400.0
10	4000.0	4400.0

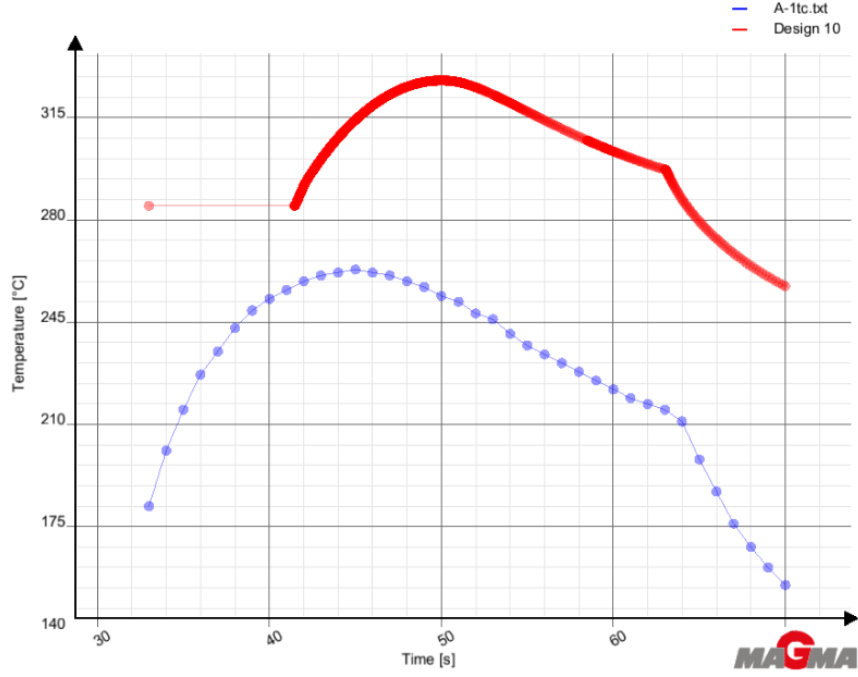
Şekil 4.9. Optimizasyon kurgusu sonucu ortaya çıkan simülasyon versiyonları

Oluşan 10 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.10'te gösterilmiştir.

Rank	Design	Objective1 (-)	Objective2 (-)
Rank 1	Design 7	14.52	2077.51
Rank 2	Design 3	15.01	2079.1
Rank 3	Design 5	14.97	2087.36
Rank 4	Design 10	14.39	2122.39
Rank 5	Design 1	15.65	2089.87
Rank 6	Design 6	15.24	2131.88
Rank 7	Design 4	15.56	2131.51
Rank 8	Design 2	15.75	2131.84
Rank 9	Design 8	15.43	2154.34
Rank 10	Design 9	16.28	2155.57

Şekil 4.10. Simülasyon sonucu en uygun çıkan versiyonlar

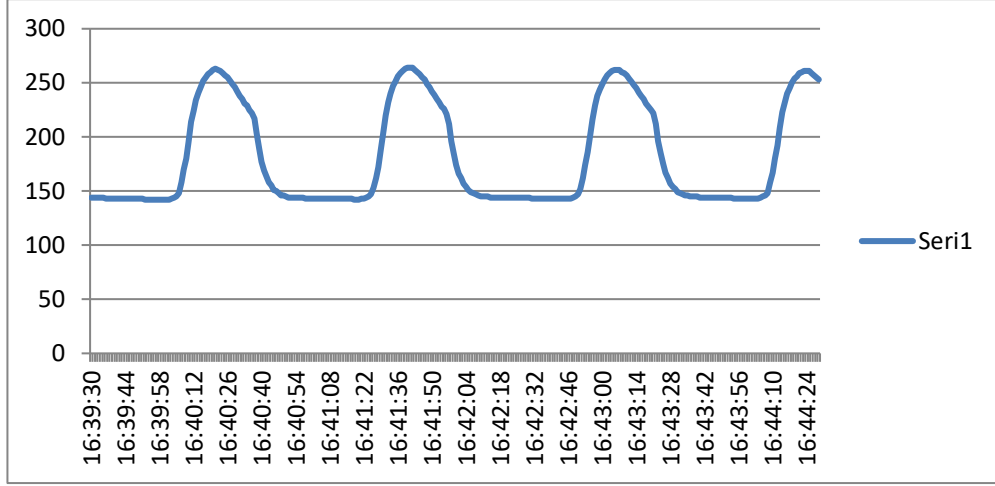
Şekil 4.10'a göre en uygun olarak belirlenen versiyonların grafikleri incelendiğinde ise kullandığımız ısı transfer katsayıları neticesinde deneysel üretim sıcaklık eğrisi ile simülasyon sıcaklık eğrisi arasında yaklaşık 50°C'lik fark, Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Simülasyon sonuç grafikleri (kirmizi renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Eğriler arasındaki fark devam etmektedir. Fakat eğrilerin şekilleri birbirine benzemesine rağmen proses zamanı anlamında yaklaşık 10 sn kadar zaman farkı olmaktadır. Bunun nedeninin de deneysel ölçüm ile elde edilen sıcaklık değerlerinin tam olarak bir üretim döngü zamanına göre doğru bir şekilde kesilememesinden dolayı olduğu anlaşılmıştır.

Simülasyon ile Magma 'ya yüklenen deneysel üretim sıcaklık eğrilerinin bir parçayı ürettiği zaman döngüsünü eşleştirmek için yeniden ölçüm alınan değerlerde seçimler yapılarak Şekil 4.12 grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.12 Magma'ya yüklenmiştir. Yapılacak çalışmalara bundan sonra Şekil 4.12 verilerine göre devam edilmiştir.



Şekil 4.12. Deneysel ölçüm verilerinin tekrardan bir üretim döngüsüne göre düzenlenmesi

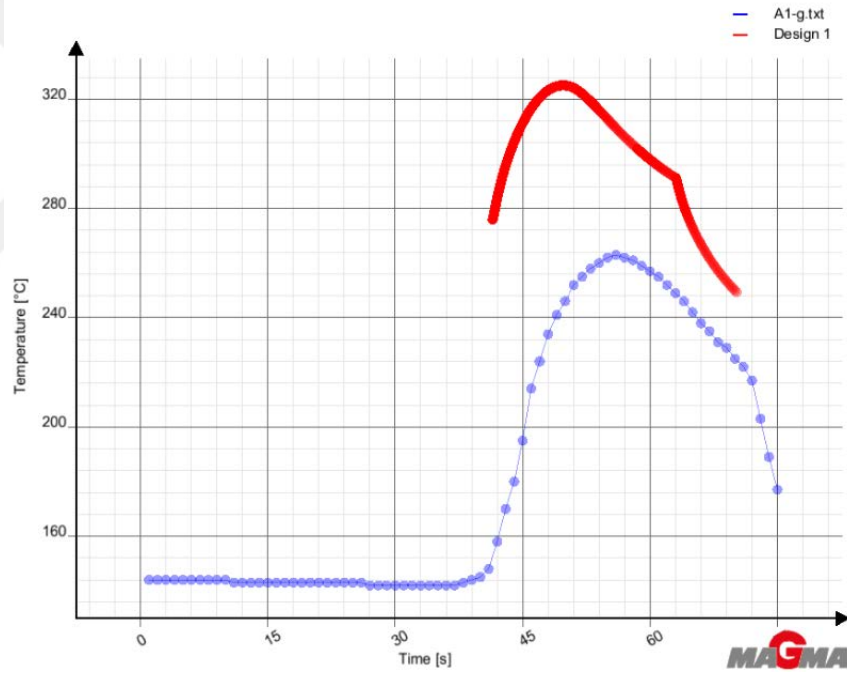
Tablo 4.5’deki 5. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6’deki 5. Analiz sütunundaki değerlerdir. Simülasyona optimizasyon kurgusu sabit ısı transfer katsayı değerleri arasında kurulmuştur. Bunun nedeni ise Tablo 4.6’te ki 2. Analiz sütununda kullanılan sabit $4200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri ile eğrilerde gerçekleşen yakınsamanın daha fazla artması için $4200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinden küçük mü yoksa büyük mü olacağı incelenmiştir. Bu nedenle çalışmada simülasyona bütün sıcaklıklar için sabit bir ısı transfer katsayısı olarak $4160\text{-}4180\text{-}4200\text{-}4220 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri girilmiştir. Girilen değerler ile optimizasyonda 4 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur.

Oluşan 4 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

Rank	Design	gradient (-)	integral (-)
Rank 1	Design 1	18.26	1785.3
Rank 2	Design 2	18.23	1791.29
Rank 3	Design 3	18.38	1800.05
Rank 4	Design 4	18.38	1801.76

Şekil 4.13. Simülasyon Sonucuna En Uygun Versiyonlar

Şekil 4.14’de görüldüğü üzere eğriler arasında yaklaşık 60°C kadar fark oluşmuştur. Eğrilerin şekilleri birbirine benzemekte ve zaman döngüsü tam olarak oturmaktadır.



Şekil 4.14. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renki eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Tablo 4.5’deki 6. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6’deki 6. Analiz sütunundaki değerlerdir.

Simülasyona optimizasyon kurgusu tekrardan sabit ısı transfer katsayı değerleri arasında kurulmuştur. Bunun nedeni ise zaman döngüsünün eşleşmesinden ve eğriler arasında halen fark olmasından dolayı ısı transfer katsayısının 4000 W/m²K değerinin altında olacağı öngörülmüştür. Öngörüye dayalı yeni bir çalışma yapılarak incelenmiştir. Bu nedenle çalışmada simülasyona bütün sıcaklıklar için sabit bir ısı transfer katsayısı olarak 3500-3600-3700-3800-3900-4000 W/m²K değerleri girilmiştir. Girilen değerler ile optimizasyonda 6 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur.

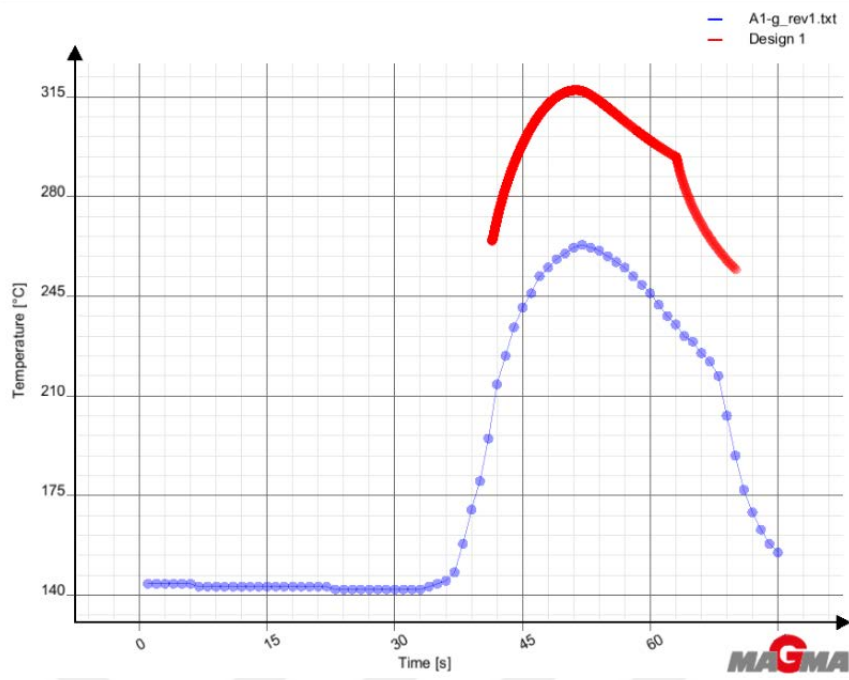
Oluşan 6 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Rank	Design	Objective1 (-)	Objective2 (-)
Rank 1	Design 1	4.61	1548.62
Rank 2	Design 2	5.17	1582.07
Rank 3	Design 3	5.66	1620.63
Rank 4	Design 4	6.03	1669.68
Rank 5	Design 5	6.62	1706.44
Rank 6	Design 6	6.98	1742.33

Şekil 4.15. Simülasyon sonuçlarındaki en uygun versiyon

Şekil 4.16'te görüldüğü üzere eğriler arasındaki fark 10°C daha düşerek 50°C olmuştur. Bu çalışma ile ısı transfer katsayısının 3000 W/m²K ila 4000 W/m²K değeri arasında çıkacağı ön görülmüştür. Bu öngörüyle de denem çalışmalarına devam edilmiştir.



Şekil 4.16. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renki eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Isı transfer katsayısının aralığı belirlenmiş olsada net bir ısı transfer katsayısı belirlenememiştir. Bu çalışmalardan hariç olarak simülasyonu kurarken girilen sınır şartlarında da değerler değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Örnek olarak;

- Likidus değeri değiştirilerek çalışma yapılmıştır,
- Solidus değeri değiştirilerek çalışma yapılmıştır,
- Kalıp – kalıp arasındaki ısı transfer değeri değiştirilerek çalışma yapılmıştır,
- Mesh boyutları değiştirilerek çalışma yapılmıştır.

Ayrıca çalışmanın her aşamasında literatür araştırmaları devam etmiştir. İncelenen literatür araştırmaları neticesinde aşağıdaki kanılara varılmıştır;

- Parça katılaşmaya başladıktan sonra parçanın en dış yüzeyinde oluşan kabuk nedeniyle ısı transfer katsayısı düşmektedir. Parça soğuyup tamamen katılaşana kadarda bu düşüş devam etmektedir. Bu sebeple her sıcaklıkta farklı ısı transfer katsayısı oluşuyor fikri ortaya çıkmıştır.

- Alt kalıp ile üst kalıp arasında, kalıp malzemelerinin aynı olmasından dolayı ısı transfer katsayısı girilmeyerek Merge Material girilmekteydi. Fakat prosesimizde olan parça kalıptan çıktıktan sonra kalıbın grafitli suya girerek soğuması nedeniyle, kalıp – kalıp arası ısı transferi $300 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak girilmiştir.
- Literatür araştırmalarının arasındaki bir çalışmada kum maça ile bakır kalıp arasında ısı transfer katsayısının $200-450 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak girilmesi, bizim de çalışmalarımıza bu değerler ile devam etmemiz gerektiği fikrini ortaya çıkarmıştır.

Yukarıda bahsedilen nedenlerle birlikte her sıcaklığa karşılık olarak farklı bir ısı transfer katsayısı girilerek çalışmalara devam edilmiştir.

Tablo 4.5'deki 7. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 7. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 7.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu kalıp-kalıp arası ısı transfer katsayısı yönünden kurulmuştur. Burada kalıp-kalıp arası ısı transfer katsayısı kurgusunda ise ilk olarak iki kalıbında aynı malzeme olmasından dolayı herhangi bir ısı taşınımı olmayacağı düşünülerek $0 \text{ W/m}^2\text{K}$ yani Merge Material olarak girilmiştir. Diğer bir düşünce ise alınan karar maddelerinde de bahsedildiği üzere prosesimizin gerçekleşme şeklinde parça kalıptan çıktıktan sonra kalıbın grafitli suya girerek soğuması nedeniyle, kalıp – kalıp arası ısı transferi $300 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak girilmiştir. Bu optimizasyon kurgusu ile 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur.

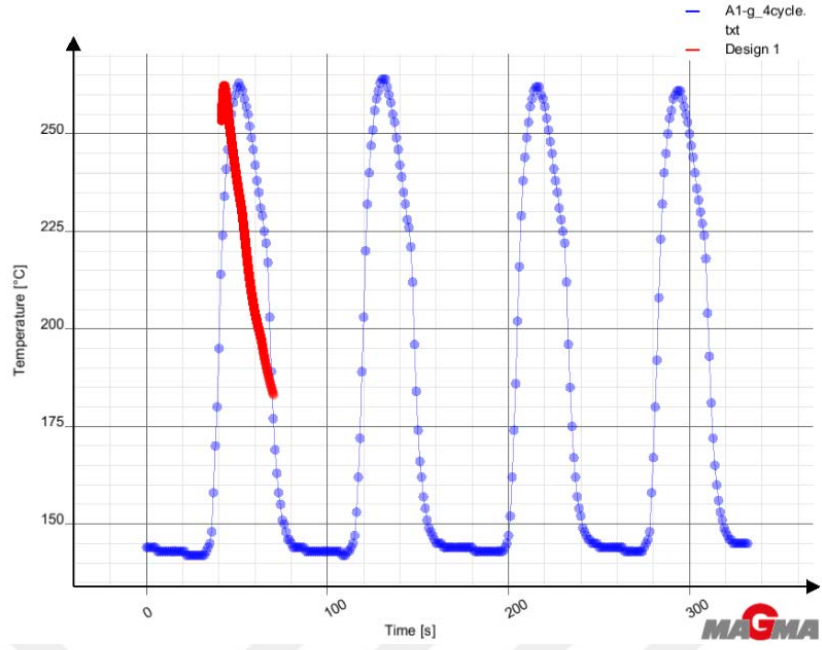
Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Rank	Design	Objective1 (-)	Objective2 (-)
Rank 1	Design 2	24.57	632.41
Rank 2	Design 1	24.72	765.04

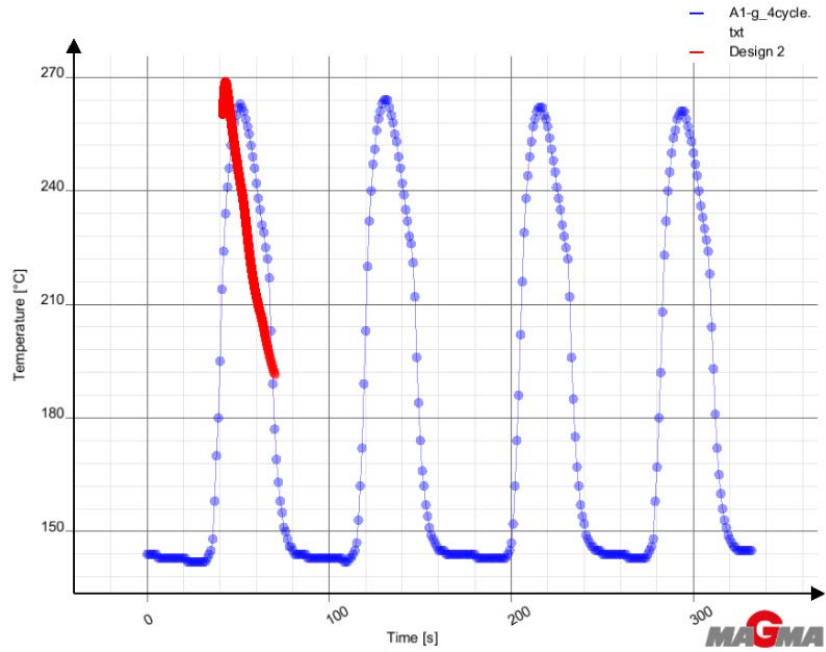
Şekil 4.17. Simülasyon sonuçlarında ki en uygun versiyon

Ayrıca simülasyon kurgusunda değiştirilen diğer parametreler ise Tablo 4.5'deki 7. Analiz çalışmasında görülen parça-maça ve kalıp-maça arası ısı transfer katsayı değerleridir. Parça- maça arası ısı transfer katsayısı olarak $400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve kalıp-maça arası ısı transfer katsayısı olarak da $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri girilmiştir. Bu değerler yapılan literatür araştırmasından referans alınarak girilen değerlerdir.

Simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisini varyasyonlu ısı transfer katsayısı tanımlayarak Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de görüldüğü üzere düşürülmüştür. Fakat eğrinin pik noktası çok hızlı bir kırılma yapmaktadır. Buda eğrilerin şekilsel benzerliğini yitirmesine neden olmaktadır. Eğrinin pik noktasındaki kırılmanın daha eğimli olarak gerçekleşmesi için yeni deneme çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.18'de kalıp-kalıp arası ısı transfer katsayısı $300 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak yapılan analiz sonucudur. Şekil 4.19 ise kalıp-kalıp arası ısı transferinin Merge Material yani $0 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak yapılan analiz sonucudur.



Şekil 4.18. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)



Şekil 4.19. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Tablo 4.5'deki 8. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 8. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 8.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu kalıp-kalıp arası ısı transfer katsayısı yönünden Tablo 4.5'de ki 7. Analiz çalışması gibi kurulmuştur. Burada da kalıp-kalıp arası ısı transfer katsayısı kurgusunda ise ilk olarak iki kalıbında aynı malzeme olmasından dolayı herhangi bir ısı taşınımı olmayacağı düşünülerek 0 W/m²K yani Merge Material olarak girilmiştir. Diğer bir düşünce ise alınan karar maddelerinde de bahsedildiği üzere prosesimizin gerçekleşme şeklinde parça kalıptan çıktıktan sonra kalıbın grafitli suya girerek soğuması nedeniyle, kalıp – kalıp arası ısı transferi 300 W/m²K olarak girilmiştir. Bu optimizasyon kurgusu ile 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur.

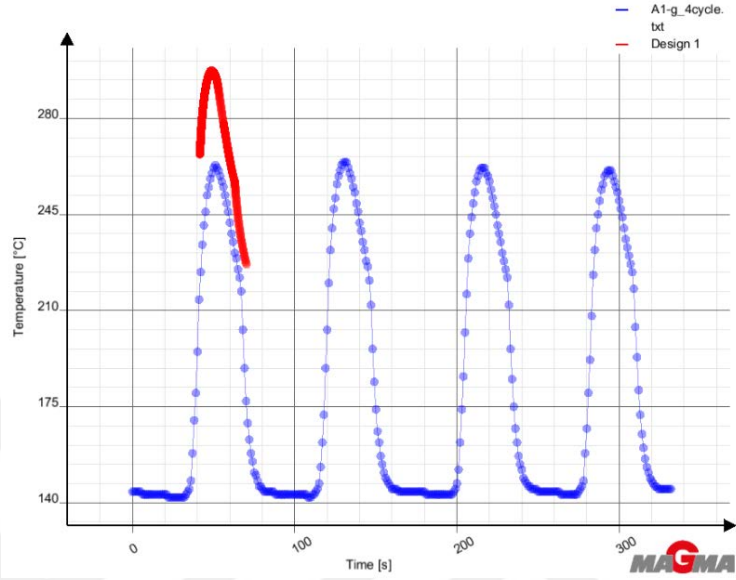
Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

Rank	Design	Objective1 (-)	Objective2 (-)
Rank 1	Design 1	8.18	896.94
Rank 1	Design 2	7.99	1131.15

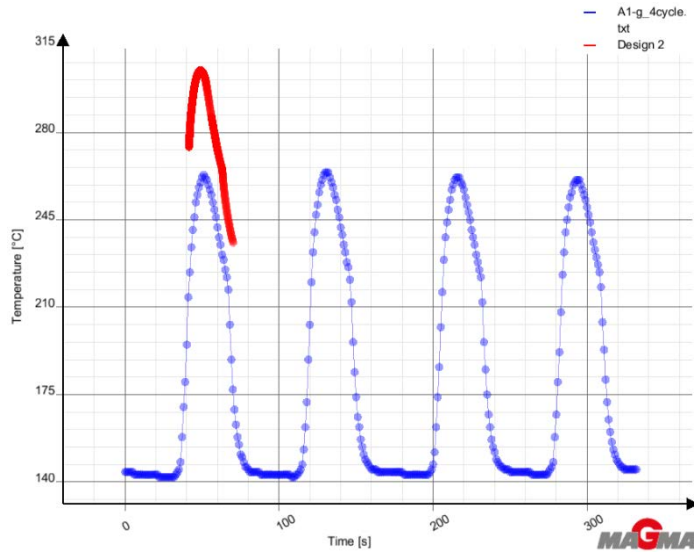
Şekil 4.20. Simülasyon sonucunda ki en uygun versiyonlar

Sıcaklığa bağlı olarak değişen ısı transfer katsayıları ile yapılan Tablo 4.5'de ki 7. ve 8. Analiz çalışmalarında görülüyor ki; alt kalıp ile üst kalıp arasındaki ısı transfer katsayısı değeri olarak 300 W/m²K değeri girilen analizin Şekil 4.21'deki eğrilerin yakınsaması, kalıp-kalıp arası ısı transfer katsayısı olarak Merge Material girilen analizin Şekil 4.22'deki sonuç eğrilerinden daha fazla yakınsama gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de ki grafiklerin genel anlamda sonuç eğrilerinin şekilsel olarak tekrardan düzelmesi ile yakınsama farkı artmıştır.

Şekil 4.22 ile Eğriler arasındaki farkta kalıplar arası ısı transferi Merge Material olduğu zaman 50°C fark olmakta iken, Şekil 4.21’de ise $300\text{ W/m}^2\text{K}$ değeri girildiği zaman 30°C fark olmaktadır.



Şekil 4.21. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)



Şekil 4.22. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

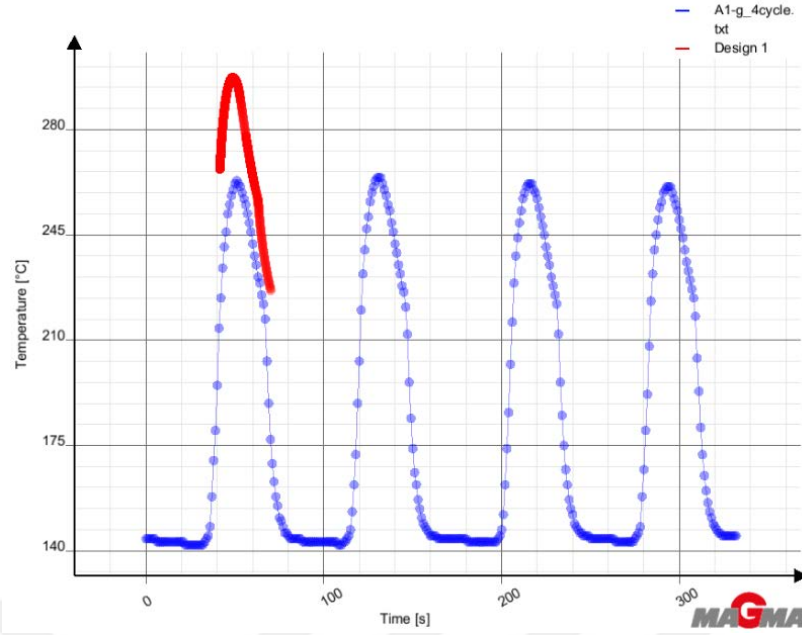
Tablo 4.5'deki 9. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'deki 9. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'deki 9.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Yakınsama farkını azaltmak için girilen en yüksek ısı transfer katsayısını artırarak çalışmaya devam edilmiştir.

Simülasyona optimizasyon kurgusu 1010°C'ye tanımlanan ısı transfer katsayı değeri arasında kurulmuştur. Bunun nedeni ise eğrilerin pik noktasındaki sıcaklığı düşürmektir. 1010°C'ye karşılık tanımlanan 4600 W/m²K değeri ile eğriler arasında halen fark olmasından dolayı ısı transfer katsayısının 4600 W/m²K değerinin üstünde olacağı öngörülmüştür. Öngörüye dayalı yeni bir çalışma yapılarak Şekil 4.24 incelenmiştir. Bu nedenle çalışmada simülasyona 1010°C sıcaklığı için ısı transfer katsayısı olarak 4700 W/m²K değerinden başlayarak 100 W/m²K artış miktarı ile 5000 W/m²K değerlerine kadar simülasyon devam ettirilmiştir. Oluşturulan simülasyon kurgusu ile optimizasyonda 4 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur.

Oluşan 4 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

Rank	Design	Objective1 (-)	Objective10 (-)	Objective11 (-)	Objective12 (-)	Objective2 (-)	Objective3 (-)	Objective4 (-)	Objec
Rank 1	Design 1	8.21	1411.55	28.91	316.05	894.73	29.45	2373.24	26.58
Rank 2	Design 4	8.21	1414.65	28.92	319.92	900.33	29.52	2382.58	26.58
Rank 3	Design 3	8.16	1419.17	28.91	320.79	900.54	29.49	2382.73	26.72
Rank 4	Design 2	8.19	1413.71	28.93	316.45	895.31	29.57	2380.86	26.75

Şekil 4.23. Simülasyon sonucunda ki en uygun versiyonlar



Şekil 4.24. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Tablo 4.5'deki 10. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 10. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 10.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Eğriler arasında ki fark Şekil 4.25'te görüldüğü üzere aynı şekilde devam etmektedir. Bu nedenle Tablo 4.5'deki 10. Analiz çalışmasında yürüteceğimiz analiz mantığı şu şekilde olacaktır;

- Parça katılaşmaya başladığı anda kalıba temas eden yüzeyinde oluşan katı kabuk, parçanın kalıptan ayrılmasına ve parça ile kalıp arasında bir hava boşluğunun oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle katılaşmanın olduğu sıcaklıklara karşılık olarak Magma programındaki Default Air ısı transfer katsayı değeri olan $1000-1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri girilerek bir Şekil 4.26 çalışması yapılmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu yukarıda bahsedildiği üzere katılaşmanın parçada katı kabuk oluşumu olarak gerçekleştiği sıcaklığa $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve 1500

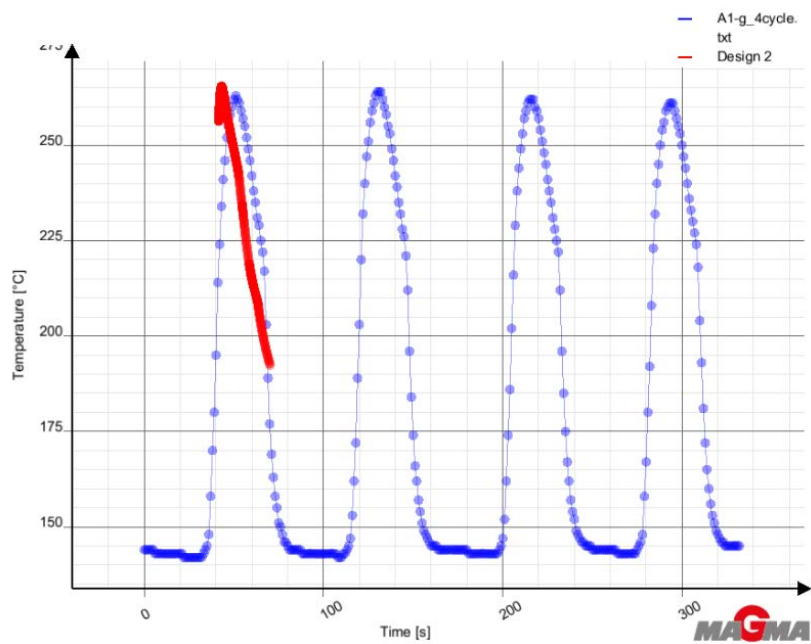
W/m²K değerleri girilerek kurulmuştur. Oluşturulan simülasyon kurgusu ile optimizasyonda 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur.

Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine en uygun versiyonlar Şekil 4.25'de gösterilmiştir.

Rank	Design	Objective1 (-)	Objective10 (-)	Objective11 (-)	Objective12 (-)	Objective2 (-)	Objective3 (-)	Objective4 (-)	Objective5 (-)
Rank 1	Design 2	23.29	757.02	24.65	346.35	555.69	27.87	1532.32	22.66
Rank 2	Design 1	23.44	741.38	24.82	352.96	578.72	28.1	1522.92	22.63

Şekil 4.25. Simülasyon sonucunda ki en uygun versiyonlar

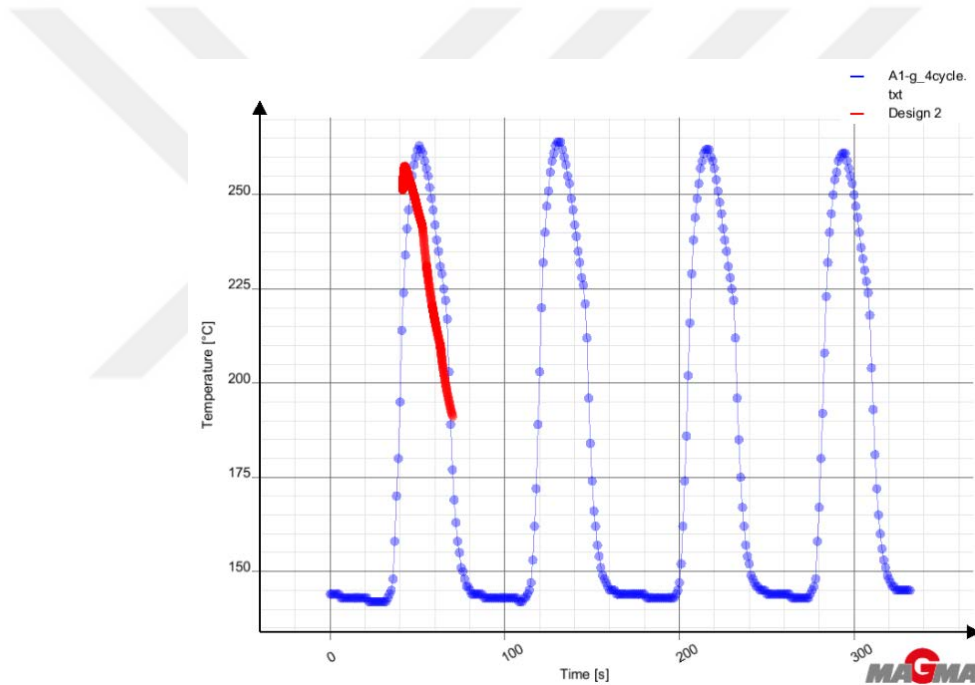
Simülasyon sonucunda Şekil 4.26'te eğriler arasındaki fark azalmış fakat simülasyon eğrisinin pik noktasındaki kırılma tekrardan hızlı bir şekilde olmuştur.



Şekil 4.26. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Tablo 4.5'deki 11. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'deki 11. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'deki 11.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan çalışma ile Şekil 4.27 'da görüldüğü üzere simülasyon eğrisi deneysel üretim sıcaklık eğrisine göre aşağıda kalmıştır.

Simülasyon optimizasyon kurgusu olarak Tablo 4.5'deki 10. Analiz çalışmasındaki optimizasyon kurgusu kullanılmıştır. Bu nedenle 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur. Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine göre uygun çıkmıştır.

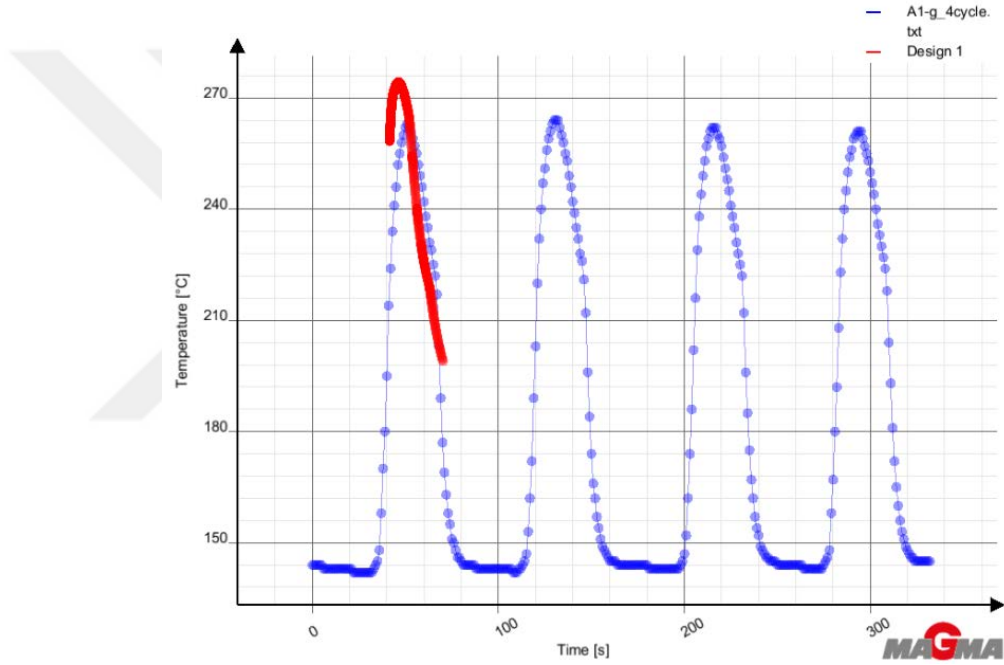


Şekil 4.27. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Tablo 4.5'deki 12. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 12. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 12.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan çalışma ile Şekil 4.28 'da görüldüğü üzere

simülasyon eğrisi deneysel üretim sıcaklık eğrisine göre 10°C fark ile üzerinde kalmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu katılaşmanın parçada katı kabuk oluşumu olarak gerçekleştiği sıcaklığa 2700 W/m²K ve 3000 W/m²K değerleri girilerek kurulmuştur. Oluşturulan simülasyon kurgusu ile optimizasyonda 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur. Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine göre uygun çıkmıştır.



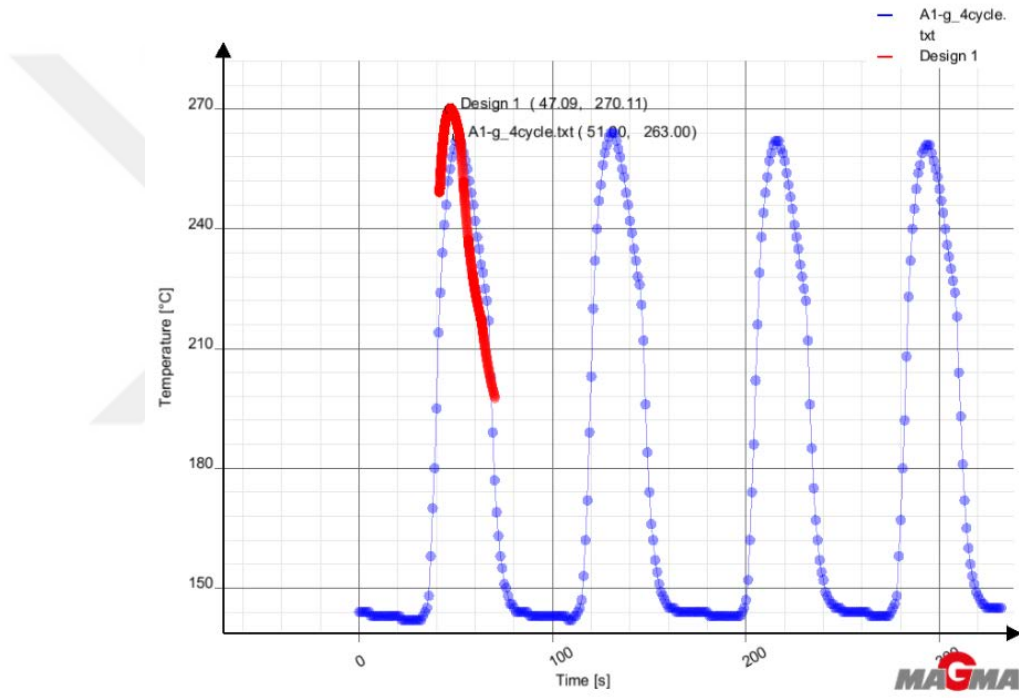
Şekil 4.28. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Yeni yapılacak çalışmada ısı transfer katsayılarında yaptığımız değişikliklerin sıcaklık aralığını likidus tarafından biraz daha artırarak devam edilmiştir.

Tablo 4.5'deki 13. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 13. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 13.sütununun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı

transfer katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan çalışma ile Şekil 4.29 'da görüldüğü üzere simülasyon eğrisi deneysel üretim sıcaklık eğrisine göre 7°C fark ile üzerinde kalmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu parçanın tamamen sıvı halde olduğu sıcaklığa 3000 W/m²K ve 3100 W/m²K değerleri girilerek kurulmuştur. Oluşturulan simülasyon kurgusu ile optimizasyonda 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur. Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine göre uygun çıkmıştır.



Şekil 4.29. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

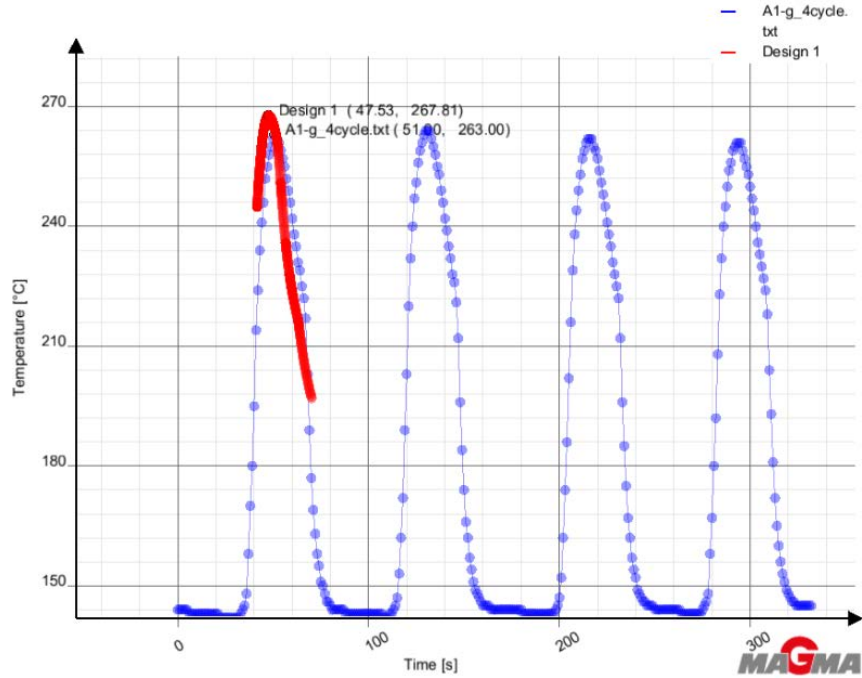
Şekil 4.29'de yapılan çalışma ile eğriler arasındaki fark 7°C olmuştur. Daha fazla yakınsama olabilir mi diye çalışmaya devam edilmiştir.

Tablo 4.5'deki 14. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 14. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 14.sütununun ısı

transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan çalışma ile Şekil 4.30 'da görüldüğü üzere simülasyon eğrisi deneysel üretim sıcaklık eğrisine göre 4°C fark ile üzerinde kalmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu parçanın tamamen sıvı halde olduğu 910 °C sıcaklığına 2700 W/m²K ve 2800 W/m²K değerleri girilerek kurulmuştur. Oluşturulan simülasyon kurgusu ile optimizasyonda 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur. Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine göre uygun çıkmıştır.

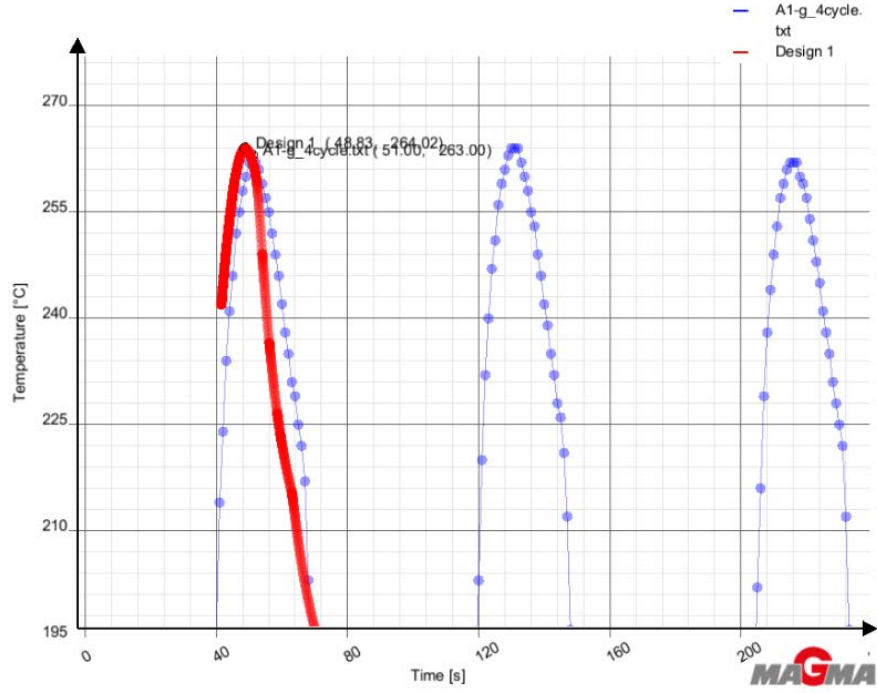
Eğriler arasında ki fark Şekil 4.30'da görüldüğü üzere tekrardan düşerek 4°C olmuştur. Aynı zamanda eğrilerin şekilsel benzerliğinde herhangi bir bozulma gerçekleşmemiştir. Aradaki farkı biraz daha azaltabilmek için çalışmaya Tablo 4.5'deki 15. Analiz çalışması ve simülasyon sonuç grafiği Şekil 4.31 ile devam edilmiştir.



Şekil 4.30. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

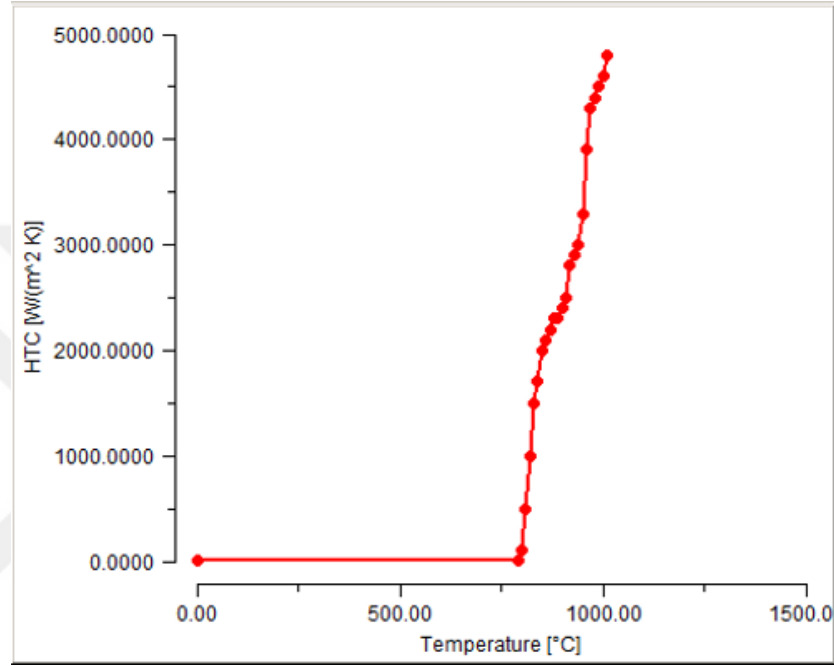
Tablo 4.5'deki 15. Analiz çalışmasında kullanılan ısı transfer katsayıları Tablo 4.6'daki 15. Analiz sütunundaki değerlerdir. Tablo 4.6'daki 15.sütunun ısı transfer katsayı değerleri incelendiği zaman her sıcaklığa karşılık gelen bir ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan çalışma ile Şekil 4.31 'da görüldüğü üzere simülasyon eğrisi deneysel üretim sıcaklık eğrisine göre 1°C fark ile üzerinde kalmıştır.

Simülasyona optimizasyon kurgusu parçanın tamamen sıvı halde olduğu 910 °C sıcaklığına 2500 W/m²K ve 2600 W/m²K değerleri girilerek kurulmuştur. Oluşturulan simülasyon kurgusu ile optimizasyonda 2 adet simülasyon versiyonu oluşmuştur. Oluşan 2 adet simülasyon versiyonlarının sonuçları arasında Magma programına tanımlanan deneysel ölçüm sıcaklık eğrisine göre uygun çıkmıştır.



Şekil 4.31. Simülasyon sonuç grafikleri (kırmızı renkli eğri – simülasyon sonucu oluşan sıcaklık eğrisi / mavi renkli eğri – deneysel üretim sıcaklık eğrisi)

Yukarıdaki Şekil 4.31’da görülüyor ki eğriler arasındaki fark 1°C olmuştur. Aynı zamanda şekilsel anlamda eğriler benzemektedir. Zamansal döngüde herhangi bir kayma olmamaktadır. Bu nedenle simülasyon çalışmaları burada sonlandırılmıştır. Eğriler arasında ki yakınsamayı elde ettiğimiz sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerlerine karşılık gelen ısı transfer katsayılarımız ayrıca not edilmiş ve Magma programına yeni bir isimle Şekil 4.32’deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 4.32. Yapılan son çalışmanın sıcaklık ve ısı transfer katsayısı değerlerinin Magma programında yeni bir isimle tanımlanması

4.3. Simülasyon Sonuçları ile Deneysel Üretimdeki Hataların Karşılaştırılması

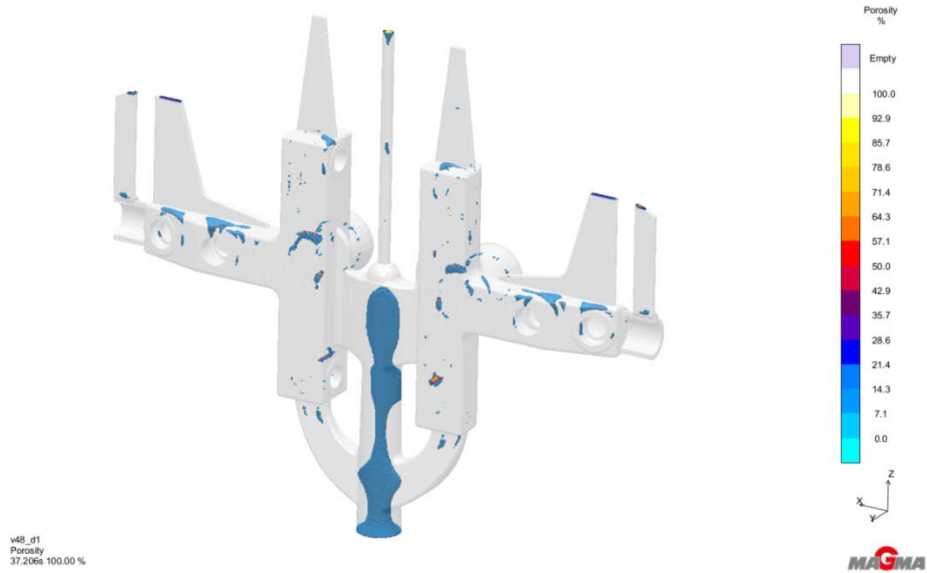
Belirlenen ısı transfer katsayıları ile yapılan simülasyonda deneysel sıcaklık eğrileri ile simülasyon sıcaklık eğrilerinin yakınsatılması Şekil 4.32 ile başarılmıştır. Yakınsamanın olduğu simülasyonun hata analizleri incelenerek, deneysel üretimde ıskarta olarak ayrılan parçaların hata nedenleri ile karşılaştırılmıştır.

Magma programının simülasyon sonucunda Şekil 4.33’de ki hot spot ve Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36’te ki porozite analiz sonuçları kontrol edilmektedir. Bu

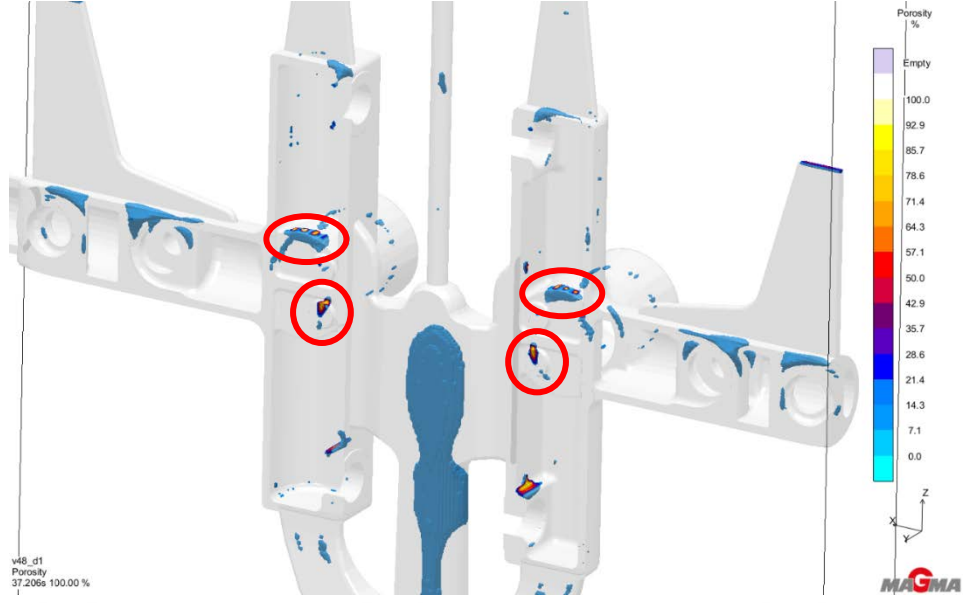
analiz sonuçlarında ekranın sağ kısmında bulunan renk skalasında hatanın oluşacağı bölgedeki renk değerinin yüksekliği burada hatanın kesin bir şekilde ortaya çıkacağını bizlere göstermektedir.



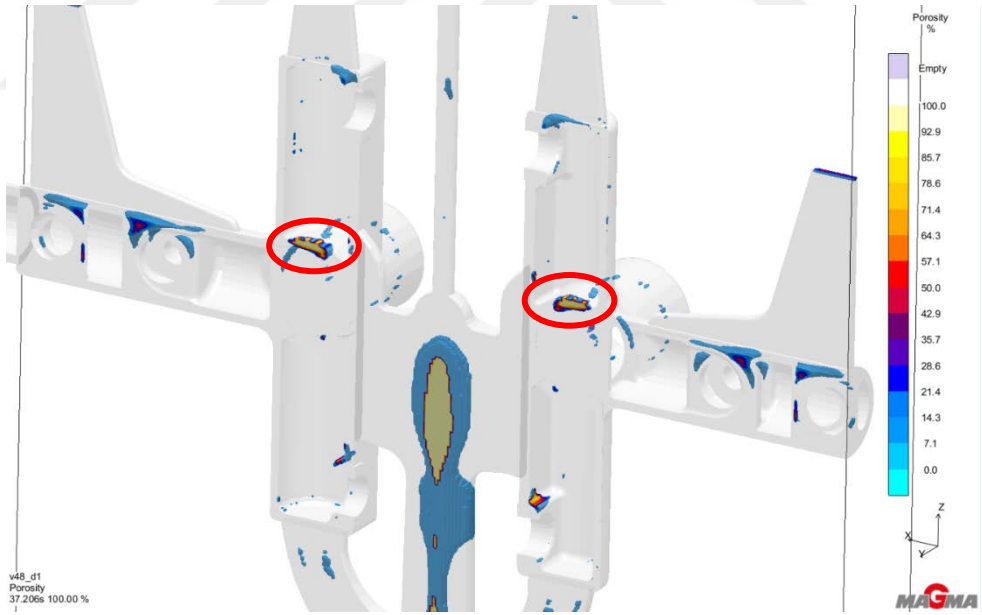
Şekil 4.33. Magma programında yapılan son çalışmanın hot spot analizi



Şekil 4.34. Magma programında yapılan son çalışmanın porosity analizi



Şekil 4.35. Magma programında yapılan son çalışmanın porozite analizi (parçanın kartuş ayakları dediğimiz bölgedeki hatalar)



Şekil 4.36. Magma programında yapılan son çalışmanın porozite analizi (parçanın kartuş yan duvarları dediğimiz bölgedeki hatalar)

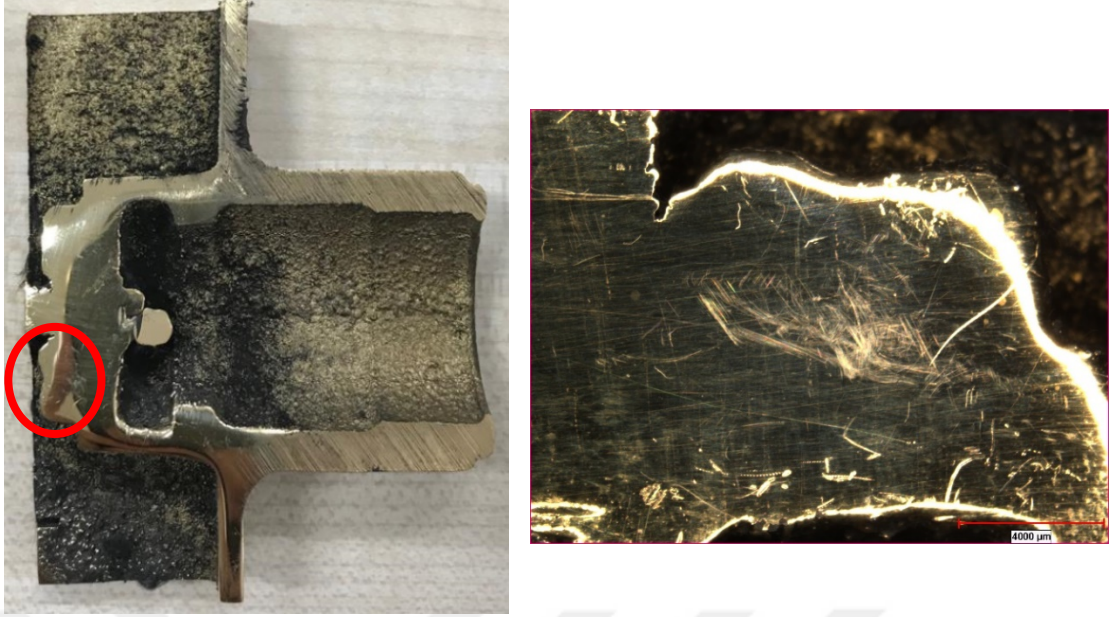
Deneyisel üretim sırasında ıskartaya ayrılan parçaların hataları Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’de incelenmiştir. Daha sonra simülasyon ile deneysel üretimdeki hata bölgeleri ve tipleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.37. Deneyisel üretimde ıskartaya ayrılan parçanın hatası (kartuş dış duvarı)

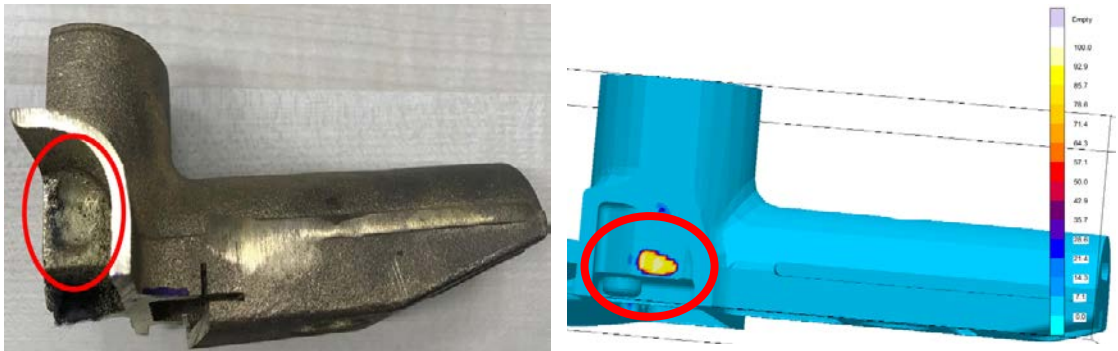


Şekil 4.38. Deneyisel üretimde ıskartaya ayrılan parçanın hatası (kartuş iç duvarı)



Şekil 4.39. Deneysel üretimde ıskartaya ayrılan parçanın hatası (kartuş ayaklarının damlacıkları)

Yapılan hata karşılaştırmaları sonucunda görülüyor ki kullandığımız ısı transfer katsayıları doğru belirlenmiştir. Çünkü simülasyon sonucunda çıkan hata analizinde parçada çıkması muhtemel olan porozite problemi, deneysel üretimde ıskartaya ayrılan hatalı parçada da net olarak Şekil 4.40’de gösterilmiştir.



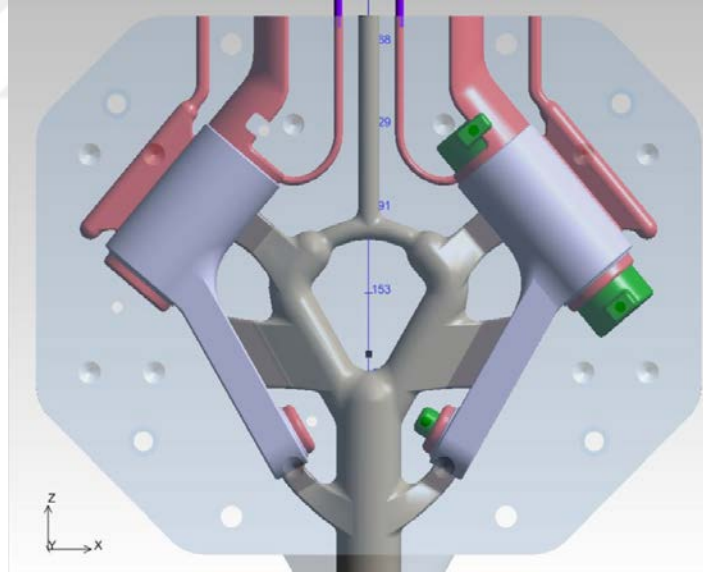
Şekil 4.40. Hata karşılaştırması

Hata bölgelerinin birebir eşleşmesi ile yapılan çalışmanın doğru bir şekilde ilerlediğinin kanıtı olmuştur.

4.4. Yeni Tanımlanan Isı Transfer Katsayısı ile Yolluk Tasarımı Değiştirilen Modele Simülasyon Yapılarak Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Yapılan termal analiz sonucunda ısı transfer katsayıları nümerik olarak hesaplanmıştır ve hesaplanan değerler ile döküm simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda oluşan sıcaklık eğrileri ile deneysel üretim anında elde edilen sıcaklık eğrisi arasında yakınsama gerçekleşmiştir. Yapılan hata analizi incelendiğinde ise deneysel üretim anında ıskartaya ayrılan parçaların hataları eşleşmektedir.

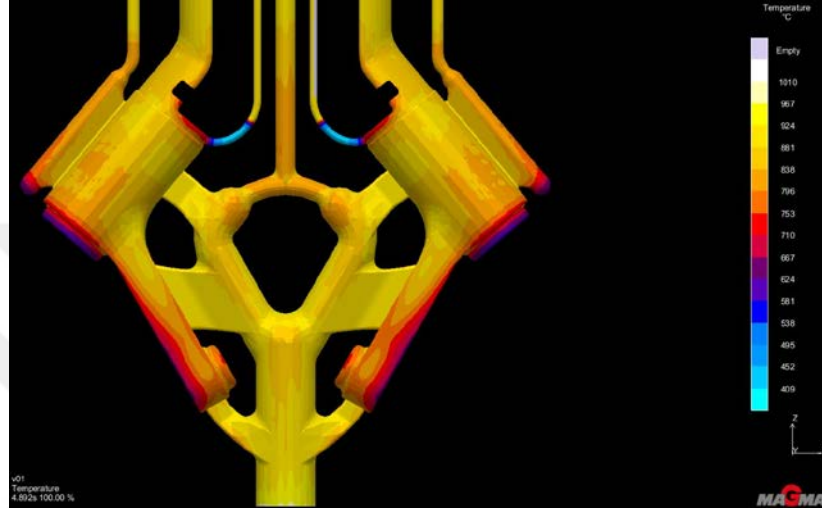
Eşleşmenin sağlandığı ısı transfer katsayısı değerleri ile kalıp tasarımı yapılmış bir lavabo bataryasında simülasyon olarak deneme gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneme simülasyonunda ilk öncelik üretimi mevcut yolluk tasarımı ile Şekil 4.41'deki denemedir.



Şekil 4.41. Lavabo bataryasının üretimi devam eden yolluk tasarımı

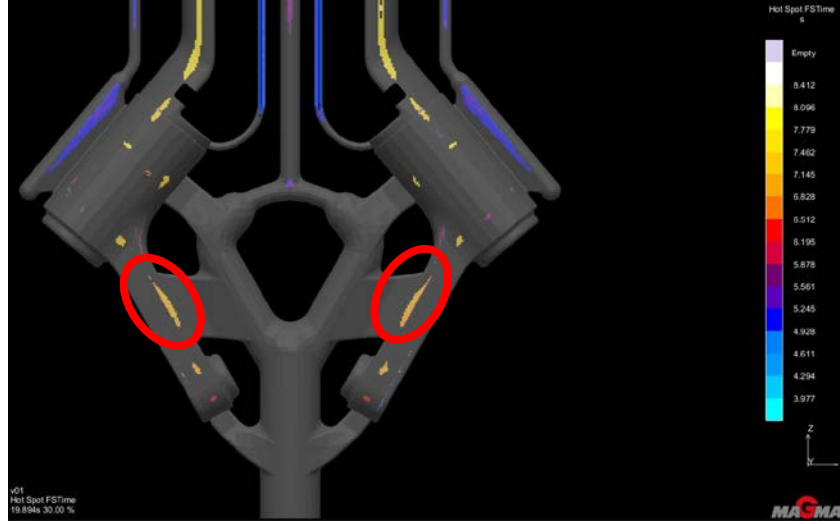
Deneme simülasyonu, yeni tanımlanan ısı transfer katsayısı değerleri ile yapılarak Şekil 4.42'deki ısı dağılımı, Şekil 4.43'deki hot spot ve Şekil 4.44'deki porozite analizleri incelenmiştir.

Şekil 4.42’de görüldüğü üzere üretimi mevcut yolluk tasarımı ile yapılan simülasyon sonucunda parça dolumu gerçekleştikten sonra parçanın sıcaklık dağılımı 800-880°C aralığındadır. Parçanın geç soğumasıyla birlikte parçanın kalıptan çıkma süresine yaklaşması ve parça sıcaklığının döküm metalinin çamurumsu olduğu sıcaklık aralığına yakın olması ile parçada oluşacak gaz boşluğu veya süngerimsi yapı hatasının çıkma olasılığını arttırdığı kararlaştırılmıştır.

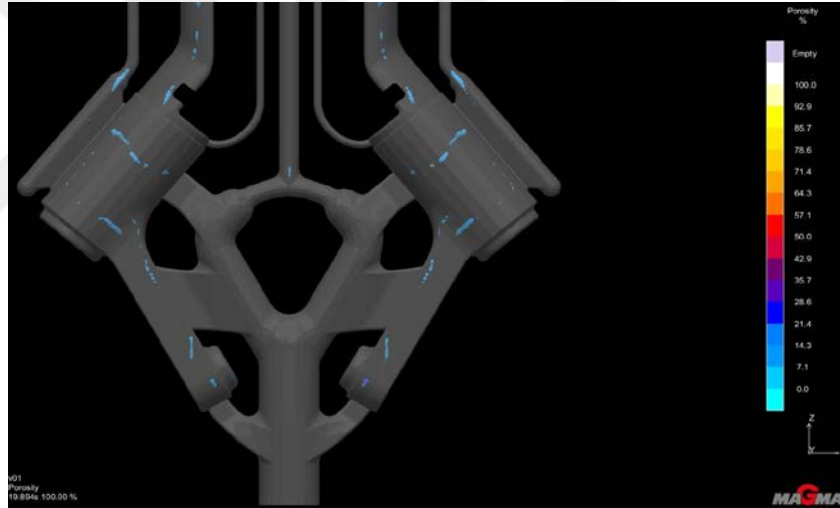


Şekil 4.42. Isı dağılım analizi

Şekil 4.43’ de görülüyor ki kırmızı ile işaretlenen bölgelerde süngerimsi yapı hatasının oluşma riski bulunmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmaları ile hot spot analizindeki oran skalasında 6’dan yukarı olan hata değerlerinin üretimde çıkma olasılığı yüksektir. Bu yüzden mevcut yolluk tasarımının değiştirilmesine karar verilmiştir.

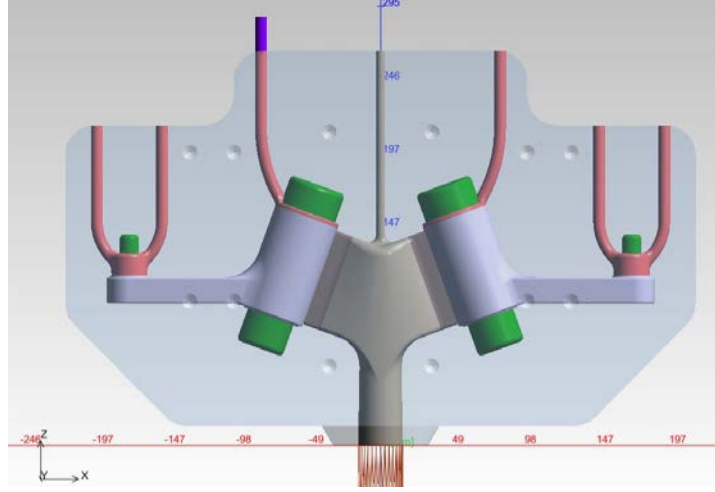


Şekil 4.43. Hot Spot analizi



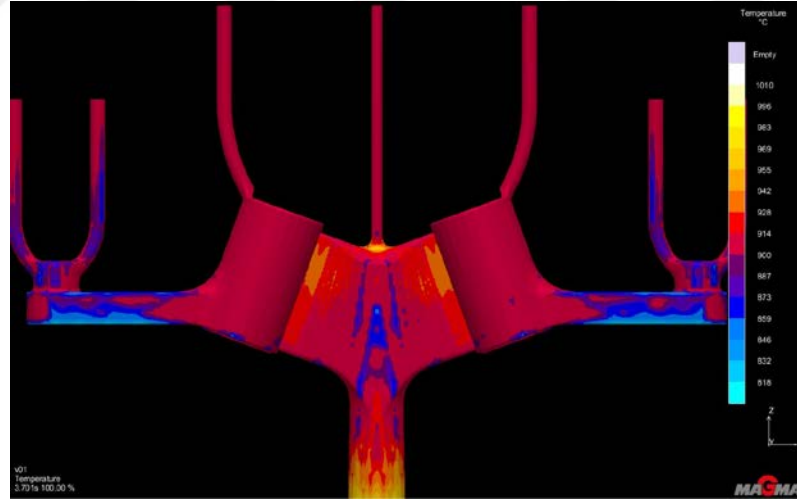
Şekil 4.44. Porozite analizi

Yapılan incelemeler sonrasında kalıbın yolluk tasarımı değiştirilerek simülasyon aynı şartlar ile Şekil 4.45'te tekrarlanmıştır.



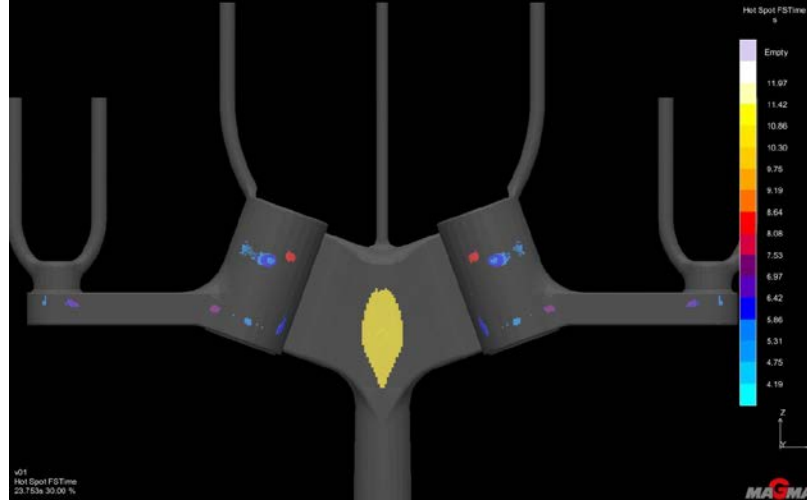
Şekil 4.45. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyon denemesi

Şekil 4.45'te görülen simülasyon denemesinin Şekil 4.46'teki ısı dağılımı incelendiğinde parça dolumu gerçekleştikten sonra sıcaklığının mevcut tasarıma göre daha düşük olduğu görülmüştür.



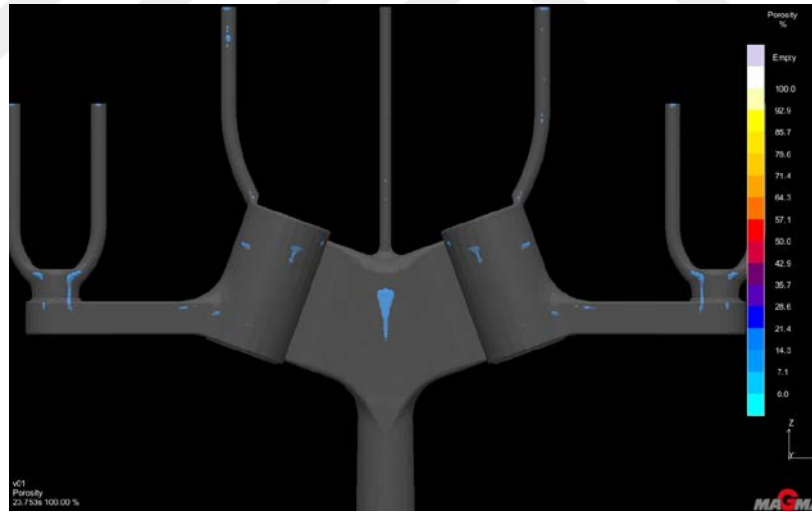
Şekil 4.46. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyonun ısı dağılımı

Şekil 4.47'da yapılan inceleme de ise Şekil 4.43'teki hot spot değerlerinden daha düşük değerler görülmektedir. Bu da üretimde ki parçada oluşacak hata riskini azaltmaktadır.



Şekil 4.47. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyonun Hot Spot analizi

Porozite analizi incelendiğinde ise hata riski bulunan bölgelerin gittikçe azaldığı Şekil 4.48 ile görülmüştür.



Şekil 4.48. Yeni yolluk tasarımı ile yapılan simülasyonun Porozite analizi

Yeni yapılan yolluk tasarımının mevcut durumdaki yolluk tasarımına göre daha iyi analiz sonuçları vermiştir. Bu nedenle mevcut üretimde ki kalıbın tashih edilerek yeni tasarlanan yolluk tasarımına göre işlenerek üretimde devreye alınması kararlaştırılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada gerçekleştirdiğimiz hedefler ve alınan sonuçlar aşağıda ki gibidir;

- Öncelikle döküm yöntemiyle üretilen parçalar arasında pareto analizi yapılarak döküm hatası nedeniyle ıskartaya ayrılan parçaların en çok gaz boşluğu ve süngerimsi yapı nedeniyle ıskartaya ayrıldığı belirlenmiştir. Daha sonra bu hatalar nedeniyle ıskartaya ayrılan ve üretim adedi en yüksek olan parçalar belirlenmiştir.
- Belirlenen parçalardan banyo bataryası ile deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve diğer lavabo bataryası ile de yolluk tasarımı değiştirilerek simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.
- ıskartaya ayrılan banyo parçalarında hataların en çok hangi bölgelerde oluştuğu incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda banyo bataryasının 3D modeli üzerinde termokupl noktaları belirlenmiştir. Belirlenen noktalara göre mevcut üretim kalıbında da aynı noktalara termokupllar yerleştirilerek bir vardiya boyunca deneysel üretim yapılmıştır.
- Deneysel üretim anındaki sıcaklık değerleri termokupl ve ölçüm kayıt cihazı ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler grafiğe dönüştürülerek incelenmiştir.
- Elde edilen üretim anındaki sıcaklık değerleri ile Ansys programında termal analiz gerçekleştirilmiş ve ısı transfer katsayıları nümerik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı transfer katsayıları incelendiğinde ise kritik olarak belirlenen döküm ve kalıp sıcaklıkları arasında ki ısı transfer katsayısı sıcaklığa göre değişmektedir. Bunun anlamı ise simülasyon programı olarak kullanılan Magma programına tanımlanan ısı transfer katsayısının sıcaklığa bağlı değişken olarak girilmesi gerektiğidir.
- Magma programındaki simülasyon çalışmaları için deneysel üretim ile elde edilen sıcaklık değerleri, termokupl noktalarına tanımlanmıştır. Ayrıca kalıp modelinde belirlenen termokupl noktaları da Magma programında aynı şekilde kalıp modeline tanımlanmıştır. Böylelikle tanımlanan termokupl noktalarında oluşan simülasyon çalışmasının sıcaklık değer eğrileri ile deneysel üretim sıcaklık eğrileri karşılaştırılabilmektedir.

- Iskartaaya ayrılma nedeni olan hataların, parçanın katılaşması anında oluştuğu kararlaştırılmıştır. Bu nedenle simülasyon sonucu ve üretim sonucu oluşan eğrilerin de parçanın katılaşması anındaki eğri yakınsaması incelenmiştir.
- Sıcaklığa bağlı değişken olarak girilen ısı transfer katsayıları ile simülasyon ve deneysel üretim anındaki eğriler arasında yakınsama gerçekleştirilmiştir.
- Eğriler arasında gerçekleştirilen yakınsama ile simülasyonun hot spot ve porozite analiz sonuçları incelenmiştir. Aynı zamanda deneysel üretim sırasında iskartaaya ayrılan parçaların hataları ile karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan hata karşılaştırmasında simülasyon da gözükken hatanın mevcut parçada da olması belirlenen ısı transfer katsayılarının uygunluğunu göstermiştir.
- Daha sonra çalışma için belirlenen lavabo bataryasının kalıp modelinde mevcut yolluk tasarımı ile simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon sonucunda ısı dağılımı, hot spot ve porozite analizleri incelenmiştir. Aynı şartlar ile yolluk tasarımı değiştirilerek simülasyon tekrarlanmış ve mevcut yolluk tasarımı bulunan simülasyon sonuçları ile yeni yolluk tasarımı yapılan simülasyonun sonuçları karşılaştırılmıştır.
- Karşılaştırma sonucunda yeni yolluk tasarımı ve belirlenen ısı transfer katsayısı ile yapılan simülasyon sonuçları mevcut olana göre ısı dağılımı daha verimli gerçekleşmiştir. Bunun sonucunda da hata çıkma oranları azalmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde bir döküm prosesinin simülasyon programı için ısı transfer katsayısı hiçbir zaman sabit olarak girilmemelidir. Çünkü döküm işlemi gerçekleşirken, ilk başta sıvı halde olan alaşım zaman içerisinde hal değiştirerek katı halini almaktadır. Başlangıçta yüksek sıcaklıkta olan metal ile düşük sıcaklıktaki kalıp arasında ısı geçişi olması ile döküm metalinde hal değişimi gerçekleşmektedir. Bu nedenle döküm parçalarında oluşan hatalar bu aşama da ortaya çıkmaktadır.

Hataların oluşmasında ki en önemli kısım olan katılaşma sırasında ki ısı transfer katsayısı değerinin düzgün belirlenmesi ile bilgisayar ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde tasarım doğrulama çalışmaları maddi ve zaman kaybı yaşanmadan gerçekleşmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] MEGEP. Tesisat Teknolojisi ve İklimlendirme, Armatür ve Aksesuar Montajı. Ankara, 2007, 49 s.
- [2] Gözen, Ahmet. Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Sistemlerinin Tasarımı ve Simülasyonunun İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007, 121 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [3] Koru, M. Basınçlı Döküm Yönteminde Al-Si (A413) Alaşımının Termal ve Dinamik Parametrelere Bağlı Olarak Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısının Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2009, 172 s. (Doktora Tezi)
- [4] Aran, A. Döküm Teknolojisi, İmal Usülleri Ders Notları, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul, 2007, 106 s.
- [5] Brunhuber E., Moderne Druckgussfertigung, Fachverlag Schiele, Berlin, 1963, 360 s.
- [6] Reimer V., Druckguss, Carl Hanser Verlag, Münih, 1981.
- [7] Campbell J.S., Casting and Forming Processes, Toronto, London, 1950.
- [8] Campbell J.S., Principles of Manufacturing Materials and Processes, McGraw-Hill Publishing Company, London, 1961, 672 s.
- [9] Niebel B. W., Drapper A.B., Wysk R. A., Modern Manufacturing Process Engineering, McGraw-Hill Publishing Company, London, 1989, 986 s.
- [10] Uludağ, Alper. Basınçlı Döküm Yönteminde Kalıp Sistem Tasarımı ve Simülasyon Analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007, 91 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [11] Kaye A., Street A., Die Casting Metallurgy, Butterworth Scientific, England, 1982, 318 s.
- [12] Street A., The Diecasting Book, Portcullis Press Ltd., England, 1984, 765 s.
- [13] Sun, J., Le, Q., Fu, L., Bai, J., Tretter, J., Herbold, K., Huo, H.. Gas Entrainment Behavior of Aluminum Alloy Engine Crankcases During The Low Pressure Die Casting Process. Journal of Materials Processing Tech., 2018, 266 (2019), 274-282.
- [14] Jiang, W.-M., Fan, Z.-T., Liu, D.-J., Liao, D.-F., Dong, X.-P., Zong, X.-M., Correlation Of Microstructure With Mechanical Properties And Fracture Behavior Of A356-T6 Aluminum Alloy Fabricated By Expendable Pattern Shell Casting With Vacuum And Low-Pressure, Gravity Casting And Lost Foam Casting. Mater. Sci. Eng. 2013, A 560, 396-403.
- [15] Çiğdemoğlu, M., Basınçlı Döküm Cilt 1. Makine Mühendisleri Odası Yayınları No:77, Ankara, 1972, 142 s.
- [16] Doehler, H.H., Basınçlı Döküm. Çeviren, Bayvas, M.Ş., Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları, Etüd ve Programlama Dairesi Yayınları No:80, Erkek Teknik Yüksek Öğretmen Okulu Matbaası, Ankara, 1974, 514 s.
- [17] Vinarcık, J.E., High Integrity Die Casting Processes. John Wiley&Sons, New York, USA, 2003, 223 s.
- [18] Flemings, C.M., Döküm ve Katılaştırma Tekniği (M. Başaran, Çev.) İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, 1976, 415 s.
- [19] Campbell, J., Casting. Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 2002, 288 s.
- [20] Hozikligil, Bahadır. Katılma Sırasında Kalıp Sıcaklığının Döküm-Kalıp Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısına Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2012, 69 s.
- [21] Prates, M., Biloni, H., Variable Affecting the Nature of the Chill Zone. Metallurgical Transactions. 1972, 3, 1501-1510.

- [22] Elliot, R., Eutectic Solidification Processing. Butterworths, London, 1983, 378 s.
- [23] Long, A., Thornhill, D., Armstrong, C., Watson D.. Determination of The Heat Transfer Coefficient at The Metal-Die Interface For High Pressure Die Cast AlSi9Cu3Fe. Applied Thermal Engineering. 2011, 31 (2011), 3996-4006.
- [24] Susac, F., Ohura, K., Banu, M., Makinouchi, A.. Determination of Heat Transfer Coefficient and Air Gap in Aluminum Casting by Numerical and Experimental Approaches. Manufacturing Science and Engineering Department, University of Galati, Romania, V-CAD System Research Program, The Physical and Chemical Research Institute, Japan. 2015, 69-70.
- [25] Taha, M.A., El-Mahallawy, N.A., El-Mestekawi, M.T., Hassan, A.A.. Estimation of Air Gap and Heat Transfer Coefficient at Different Faces of Al and Al-Si Castings Solidifying in Permanent Mould. Materials Science and Technology. 2013, 17:9, 1093-1101.
- [26] Sharma, D.G.R., Krishnan, M., Simulation of Heat Transfer at Casting Metal-Mold Interface. AFS Transactions. 1991, 99, 429-438.
- [27] Ho, K., Pehlke, R D., Mechanisms of heat transfer at a metal-mold interface. AFS Transactions. 1984, 92, 587-598.
- [28] Kannaiah, P., Narayana, K.L., Roshan, H., Thermal properties of molding sands: casting-over probe embedded specimen method. AFS Transactions. 1987, 94, 591-600.
- [29] Bandyopadhyay, B.P., Joshi, M.D., Chakraborty, P.N., A transient method of simultaneous measurement of thermal properties of moulding sand using plane heat source. British Foundryman. 1984, 77, 318-321.
- [30] Akar, N.. Katılma sırasında döküm-kalıp ara yüzeyinde ısı transfer katsayısının incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 120 s.
- [31] Şahin, S, Şahin, H.M., Kocatepe, K., Akar, N, Investigation of Heat Transfer Coefficient During Unsteady-State Solidification at Casting Metal-Mold Interface. Proceedings of IMEC2004 International Mechanical Engineering Conference, December 5-8, 2004, Kuwait, pp 671-691.
- [32] Bamberger, M. and Stupel, M.M., Influence of different chill materials on heat flux and dendrite arm spacing of a356 aluminum alloy casting, Giesserei, 1986, 2, 77-80.
- [33] Santos, C.A., Quaresma, J.M.V., Garcia, A., Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold casting, Journal of Alloys and Compounds, 2001, 319, 174-186.
- [34] Santos, C.A., Siqueira, C.A., Garcia, A., Quaresma, J.V.M., Spim, J.A., Metal/Mold heat transfer coefficients during horizontal and vertical unsteady-state solidification of al-cu and sn-pb alloys. 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering, 2002, Rio de Janeiro, Brazil.
- [35] Santos, C.A., Siqueira, C.A., Garcia, A., Quaresma, J.M.V., Spim, J.A., Metal-Mold heat transfer coefficients during horizontal and vertical unsteady-state solidification of al-cu and sn-pb alloys. Inverse Problems in Science and Engineering, 2004, 12(3), 279-296.
- [36] Muojekwu, C.A., Samarasekera, I.V., Brimacombe, J.K., Heat transfer and microstructure during the early stages of metal solidification, Metallurgical and Materials Transactions B, 1995, 26, 361-382.

- [37] Kumar, P. T. S., Prabhu, N. K., Heat flux transients at the casting/chill interface during solidification of aluminum base alloys. *Metallurgical Transactions B*, 1991, 22, 717-727.
- [38] Meneghini, A., Tomesani L., Chill material and size effects on HTC evolution in sand casting of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, in pres 2005.
- [39] Hadala, B., Malinowski, Z., Szajding, A.. Solution Strategy for The Inverse Determination of The Specially Varying Heat Transfer Coefficient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, 104(2017), 993–1007.
- [40] Bazhenov, V.E., Koltygin, A.V., Tselovalnik Y.V., Sannikov A.V. Determination of Interface Heat Transfer Coefficient Between Aluminum Casting and Graphite Mold. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016, 58(2) (2017), 114-123.
- [41] Akar, N, Şahin H.M., Yalçın, N., Kocatepe K., Experimental study on the effect of liquid metal superheat and casting height on interfacial heat transfer coefficient. *Experimental Heat Transfer*, 2008, 21, 83–98.
- [42] Gafur, M. A., Nasrul Haque, M., Narayan Prabhu, K., Effect of chill thickness and superheat on casting/chill interfacial heat transfer during solidification of commercially pure aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 133, 257-265.
- [43] Srinivasan, M.N., Heat transfer coefficients at the casting-mould interface during solidification of flake graphite cast iron in metallic moulds. *Indian Journal of Technology*, 1982, 20(4), 123-129.
- [44] Michel, F., Louchez, P. R., Samuel, F. H., Heat transfer coefficient during solidification of Al-Si alloys: Effects of mold temperature, coating type and thickness. *AFS Transactions*, 1995, 103, 275-283.
- [45] Gozlan, E., Bamberger, M., Heat flow and solidification in a metal mould Source. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1987, 78(9), 677-682.
- [46] Hallam, C.P., Griffiths, W.D., A Model of the Interfacial Heat-Transfer Coefficient for the Aluminum Gravity Die-Casting Process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35B (4), 721-733.
- [47] Koru, M., Serçe, O., Experimental and Numerical Determination of Casting Mold Interfacial Heat Transfer Coefficient in the High Pressure Die Casting of A-360 Aluminum Alloy. *Acta Physica Polonica A*. 2016, 130(1), 453-458.
- [48] Nyamekye, K., Wei, S., Askeland, D., Voigt, R.C., Pischel, R.P., Rasmussen, W., Ramsay, C., A review of permanent mold coating and their effect on heat transfer in the mold. *AFS Transactions*, 1994, 102, 869-876.
- [49] Venkaramani, R., Ravidran, C., Effects of coating thickness and pouring temperature on thermal response in lost foam casting. *AFS Transactions*, 1996, 104, 281-290.
- [50] Bohacek, J., Kharicha, A., Ludwig, A., Wu, M., Karimi-Sibaki, E. Heat Transfer Coefficient at Cast Mold Interface During Casting: Calculation of Air Gap. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49B, 1421-1433.
- [51] Akar, N ve Yalçın, N., Al-Si alaşımlarında silisyum miktarının döküm parçakalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı üzerine etkisi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2007, 22 (3), 451-459.
- [52] Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Osorio, W.R., Garcia, A., Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 421, 245-253.

- [53] Spinelli, J.E., Ferreira, I.L., Garcia, A., Evaluation of heat transfer coefficients during upward and downward transient directional solidification of Al-Si alloys. *Struct Multidisc Optim*, 2006, 31, 241-248.
- [54] Ferreira, I.L., Spinelli, J.E., Nestler, B., Garcia, A., Influences of solute content, melt superheat and growth direction on the transient metal/mold interfacial heat transfer coefficient during solidification of Sn-Pb alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 111, 444-454.
- [55] Fortin, G, Louchez, P, Samuel, F H, Factors controlling heat transfer coefficients at the metal-mold interface during solidification of aluminum alloys: an analytical study. *AFS Transactions*, 1992, 100, 863-871.
- [56] Peres, M.D., Siqueira, C.A., Garcia, A., Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 381, 168-181.
- [57] Taha, M.A., El-Mahallawy, N.A., El-Mestekawi, M.T., Hassan A.A., Estimation of air gap and heat transfer coefficient at different faces of Al and Al-Si castings solidifying in permanent mould. *Materials Science And Technology*, 2001, 17 (9), 1093-1101.
- [58] Siqueira, C.A., Cheung, N., Garcia, A., The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn-Pb alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, 351, 126-134.
- [59] Sá, F., Rocha, O.L., Siqueira, C.A., Garcia, A., The effect of solidification variables on tertiary dendrite arm spacing in unsteady-state directional solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys. *Materials Science and Engineering*, 2004, A 373, 131-138.
- [60] Souza, E. N., Cheung, N. and Garcia, A., The correlation between thermal variables and secondary dendrite arm spacing during solidification of horizontal cylinders of Sn-Pb alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, In Press 2005.
- [61] Spinelli, J.E., Rosa, D.M., Ferreira, I.L., Garcia, A., Influence of melt convection on dendritic spacing of downward unsteady-state directionally solidified Al-Cu alloys. *Materials Science and Engineering*, 2004, A 383, 271-282.
- [62] Krishnan, M., Sharma, D.G.R., The Effect of Alloy Properties on the Heat Flow across the Casting-Mold Interface. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1993, 28, 447-451.
- [63] Wang, G. X., and Matthys, E. F., Interfacial thermal contact during rapid solidification on a substrate. *Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference*, Brighton, United Kingdom, 1994, (Heat Transfer 1994) 4, 169-174.
- [64] Wang, G.-X., Matthys, E.F., Experimental determination of the interfacial heat transfer during cooling and solidification of molten metal droplets impacting on a metallic substrate: effect of roughness and superheat. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45, 4967-4981.
- [65] El-Mahallawy, N. A., Assar, A. M., Metal-Mould Heat Transfer Coefficient Using End-Chill Experiments. *Journal of Materials Science Letters*, 1988, 7(3): 205-208.
- [66] Taha, M.A., El-Mahallawy, A.M., Assar, A.W.M., Hammouda, R.M., Effect of Melt Superheat and Chill Materials on Interfacial Heat Transfer Coefficient in End-Chill Al and Al-Cu Castings. *Journal of Material Science*, 1992, 27: 3467-3473.

- [67] Todoroki, H., Lertarom, R., Suzuki, T., Cramb, A. W., Heat transfer behavior of pure iron and nickel against a water cooled copper mold during initial stage of solidification Source. Proceedings-Ironmaking Conference, London, UK, 1997, 731-742.
- [68] Sun, R., Hu, H., Niu, X., Determination of heat transfer coefficients by extrapolation and numerical inverse methods in squeeze casting of magnesium alloy AM60. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211:1432-1440.
- [69] Hamasaiid, A.M.S., Dour, G., Dargusch, M.S., Loulou, T., Davidson, D.J.C., Savage, G., Heat-transfer coefficient and in-cavity pressure at the casting die interface during high-pressure Die casting of the magnesium alloy AZ91D. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39A, 853-864.
- [70] Nishida, Y., Matsubara, H., Effect of Pressure on Heat Transfer at the Metal Mould-Casting Interface. *British Foundryman*, 1976, 69: 274-278.
- [71] Ha, J., Cleary, P., Alguine, V., Nguyen, T., Simulation of die filling in gravity die casting using SPH and MAGMASoft. Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne Australia, 1999.
- [72] Invinkelried, T.H., Homberger, H., Mold fill simulation to improve the quality of a component. *Magnesium Industry*, 2001.
- [73] Miller, R.A., Prediction of part distortion in die casting. The Ohio State University 210 Baker Systems Building 1917 Neil Avenue Columbus, 43210, 2002.
- [74] Singh, D.P.K., Mallinson, G.D., Panton, S.M., Applications of optimization and inverse modeling to alloy wheel casting. *Numerical Heat Transfer*, 2002, PartA, 41, 741-756.
- [75] Pariona, M.M., Mossi, A. C., Numerical simulation of heat transfer during the solidification of pure iron in sand and mullite molds. *J. Of The Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng*, 2005, Vol. XXVII, No. 4 / 399.
- [76] Kang, C.G., Seo, P.K., Kang, S.S., The effect of injection velocity on liquid segregation and mechanical properties in arm part fabricated by semi-solid die casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 176, 32-40.
- [77] Verran, G.O., Mendes, R.P.K., Rossi, M.A., Influence of injection parameters on defects formation in die casting Al12-Si1-3Cu alloy, experimental results and numeric simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 179, 190-195.
- [78] Cleary, P.W., Ha, J., Prakash, M., Nguyen, T., 3-D SPH Flow predictions and validation for high pressure die casting of automotive components. *Applied Mathematical Modeling*, 2006, 30, 1406–1427.
- [79] Seo, P.K., Kim, D.U., Kang, C.G., The effect of the gate shape on the micro structural characteristic of the grain size of Al–Si alloy in the semi-solid die casting process. *Materials Science and Engineering*, 2007, A445-446, 20-30.
- [80] Seo, P.K., Kimb, H.C., Kang, C.G., Numerical integration design process to development of suspension parts by semi-solid die casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183, 18-32.
- [81] Shamasundar, S., Gopalakrishna, V., Manjunatha, B., Gravity Die Casting Process Die Design and Process Optimisation, ProSIM- AFTC, 326, III Stage IV Block, Basaveshwara Nagar, Bangalore 560079

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat Can NİŞANCI

Doğum Yeri ve Yılı : Gölcük, 1989

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : mcnisanci@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Çiğli Milli Piyango Anadolu Lisesi, 2007

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2013

Mesleki Deneyim

Vestel High End 2011-2013

Ege Aşınmaz Metal 2014

Valfsel Armatür Sanayi A.Ş. 2015- (devam ediyor)