

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÖNLÜ KATILAŞTIRILMIŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
KATILAŞMA PARAMETRELERİNİN GÖZENEKLİLİK
ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Selçuk ŞİRİN

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adem DEMİR**

Ocak 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÖNLÜ KATILAŞTIRILMIŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
KATILAŞMA PARAMETRELERİNİN GÖZENEKLİLİK
ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

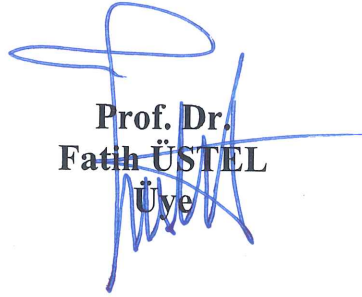
Selçuk ŞİRİN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

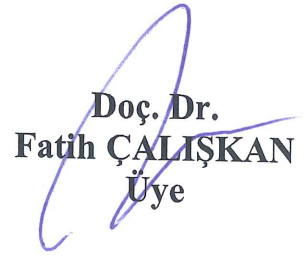
Bu tez 21/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



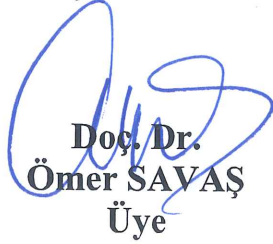
Prof. Dr.
Adem DEMİR
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Fatih ÜSTEL
Üye



Doç. Dr.
Fatih ÇALIŞKAN
Üye



Doç. Dr.
Ömer SAVAŞ
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Faruk VAROL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Selçuk ŞİRİN

21.01.2019

TEŞEKKÜR

Doktora çalıŐmalarım boyunca değerli deneyimlerimden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araŐtırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tım aŐamalarında yardımlarımı esirgemeyen, teŐvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren, laboratuvar imkanlarını sunan değerli danıŐmanım Prof. Dr. Adem DEMİR başta olmak üzere tım eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım tım hocalarıma teŐekkürlerimi sunarım.

Tez izleme toplantılarındaki tavsiyeleri, yönlendirmeleri ve çalışmaya katkıları nedeniyle tez izleme jrisindeki değerli hocalarıma, kontrollü katılaşma firının programlanmasındaki katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Murat KARABACAK'a, deney sisteminin kurulumundan tez teslimine kadar çeşitli aŐamalarda yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli çalışma arkadaŐlarım Ahmet SARI'ya, ArŐ. Gör. Engin GEPEK'e, ArŐ. Gör. Engin KOCAMAN'a ve ArŐ. Gör. Merve Gizem ÖZDEN'e tek tek teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon BaŐkanlıęına (Proje No: 2014-50-02-018) teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan, bana g veren, en büyük motivasyon kaynağım, canım ailem, hepimize Őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR TARAMASI	9
2.1. Gözeneklilik	9
2.1.1. Hidrojen gözeneği	12
2.1.2. Çekinti gözeneği	14
2.2. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları	16
2.3. Gözenek Oluşum Modellemesinde Kullanılan Yaklaşımlar	17
2.3.1. Kriter fonksiyonları metodu	18
2.3.1.1.Niyama kriteri	20
2.3.1.2.LCC kriteri	22
2.3.1.3. FCC kriteri.....	23
2.3.1.4. Boyutsuz Niyama kriteri	23
2.4. Yönlü Katılma Fırınları.....	27
2.4.1. Sabit fırın ve kalıp	27
2.4.2. Hareketli fırın veya kalıp	28
2.5. Regresyon Analizi	29

2.6. Yapay Sinir Ağları.....	30
------------------------------	----

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
3.1. Fırın ve Kalıp Tasarımı	33
3.2. Fırın Kurulumu	37
3.2.1. El İle kontrol	41
3.2.2. Bilgisayar destekli otomatik kontrol	42
3.3. Termal Analiz	45
3.4. Metal Ergitme ve Döküm.....	47
3.4.1. Sıvı metal temizleme ve kalite değerlendirme çalışmaları	48
3.4.2. Döküm çalışmaları	53
3.5. Katılaşma Parametrelerinin Hesaplanması	56
3.5.1. Sıcaklık gradyanının hesaplanması	57
3.5.2. Solidus hızının hesaplanması.....	58
3.5.3. Bölgesel katılaşma süresinin hesaplanması	60
3.6. Metalografik İşlemler	62
3.7. Mikroyapı İncelemesi	63
3.7.1. İkincil dendrit kolları arası mesafenin hesaplanması	64
3.8. Gözeneklilik ölçümü.....	65
3.8.1. Yoğunluk ölçümü	66
3.8.2. Görüntü analizi metodu ile gözeneklilik ölçümü	68
3.8.3. Bilgisayarlı tomografi taraması	70

BÖLÜM 4.

DENEYSEL BULGULAR	72
4.1. Termal Analiz Sonuçları	72
4.2. Sıvı Metal Kalite Değerlendirme Sonuçları	73
4.3. Katılaşma Parametreleri Sonuçları	78
4.4. Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	83
4.4.1. İkincil dendrit kolları arası mesafe sonuçları	84
4.4.2. SEM analizi sonuçları	92

4.5. Gözeneklilik Sonuçları	94
4.5.1. Yoğunluk ölçüm metoduna göre gözeneklilik sonuçları	95
4.5.2. Görüntü analiz metoduna göre gözeneklilik sonuçları	95
4.6. Matematiksel Model Oluşturma	103
4.6.1. Regresyon analizi uygulaması	105
4.6.2. YSA uygulaması.....	108
4.7. Model Doğrulama	112
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	118
KAYNAKLAR.....	124
ÖZGEÇMİŞ	131



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

%P	: Gözeneklilik oranı
μ	: Sıvının viskozitesi
BD-SEA	: Bilgisayar destekli soğuma eğrisi analizi
G	: Sıcaklık gradyanı
LM	: Levenberg-Marquardt algoritması
m_h	: Numunenin havadaki ağırlığı
m_s	: Numunenin sudaki ağırlığı
MYS	: Mutlak yüzde sapma
P_A	: Atmosferik basınç
PFA	: Termokapıl bağlantı hatası
P_g	: Gaz basıncı
P_H	: Hidrojen basıncı
PID	: Oransal-integral-türevsel geri besleme denetleyicisi
PLC	: Programlanabilir mantıksal denetleyici
P_o	: Ortam basıncı
P_R	: Direnç basıncı
P_s	: Yüzey geriliminden kaynaklanan basınç
R	: Soğuma hızı
R^2	: İstatistiksel anlamlılık değeri
RPT	: Düşürülmüş basınç testi (Reduced Pressure Test)
t_f	: Bölgesel katılaşma süresi
V_s	: Katı-sıvı arayüzey ilerleme(Solidus) hızı
$W/m^2\text{°K}$: Termal iletkenlik birimi
Xray-CT	: Bilgisayarlı tomografi taraması
Y.E.	: Yoğunluk endeksi
YSA	: Yapay sinir ağları

β	: Çekinti oranı
ΔP_{cr}	: Kritik basınç düşüşü
ΔP_{MZ}	: Maşî bölgesindeki basınç düşüşü
ΔT_0	: Alaşımın katılaşıma aralığı
λ_2	: İkincil dendrit kolları arası mesafe
ρ_a	: Atmosfer altında katılaştırılan numunenin yoğunluğu
ρ_d	: Deneysel yoğunlu
ρ_l	: Sıvı metal yoğunluğu
ρ_s	: Katının yoğunluğu
ρ_t	: Teorik yoğunluk
ρ_v	: Vakum altında katılaştırılan numunenin yoğunluğu
σ_{LV}	: Sıvı-gaz yüzey gerilimi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dünyada yaygın kullanılan metallerin ortalama talep artış oranları	1
Şekil 1.2. Çin'de şehirleşmeye bağlı olarak artan metal talepleri	2
Şekil 1.3. Sektörel bazda alüminyum tüketimi (bin ton)	3
Şekil 1.4. 2012 yılı itibariyle otomobilde alüminyum kullanım oranı ve dağılımı	4
Şekil 1.5. Otomobilde kullanılan alüminyum parçalarda yıllık artış	4
Şekil 1.6. Otomobillerde, günümüzde kullanılan ve gelecekte öngörülen alaşımın oransal dağılımı	5
Şekil 1.7. Metal şekillendirme yöntemlerine göre alüminyum ürünlerin kullanıldığı yerler	5
Şekil 1.8. 12 aylık gözlem sonunda elde edilen döküm hataları verilerinin dağılımı	7
Şekil 2.1. a) Gaz, b) çekinti gözeneği örnekleri	10
Şekil 2.2. a) İnterdendritik sıvı akışı, b) Yarı-Katı bölgede bölgede metalostatik basıncın azalması, c) Sıvıdaki H gazı konsantrasyonu ve çözünübilirlik sınırı (Pequet ve ark., 2002)	11
Şekil 2.3. Bir hidrojen gözeneğinin oluşumunu destekleyen ve karşı koyan kuvvetlerin şematik gösterimi.	14
Şekil 2.4. Çekinti rejimleri.....	15
Şekil 2.5. Temel besleme mekanizmaları	16
Şekil 2.6. Besleyici etki mesafesinden uzak ve uç etkisi altında kalmayan yarı - sonsuz bölge	19

Şekil 2.7. Deneysel olarak belirlenen G ve t_f arasındaki ilişki (Niyama ve ark., 1982).....	21
Şekil 2.8. Niyama kriterine göre çelik alaşımlarında çekinti riski	22
Şekil 2.9. LCC kriterine göre gözenekliliğin değişimi	23
Şekil 2.10. Tek yönlü katılaşmada yarı-katı bölgenin şematize edilmesi.....	25
Şekil 2.11. Boyutsuz Niyama Kriterine göre üç farklı malzeme için gözenek hacmi tahmini	26
Şekil 2.12. Sabit fırın ve kalıp prensibiyle çalışan yönlü katılaşma sistemi.....	28
Şekil 2.13. Bridgman yönlü katılaşma düzeneği (Kaya ve ark., 2009).....	29
Şekil 3.1. Tek yönlü kontrollü katılaşma fırını bölümleri	33
Şekil 3.2. İlk etapta modelleme çalışmalarının; a) Sıcaklık gradyanı, b) Mikroporozite sonuçları.....	34
Şekil 3.3. Silindir kesit ile kare kesit arasındaki katılaşma zamanı benzerlikleri	35
Şekil 3.4. İkinci etap çalışmalarında kullanılan, a) Model ölçüleri, b) Bakır, c) Grafit termo-fiziksel özellikleri.....	35
Şekil 3.5. Tek yönlü kontrollü katılaşma fırını tasarımı	36
Şekil 3.6. Fırın detayları.....	36
Şekil 3.7. Kalıp, soğutucu ve termokapıl detayları	37
Şekil 3.8. a) Tasarlanan ve b) Üretilen fırın	38
Şekil 3.9. Enda ETC-9420 PID sıcaklık kontrol cihazı	38
Şekil 3.10. a) Siemens S7-1200 PLC cihazı ve b) CM1241 Modbus Haberleşme Cihazı	39
Şekil 3.11. PID sıcaklık kontrol cihazlarıyla PLC ve katı hal röleleri arasındaki bağlantıların düzenlenmesi	40
Şekil 3.12. Kontrollü katılaştırma öncesi metal ergitmek için kullanılacak elektrik direnç ergitme fırını	40
Şekil 3.13. Tek bir bölgenin sıcaklık kontrolünün sağlanması	41

Şekil 3.14. Fırının her bir bölgesinin ayrı bir sıcaklıkta tutulması.....	42
Şekil 3.15. Tiaportal yazılımı arayüzü	43
Şekil 3.16. Bilgisayar destekli otomatik kontrol test sonuçları	43
Şekil 3.17. Fırın kontrol arayüzünün son hali	44
Şekil 3.18. SEA için hazırlanılan kalıp	46
Şekil 3.19. Anlık olarak izlenen ve kaydedilen soğuma eğrisi verileri.....	46
Şekil 3.20. Etial 171 alaşımına ait sıcaklık-zaman eğrisi	47
Şekil 3.21. Alüminyum içinde hidrojen çözünürlüğü (Campbell, 2015).....	49
Şekil 3.22. Sıvı metal içerisine azot gazı üfleme işlemi	49
Şekil 3.23. RPT Test düzeneği	51
Şekil 3.24. Regresyon analizi adımları	52
Şekil 3.25. Kokil kalıp boyası ile kaplanmış kalıp	53
Şekil 3.26. Termokapıl bağlantısında kopukluk olması durumunda görülen hata	54
Şekil 3.27. Kalıp üzerine yerleştirilen döküş haznesi	55
Şekil 3.28. Döküm sonrası açılan kalıbın ve kontrollü katılaşma numunesinin görüntüsü	55
Şekil 3.29. Kontrollü katılaştırılmış numunenin soğuma eğrileri üzerinden sıcaklık gradyanı hesaplanması	58
Şekil 3.30. Kontrollü katılaştırılmış numunenin soğuma eğrileri üzerinden solidus hızının hesaplanması	60
Şekil 3.31. Kontrollü katılaştırılmış numunenin soğuma eğrileri üzerinden bölgesel katılaşma süresinin hesaplanması	61
Şekil 3.32. Yoğunluk ve mikroyapı incelemeleri için kesilen numune kesitleri	62
Şekil 3.33. Zımparalama aşamaları sonrasında yüzey pürüzlüklerinin giderilmesi (Berkdemir, 2009).....	63
Şekil 3.34. Gözenek oluşumunun şematik görüntüsü (Melo ve ark., 2005).....	64
Şekil 3.35. İkincil dendrit kolları arası mesafenin hesaplanması	65

Şekil 3.36. Yoğunluk ölçümlerinin yapıldığı Arşimet düzeneği	67
Şekil 3.37. a) Teorik yoğunluk numunesinin ölçüleri, b) Hızlı katılaştırma düzeneği	67
Şekil 3.38. Teorik yoğunluk ölçümü yapılan hızlı katılaştırma numunesi	68
Şekil 3.39. Gözeneklilik incelemesi için farklı kesitlerden alınan mikroyapı görüntüleri	69
Şekil 3.40. Farklı kesitlerden alınan mikroyapı görüntülerinin birleştirilmesi	70
Şekil 3.41. Gözenekli alanlarla dolu alanların ayırt edilmesi	70
Şekil 4.1. Soğuma eğrisi ve birinci türevi.....	72
Şekil 4.2. Sıcaklık-birinci türev eğrisi	73
Şekil 4.3. Vakum altında katılaştırılan RPT numunelerinin taranmış görüntüsü	74
Şekil 4.4. Atmosfer altında katılaştırılan numune ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki.....	75
Şekil 4.5. Vakum altında katılaştırılan numune ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki.....	77
Şekil 4.6. Birinci deney setinden elde edilen soğuma grafikleri	79
Şekil 4.7. İkinci deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri	80
Şekil 4.8. Üçüncü deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri	80
Şekil 4.9. Dördüncü deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri.....	81
Şekil 4.10. Beşinci deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri.....	82
Şekil 4.11. Altıncı deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri.....	82
Şekil 4.12. a) 1 numaralı, b) 2 numaralı, c) 3 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri	85
Şekil 4.13. a) 4 numaralı, b) 5 numaralı, c) 6 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri	86
Şekil 4.14. a) 7 numaralı, b) 8 numaralı, c) 9 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri	87

Şekil 4.15. a) 10 numaralı, b) 11 numaralı, c) 12 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri	88
Şekil 4.16. a) 13 numaralı, b) 14 numaralı, c) 15 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri	89
Şekil 4.17. a) 16 numaralı, b) 17 numaralı, c) 18 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri	90
Şekil 4.18. İDKA ile bölgesel katılma süresi arasındaki ilişki	91
Şekil 4.19. 100 büyütmede çekilerek elementel haritalama analizi yapılan 6 numaralı numuneye ait, a) SEM görüntüsü, b) Al içeren bölgeler, c) Si içeren bölgeler, d) Mg içeren bölgeler.....	92
Şekil 4.20. Taranan alana ait EDX spektrumları	93
Şekil 4.21. 17 numaralı numune üzerinden alınan gaz gözeneği görüntüsü	94
Şekil 4.22. 17 numaralı numune üzerinden alınan çekinti gözeneği görüntüsü	94
Şekil 4.23. a) 1 numaralı, b) 2 numaralı, c) 3 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları.....	96
Şekil 4.24. a) 4 numaralı, b) 5 numaralı, c) 6 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları.....	97
Şekil 4.25. a) 7 numaralı, b) 8 numaralı, c) 9 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları.....	98
Şekil 4.26. a) 10 numaralı, b) 11 numaralı, c) 12 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları.....	99
Şekil 4.27. a) 13 numaralı, b) 14 numaralı, c) 15 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları.....	100
Şekil 4.28. a) 16 numaralı, b) 17 numaralı, c) 18 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları.....	101
Şekil 4.29. Yoğunluk ölçüm ve görüntü analiz sonuçlarının kıyaslanması	102
Şekil 4.30. a) G ile Vs'nin, b) Vs ile tf'nin, c) G ile tf'nin gözenekliliğe etkisi	104

Şekil 4.31. Verilerin analiz programına girilmesi ve tanımlanması.....	105
Şekil 4.32. Gözeneklilik tahmininde kullanılan matematiksel model	106
Şekil 4.33. Girdiler ve çıktının programa tanıtılması.....	108
Şekil 4.34. Yapay sinir ağları mimarisi.....	109
Şekil 4.35. Ağın öğrenme süreci ile hata arasındaki ilişki.....	110
Şekil 4.36. Ağın regresyon eğrileri ve hesaplanan R değerleri	111
Şekil 4.37. Doğrulama deneyinde kullanılan modelin, a) teknik resmi, b) montaj görünümü, c) döküm hali.....	113
Şekil 4.38. Denklemin Custom Formula menüsüne girilmesi.....	114
Şekil 4.39. a) Bu çalışmadan üretilen formüle göre, b) FCC kriterine göre, c) Niyama kriterine göre gözeneklilik sonuçları	115
Şekil 4.40. a) Gerçek numunenin kesit inceleme düzlemleri, b) AA düzlemine, c) BB düzlemine ait gözeneklilik sonuçları.....	116
Şekil 4.41. Taranmış numunenin, a) genel, b) üstten, c) önden görünüşü.....	117
Şekil 5.1. a) AZ91 alaşımında katılaşma zamanı İDKA arasındaki ilişki (Cáceres ve ark., 2002), b) A319 alaşımında katılaşma zamanının İDKA ve mekanik özelliklere etkisi (Boileau ve Allison, 2003)	119
Şekil 5.2. Al-7Si-0,3Mg alaşımında, a) Solidus hızının, b) Katılaşma zamanının gözenek oluşumuna etkisinin incelenmesi (Lee ve ark., 1990).....	121
Şekil 5.3. Sıcaklık gradyanı ile gözenek oranı arasındaki ilişki (Kuo, 2012)	121
Şekil 5.4. Deneysel sonuçlarla modelleme sonuçlarının karşılaştırılması	122

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Gözenek tahmininde kullanılan kriter fonksiyonlar	20
Tablo 3.1. Grafit ve CuCr1Zr alaşımlarının termal iletkenlik değerleri	37
Tablo 3.2. Etial 171 alaşımının spektral analiz sonuçları	48
Tablo 4.1. RPT numunelerine ait yoğunluk ve yoğunluk endeksi değerleri	74
Tablo 4.2. Atmosfer altında katılaştırılan numuneler için varyans analizi tablosu	76
Tablo 4.3. Vakum altında katılaştırılan numuneler için varyans analizi tablosu	78
Tablo 4.4. Ölçülen katılma parametreleri sonuçları	83
Tablo 4.5. Bölgesel katılma süresi ve İDKA mesafeleri sonuçları	91
Tablo 4.6. Taranan alandaki elementlerin ağırlıkça oranları	93
Tablo 4.7. Numunelerin havada-suda ölçülen ağırlıkları ve yüzde gözeneklilik değerleri	95
Tablo 4.8. Görüntü analiz metoduna göre gözeneklilik sonuçları	102
Tablo 4.9. Deneylerden elde edilen tüm veriler	103
Tablo 4.10. Regresyon analizinde iterasyon yöntemiyle en uygun katsayıların bulunması	107
Tablo 4.11. Regresyon analizinin varyans analizi tablosu	107
Tablo 4.12. Gerçek gözeneklilik sonuçlarıyla modelleme tahminlerinin kıyaslaması	112

ÖZET

Anahtar kelimeler: Alüminyum döküm, yönlü katılaşma, gözeneklilik, yapay sinir ağları, regresyon analizi

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluklu olması, yüksek korozyon direnci, mukavemetinin arttırılabilir olması elektriksel ve ısı iletkenliklerinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı günümüzde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle son yirmi yılda otomotiv endüstrisinde araçların ağırlıklarının azaltılması ve bunun sonucu olarak performans artışı, yakıt tasarrufu sağlanması gibi avantajlardan dolayı alüminyum döküm ürünlerinin kullanımı ciddi oranda artmıştır.

Döküm yöntemiyle üretilen ürünlerde en sık karşılaşılan problemlerden biri olan gözenek oluşumu malzemeleri kullanılmaz hale getirmektedir. Yönlü katılaşmada ısı akışı tek yönlü olduğundan, bu yöntem ile sıcaklık gradyanı, bölgesel katılaşma süresi, solidus hızı gibi katılaşma parametrelerinin, mikroyapıya ve gözenek oluşumuna etkisi incelenebilmektedir.

Bu çalışmada, tek yönlü katılaşmaya uygun olarak tasarlanan bir fırın vasıtasıyla farklı katılaşma parametreleri (G , V_s ve t_f) değerlerinde katılaştırılan Etial 171 alaşımında, katılaşma parametrelerinin gözenek oluşumuna etkileri incelenmiştir. Alaşımın karakterizasyonunda SEM ve spektral analiz yöntemleri kullanılmıştır. Katılaşma parametreleri değerlerinin hesaplanmasında ise kritik noktaların ölçümü için DTA ve soğuma eğrisi analizi tekniklerinden yararlanılmıştır. Numunelerde oluşan gözenek oranının ölçülmesinde Arşimet prensibine göre yoğunluk analizi metodu ve mikroskopik görüntü analiz metotları kullanılmıştır. Ölçülen en yüksek gözeneklilik oranı %1,467 ve en düşük gözeneklilik oranı %0,6049 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra bu parametrelerin gözeneklilikle ilişkisini anlamlandırabilmek amacıyla yapay sinir ağları ve regresyon analizi tekniklerinden yararlanılmıştır. Son olarak, regresyon analizi yöntemiyle üretilen matematiksel model, döküm simülasyon programında tanımlanmış ve modelin doğruluğunu tespit etmek amacıyla kum kalıba doğrulama numunesi dökülmüştür. Doğrulama numunesinde gözenekli bölgelerin tespiti için mikroskopik görüntü analizi ve bilgisayarlı tomografi taraması yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde matematiksel model, Niyama kriteri, FCC kriteri ve doğrulama numunesinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmış ve Niyama ile FCC kriterine göre doğrulama numune daha uyumlu sonuçlar üretmiştir.

THE EFFECT OF SOLIDIFICATION PARAMETERS ON POROSITY IN DIRECTIONALLY SOLIDIFIED ALUMINIUM CASTING ALLOYS

SUMMARY

Keywords: Aluminum casting, directional solidification, porosity, artificial neural networks, regression analysis

Aluminium alloys are widely used because of their low density, high corrosion resistance, wide range of strength, high electrical and thermal conductivity. Within the last 20 years, in order to increase fuel economy, performance and lower the weight automotive components aluminium is selected and used by the designers and engineers.

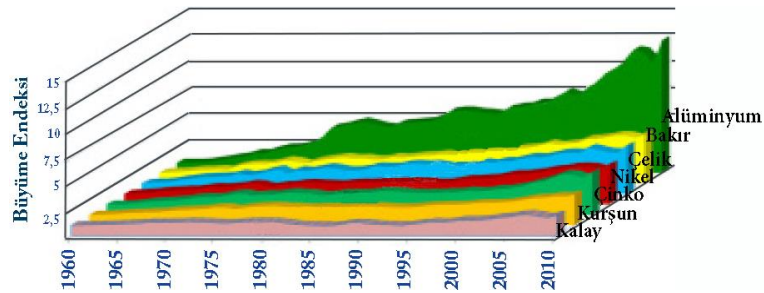
Porosity generation is the most common problem in aluminium casting which turns the parts into scrap. In directional solidification heat transfer is unidirectional that allows researchers to examine the effect of parameters like temperature gradient, local solidification time, solidus velocity on microstructure.

In this study, the observation of porosity formation in AlSi10Mg (Etial 171) alloy solidified with different solidification parameters (G , V_s and t_f) with the furnace designed for directional solidification. Characterisation of the alloy has been key it out by SEM-EDS and spectral analysis methods. DTA and cooling curve analysis techniques have been used to obtain critical points for calculation of the parameters of solidification values. In order to measure the the sample porosities, density measurement were performed according to Archimedes' principle and microscopic image analysis method by ImageJ. Maximum measured porosity is %1,467 and minium measured porosity is %0,6049. Artifical Neural Network and regression analysis techniques have been used in order to ensure the relationship between the solidification parameters and the porosity results. Lastly, the mathematical model which generated by regression analyses was defined the casting simulation program. A verification sample was poured in a sand mould to ensure and determine the accuracy of the model. Determination of porosity region from the verification samples have been used by image analysis and computational tomography scan. The results from the mathematical model have been compared with Niyama Criterion, FCC criterion and verification sample. The mathematical model obtained verification sample results in this study is better than Niyama and FCC criterion.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Alüminyum, yalnızca 200 yıllık geçmişe sahip olan “genç” bir metaldir. Jules Verne 1865 tarihinde yazdığı “Ay’a Yolculuk” adlı kitabında alüminyumu, gümüş beyazlığında, altın dayanıklılığında (korozyona direnç), demir gibi mukavemetli, cam kadar hafif olarak tanımlamıştır. Alüminyum keşfedildiği dönem itibariyle altın ve platinden daha değerliydi, eğer maliyet gibi hayati bir problem olmasaydı hafif metaller çağı o zamanlarda başlamış olacaktı. Bilim adamlarının çabalarının bir sonucu olarak, günümüzde alüminyumun çok geniş bir kullanım yelpazesi bulunmaktadır (Eskin, 2008).

Günay (2013), Dünya’daki yeni eğilimler ve Türkiye’de alüminyum döküm sektörünün geleceğiyle alakalı olarak yayınladığı teknik yazısında, yaygın olarak kullanılan metallerin son 50 yılda artan talebe bağlı olarak üretim büyüme endeksini paylaşmıştır (Şekil 1.1.).

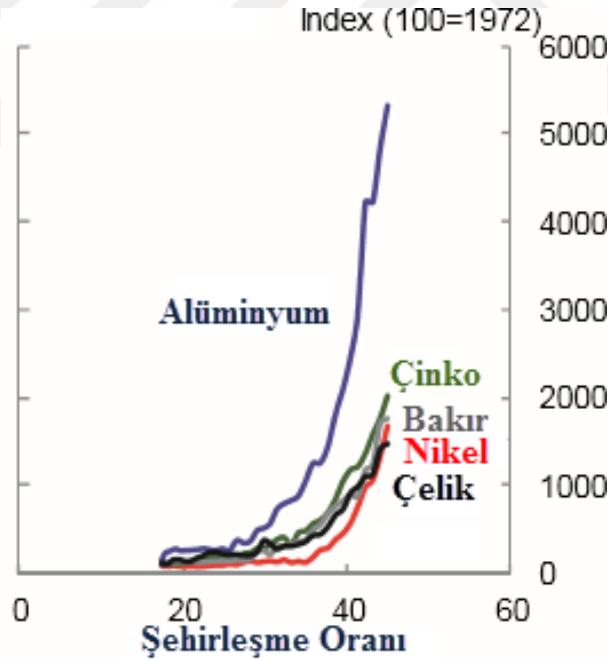


Şekil 1.1. Dünyada yaygın kullanılan metallerin ortalama talep artış oranları

Şekil incelendiğinde, son 50 yıllık dönemde alüminyumda yaklaşık 12,7 kat, çelikte ise 4 kat talep artışı olduğu tespit edilmiştir. Alüminyumda görülen bariz talep artışının

sebepleri olarak, özellikle otomotiv endüstrisinde hafif araç konseptine yönelimle birlikte enerji verimliliği, karbon salınımında azalma gereksinimi, alüminyumun geri kazanımının kolay oluşu, korozif ortamlara karşı yüksek dirence sahip oluşu, mekanik ve fiziksel özelliklerin yüksek oluşu gösterilmektedir (Yılmaz, 2013).

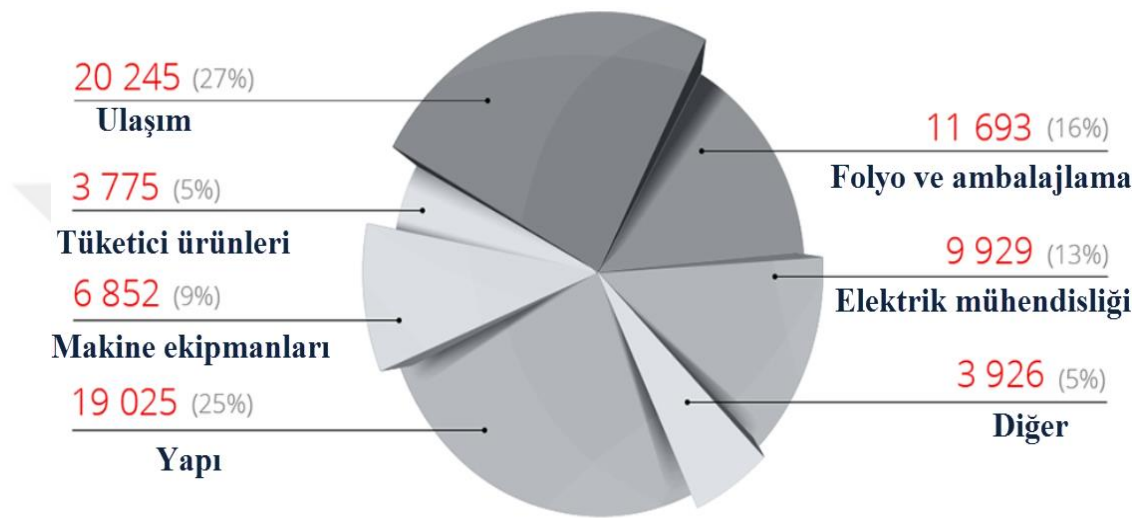
Küresel emtia piyasalarında Çin'in yükselişi üzerine yapılan bir araştırmada (Coates ve Luu, 2012), 1972 yılından bu yana Çin'deki şehirleşme oranının artmasına bağlı olarak alüminyum talebinin diğer metallere göre hızla arttığı tespit edilmiştir (Şekil 1.2.). Araştırmacılar, alüminyumda görülen hızlı talep artışını, şehirleşmeye bağlı makine, otomotiv, elektronik ve ev eşyalarına talep ile birlikte Çin'in bu sektörlerde büyük bir ihracatçı konumunda olmasına bağlamaktadır.



Şekil 1.2. Çin'de şehirleşmeye bağlı olarak artan metal talepleri

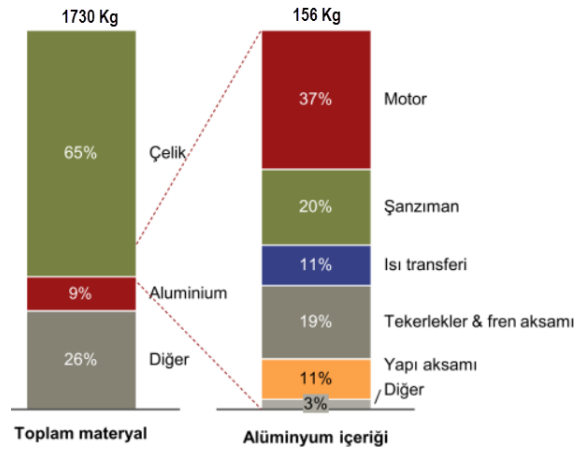
Çin'de altyapı ve üretim faaliyetlerinin bir sonucu olarak metal talebi GSYH büyüme hızını geçmiştir. Geçtiğimiz on yıllık dönemde alüminyum talebi yıllık ortalama %16 artmıştır. Bu durum daha önce sanayileşmiş ekonomilerin kentleşme süreçleriyle

uyumlu gözükmektedir. Günümüzde küresel alüminyum pazarı Çin ve dünyanın geri kalanı şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Mevcut durumda Çin dünyanın en büyük alüminyum üreticisi ve tüketicisi konumundadır. 2014 yılı verilerine göre alüminyum tüketimini sektörel bazda inceleyecek olursak, en çok tüketilen ilk iki sektör sırasıyla, ulaşım (%27) ve yapı (%25) sektörleridir (Şekil 1.3.).



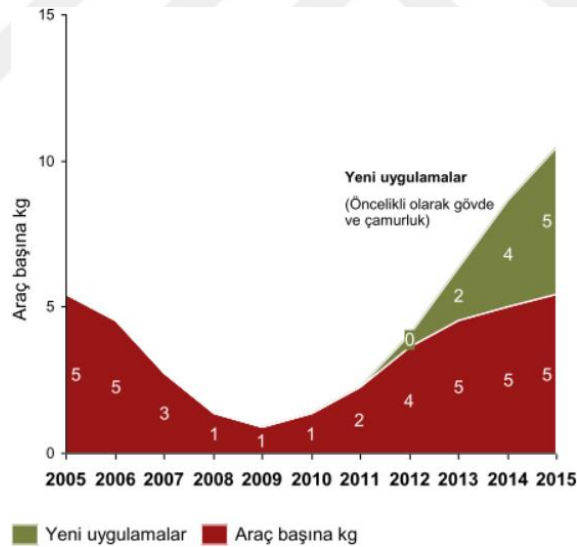
Şekil 1.3. Sektörel bazda alüminyum tüketimi (bin ton)

Son dönemlerde artan çevresel kaygılardan dolayı hükümetlerin aldığı kanuni tedbirler ve artan enerji fiyatları, otomotiv üreticilerini daha hafif, enerji verimliliği yüksek araç tasarlama arayışına itmiştir. (Kaufman ve Rooy, 2004; De Obaldia, 2007). Yüksek spesifik mukavemet, yüksek korozyon direnci, mukavemetinin arttırılabilir olması, düşük ergime sıcaklığı ve akışkanlık karakteristiğine bağlı olarak yüksek dökülebilirliğe sahip olması, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliğe sahip olması gibi özelliklerinden dolayı başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde alüminyum alaşımlarına ilgi her geçen gün artmaktadır (Lee ve ark., 2001; Sabau ve Viswanathan, 2002; Campbell, 2015). 2012 yılı verilerine göre (ATKearney, 2016), binek otomobillerin ortalama %9'u alüminyum parçalardan üretilmektedir (Şekil 1.4.).



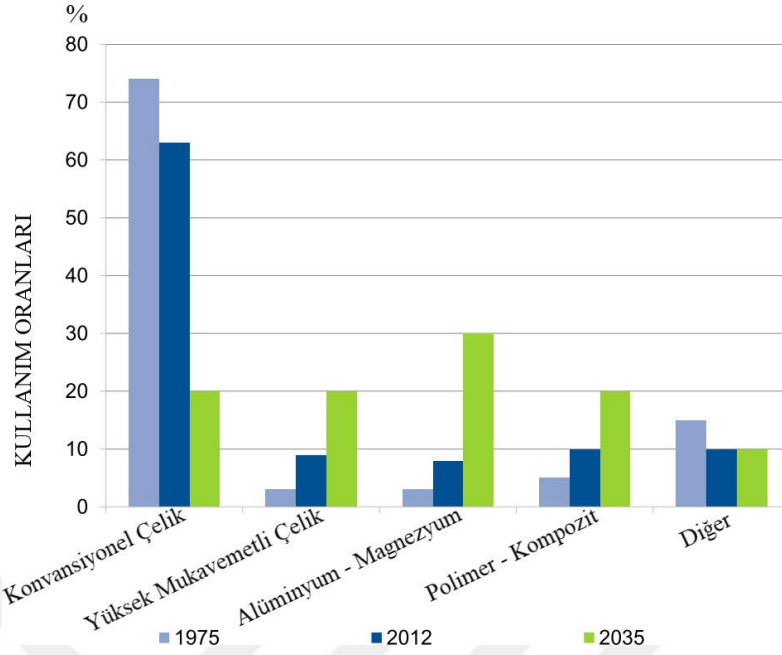
Şekil 1.4. 2012 yılı itibariyle otomobilde alüminyum kullanım oranı ve dağılımı

Bununla birlikte her geçen yıl otomobillerde mevcut alüminyum parçalarda hafifletme çalışmaları devam ederek gövde ve çamurlukta da yeni uygulamalarda araç hafifletme çalışmaları ivme kazanmaktadır (Şekil 1.5.).



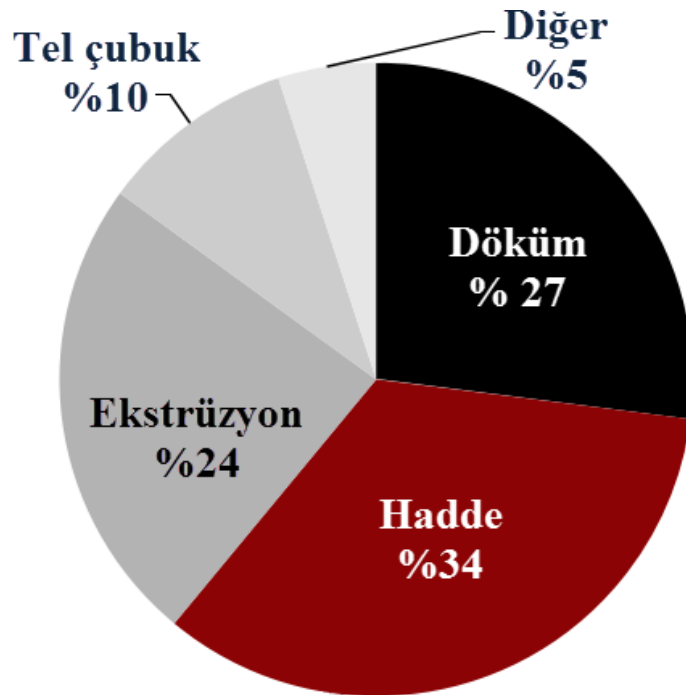
Şekil 1.5. Otomobilde kullanılan alüminyum parçalarda yıllık artış

Günümüzde, otomobillerde en çok kullanılan malzeme konvansiyonel çelik olmakla birlikte, 20 yıl içerisinde bu durumun değişeceği ve konvansiyonel çeliklerin yerini alüminyum-magnezyum gibi hafif metallerin alacağı öngörülmektedir (Büchner ve Gloßner, 2015) (Şekil 1.6.).



Şekil 1.6. Otomobillerde, günümüzde kullanılan ve gelecekte öngörülen alaşımların oransal dağılımı

Metal şekillendirme yöntemlerine göre dünya çapında en çok tüketilen alüminyum ürünleri %34 ile en çok hadde ve yassı ürünlerdir (Mayr, 2010). İkinci sırada ise %27 ile döküm yöntemiyle üretilen ürünler yer almaktadır (Şekil 1.7.).



Şekil 1.7. Metal şekillendirme yöntemlerine göre alüminyum ürünlerin kullanıldığı yerler

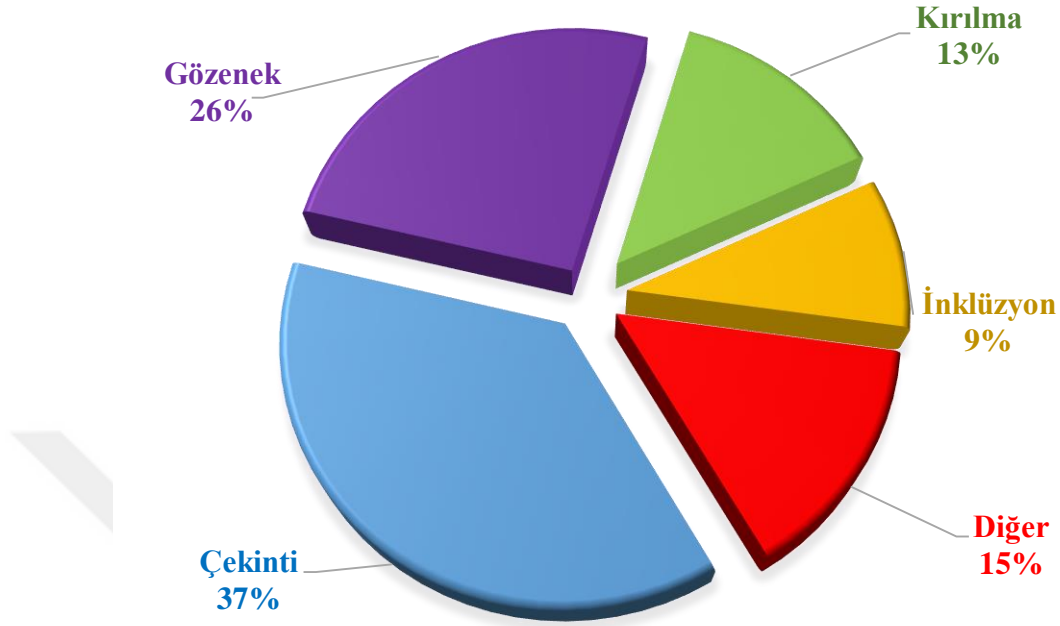
Yukarıdaki şekilde belirtilen döküm haricindeki proseslerde ilk ürün (hammadde) döküm yöntemiyle üretilmektedir. Diğer bir deyişle kullanılan alüminyum alaşımları doğrudan veya dolaylı olarak döküm yöntemi ile üretilmektedir.

Şu anda dünya üzerinde kullanılan 300'den fazla standart alüminyum döküm alaşımı mevcuttur. Bu çeşitlilik çok farklı karakteristik özelliklere sahip alüminyum döküm ürünleri üretilebilmesine olanak tanır. Alüminyum alaşımları içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip olan alaşım grubu Al-Si alaşımlarıdır (Kaufman ve Rooy, 2004; Campbell, 2015).

Döküm işlemi, eritilmiş metalin yerçekimi veya basınç etkisiyle kalıp boşluğuna doldurulması ve burada katılaştırılması olarak tanımlanmaktadır (Groover, 2010). Döküm yöntemi diğer üretim yöntemlerine kıyasla seri imalata ve düşük maliyetlerle ürün üretimine daha uygun bir yöntemdir. Diğer yöntemlerle birkaç parçanın birbirine montajını gerektiren kompleks bir ürünü döküm yöntemiyle tek parça halinde üretmek mümkündür (Cantor ve O'Reilly, 2003). Döküm yöntemiyle üretilecek olan parçalarda boyut ve ağırlık sınırlaması yoktur. Bu ve bunun gibi birçok avantajı sayesinde döküm yoluyla üretim, imalat yöntemleri arasında büyük bir öneme sahiptir (Beeley, 2001; Muenprasertdee, 2007).

Döküm yönteminde kalıp içindeki sıvı haldeki metal katılırken hacimsel olarak daralır. Bu daralma sonucunda parçalarda çekinti adını verdiğimiz döküm boşlukları oluşur ve bu boşluklar parçayı kullanılamaz hale getirir (Fredriksson ve Akerlind, 2006). Sharma ve arkadaşları (2016), alüminyum jant üreticisi olan bir firmada 12 ay boyunca müşteri tarafından reddedilen veya hatalı üretilen döküm parçaları inceleyerek hata tiplerine göre raporlamıştır. 12 ay sonunda elde edilen sonuçlar Şekil 1.8.'de verilmiştir.

Bu sonuçlara göre oluşan hataların %37'si çekinti, %25'i ise gözenek kaynaklıdır.



Şekil 1.8. 12 aylık gözlem sonunda elde edilen döküm hataları verilerinin dağılımı

Kum dökümhanesinde yapılan benzer bir çalışmada çekintiye bağlı hataların oranı %27, kırılmaya bağlı hataların oranı %18 çıkmıştır (Maneesh ve George, 2015). Kırılmaya bağlı oluşan hataların gözle görülemeyecek boyutlardaki gözenekleşmeden kaynaklanabileceği düşünüldüğünde hataların büyük bir kısmının çekinti ve gözenek kaynaklı olduğu söylenebilir.

Döküm yöntemiyle üretilen parçalarda en sık karşılaşılan problemlerden olan çekinti ve gözenek oluşumu malzemeleri kullanılmaz hale getirmektedir (Patel, 2013). Yönlü katılaşma, porozite oluşumunu incelemek için yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir. Yönlü katılaşmada ısı akışı tek yönlü olduğundan, bu yöntem katılaşma parametrelerinin, mikroyapıya ve porozite oluşumuna etkisini incelemek için kullanılan güçlü bir tekniktir (Whitesell, 2002). Regresyon analizi, bağımlı bir değişken ile (mikroyapı parametreleri) bağımsız değişkenler (katılaşma parametreleri)

arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve bu ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Shang ve ark., 2004).

Bu çalışmada, ticari olarak yaygın kullanım alanına sahip Etial 171 (AlSi10Mg) alaşımı kontrollü bir şekilde katılaştırılmış ve katılma parametrelerinin (bölgesel katılma süresi, solidus hızı, sıcaklık gradyanı) mikroyapı parametrelerine (İkincil dendrit kolları arası mesafe, porozite oluşumu) etkileri incelenmiştir. Daha sonra regresyon analizi vasıtasıyla parametreler arasında bir bağıntı kurularak matematiksel model oluşturulmuştur. Son olarak, oluşturulan matematiksel model ticari bir döküm simülasyon yazılımında test edilerek model doğrulaması yapılmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

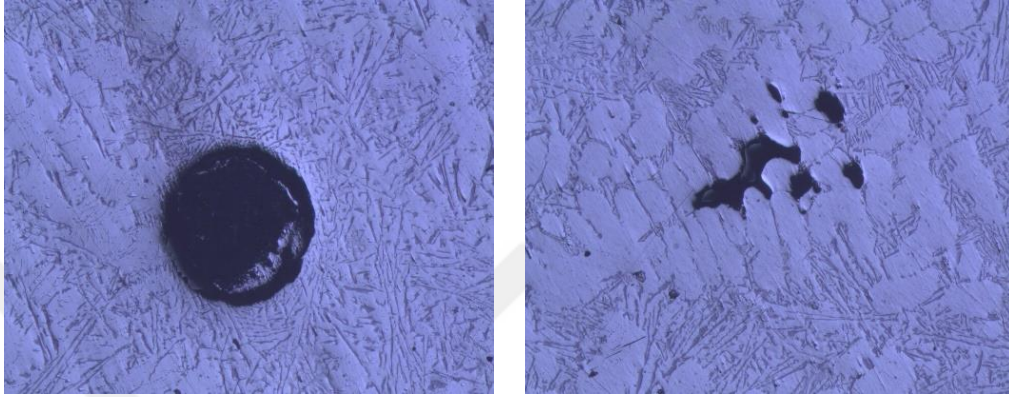
2.1. Gözeneklilik

Döküm yöntemi, karmaşık şekilli ve seri imalat parça üretimine uygun bir yöntem olarak ciddi ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Katılma esnasında meydana gelen gözenek oluşumu ise, mekanik özelliklere zarar verdiği, yorulma performansını ve toplam uzamayı azalttığı için, büyük bir dezavantajdır (Lee ve Hunt, 1997). AS7G03 (AlSi7Mg0.3) döküm alaşımında, 1% hacimsel oranlı porozite, gözenekleri olmayan benzer bir mikro yapıya sahip aynı alaşım ile karşılaştırıldığında, yorulma ömründe %50 ve yorulma dayanımında %20 azalmaya yol açabilir (Buffière ve ark., 2001).

Gözenek, en inatçı ve döküm kullanıcılarının en yaygın olarak yakındığı hatadır. Dökümlerdeki gözenek, kalite ve güvenilirlik konusunda yaygın müşteri endişelerine sebep olmaktadır. Poroziteyi kontrol altına almak, kaynaklarını ve sebeplerini anlamaya bağlıdır. Ürün kalitesi, parça performansı ve tasarım güvenilirliğinde önemli iyileştirmeler, dökümlerdeki gözenekler kontrol altına alınabilirse veya elimine edilebilirse, gerçekleştirilebilir.

Alüminyum alaşımları, tipik olarak yerini almak istedikleri çelik ve dökme demir alaşımlarının ağırlıkça yaklaşık üçte biri kadar oldukları için, yapısal parçalarda ve otomobillerin ağırlığını azaltmada önemli avantaj sağlar. Buna rağmen, yapısal parçalar, özellikle şase ya da süspansiyon elemanları aksamalarının mekanik özelliklerinde daha yüksek performans gereksinimi vardır. Dökümlerin mekanik

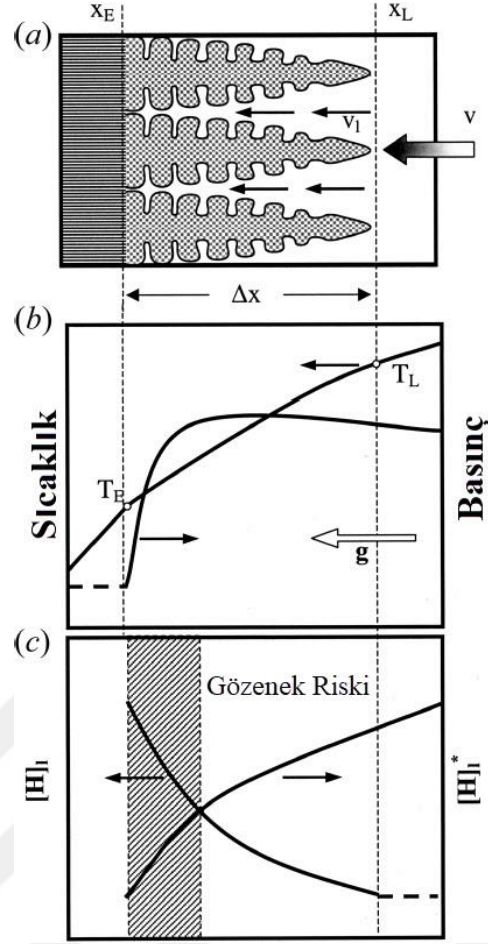
özelliklerinde (süneklik ve yorulma ömrü başta olmak üzere) düşüşe yola açan en önemli faktör, gözenek oluşumudur. Döküm terminolojisinde sıkça kullanılan gözenek, genellikle ya “hidrojen-gaz” (Şekil 2.1.a) ya da “çekinti” gözeneği (Şekil 2.1.b) olarak tanımlanır (Dispınar ve Campbell, 2004).



Şekil 2.1. a) Gaz, b) çekinti gözeneği örnekleri

Hidrojen gözeneği, genellikle yuvarlak, izole olmuş ve iyi dağılmış gözeneklere verilen isimdir. Birbirine bağlı veya kümeler şeklinde ve dendritler arasında oluşan düzensiz şekle sahip gözeneklere ise çekinti gözeneği adı verilir (Ghosh ve ark., 2013).

Katılaşma çekmesi, faz dönüşümü esnasında çoğu alışımda görülen hacimsel küçülmeden kaynaklanır ve porozite oluşumunu engellemek interdendritik sıvı akışı (besleme) sağlanmalıdır (Şekil 2.2.a). Sıcaklığın düşmesiyle birlikte Yarı-Katı bölgede metalostatik basıncın azalması (Şekil 2.2.b), sıvıdaki çözünmemiş gazların çözünebilirliğinin limite yaklaşması gibi nedenlerle besleme etkinliği azalmaktadır. Ek olarak katılaşma esnasında, katı bölgenin hidrojen çözünürlüğü sıvı bölgeye göre çok daha düşüktür. Böylelikle katı/sıvı ara yüzeyi hidrojen atomlarını sıvı bölgeye doğru itecektir. Sıvı içindeki gaz çözünürlüğü limit değerlere ulaşırsa, boşluklar çekirdeklenecek büyümeye başlayacaktır (Şekil 2.2.c).



Şekil 2.2. a) İnterdendritik sıvı akışı, b) Yarı-Katı bölgede bölgede metalostatik basıncın azalması, c) Sıvıdaki H gazı konsantrasyonu ve çözünübilirlik sınırı (Pequet ve ark., 2002)

Katılaşma esnasındaki toplam ortam basıncı ($P_0 \sim 1$ atm), metalostatik basınç ($P_p = \rho_l g h$) ve sıvı-buhar yüzey gerilim basıncı ($P_\sigma = 2\sigma_{LV}/r$) kapalı por eğilimindedir. Dağılan çeşitli gazların gaz basıncı (P_g) ve maşi bölgesindeki basınç düşmesi (ΔP_{MZ}) açık por eğilimindedir. Genel olarak porozitenin, açık porların bölgesel basıncının kapalı porların bölgesel basıncını aşmasıyla heterojen olarak çekirdeklendiği tahmin edilmektedir. Toplam net basınçta kapalı porların basınçlarının daha yüksek olması durumunda gözenek çekirdeklenmesi için şartlar elverişli hale gelmektedir ve şu şekilde formüle edilebilir:

$$P_T = P_0 + \frac{2\sigma_{LV}}{r} + \rho L g h - P_g - \Delta P_{MZ} \quad (2.1)$$

Burada ρ_L sıvı metal yoğunluğu, g yerçekimi sabiti, h sıvı metal yüksekliği ve σ_{LV} sıvı-buhar yüzey gerilimidir. $P_T < 0$ olması durumunda porozite oluşması beklenir.

Yönlü katılma ile ilgili yapılan çalışmalarda, hücrel arası boşlukların ve hücre çapları ile uzunlukların yaklaşık olarak eşit olduğu, böylece bu bölgelerin kapiler tüpler şeklinde basitçe modellenebileceği fark edilmiştir (Whitesell ve Overfelt, 2001). Sıvı metal aşağı doğru akarak hücrel arası boşlukları beslerken, hücre köklerinde katılma çekmesi meydana gelmektedir. Hagen-Poiseulle eşitliği kapiler tüplerde aşağıya doğru basınç düşmesini şu şekilde tanımlar:

$$\Delta P = \frac{8\mu LU}{r^2} \quad (2.2)$$

Burada; ΔP basınç düşmesi, μ sıvının viskozitesi, U kapiler tüpün içindeki sıvının hızı, r kapiler tüpün yarıçapıdır. Eğer dendritler arası kapiler tüpün uzunluğu katılma değişkenleri ($L \sim \Delta T_0 / G$) ve katılma hızı (V_s) kullanılacak şekilde basınç düşmesi eşitliği tanımlanacak olursa;

$$\Delta P_{Mz} = \frac{8\mu\beta\Delta T_0 V_s}{Gr^2} \quad (2.3)$$

Burada ΔT_0 ; alaşımın katılma aralığı, G ; termal gradyan, $\beta = ((\rho_s - \rho_l) / \rho_s)$ ve ρ_s ile ρ_l sırasıyla sıvının ve katının yoğunluğudur.

2.1.1. Hidrojen gözeneği

Alüminyum alaşımlarında gözenek, çözünmüş hidrojen, katılma çekintisi veya her ikisinden dolayı oluşmaktadır. Hidrojen gözeneğine, katı ve sıvı alüminyumun

içindeki hidrojen çözünürlüğü arasındaki fark sebep olmaktadır (Lee ve Wang, 2010). Çözünürlükteki bu farklılıktan dolayı, eriyik alüminyumda çözünmüş hidrojen gazının yaklaşık %5'i katının içinde kalmaktadır.

Uygun gaz giderme teknikleri, hidrojeni kabul edilebilir düşük seviyelere indirebilir. Gaz giderme için kullanılan gaz, asal (nitrojen veya argon gibi) ya da reaktif (klor gibi) olarak sınıflandırılır. Bir dönme çarkı kullanılarak, gazın eriyik alüminyuma girişi sağlanır. Bu, ince dağılımlı baloncuklar üretir. Sıvı eriyikte bulunan hidrojen atomları, bu ince baloncuklara difüz eder ve yüzeyde süzülerek eriyiği terk eder. Klor kullanıldığında ise, klorürler gaz baloncuklarında ve metal arayüzeylerinde (Al, Cl₂ ile reaksiyona girer ve AlCl₃ oluşur.) oluşur ve yüzey gerilimini değiştirirler. Eriyiğin içindeki oksit inklüzyonlar, baloncuklara bağlanır ve yüzeyde yüzerler, sonrasında oksit inklüzyon içeriğini azaltmak için sistemden çıkarılırlar. Asal ve reaktif gazların karışımı, tatmin edici sonuçlar verecektir (Plotkowski, 2012) .

Sıvı alüminyum, atmosferde bulunan su buharı ile aşağıdaki reaksiyona göre alüminyum oksit ve hidrojen gazı oluşturarak reaksiyona girer.



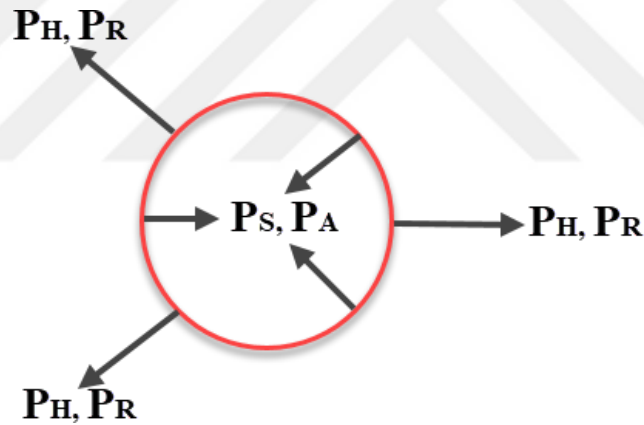
Hidrojen gazı kısmen atmosfere kaçar ve eriyik yüzeyinde hidrojen molekülünün çözülümü ile sıvı alüminyumun içinde kısmen çözünür.



Gaz gözeneği, sıvı alüminyum hidrojen gaz çözünürlülüğü ile katı alüminyumun içindeki çözünürlülüğü (erime noktasında, sırasıyla 0.7 cm³/100 gr ve 0.04 cm³/100

gr) arasında büyük fark olmasından dolayı, katılaşma sırasında açığa çıkar. Metal katılaştıkça, hidrojen katılaştan fazdan, gitgide artarak gazca zenginleşen sıvı fazın içine atılır (Anson, 2000).

Alüminyum alaşımlarda hidrojen gözeneği, dendritik bir ağın sebep olduğu sıvı akışına dirençli basınç, hidrojen basıncı, sıvı metalin yüzey geriliminden kaynaklanan basınç ve metalostatik ve atmosferik/uygulanan basınçların toplamı olan bu dört farklı basınçların sonucudur. Bunlardan, yüzey gerilimi ve atmosferik/uygulanan basınç gözenek oluşumunu engellerken, sıvı akışına dirençli basınç ve hidrojen basıncı oluşumu destekler. Bir hidrojen baloncuğunun üzerindeki bu kuvvetlerin etkisi Şekil 2.3.'te şematik olarak gösterilmiştir.



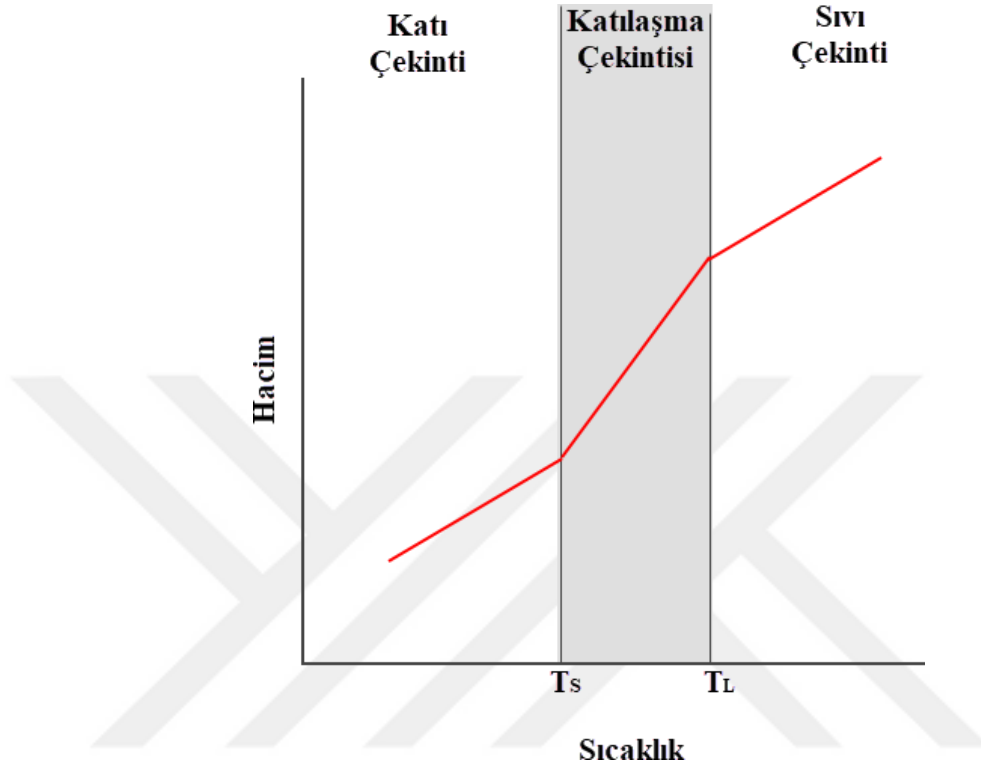
Şekil 2.3. Bir hidrojen gözeneğinin oluşumunu destekleyen ve karşı koyan kuvvetlerin şematik gösterimi.

Burada P_H ; Hidrojen basıncı, P_R ; direnç basıncı, P_S ; yüzey geriliminden kaynaklanan basınç ve P_A ; atmosferik basınç olarak tanımlanmıştır (Chintalapati, 2009).

2.1.2. Çekinti gözeneği

Pek çok metal katılaşma sırasında oluşan faz dönüşümleri nedeniyle hacimsel olarak daralır. Bu daralmaya çekinti adı verilmektedir. Literatürde, sıvı çekinti, katılaşma

çekintisi ve katı çekmesi olmak üzere Şekil 2.4.'te de şematik olarak gösterilen üç tip çekintiden bahsedilmektedir (Stefanescu, 2015).



Şekil 2.4. Çekinti rejimleri

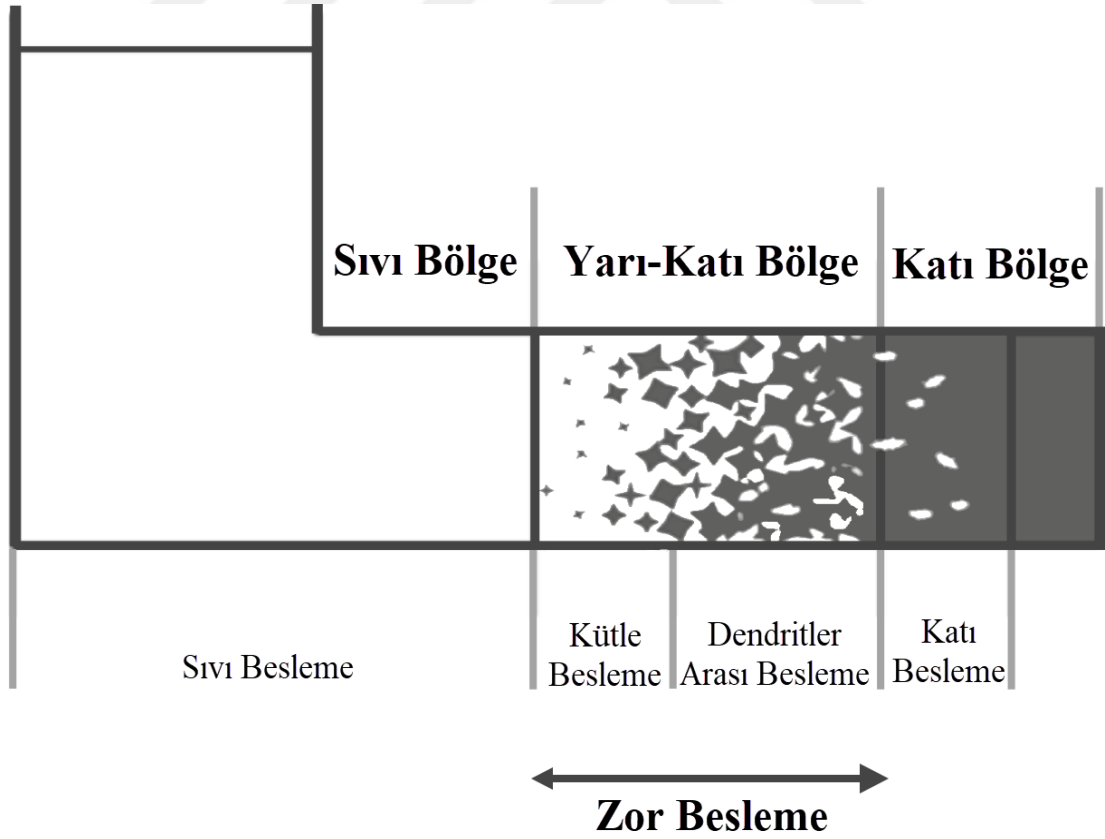
Sıvı çekinti, döküm sıcaklığından likidus sıcaklığına kadar olan bölgede gerçekleşir ve genellikle yolluk ile besleyicilerden gelen sıvı akışıyla karşılanır. Katlaşma çekintisi, maşi (sıvı-katı) bölgesinde meydana gelen çekinti tipidir. Bu çekintiyi dengelemek için, risk içeren bölgelere besleyiciden sıvı metal takviyesi yapılmalıdır. Sıvı metalin gerekli alanlara akışı, daha dar interdendritik kanallar, inklüzyonlar ve izole sıcak noktalar ile sınırlanabilir (Pequet ve ark., 2002).

Katı çekinti ise malzeme tamamen katılaştıktan sonra meydana gelen hacimsel büzölmeye verilen addır. Buna modelci çekmesi de denmektedir ve bu durum model yapımı esnasında telafi edilebilmektedir.

Alüminyum katılaştırken, sıvı ve katı fazlar arasındaki yoğunluk farkından dolayı yaklaşık %7'lik bir hacimsel büzülme gerçekleşir. Katılaşma esnasında komşu alanlardan sıvı akışı sağlanarak bu büzülme dengelenmeli veya beslenmelidir (Campbell, 2004).

2.2. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları

Sıvı metal katılaştırken, sıvı bölgelerle katı bölgeler arasında negatif basınç farkı oluşmaktadır. Bölgeler arasında oluşan bu basınç farkı, döküm parçalarda gözeneklilik, yüzey çökmeleri gibi hacimsel hataların oluşması için itici güç etkisi gösterir. Bu hataların oluşma riskini azaltan beş temel besleme mekanizması Şekil 2.5.'te tanımlanmıştır (Patel, 2013).



Şekil 2.5. Temel besleme mekanizmaları

Sıvı besleme mekanizması, katılaşma öncesinde sıvı metalin düşük viskoziteye sahip olduğu durumda aktif rol alan bir mekanizmadır. Bu mekanizmada itici güç sıcaklık değişimlerine bağlı olarak görülen hacimsel değişimdir. Sıvı besleme sırasında basınç farkı ihmal edilebilecek düzeyde düşüktür. Genellikle saf ve ötektik benzeri alaşımlarda görülen bir besleme mekanizmasıdır.

Kütle besleme mekanizması, yarı-katı bölgede katı oranının %0-50 aralığında olduğu durumlarda gerçekleşir. Genelde kalın kesitli parçalarda kütle besleme mekanizması etkin rol oynamaktadır. Katılaşma devam ettikçe dendritler büyüyecek ve dendritler arası kanallar daralacaktır. Daralan kanallar arasında kalıntı sıvı metaller birikecektir. Bu aşamada etkin rol oynayan mekanizma dendritler arası beslemedir ve geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda kritik öneme sahiptir (Campbell, 2015). Zor besleme, katılaşma esnasında artan gerilimlerin dendrit ağ kuvvetlerini aşması sonucunda dendrit ağlarının kırılmasıyla meydana gelir. Bu kırılma, makroskobik boyutlarda oluşursa dendrit kanallarını tıkayarak beslemeyi keserken, mikroskobik boyutlarda oluşması durumunda izole kalmış bölgelerin beslenmesine yardımcı olur (Dahle ve StJohn, 1998). Katılaşmanın son aşamasında izole döküm bölgelerinde kalan sıvı metalin donması esnasında etkin mekanizma, katı besleme olarak adlandırılmaktadır.

2.3. Gözenek Oluşum Modellemesinde Kullanılan Yaklaşımlar

Günümüzde gözenek oluşumu mekanizması anlaşılmış olsa da hatanın parça üzerinde tam olarak nerede ve hangi büyüklükte oluşabileceğinin tahmin edilebilmesi üzerine çalışmalar hala devam etmektedir. Geçtiğimiz elli yılda, özellikle de son yirmi yıllık dönemde gözenek oluşumunun tahmininde bilgisayar destekli analiz yöntemlerinden faydalanılmaktadır (Sata, 2010).

Bu konuda yapılan çalışmalar beş ana başlık altında toplanabilir. Bunlar;

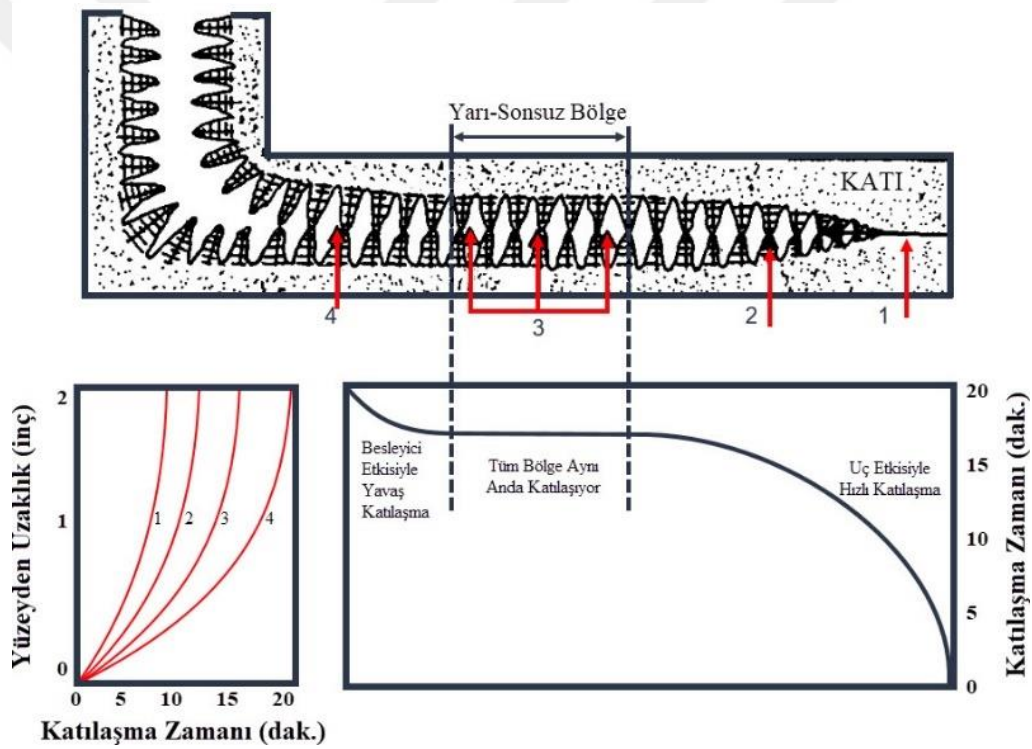
1. Analitik modeller
2. Kriter Fonksiyonları metodu
3. Enerji, kütle ve denge korunumuyla süreklilik denklemlerinin birlikte kullanıldığı Darcy kanununun numerik çözülmesi
4. Hidrojen difüzyonu-kontrollü büyüme ile katı-gaz sistemlerin etkileşimine dayalı modelleme
5. Gözenek-mikroyapı etkileşimini göz önünde bulundurarak, gözenek ve tanelerin difüzyonla sürekli büyümesine dayalı stokastik büyüme yaklaşımları

Yukarıda sayılan son üç madde, mikroyapı modelleyebilecek kapasitede detaylı hesaplama yapılabilen modelleme teknikleridir. Ancak bu kadar kapsamlı hesaplamaların yapılabilmesi için güçlü bilgisayarlara ve fazlaca zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum belirtilen modelleme yaklaşımlarını endüstriyel anlamda uygulanabilir olmaktan çıkarmaktadır (Lee ve ark., 2001). Kriter fonksiyonları metodu ise lokal koşulları (soğuma hızı, sıcaklık gradyanı v.b.) çekinti hatasıyla ilişkilendiren basit deneysel kurallara bağlı bir modelleme yöntemi olmasından ötürü endüstriyel anlamda sıklıkla tercih edilmektedir (Stefanescu, 2005).

2.3.1. Kriter fonksiyonları metodu

Kriter fonksiyonları metodu, deneysel gözlemlere teorik formül çıkarmaya dayalı modelleme yöntemidir. Gözenek yüzdesi, türetilmiş matematik denklemlerden direk olarak hesaplanabilir. Termal parametreler, bilgisayar modellemesi ile simule edilebildiklerinden, bu yöntem dökümlerin spesifik bölgelerinde, gözenek seviyelerini miktar bakımından tahmin etmede kolay bir yol sağlar.

Pellini (1953) yönlenmiş katılaşma ile besleyicinin, besleme mesafesi etkinliğini gözlemleyebilmek adına yaptığı çalışmada (Şekil 2.6.) besleyicinin erişemediği ve aynı zamanda uç etkisinden yararlanamayan bölgeyi “yarı-sonsuz” bölge olarak tanımlamıştır. Yaptığı ölçümlerde Yarı-sonsuz bölge olarak tanımladığı 4 inç (100mm) uzunluğundaki bu bölgede merkez hattı çekintisi gözlemlemiştir. Termokapıl verilerinden elde ettiği sonuçlara göre bu bölgede sıcaklık gradyanını $40^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 'den düşük olarak tespit ederek bu bölgedeki mikroporoziteyi sıcaklık gradyanına dayandırmıştır.



Şekil 2.6. Besleyici etki mesafesinden uzak ve uç etkisi altında kalmayan yarı-sonsuz bölge

Kriter fonksiyonları metodunda kullanılan birçok farklı model vardır. Bunlardan en bilineni Niyama yaklaşımıdır (Felberbaum, 2010). Niyama, çelik dökümler için termal gradyanı, soğuma hızının kareköküne oranlayarak, soğuma hızının azalması veya katılaşma zamanının artması durumunda gözenekliliğin arttığını modeliyle doğrulamış oldu (Niyama ve ark., 1982).

Niyama kriteri çeliklerde çok iyi sonuçlar verirken, özellikle Al-Si alaşımlarında gözenek oluşumu konusunda başarısız olmuştur. Birçok araştırmacı alüminyum esaslı alaşımlarda, gözenek oluşumunu modelleyebilmek için Niyama kriterini geliştirmeye çalışmışlardır. Tablo 2.1.'de de özetlendiği gibi, pek çok kriter fonksiyonları, farklı döküm koşulları altında önerilmiş fakat hala ideal bir metod bulunamamıştır.

Son dönemlerde, ısı transfer hesaplamalarıyla ve termokapılar aracılığıyla alınan ölçümlere dayalı termal parametreler üzerinden yapılan gözeneklilik modelleri geliştirilmiştir.

Tablo 2.1. Gözenek tahmininde kullanılan kriter fonksiyonlar

Araştırmacılar	Kriter Fonksiyon	Alaşım
Bishop ve Pellini (1951)	G	Çelik
Rao ve Panchanathan (1973)	G/t_f	A319
Davies (1975)	G/V_s	Çelik, Al alaşımları
Niyama ve ark. (1982)	$G/R^{1/2}$	Çelik
Y. W. Lee ve ark. (1990)	$G \cdot t_f^{2/3} / V_s$	A356
Kao ve Chang (1995)	$G^{0,38} / V_s^{1,62}$	A356
Chiesa ve ark. (1998)	$1/t_f^m \cdot V_s^n$	A356
Shang ve ark. (2004)	$t_f^{1,18} / V_s^{1,13}$	A319, A332, A356
Carlson ve Beckermann (2009)	$\frac{G \lambda_2 \sqrt{\Delta P_{cr}}}{\sqrt{\mu_1 \beta t_f R}}$	Çelik, Al ve Mg alaşımları

G: Sıcaklık Gradyanı - t_f : Bölgesel Katılma Süresi - V_s : Solidus Hızı - R : Soğuma Hızı
 λ_2 : İkincil dendrit kolları arası mesafe - β : Toplam katılma çekmesi - ΔP_{cr} : Kritik basınç düşüşü

2.3.1.1. Niyama kriteri

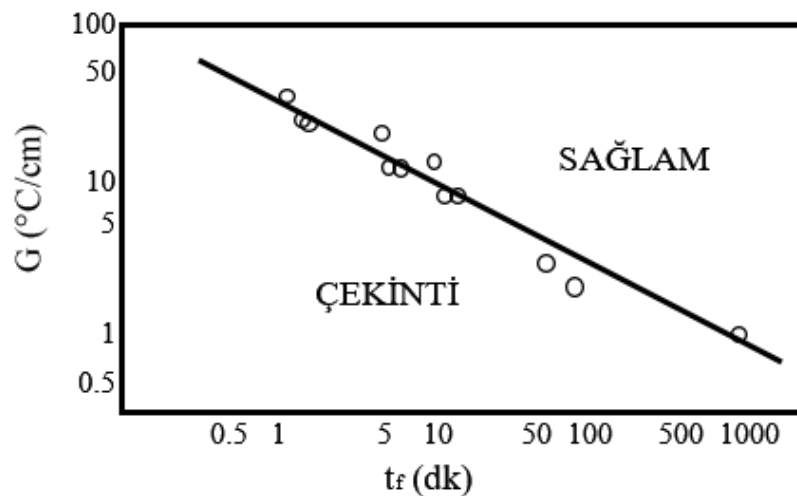
Niyama kriteri, günümüzde gözeneklilik tahmininde en yaygın kullanılan metottur. Bu kriter, katılma parametrelerinin (sıcaklık gradyanı, katılma zamanı vb.) gözenekliliğe etkilerini deneysel bulgular ilişkilendirerek, günümüzde var olan döküm simülasyon yazılımlarına entegre edilmiştir.

Tüm döküm simülasyon yazılım paketleri Niyama kriterini standart çıktı olarak hesaplar ve dünya çapında birçok dökümhane bu kriteri kullanmaktadır. Döküm-

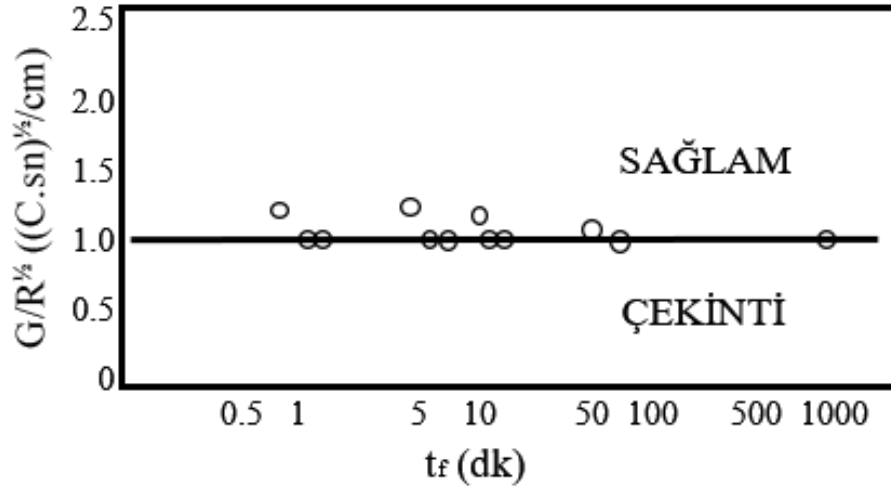
simülasyon kullanıcıları, bir döküm simülasyonu ile tahmin edilen ve belli eşik değerlerin altında Niyama değerlerini içeren bölgelerde büzülme gözenekliliğinin oluşmasını bekler (Carlson ve Beckermann, 2009).

Niyama kriterinin bu kadar popüler olmasının nedeni aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- Kriter gayet basittir ve çalışabilmek için sadece sıcaklık ölçümlerinden alınan veriler yeterlidir.
- $G/(R)^{1/2} = (G/V_s)^{1/2}$ iken G/V_s katılaşma esnasında yarı-katı bölgeyi, kolonsal veya eş eksenli büyümeyi belirleyen en önemli parametredir. Bu yüzden, Niyama kriterinin katılaşma işlemi ve gözenek oluşumu ile yakın bir ilişkisi vardır.
- Son katılaşan bölgeler, genellikle daha düşük $G/R^{1/2}$ değerlerine sahiptir. Çünkü bu alanlar, çoğunlukla daha düşük G ve daha yüksek V_s 'e sahiptir (Şekil 2.7.).
- Niyama kriterinde çelik alaşımları için $[(C.sn)^{1/2}/cm]$ eşik değer olarak tespit edilmiştir. (Şekil 2.8.).



Şekil 2.7. Deneysel olarak belirlenen G ve tr arasındaki ilişki (Niyama ve ark., 1982)



Şekil 2.8. Niyama kriterine göre çelik alaşımlarında çekinti riski

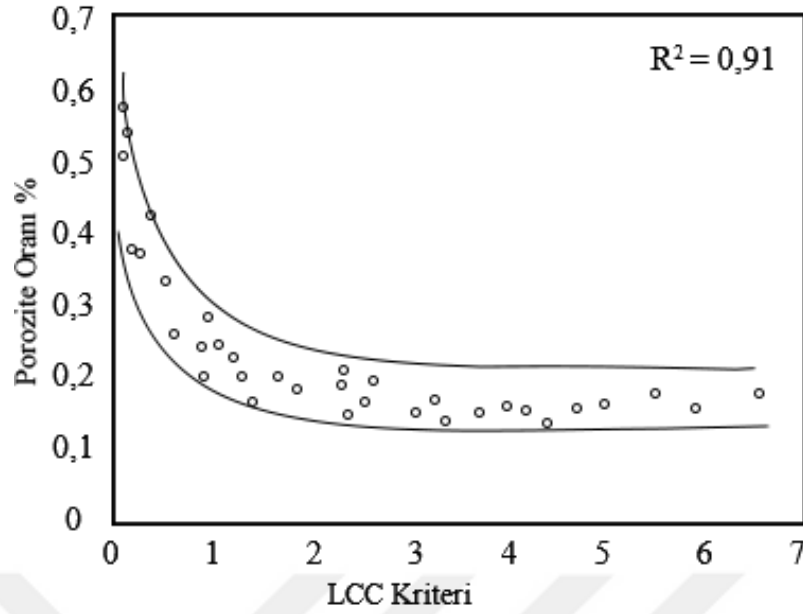
2.3.1.2. LCC kriteri

Niyama kriterinin ardından , Lee ve arkadaşları (1990) geniş katılma aralığına sahip alüminyum alaşımları için Besleme Verimliliği Parametresi olarak ta adlandırdıkları LCC kriterini geliştirmişlerdir. LCC ve Niyama kriteri arasındaki en önemli fark, yarı-katı bölgedeki geçirgenliği sıvı oranıyla ilişkilendirmesidir. LCC Kriteri Denklem 2.6.'daki gibi formüle edilmiştir:

$$LCC = G t_f^{2/3} / V_s \quad (2.6)$$

Burada t_f , katılma zamanı ve V_s , katı-sıvı arayüzey ilerleme hızıdır.

Bu kriterin geliştirilmesinde farklı uzunluklarda plaka şeklinde dökülen parça ve farklı boyutlardaki besleyiciler üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara, hesaplanan LCC kriteri değerinin 1 ve altında olması durumunda dökümün gözenek oluşumuna daha yatkın olduğunu tespit edilmiştir (Şekil 2.9.).



Şekil 2.9. LCC kriterine göre gözenekliliğin değişimi

2.3.1.3. FCC kriteri

Alüminyum alaşımlarında porozite oluşumu üzerine bilinen en yaygın kriterlerden biri de Chiesa ve ark. (1998) tarafından geliştirilmiştir (Denklem 2.7).

$$FCC = K \cdot t_f^m \cdot V_s^n \quad (2.7)$$

Burada K değeri metal kalitesi faktörü, m ve n ise malzemeye bağlı bir sabit olarak tanımlanmıştır.

2.3.1.4. Boyutsuz Niyama kriteri

Niyama kriteri dökümhaneler için gözenek tahmininde tercih edilen bir araç olmasına rağmen genellikle sadece çelik alaşımlarında kullanılabilmesi, gözenegin boyutu hakkında fikir vermemesi gibi nedenler kullanımını kısıtlamaktadır. Niyama kriteri, sadece termal parametrelerin bir fonksiyonu olduğu için bir alaşım için hesaplanan

Niyama kriteri değerleri, diğer bir alaşım için aynı olacağı anlamına gelmez. Carlson ve Beckermann (2009), yaptıkları çalışmalar sonucunda Niyama kriterini sadece çelik için değil aynı zamanda Ni, Mg ve Al esaslı alaşımlar için kullanılabilir hale getirmişlerdir. Bununla birlikte oluşan çekinti gözeneği miktarını da tahmin etmek için kullanılabilen kriter gelişimi üzerine çalışmışlardır.

Carlson ve arkadaşları tarafından geliştirilen kriter, sadece termal parametreleri değil aynı zamanda alaşımın katılaşma karakteristiği ve özelliklerini de hesaba katan boyutsuz bir Niyama kriteri versiyonudur. Carlson ve Beckermann (2009), tek yönlü katılaştırılan bir sistem üzerinde Denklem 2.8.'deki kriteri geliştirmişlerdir.

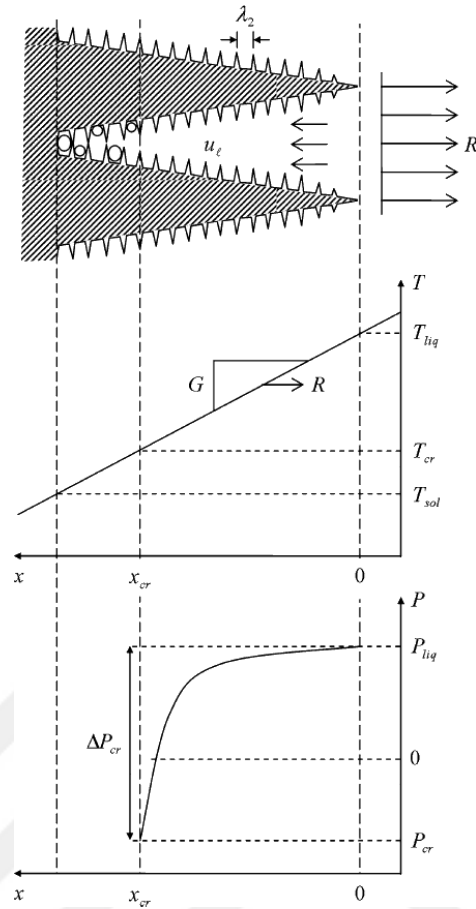
$$g_l u_l = -\frac{K}{\mu_l} \frac{dP}{dx} \quad (2.8)$$

Burada, g_l sıvı hacim oranı, u_l yarı-katı bölgedeki sıvı hızı, μ_l dinamik sıvı viskozitesi, P eriyik basıncı ve x konumsal koordinat, K yarı-katı bölgedeki geçirgenlik olarak tanımlanmıştır. Sıvı ve katı yoğunluğunun katılaşma sırasında sabit olduğu varsayıldığında, toplam katılaşma çekmesi Denklem 2.9.'daki gibi tanımlanabilir.

$$\beta = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \quad (2.9)$$

Burada, β çekinti oranını, ρ_s katı yoğunluğunu, ρ_l sıvı yoğunluğunu vermektedir. Yarı-katı bölgedeki çekinti hızını, sıvının dinamik viskozitesi üzerinden tanımlamak istediğimizde Denklem 2.10. elde edilmektedir.

$$u_l = -\frac{\beta R}{G} \quad (2.10)$$



Şekil 2.10. Tek yönlü katılaşmada yarı-katı bölgenin şematize edilmesi

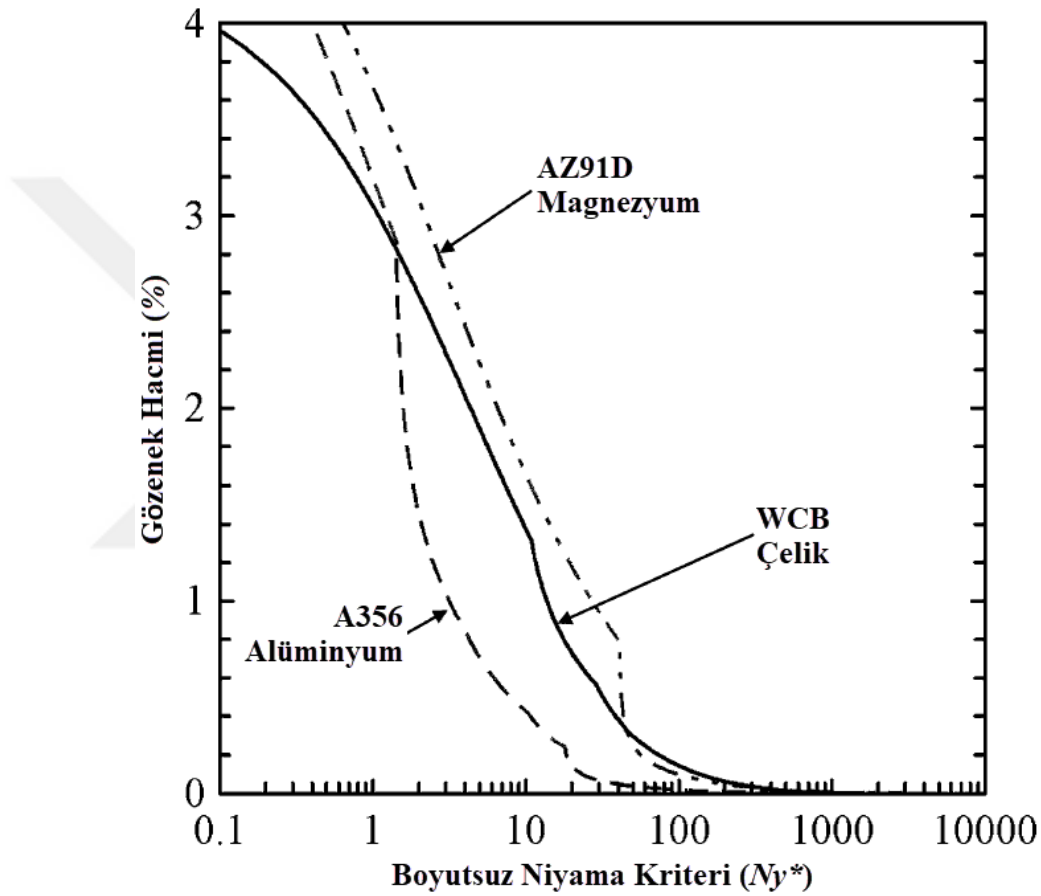
Yarı-katı bölgede tek yönlü katılaşma esnasında sıvı metalin davranışı Şekil 2.10.'da şematize edilmiştir. Buna göre katı oranı arttıkça sıvı metal basıncında düşüş meydana gelmektedir. Basıncıdaki düşüş kritik bir değere ulaştığında gözenek oluşmaya ve büyümeye başlar. Denklem 2.9. ve 2.10.'daki verileri Denklem 2.8.'de yerine yerleştirdiğimizde Denklem 2.11.'de mesafeye bağlı basınç değişimi türünden bir bağıntı elde etmiş oluruz.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\mu_l \beta R g_l}{KG} \quad (2.11)$$

Carlson ve Beckermann tarafından geliştirilen Boyutsuz Niyama Kriteri, Niyama kriterine uyalandığında Denklem 2.12. elde edilmiştir.

$$Ny^* = C_\lambda \frac{G}{R^{5/6}} \sqrt{\frac{\Delta P_{cr}}{\mu_l \beta \Delta T_f}} \quad (2.12)$$

Bu kritere göre üç farklı alaşım için çalışmalar yapılmış ve sonuçlar Şekil 2.11.'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.11. Boyutsuz Niyama Kriterine göre üç farklı malzeme için gözenek hacmi tahmini

Yukarıdaki şekile göre Boyutsuz Niyama Kriteri değeri arttıkça gözenekliliğin azaldığı ve Niyama kriterinden geliştirilen Boyutsuz Niyama Kriteriyle sadece çelik alaşımları için değil farklı alaşımlar içinde gözeneklilik tahmini yapılabildiği tespit edilmiştir (Carlson ve Beckermann, 2009).

2.4. Yönlü Katılaşma Fırınları

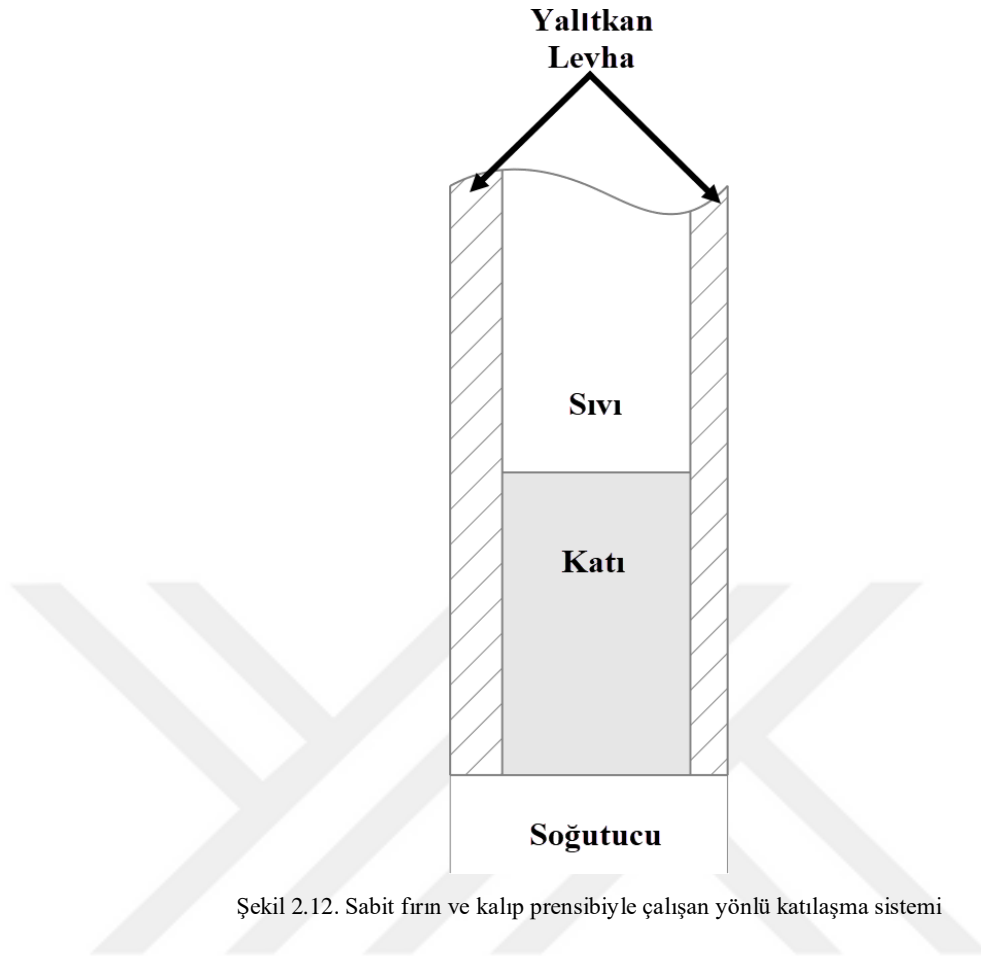
Sıcaklık gradyanı (G) ve büyüme hızı (V), mikroyapının kontrol edilmesinde önemli iki parametredir. Bu yüzden, bir yönlü katılaşma düzeneği, döküm sırasında istenilen mikroyapı oluşmasını sağlamak için, G ve V parametrelerinin kontrolünü sağlayabilecek özelliklerde olmalıdır. Yönlü katılaşma sistemleri sabit fırın ve kalıp ile hareketli fırın ve kalıp olarak ikiye ayrılır. Bu sistemlerde genel olarak şunlar amaçlanır:

1. Parça boyunca sabit bir mikroyapı elde etmek için sabit bir G ile katılaştırma
2. G ve V'yi arttırarak daha ince bir mikroyapı ve yüksek mekanik özellik elde etmek
3. G ve V'yi bağımsız olarak kontrol ederek katılaşma mekanizmasını anlamlandırmak

2.4.1. Sabit fırın ve kalıp

Bu tip fırınlar genel olarak uç kısmında soğutulan ve diğer kısımlarda termal olarak yalıtılmış bölümlerden oluşur. Erimiş malzeme kalıba döküldüğü anda uç kısımda soğutucuya temas eden bölgelerden katılaşmaya başlar (Şekil 2.12.).

Katılaşma, tamamıyla parçanın boyutu ve geometrisi, alaşımın, kalıbın ve soğutucunun fiziksel ve termal özellikleri ve eriyiğin ve kalıbın ilk sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Katılaşma sırasında, sıvı-katı arayüzeyi soğutucudan uzaklaşır ve sonrasında yavaşlar. Isıl gradyanda azalır. Bu yüzden, döküm mikroyapısında farklılıklar gözlemlenir (McLean, 1983).



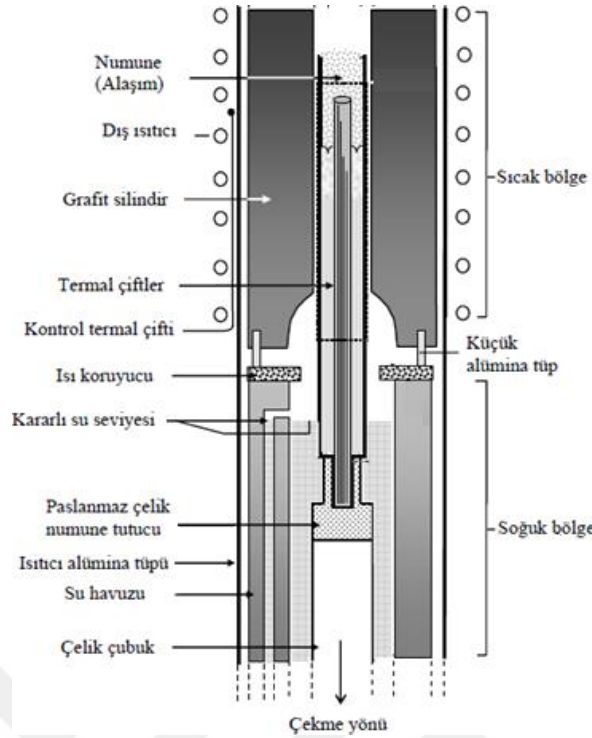
Şekil 2.12. Sabit fırın ve kalıp prensibiyle çalışan yönlü katılaşma sistemi

2.4.2. Hareketli fırın veya kalıp

Bu yöntemde diğerinden farklı olarak fırın ya da kalıptan biri hareketli diğeri sabittir.

Bu sistemle çalışan en çok bilinen yöntem Bridgman metodudur.

Bridgman metodunda sıcak ve soğuk bölgelerden oluşan sabit bir fırın içerisine yerleştirilen ve sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekilen hareketli bir kalıp bulunmaktadır. Kalıp uzun ve ince kesitlidir ve katılaşmanın yönlendirilmesini sağlamak amacıyla kalıbın alt kısmında soğutucu bulunmaktadır. Kalıp sabit bir ilerleme hızla sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekilerek katılaşma sağlanır. Bu yöntem çoğunlukla tek kristal üretiminde tercih edilmektedir (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. Bridgman yönlü katılaşma düzeneği (Kaya ve ark., 2009)

Günümüzde yönlü katılaşma uygulamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- İnce duvarlı bir kalıp su soğutmalı bir bakır soğutucunun üzerine yerleştirilir.
- Kalıp, indüksiyon ısıtmalı bir vakum fırınına yerleştirilerek dökümü yapılacak alaşımın likidus sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır.
- Ergitilmiş şarj kalıbın içine dökülür ve ısıl olarak dengeye gelmesi beklenir.
- Isı transferi ve ısıl gradyanı iyileştirmek için, fırının sıcak bölgesinden soğuk bölgesine doğru kalıp çekilir. Kolonsal büyümenin sağlanması amacıyla çekme belirli bir hızda yapılır.

2.5. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, araştırmacıların yaptıkları deneysel çalışmalarda deney parametrelerinin etkilerini keşfetmesine, sonuçların analiz edilmesine ve optimum

deney sonuçlarının elde edilmesine yardımcı olan istatistiksel bir araçtır (Patel ve ark., 2014).

Katılma ve mikroyapı üzerinde çalışmalar yapan birçok araştırmacı deney parametreleri ile sonuçlar arasında bir ilişki kurabilmek için regresyon analizi yönteminden yararlanmıştır.

Kaya ve arkadaşları (2009), Al-Ti alaşımını bridgman tipi fırında yönlü katılaştırarak, regresyon analizi yöntemiyle, sıcaklık gradyanı ve katı-sıvı arayüzey ilerleme hızının, yarı-katı bölge derinliği, dendrit kolları arası mesafe gibi mikroyapı parametrelerine etkisini gösteren denklemler oluşturmuşlardır.

Shang ve arkadaşları (2004), Al-Si alaşımlarının alçak basınçlı dökümünde gözenek oluşumunun tahmin edilmesi için regresyon analizi yönteminden yararlanmışlardır. Analiz sonucunda bölgesel katılma süresi ve katı-sıvı arayüzey hızının gözenekliliğe etkisi üzerinden bir matematiksel bağıntı kurmuşlardır.

2.6. Yapay Sinir Ağları

Yapay zeka, yapay sistemler ve makineler tarafından insan zekasının anlaşılması ve simüle edilmeye çalışılmasıdır. İnsan zekası, öğrenme akıl yürütme ve kendini düzeltme olarak tanımlanmaktadır. İnsan zekasını ve akıl yürütme yeteneğini modelleyebilen çeşitli teknikler bulunmaktadır. Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi de bu tekniklerden biridir.

YSA, insan beyninin çalışma prensibine dayanarak oluşturulmuş “yapay akıl yürütme sistemi” kullanılarak karmaşık problemleri çözme yeteneğine sahip bir hesaplama

ağıdır. Özellikle girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkilerin tespit edilemediği karmaşık problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ghosh ve ark., 2013).



BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneylerde kullanılan materyaller, tasarım metotları, ölçüm metotları, modelleme çalışmaları ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

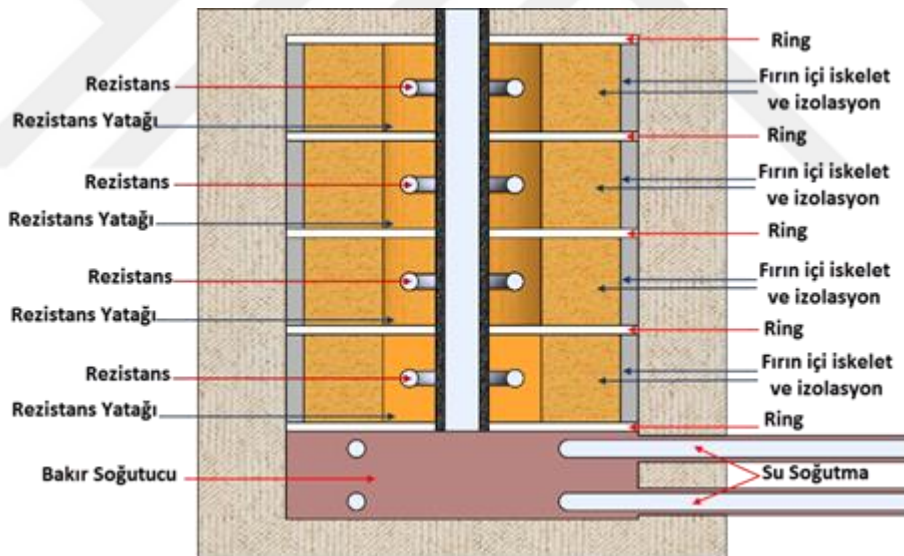
Tez kapsamında ticari olarak yaygın bir kullanım alanına sahip olan Etial 171 (AlSi10Mg – A360) alaşımı kontrollü olarak tek yönlü katılaştırılmış ve kontrollü katılma parametrelerinin (sıcaklık gradyanı, solidus hızı, bölgesel katılma süresi) mikroyapı parametrelerine (ikincil dendrit kolları arası boşluklar, porozite) etkileri incelenmiştir.

İlk etapta fırın ve döküm modeli üzerinde tasarım çalışması yapılarak tasarıma uygun bir şekilde fırın ve kalıp imal ettirilmiştir. Daha sonra dökümü yapılacak olan Etial 171 alaşımının kimyasal bileşimini tespit edebilmek için spektral analiz yapılmıştır. Bu aşamadan sonra imal ettirilen kalıp, fırın üzerine yerleştirilerek boşta ısıtılıp soğutulmuş ve boşta döküm yapılarak test edilmiştir. Aynı zamanda Etial 171 alaşımına termal analiz yapılarak daha sonra katılma parametrelerinde kullanılmak üzere likidus ve solidus sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Son olarak kontrollü katılma deneyleri yapılarak katılma parametrelerinin mikroyapı parametrelerine etkileri incelenmiş, bu parametrelerin arasındaki ilişkiyi anlayabilmek için regresyon analizi ve YSA vasıtasıyla matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel model ticari bir döküm simülasyon yazılımında test edilmiş ve model doğrulama çalışması yapılmıştır.

3.1. Fırın ve Kalıp Tasarımı

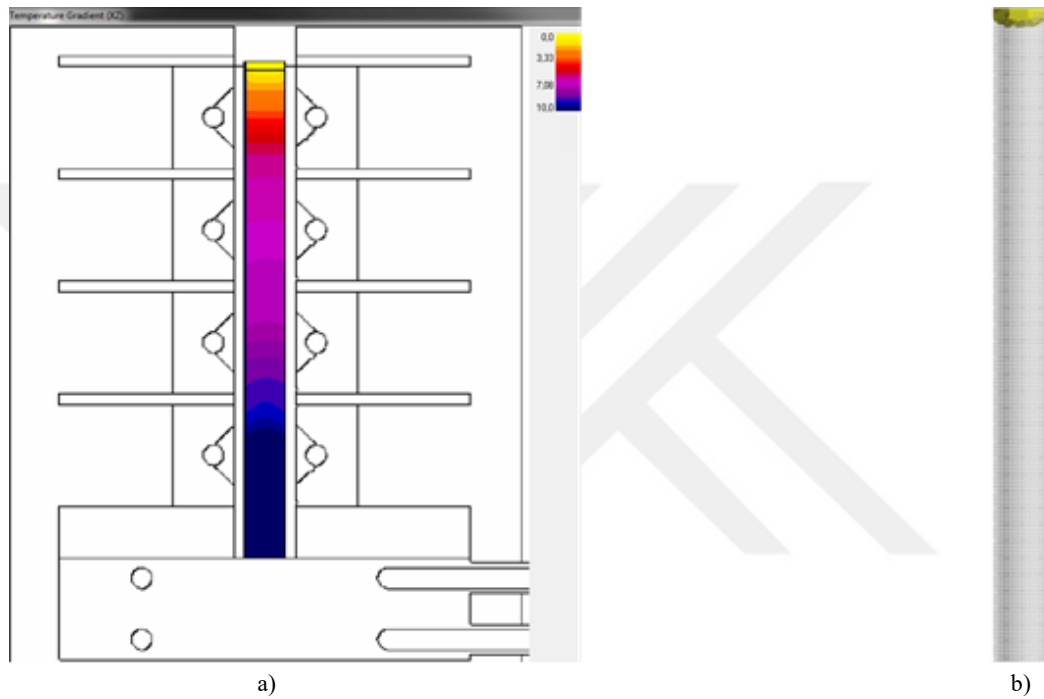
Çalışmalarda kullanılacak olan tek yönlü kontrollü katılaşma fırını dört farklı bölgeden ısıtılabilir şekilde bir bilgisayar destekli tasarım yazılımında tasarlanmıştır. Başka bir fırında ergitilen döküm alaşımı fırın içine yerleştirilen kalıba dökülecek ve alt bölgede içinden su soğutma kanalları geçen bakır soğutucu vasıtasıyla yukarı doğru yönlü bir katılaşma sağlanması amaçlanmıştır. Dökümden sonra katılaşma esnasında dört ayrı bölgeye bağlanan dört ayrı termokapıldan alınan verilere göre istenen sıcaklık gradyanının sağlanabilmesi için kontrol ünitesinden bölgelerin sıcaklıklarının ayarlanması hedeflenmiştir. Bölgeler arası ısı geçişini minimize edebilmek için ring adı verilen seramik elyaf yalıtkan plakaların kullanılması planlanmıştır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Tek yönlü kontrollü katılaşma fırını bölümleri

İlk etapta homojen bir ısıtma-soğutma rejiminin sağlanabilmesi için dökümü yapılacak numunenin silindirik kesitli olması gerektiği düşünülerek, 20mm çapında ve 250 mm yüksekliğinde tasarlandı ve bu şekilde SOLIDCast ticari döküm simülasyon yazılımında simüle edilerek sıcaklık gradyanı (Şekil 3.2.a) ile mikroporozite oluşumu (Şekil 3.2.b) sonuçları incelendi. Elde edilen sonuçlarda malzemenin sadece 3-5

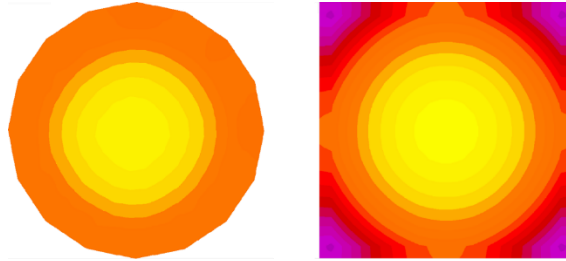
cm'lik bir kısmında gradyanın çok düşük olduğu ve porozitenin dar bir aralıktta olduğu gözlemlendi. Bunun sonucunda incelenmesi gereken bölgenin çok dar olduğu ve böyle bir durumda elde edilen sonuçların sağlıklı bir şekilde yorumlanamayacağı kanaatine varılarak numunenin boyunun ve çapının arttırılmasıyla modelin revize edilmesine karar verildi.



Şekil 3.2. İlk etapta modelleme çalışmalarının; a) Sıcaklık gradyanı, b) Mikroporozite sonuçları

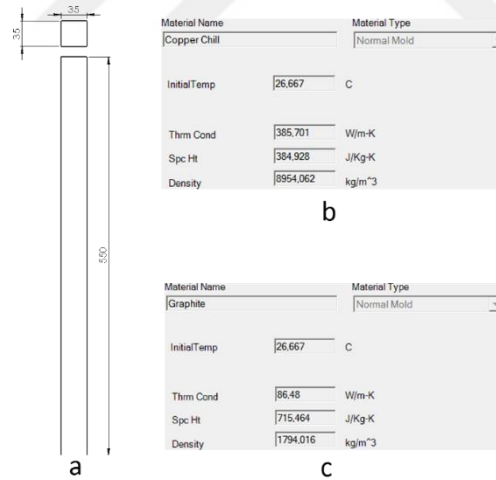
İkinci etap çalışmalarında numunenin çap ve boy ölçüleri değiştirilerek farklı modelleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan tasarım ve modelleme çalışmalarında, gerçek döküm deneylerine geçildiği aşamada tahribatsız muayene yöntemleriyle numune test edilmek istenildiğinde ve metalografik incelemeler esnasında kolaylık sağlayabileceği düşünülerek, model silindirikten kare profil şekline dönüştürülerek simüle edilmiştir. Simülasyon çalışması sonucunda katılma zamanı kesit analizi yapıldığında kare profilli numunenin köşelerinin uç etkisiyle hızlı katılarak

merkezdeki kısmın silindirik numune gibi davrandığı tespit edilmiş (Şekil 3.3.) ve döküm modeli çalışmalarına kare profil üzerinden devam edilmiştir.



Şekil 3.3. Silindir kesit ile kare kesit arasındaki katılma zamanı benzerlikleri

Ayrıca kalıp malzemesi olarak grafit yerine bakır kullanılması durumunda, bakırın ısıyı daha iyi iletibilmesinden ötürü ısıtmanın ve soğutmanın dolayısıyla fırın kontrolünün daha kolay olacağı düşünülerek bakır kalıplı modelleme çalışmaları yapıldı. Numune ölçüleri, bakırın ile grafitin termo-fiziksel özellikleri Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. İkinci etap çalışmalarında kullanılan, a) Model ölçüleri, b) Bakır, c) Grafit termo-fiziksel özellikleri

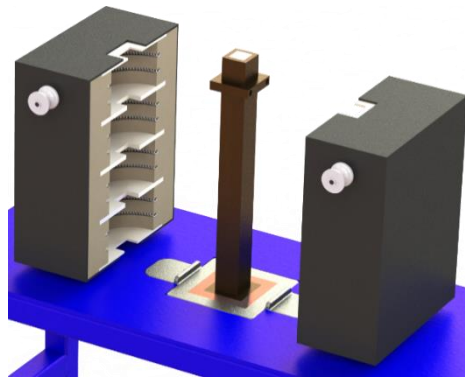
Bu aşamadan sonra modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlara uygun şekilde imal edilebilecek fırın tasarımı yapılmıştır. Fırın tasarımıyla ilgili üç boyutlu çizim görüntüleri Şekil 3.5.'te verilmiştir. Fırın, dört ayrı bölgede sıcaklığın kontrol edilebileceği şekilde tasarlanmıştır. Kontrol olayı iki aşamalı olarak planlanmıştır.

Birinci aşamada, her bir bölgede kalıp içine yerleştirilen termokapıllardan ölçülen sıcaklık değerleri PID sıcaklık kontrol cihazında okunarak Modbus haberleşme cihazı vasıtasıyla bilgisayar üzerinde oluşturulmuş bir arayüzde gösterilecektir. İkinci aşamada hangi bölge kaç dereceye ayarlanmak isteniyorsa arayüzde ilgili kısma istenen değer girilecek ve yine Modbus haberleşme cihazı vasıtasıyla PLC cihazı üzerinden katı hal rölelerine, buradan da rezistanslara istenen değere ısıtma emri iletilecektir.



Şekil 3.5. Tek yönlü kontrollü katılaşma fırını tasarımı

Elektronik, mekanik ve termal parametreler göz önünde bulundurularak tasarımı tamamlanan yönlü kontrollü katılaşma fırının, teknik resim ölçüleri detaylandırılarak (Şekil 3.6.), üretilmek üzere Telmika Elektrik-Elektronik Ticaret Şti. ne gönderilmiş ve bu firmaya ürettirilmiştir.



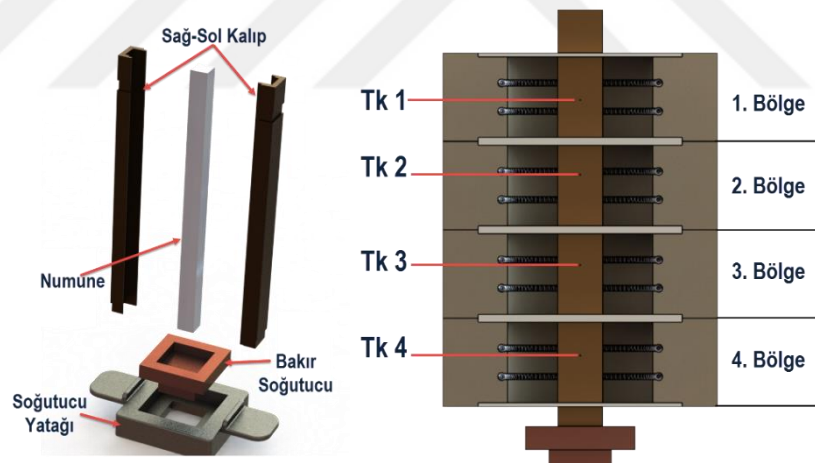
Şekil 3.6. Fırın detayları

Kalıp malzemesi için, ticari olarak temin edilebilen, diğer temin edilebilecek ürünlere nispeten daha iyi termal iletkenliğe sahip olan ve sıcaklık değişikliklerine daha duyarlı olmasından ötürü, CuCr1Zr alaşımı tercih edilmiştir. Grafit kalıp ile CuCr1Zr kalıp malzemesi arasındaki iletkenlik farkı Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Grafit ve CuCr1Zr alaşımlarının termal iletkenlik değerleri

	Grafit	CuCr1Zr
Termal İletkenlik (W/m ² K)	86,48	320

Kalıbın alt kısmında kullanılarak katılaşmayı yönlendirecek olan soğutucu da aynı malzemedan seçilerek kalıp ile birlikte Kor Bakır Alaşımları firmasında kütük halinde dökürülmüş ve Emin Kalıp firmasında işlenerek istenen ölçülere getirilmiştir. Kalıp ölçüleri, yerleşimi ve termokapıl yerleri Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kalıp, soğutucu ve termokapıl detayları

3.2. Fırın Kurulumu

Kontrollü katılaşma prensibine uygun ve dört ayrı bölgeden sıcaklık kontrolü yapılabilecek özelliklerde olacak şekilde tasarlanan fırın, istenen özelliklere uygun olarak imal edilmiştir (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. a) Tasarlanan ve b) Üretilen fırın

Fırının istenen kontrollü katılaştırma özelliklerini sağlaması amacıyla her biri bir bölgeyi kontrol edecek şekilde toplam 4 adet Enda ETC 9420 PID sıcaklık kontrol cihazının (Şekil 3.9.) fırına montajı sağlanmıştır. PID denetleyiciler endüstride en çok kullanılan denetleme elemanlarından birisidir. Bunun nedeni PID kontrolörün hemen hemen tüm denetim sistemlerine uygulanabilmesidir. Denetlenecek sistem motor hızı, konum, fırın sıcaklığı vb. olabilir. İstenilen set değerine gelmesi ve set değerinin değişimlerini takip etmesi istenir (Soygüder ve Alli, 2006).



Şekil 3.9. Enda ETC-9420 PID sıcaklık kontrol cihazı

Sıcaklık kontrol cihazlarının istenen gradyanda ve hızda katılaşmayı sağlayabilecek şekilde programlanabilmesi için bir adet Siemens S7-1200 PLC cihazı (Şekil 3.10.a) ve PLC ile sıcaklık kontrol cihazlarının arasında iletişim sağlanabilmesi için Siemens CM1241 Modbus (Şekil 3.10.b) haberleşme cihazı alınmış ve kontrol panosu bağlanmıştır.



Şekil 3.10. a) Siemens S7-1200 PLC cihazı ve b) CM1241 Modbus Haberleşme Cihazı

Ayrıca fırın bölgelerinin ısıtılması için fırın imalatı esnasında PID sıcaklık kontrol cihazlarının bağlanılacağı 4 adet katı hal rölesinin fırın kontrol panosuna montajı yapılmış ve bu katı hal röleleri de fırın içi rezistanslara bağlanmıştır. (Şekil 3.11.).

Katı hal röleleri çalışma prensibi olarak, elektronik parçalardan meydana gelmiş bir anahtarlama sistemidir. Rölede kumanda devresi transistör benzeri elemanı açık konumdan kapalı konuma gelerek sisteme enerji verir. Bu bir elektrik rölesi ya da kontaktörün bobinine enerji verilerek kontaklarının açık konumdan kapalı konuma gelmesi gibi bir uygulamadır.



Şekil 3.11. PID sıcaklık kontrol cihazlarıyla PLC ve katı hal röleleri arasındaki bağlantıların düzenlenmesi

Kontrollü katılaştırma öncesinde metal ergitme işlemi için bir adet 10kW gücünde çan tipi elektrik direnç ergitme fırını imal ettirilmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Kontrollü katılaştırma öncesi metal ergitmek için kullanılacak elektrik direnç ergitme fırını

İmalat ve kurulum aşamaları tamamlandıktan sonra ilk etapta fırın içi bölgelerinin PID cihazları üzerinden el ile kontrolü ve ardından bilgisayar destekli otomatik kontrol aşamalarına geçilmiştir.

3.2.1. El İle kontrol

Fırın kurulumu için gerekli bütün bağlantılar ve ayarlamalar tamamlandıktan sonra ilk etapta tek bir bölge üzerinde sıcaklık kontrolü sağlanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kullanım kılavuzundaki yönergeler takip edilerek, PID sıcaklık kontrol cihazı, termokapıl ve ilgili bölgenin rezistansı arasında iletişim sağlanmıştır. PID cihazı üzerindeki butonlar vasıtasıyla (Şekil 3.9.) sıcaklık ayarlaması yapılarak rezistansların tepki verip vermediği takip edilmiştir. Şekil 3.13.'te PID sıcaklık kontrol cihazının ayarlanması sonucunda sadece en alt bölgenin sıcaklık kontrolünün yapılabildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Tek bir bölgenin sıcaklık kontrolünün sağlanması

Bu aşamadan sonra diğer bütün PID sıcaklık kontrol cihazları ile termokapıl ve rezistanslar arasında el ile kontrol için gerekli ayarlamalar yapılarak, her bir cihazın

ait olduğu fırın bölgesini istenilen sıcaklığa getirebilmesi sağlanmıştır. Yapılan testlerden elde edilmiş bir sonuç Şekil 3.14.'te verilmiştir. Burada her bir PID cihazında sarı ve kırmızıyla yazılmış değerler görülmektedir. Sarı değerler o bölgenin ayarlanan sıcaklığını, kırmızı bölgeler ise anlık olarak ölçülen sıcaklığı göstermektedir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi fırının sıcaklık kontrolü manuel olarak yapılabilmektedir. Fakat manuel kontrol de zamana bağlı olarak sürekli sıcaklığı kontrol etmek ve bölgeler arasındaki sıcaklık farkını sabit tutmak zor olacağından bu aşamadan sonra bilgisayarla otomatik kontrol çalışmalarına geçilmiştir.

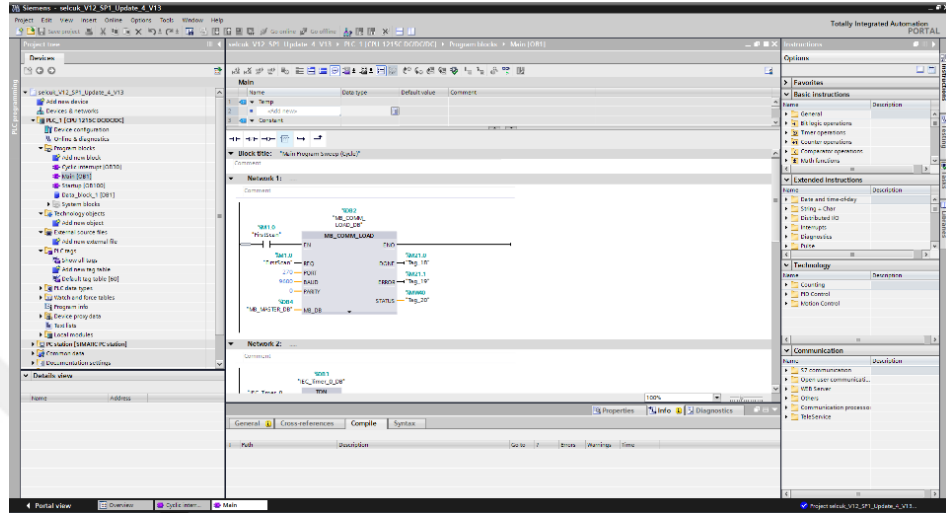


Şekil 3.14. Fırının her bir bölgesinin ayrı bir sıcaklıkta tutulması

3.2.2. Bilgisayar destekli otomatik kontrol

Fırının el ile kontrolü tamamlandıktan sonra bilgisayar destekli otomatik kontrol aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada Üniversitemizin Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan Dr. Öğr. Üyesi Murat

Karabacak'tan destek alınmıştır. İlk etapta bilgisayarla PLC cihazının haberleşmesini sağlamak için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma için Tiaportal yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3.15.).



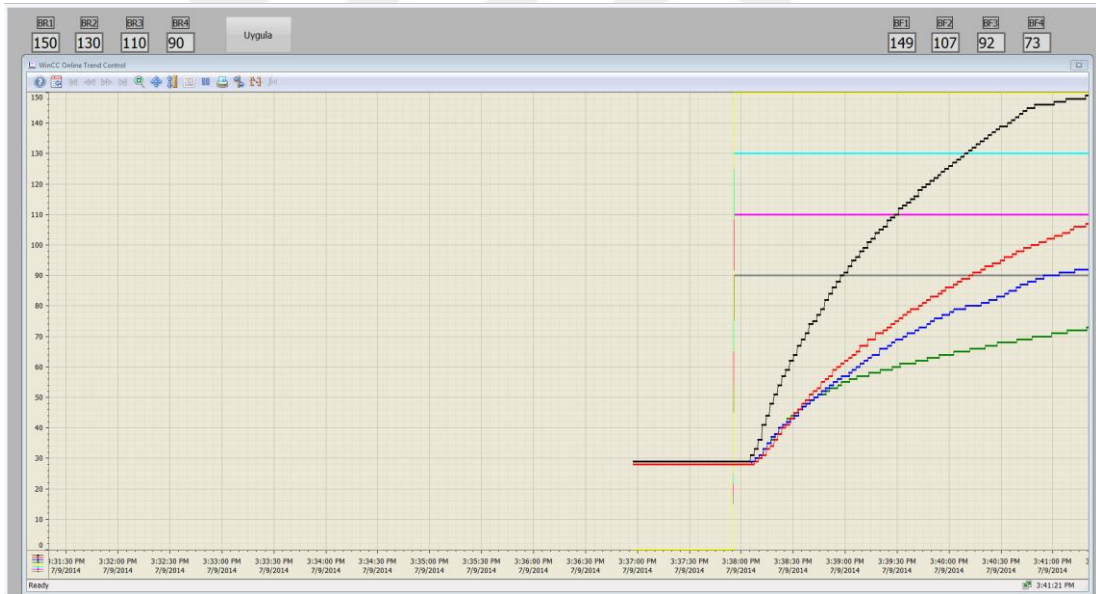
Şekil 3.15. Tiaportal yazılımı arayüzü

Haberleşme sağlandıktan sonra Tiaportal yazılımına entegre bir modül olan WinCC yazılımıyla basit bir arayüz yapılarak kontrolün sağlandığına dair test çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları Şekil 3.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Bilgisayar destekli otomatik kontrol test sonuçları

Test aşaması tamamlandıktan sonra arayüz üzerinde geliştirmelere devam edilmiş ve arayüz son haline getirilmiştir (Şekil 3.17). Arayüzde dört adet sağda, dört adet solda, değerlerin yazılı olduğu kutucuk ve bir grafik ekranı görülmektedir. Sol kutucuklara, fırındaki ilgiyi bölgeye ait hedeflenen değerler girilmektedir. Bütün bölgelere hedeflenen değeri girdikten sonra “Uygula” butonuna basıldığında yazılım aynı anda tüm bölgeler için hedef sıcaklığı güncellemektedir. Sağdaki kutular ise fırındaki her bir bölgenin sıcaklığını 250 milisaniyede bir güncelleyerek anlık olarak göstermektedir. Grafik ekranında da hedeflenen sıcaklık değerleriyle okunan sıcaklık değerleri grafik olarak gösterilmekte, gösterilen değerlerin aralıklara değiştirilebilmekte ve bu değerler excel çıktısı olarak alınarak düzenleme işlemleri yapılabilmektedir.



Şekil 3.17. Fırın kontrol arayüzünün son hali

Fırın kontrol arayüzü tamamlandıktan sonra döküm deneylerinde kullanılacak olan Etial 171 alaşımının likidüs ve solidus sıcaklıklarını belirlemek için termal analiz çalışmalarına geçilmiştir.

3.3. Termal Analiz

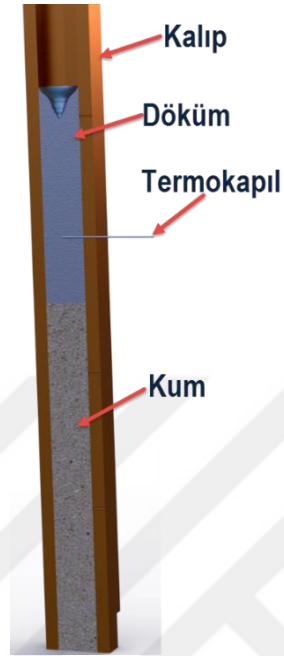
Termal analiz, bir numuneden alınan ısıtma ve/veya soğuma eğrisi üzerinde tespit edilen termal olayların doğrudan bir faz dönüşümüyle ilişkilendirilmesi temeline dayanmaktadır (Dehnavi ve ark., 2015). Bu analiz tekniği, metallerin ve alaşımların likidus-solidus sıcaklıkları, ergime gizli ısı, katı oranı gibi katılma karakteristiklerini belirlemede metalurjistler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır (Barlow ve Stefanescu, 2002; Emadi ve ark., 2005).

Metal ve alaşımların katılmasını araştırmada kullanılan birçok farklı termal analiz yöntemi vardır. Bu yöntemlerden en çok bilinenleri DTA, TGA ve DSC yöntemleridir. Bu üç yöntem yüksek doğrulukla çalışan standardize yöntemler olmakla birlikte numune boyutuna bağımlı olunması, anlık veri alınamaması, yüksek maliyet, uygulama zorluğu gibi nedenlerden dolayı endüstri açısından kullanışlı değildir (Fornaro ve Palacio, 2009; Farahany ve ark., 2013).

Alternatif olarak geliştirilen bilgisayar destekli soğuma eğrisi analiz (BD-SEA) yöntemi, anlık veri verebilen, basit ve ucuz bir yöntem olması bakımından ticari uygulamalar için daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, katılma parametrelerinin (sıcaklık gradyanı, solidus hızı, bölgesel katılma süresi vb.) belirlenebilmesi için likidus ve solidus sıcaklıklarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu sıcaklıkları tespit edebilmek için SEA yönteminden yararlanılmıştır. Kontrollü katılma deneyleri için hazırlanan kalıp, yavaş soğuma elde etmek için yarıya kadar kumla doldurulup (Şekil 3.18.) fırın içine yerleştirilmiştir. Şekil 3.7.'de gösterilen ikinci bölgedeki termokapıl kalıp içine yerleştirilmiş elektrik

direnç ergitme fırınında ergitilen Etial 171 alaşımı kalıba dökülerek ortalama 0,18 °C/sn hızla soğuma gerçekleştirilmiştir.



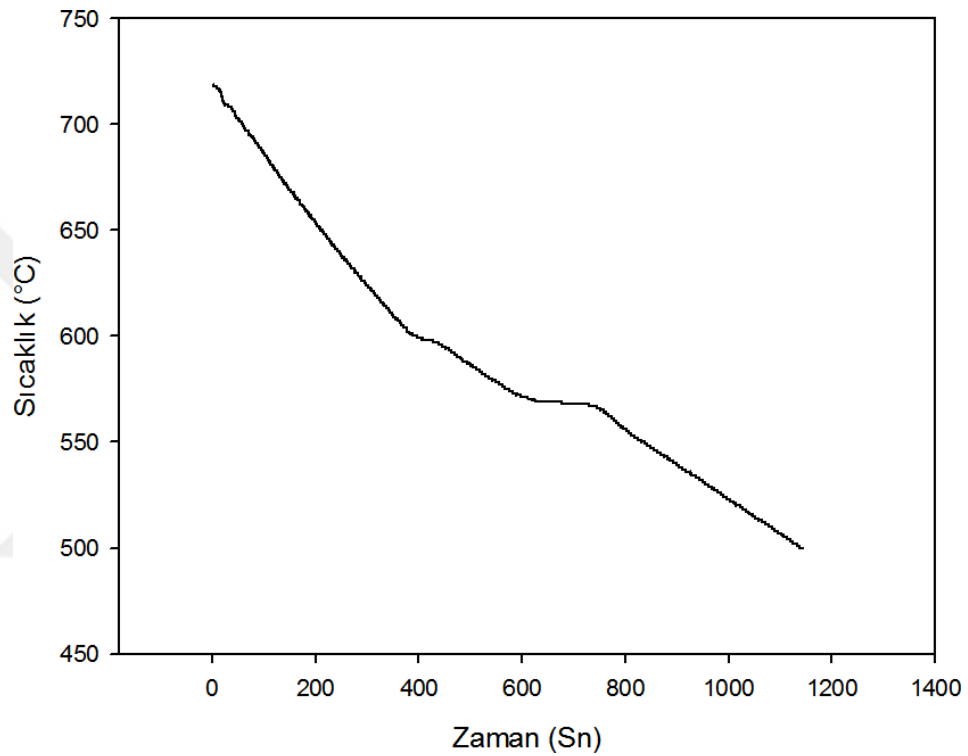
Şekil 3.18. SEA için hazırlanılan kalıp

Soğuma esnasında elde edilen veriler fırın kontrol yazılımı tarafından anlık olarak izlenmiş ve daha sonra işlenmek amacıyla csv formatında kaydedilmiştir (Şekil 3.19.).



Şekil 3.19. Anlık olarak izlenen ve kaydedilen soğuma eğrisi verileri

Kaydedilen veriler bir grafik oluşturma ve düzenleme yazılımında işlenmiş ve Şekil 3.20.'deki soğuma eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen eğri üzerindeki kritik noktaları daha belirgin hale getirebilmek için eğrinin birinci dereceden türevi alınmış ve faz dönüşüm noktaları belirginleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra metal ergitme ve döküm çalışmalarına geçilmiştir.



Şekil 3.20. Etial 171 alaşımına ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.4. Metal Ergitme ve Döküm

Metal ergitme ve döküm işlemlerine geçmeden önce alaşımın kimyasal bileşimini tespit etmek için spektral analiz yaptırılmıştır. Kontrollü katılma deneylerinde kullanılacak olan Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinde primer külçe olarak Etial 171 (A360-AlSi10Mg) alaşımı Tuncel Metal (İstanbul) firmasından temin edilmiştir. Temin edilen külçelerden alınan numuneler spektral analiz için Altun Döküm San. Tic. Ltd. Şti (Konya) firmasına gönderilmiş ve Spectro marka, Spectromax M1156235

model alüminyum ve alaşımlarının optik emisyon spektrometre cihazında analizi yapılmıştır. Elde edilen kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Etial 171 alaşımının spektral analiz sonuçları

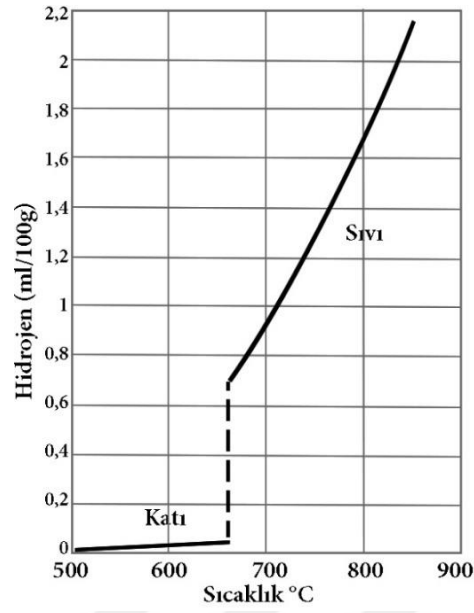
Alaşım Elementi	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	%Al
% Bileşim	9,740	0,266	0,069	0,538	0,501	0,044	0,012	88,77

Alaşımın kimyasal bileşimi ile likidus ve solidus sıcaklıkları belirlendikten sonra ergitme ve döküm işlemlerine geçilmiştir. Ergitme işlemleri Şekil 3.12.'de gösterilen 10 kW gücündeki elektrik direnç ocağında yapılmıştır. Ocak üzerinde bulunan K tipi termokapıl ve elektronik kontaktör termostat ile ergitilmiş metalin sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Pota olarak 8 kg sıvı alüminyum kapasitesine sahip SiC pota kullanılmıştır.

Döküm işlemine geçmeden önce sıvı metalin gazlılığını değerlendirmek ve metali temizlemek için sıvı metal kalite değerlendirme ve temizleme çalışması yapılmıştır.

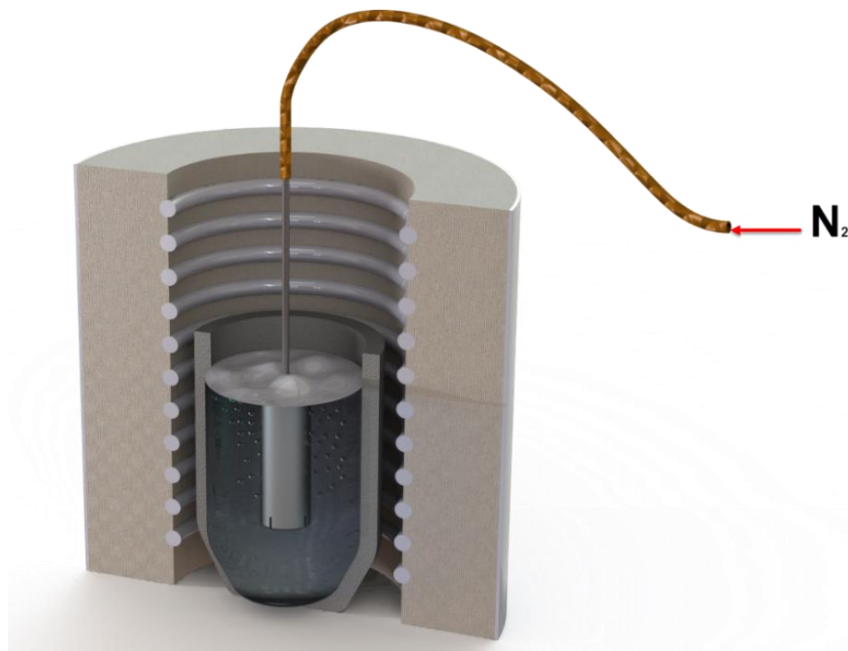
3.4.1. Sıvı metal temizleme ve kalite değerlendirme çalışmaları

Döküm üretimindeki kalite ergitilmiş metal kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Sıvı metal içinde bulunan çözünmemiş gazlar ve inklüzyonlar metal kalitesinin düşmesindeki en önemli etkidir. Ergitilmiş alüminyum alaşımları hidrojen emilimine karşı oldukça duyarlıdır. Sıvı alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü çok yüksek seviyelerdeyken, katı fazda çözünürlük ciddi oranda düşmektedir (Şekil 3.21.). Çözünmemiş gazların varlığı bi-film ve porozite oluşumuna dolayısıyla mukavemet düşüşüne yol açmaktadır(Campbell, 2004; Dispınar, 2005).



Şekil 3.21. Alüminyum içinde hidrojen çözünürlüğü (Campbell, 2015)

Deneyle esnasında çözünmemiş gazların porozite oluşumuna etkisini azaltmak ve metal içerisindeki hidrojen gazların seviyesini en aza indirmek için ergitilmiş sıvı metal daldırılan kanallı grafit lans içerisinde 720°C'de 10 dakika boyunca azot gazı verilmiştir (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Sıvı metal içerisine azot gazı üfleme işlemi

Pratikte basit ve yaygın kullanım alanına sahip olan bu yöntemle, sıvı metal içine tamamen dağılan azot gazı hidrojenin düşük kısmi basıncı nedeniyle hidrojeni içine toplar. Gaz kabarcıklarının içine difüze olan hidrojen, yüzeye doğru yükselerek sıvı metalden arındırılmış olur.

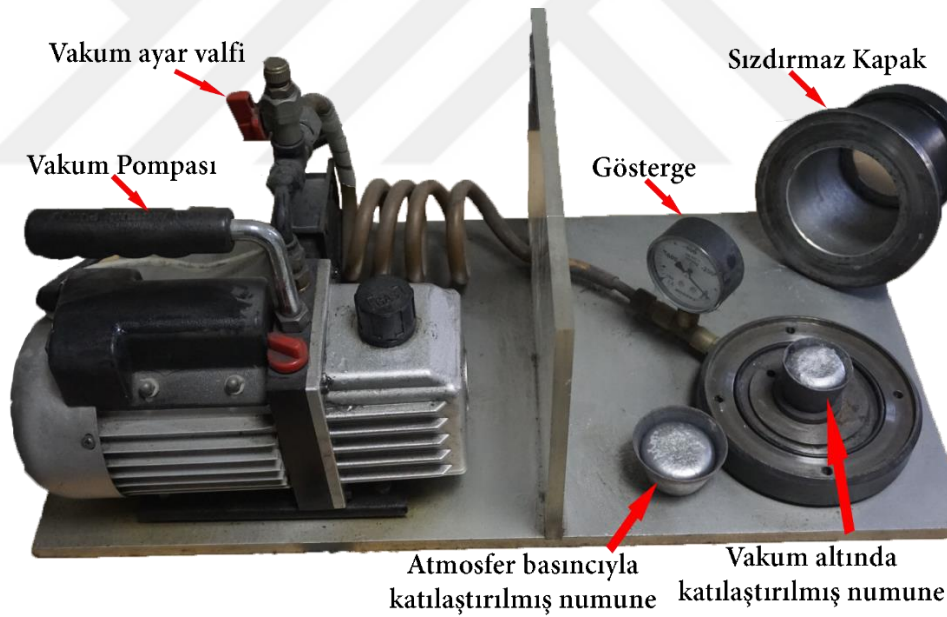
Temizlenen sıvı metalin kalitesini ölçmek için birçok yöntem olmakla birlikte bunların içinde dökümhane pratiğine en uygun ve hızlı sonuç verebilen yöntem düşürülmüş basınç testi (RPT) yöntemidir. Bu yöntem ile çözünmemiş hidrojen, inklüzyonlar ve bifilmeler tespit edilebilmektedir (Dispınar, 2005).

Yöntemin ana ilkesi, sıvı alüminyumun katılaştırılması esnasında düşürülmüş basınç ortamının etkisiyle birlikte gaz gözeneklerinin oluşturulması ve büyütülmesine dayanır. Sıvı metal kalitesi testinin sonuçları, görsel gözlem yoluyla veya yoğunluk endeksi metoduyla olmak üzere iki farklı şekilde incelenebilmektedir. Görsel gözlem metodu, elde edilen numunelerin kesit düzlemlerinin gözle kontrolü ve standart bir cetvel üzerinden sonuçların kıyaslanması prensibine dayalı pratik bir yöntemdir. Yoğunluk endeksi metodu ise atmosferde ve vakum altında katılaştırılmış numunenin yoğunluklarının oranlanmasıyla tespit edilen kantitatif bir yöntemdir ve şu şekilde hesaplanmaktadır (Djurdjevic ve ark., 2010).

$$Y.E = \left(\frac{\rho_a - \rho_v}{\rho_a} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Burada $Y.E$; yoğunluk endeksi değerini, ρ_a ; atmosfer basıncında katılaştırılmış numunenin yoğunluğunu ve ρ_v ise vakum altında katılaştırılmış numunenin yoğunluğunu göstermektedir.

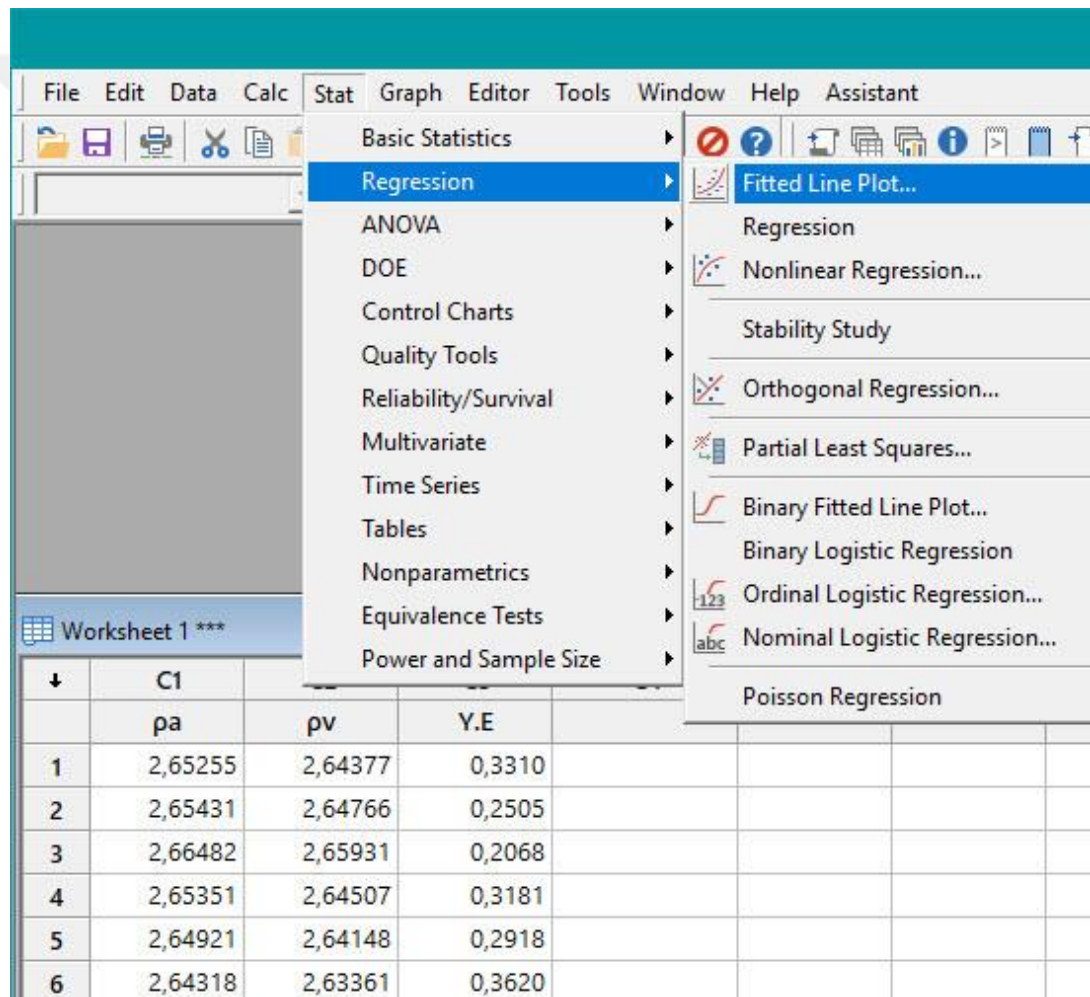
Bu çalışmada, her bir döküm işleminden önce RPT yöntemiyle sıvı metal kalitesi belirleme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde Şekil 3.23.'te gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Dökümden hemen önce potadan bir miktar sıvı metal alınarak yaklaşık 80-100 gr kapasiteli atmosfer altında ve vakum altında katılaştırılarak numune kaplarına döküm yapılmıştır. Ardından atmosfer basıncıyla katılaştırılacak numune kendi halinde katılaştırmaya bırakılmıştır. Aynı zamanda vakum altında katılaştırılacak numunenin sızdırmaz kapağı kapatılmış ve vakum pompası çalıştırılmıştır. Vakum ayar valfinden 1 atm'lik (760mmHg) vakum oluşacak şekilde ayar yapılmış ve bu şekilde vakum altında katılaştırılan RPT numune elde edilmiştir. Elde edilen numunelerden yoğunluk endeksi sonuçları alınarak sıvı metal kalitesi tespit edilmiştir.



Şekil 3.23. RPT Test düzeneği

Yoğunluk endeksi ile RPT numuneleri arasında bir ilişki olup olmadığını tanımlamak için bir paket program yardımıyla regresyon analizi yapılmıştır. Eğer varsa bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki mi yoksa tesadüfi bir ilişki mi olduğu irdelenmiştir. Bu bağlamda, sırasıyla, atmosfer altında ve vakum altında katılaştırılan numuneler ile

Y.E. arasında bir ilişki olup olmadığı incelenmiş ve bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki mi yoksa tesadüfi bir ilişki mi olduğu irdelenmiştir. Bu işlemi gerçekleştirmek için Tablo 4.1.'deki veriler program ara yüzüne eklenmiş ve ardından Stat→Regression→Fitted Line Plot menüsünden regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 3.24.). Fitted Line Plot Menüsü bağımsız bir değişken ile bağımlı bir değişken arasındaki ilişkiyi tanımlamak için regresyon analizi yapan ve analiz sonucunda matematiksel bir model tanımlayarak bu modelin eğrisini çizen araçtır.



Şekil 3.24. Regresyon analizi adımları

Her bir dökümden önce bu şekilde numuneler alınarak benzer kalite ve temizlikteki sıvı metallerle döküm deneylerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu aşamadan sonra

döküm işlemine geçilmiştir. Sıvı metal kalitesi ile ilgili sonuçlar Bölüm 4.'te verilmiştir.

3.4.2. Döküm çalışmaları

Döküm esnasında kalıp ile sıvı metal arasında etkileşimi engellemek için kalıp yüzeyleri su bazlı kokil kalıp boyası ile kaplanmıştır (Şekil 3.25.). Kaplama işlemi püskürtülerek yapılmıştır. Boyanın su bazlı olmasından dolayı, boya püskürtülmeden önce kalıp 150°C'ye ısıtılarak kaplama esnasında suyun buharlaşması sağlanmış ve kaplamanın dayanıklılığı arttırılmıştır.



Şekil 3.25. Kokil kalıp boyası ile kaplanmış kalıp

Döküm işlemine geçilmeden önce kontrol edilmesi gereken bir diğer parametre de termokapılların hazır olup olmadığıdır. Termokapıllar, kontrollü katılma

çalışmalarında fırın bölgelerinin kontrol edilebilmesi ve döküm sonrasında katılaşma parametrelerinin hesaplanabilmesi için kalıbın içine doğru sokulmaktadır. Dolayısıyla döküm işlemi tamamlandıktan sonra termokapılar döküm içinde kalmakta ve bu yüzden kesilerek her dökümden önce yeniden hazırlanmaktadır. Yeniden hazırlanan termokapılar, kalıp içine yerleştirilmeden önce kaynatılmış suya daldırılarak kontrol edilmiştir. Kontrol sonucunda yanlış kutuplara bağlanan termokapılar varsa bunlar düzeltilmiştir. Bazı durumlarda termokapıl uçlarında temassızlık veya kopma olması durumunda termokapıdan PID sıcaklık kontrol cihazına sinyal gitmediğinde PFA adı verilen kopuk bağlantı hatası ile karşılaşmıştır (Şekil 3.26.).



Şekil 3.26. Termokapıl bağlantısında kopukluk olması durumunda görülen hata

Termokapıl bağlantıları kontrol edilip kalibre edildikten sonra kalıp içine yerleştirilmiş ve döküm işlemine hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra döküme geçmeden hemen önce RPT numunesi alınmış ve bununla birlikte yoğunluk ölçümünde kullanılmak üzere referans yoğunluk numunesi alınmıştır. Referans yoğunluk numunelerinin nasıl alındığı ve nerede kullanılacağı Bölüm 3.6.2.1.'de anlatılmıştır. Ardından döküm işleminin daha rahat yapılabilmesini sağlamak amacıyla kalsiyum

silikat plakalardan işlenerek üretilen döküş haznesi kalıp üzerine yerleştirilmiş (Şekil 3.27.) ve döküm işlemine geçilmiştir.



Şekil 3.27. Kalıp üzerine yerleştirilen döküş haznesi

Dökümden sonra açılan kalıbın ve kontrollü katılaşma numunesinin görüntüsü Şekil 3.28.'de verilmiştir.



Şekil 3.28. Döküm sonrası açılan kalıbın ve kontrollü katılaşma numunesinin görüntüsü

Döküm işlemi tamamlandıktan sonra fırın kontrol arayüzü tarafından kaydedilen veriler, katılma parametrelerinin hesaplanmasında, kontrollü katılaştırılan numuneler ise mikroyapı parametrelerinin ölçümünde kullanılmıştır.

3.5. Katılma Parametrelerinin Hesaplanması

Araştırmacılar, katılma esnasında dökümlerin besleme davranışlarını, katılma zamanı ve soğuma hızı ile açıklamaya çalışmışlardır (Kuo, 2012). Katılma bilimindeki ilerlemelerle birlikte, soğuma hızının yerini sıcaklık gradyanı (G) ve solidus (katı-sıvı arayüz ilerleme) hızı (V_s) olmak üzere iki bağımsız parametre almıştır (Guthy, 2002).

Birçok araştırmacı, gözenek oluşum mekanizmasını incelemek için yönlü katılma ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Yönlü katılma, gözenek oluşumunu incelemek için yaygın şekilde kullanılan bir yöntem olmakla birlikte bu tip dökümlerde sıcaklık gradyanı ve solidus hızı parametreleri mekanizmayı anlamada belirleyici rol oynamaktadır (Whitesell ve Overfelt, 2001).

Bölgesel katılma süresi (t_f), sıcaklık gradyanı (G) ve solidus hızı (V_s) gibi katılma parametreleri, mikroyapıyı ve gözenek oluşumunu tahmininde kullanılan önemli faktörlerdir (Shang ve ark., 2004).

Kontrollü katılma çalışmaları esnasında fırın kontrol arayüzünde csv formatında kaydedilen sıcaklık-zaman verileri, excel programında açılarak düzenlenmiştir. Düzenlenen veriler daha sonra SigmaPlot programına aktarılmış ve her bölgeye ait katılma parametreleri (t_f , G , V_s) grafikleri çıkarılmıştır. Daha sonra bu grafikler

üzerinden tek tek ölçümler yapılarak katılma parametrelerine ait değerler hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların nasıl yapıldığı aşağıda sırasıyla alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.5.1. Sıcaklık gradyanının hesaplanması

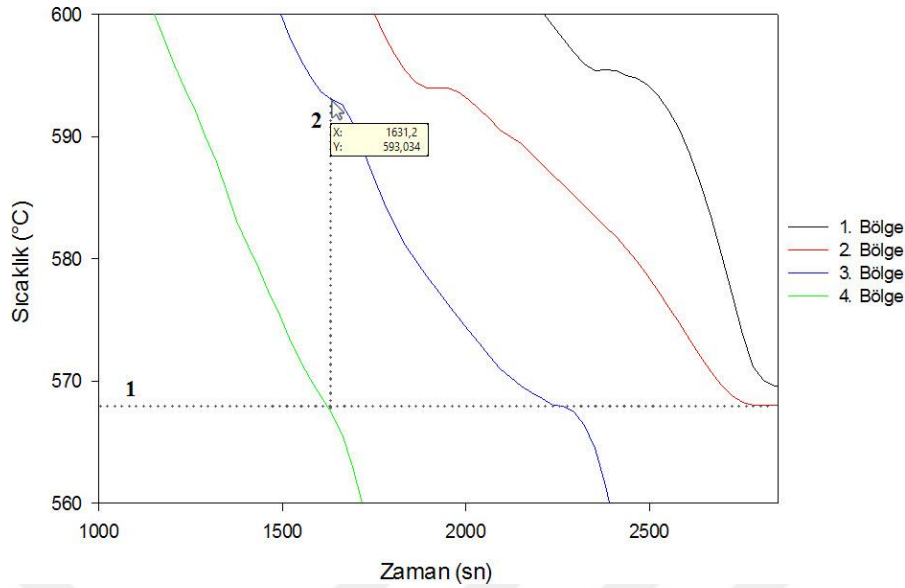
Tek yönlü kontrollü katılma çalışmasında ısı akışı tek yönlüdür. Şekil 3.7. incelendiğinde katılmanın, bakır soğutucuyla yönlendirilerek 4. Bölgeden 1. Bölgeye doğru ilerlediği görülmektedir. Bu durumda sıcaklık gradyanı X_4 konumundaki termokapıl katı-sıvı ara yüzey (solidus) sıcaklığına ulaştığında X_3 konumundaki termokapıl ile arasındaki sıcaklık farkının termokapıllar arası mesafeye bölünmesiyle hesaplanmıştır (Gandin, 2000; Elhadad, 2003).

Buna göre sıcaklık gradyanı formülü şu şekildedir.

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_3 - T_4}{X_3 - X_4} \quad (3.2)$$

Burada G; sıcaklık gradyanını, ΔT ; ilgili bölgelerdeki termokapılların sıcaklık farkını ve ΔX ise ilgili bölgelerdeki termokapıllar arası mesafeyi göstermektedir. Sıcaklık gradyanının birimi $^{\circ}\text{K}/\text{cm}$ veya $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ olarak tanımlanmıştır (Elhadad, 2003).

Bölgelere ait sıcaklık gradyanının soğuma eğrileri ile hesaplanması şu şekildedir. Şekil 3.29'da SigmaPlot programı ile örnek olarak çizdirilen grafiklerde dört ayrı bölgeye ait soğuma eğrileri bulunmaktadır. Siyah renk, Şekil 3.7.'de tanımlanmış olan 1. Bölge'ye, Kırmızı renk 2. Bölge'ye, Mavi renk 3. Bölge'ye ve Yeşil renkte 4. Bölge'ye ait termokapıl verilerini göstermektedir.



Şekil 3.29. Kontrollü katılaştırılmış numunenin soğuma eğrileri üzerinden sıcaklık gradyanı hesaplanması

İlk aşamada bu eğriler üzerinde tespit edilen sıvı-katı arayüz (solidus) sıcaklığını belirtmek için 568°C den 1 numaralı yatay çizgi çizilmiştir. 4. Bölgedeki termokapıl sıcaklığı solidus sıcaklığına ulaştığı noktada 2 numaralı dik çizgi çizilerek aynı anda 3. Bölgedeki termokapıl sıcaklığı 593°C olarak ölçülmüştür. İki termokapıl arasındaki mesafe ise 10,8 cm olarak ölçülmüştür. Tespit edilen değerler Denklem 3.3.'te yerine yerleştirilerek aşağıdaki sonuç bulunmuştur.

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_3 - T_4}{X_3 - X_4} = \frac{593 - 568}{10,8} = 2,315 \text{ } ^\circ\text{C/cm} \quad (3.3)$$

Bu örneğe ve diğer yapılan deneysel çalışmalara ait hesaplanan sıcaklık gradyanı değerleri Bölüm 4.'te verilmiştir.

3.5.2. Solidus hızının hesaplanması

Solidus hızı, X_1 konumundaki termokapılın t_1 zamanında solidus sıcaklığına erişmesiyle X_2 konumundaki termokapılın t_2 zamanında solidus sıcaklığına

erişmesinin birbirine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır (Tynelius, 1992). Buna göre solidus hızı Denklem 3.4.'te formüle edildiği şekliyle hesaplanabilir:

$$V_s = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_1 - X_2}{t_1 - t_2} \quad (3.4)$$

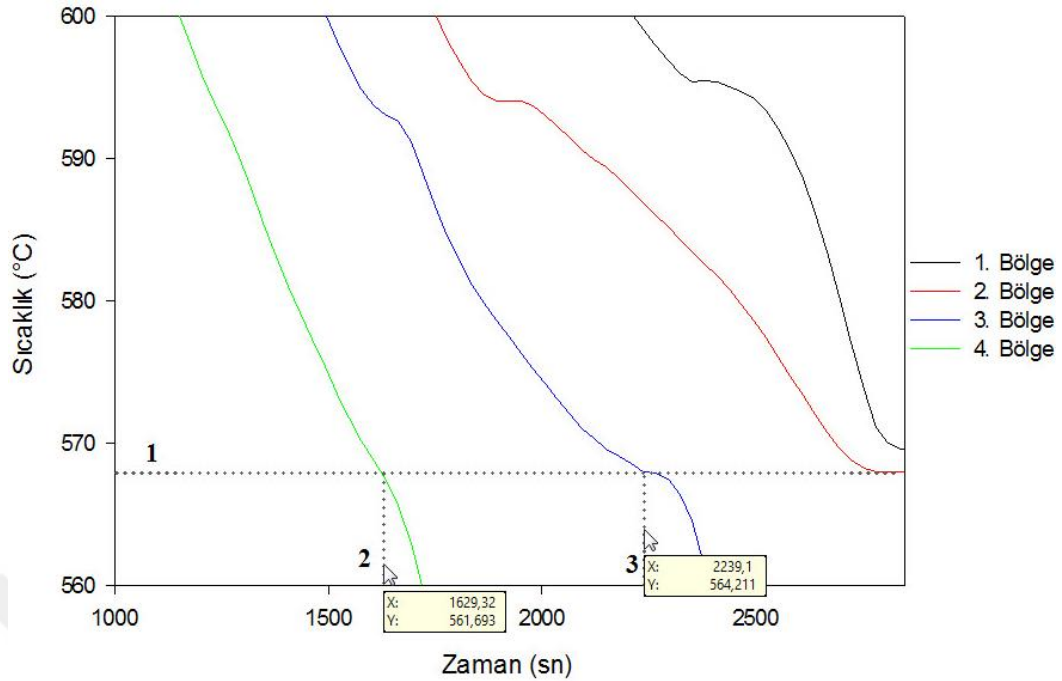
Burada V_s ; solidus hızını, Δt ; ilgili bölgelerdeki termokapılların solidus sıcaklığına eriştikleri zamanı ve ΔX ise ilgili bölgelerdeki termokapıllar arası mesafeyi göstermektedir.

Solidus hızı, tek yönlü kontrollü katılma deneyinden elde edilen veriler ile SigmaPlot programında çizdirilen soğuma eğrileri (Şekil 3.30.) üzerinden aşağıdaki örnekte gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

İlk olarak, tespit edilen solidus çizgisini göstermek için 1 numaralı yatay çizgi çizilmiştir. Daha sonra 4. Bölge soğuma eğrisinin 1 numaralı yatay çizgiyle kesiştiği noktadan aşağı doğru (Zaman eksenine) dik bir şekilde 2 numaralı çizgi indirilerek solidus sıcaklığına düşme zamanı (1629 sn) tespit edilmiştir. Son olarak katılmanın ilerlediği yöndeki bir sonraki bölge olan 3. Bölgedeki termokapılın 1 numaralı yatay çizgiyle kesiştiği noktadan aşağı doğru Zaman eksenine dik bir şekilde 3 numaralı çizgi indirilerek solidus sıcaklığına düşme zamanı (2239 sn) tespit edilmiştir. İki termokapıl arasındaki mesafe ise 108 mm olarak ölçülmüştür.

Bu değerler Denklem 3.5.'te yerine yerleştirildiğinde aşağıdaki sonuç bulunmuştur.

$$V_s = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{108}{2239 - 1629} = \frac{108}{610} = 0,177 \text{ mm/sn} \quad (3.5)$$



Şekil 3.30. Kontrollü katılaştırılmış numunenin soğuma eğrileri üzerinden solidus hızının hesaplanması

Bu örneğe ve diğer yapılan deneysel çalışmalara ait hesaplanan solidus hızı değerleri Bölüm 4.'te verilmiştir.

3.5.3. Bölgesel katılma süresinin hesaplanması

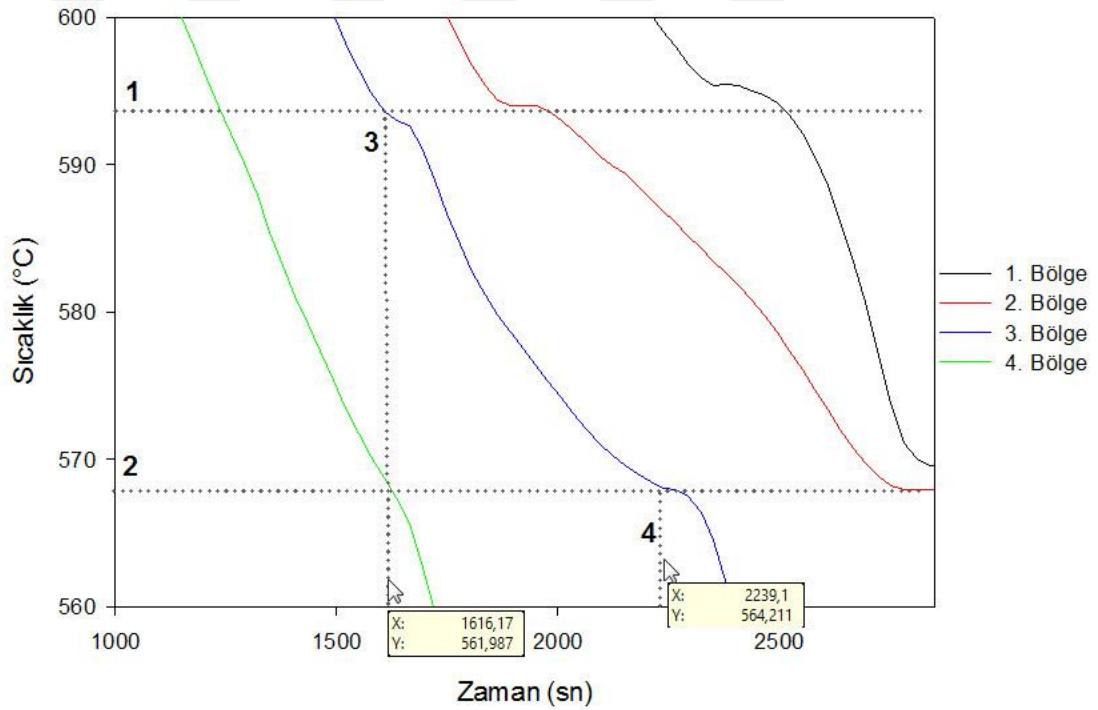
Döküm yöntemiyle üretilen parçalarda, yorulma ömrünün düşmesi maksimum gözenek çapıyla doğrudan alakalıdır. Gözenek çapındaki artış ise ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe artışına ve bölgesel katılma süresindeki artışa bağlıdır (Boileau ve Allison, 2003). Yönlü katılaştırılmış Al-4,5Cu alaşımında, porozite oluşumuna dendritler arası akışın etkisinin incelendiği bir çalışmada bölgesel katılma süresi arttıkça porozitenin de arttığı tespit edilmiştir (Kao ve ark., 1995).

Bölgesel katılma süresi, sıvı metalin likidus sıcaklığından, solidus sıcaklığına soğuyana kadar geçen zaman olarak tanımlanmakta ve Denklem 3.6.'da gösterildiği gibi formüle edilmektedir (Bichler, 2005).

$$t_f = t_s - t_l \quad (3.6)$$

Burada t_f ; bölgesel katılma süresini, t_s ; ilgili bölgedeki termokapılın solidus sıcaklığına eriştiği zamanı ve t_l ise ilgili bölgedeki termokapılın likidus sıcaklığına eriştiği zamanı göstermektedir.

Bölgesel katılma süresi, tek yönlü kontrollü katılma deneyinden elde edilen veriler ile SigmaPlot programında çizdirilen soğuma eğrileri (Şekil 3.31.) üzerinden aşağıdaki örnekte gösterildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 3.31. Kontrollü katılaştırılmış numunenin soğuma eğrileri üzerinden bölgesel katılma süresinin hesaplanması

İlk olarak, tespit edilen likidus ve solidus noktalarını göstermek için 1 ve 2 numaralı yatay çizgiler çizilmiştir. Daha sonra 3. Bölge soğuma eğrisinin 1 numaralı yatay çizgiyle kesiştiği noktadan aşağı doğru dik bir şekilde 3 numaralı çizgi indirilerek likidus sıcaklığına erişme zamanı (1616 sn) tespit edilmiştir. Ardından 2 numaralı

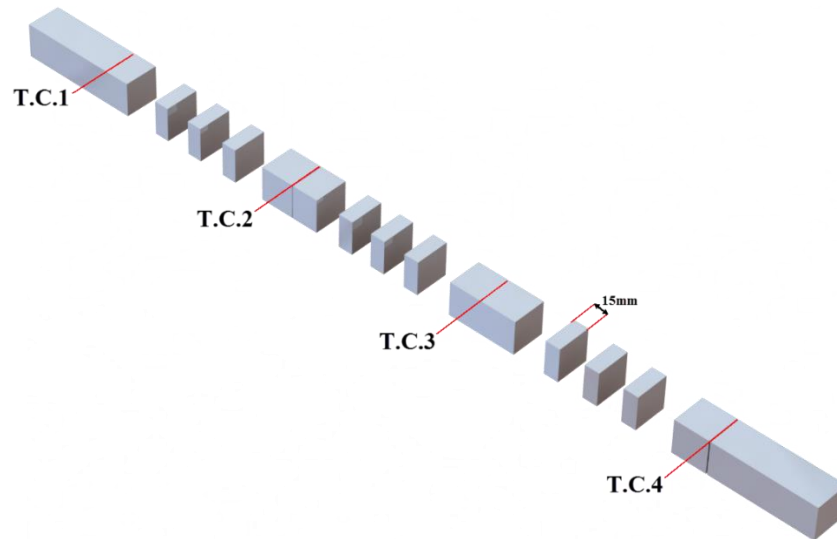
yatay çizgiyle kesiştiği noktadan aşağı doğru dik bir şekilde 4 numaralı çizgi indirilerek solidus sıcaklığına erişme zamanı (2339 sn) tespit edilmiştir. Bu değerler Denklem 3.7.'de yerine yerleştirildiğinde aşağıdaki sonuç bulunmuştur.

$$t_f = t_s - t_l = 223 - 1616 = 723 \text{ sn} \quad (3.7)$$

Bu örneğe ve diğer yapılan deneysel çalışmalara ait hesaplanan bölgesel katılma süresi değerleri Bölüm 4.'te verilmiştir.

3.6. Metalografik İşlemler

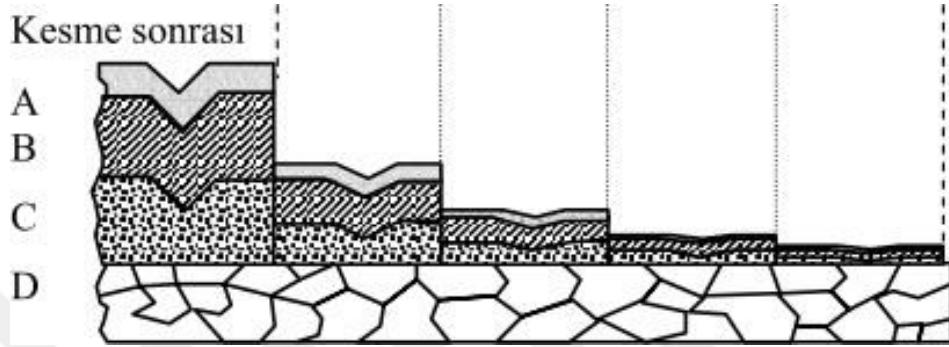
Tek yönlü kontrollü katılaştırılmış numuneler yoğunluk ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri için Presi Mecatome T260 hassas kesme cihazında Şekil 3.32.'de gösterildiği gibi kesilmiştir.



Şekil 3.32. Yoğunluk ve mikroyapı incelemeleri için kesilen numune kesitleri

Kesilen numunelerde ilk olarak gözeneklilik ölçümü yapılmıştır. Daha sonra mikroyapı incelemeleri için metalografik işlemlere geçilmiştir. Metalografik işlemler

zımparalama ve parlatma olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk etapta, kesme diskinden kaynaklanan yüzey pürüzlülüklerinin gidermek için 180 gritlik SiC kaba zımparadan başlayarak sırasıyla 400, 800, 1200 ve 2500 gritlik zımparalarla zımparalama işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.33.).



Şekil 3.33. Zımparalama aşamaları sonrasında yüzey pürüzlüklerinin giderilmesi (Berkdemir, 2009)

Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra parlatma aşamasına geçilmiştir. Parlatmanın amacı, zımparalama sonrasında yüzeyde oluşan deformasyonları ortadan kaldırarak numunenin iç yapısını ortaya çıkarmaktır (Kaya, 2001). Bu kapsamda, sırasıyla 3 μ m ve 1 μ m alümina süspansiyon ile ardından 0,5 μ m koloidal silica ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler, Döküm Laboratuvarında hazırlanan 190ml distile su, 5ml HNO₃, 3ml HCl ve 2ml HF içeren Keller (Zipperian, 2011) çözeltisiyle dağlanarak mikroyapı incelemelerine hazır hale getirilmiştir.

3.7. Mikroyapı İncelemesi

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin mikroyapı çekimleri Nikon marka Eclipse L150 model mikroskopta 50 ve 100 kez büyütmelerde yapılmıştır. Daha sonra ImageJ görüntü analiz yazılımı yardımıyla mikroyapı görüntüleri üzerinden inceleme ve ölçümler yapılmıştır.

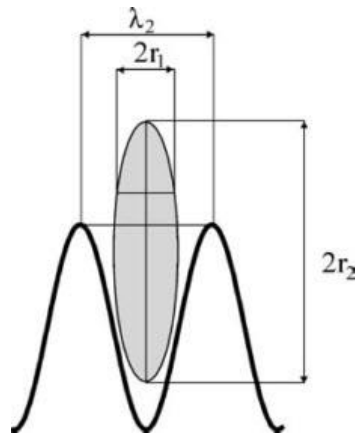
3.7.1. İkincil dendrit kolları arası mesafenin hesaplanması

Araştırmacılar, porozite oluşumuyla ilgili olarak yaptıkları çalışmalarda gaz porozitesinin ikincil dendrit kolları arasında çekirdeklenerek büyüdüklarini kabul etmektedir (Kubo ve Pehlke, 1985; Kao ve ark., 1994; Atwood ve Lee, 2003).

Kao ve arkadaşları (1995), ikincil dendrit kolları arasında gaz porozitesi oluşumunu Şekil 3.34.'te görüldüğü gibi şematize ederek Denklem 3.8.'de matematiksel olarak ifade etmektedir.

$$r_1 = \frac{\lambda_2}{4} \quad (3.8)$$

Burada, r_1 ; gaz baloncuğunun genişliği, λ_2 ise ikincil dendrit kolları arası mesafeyi göstermektedir. Bu formülden de anlaşılacağı gibi gaz porozitesiyle ikincil dendrit kolları arası mesafe arasında bir ilişki bulunmaktadır.

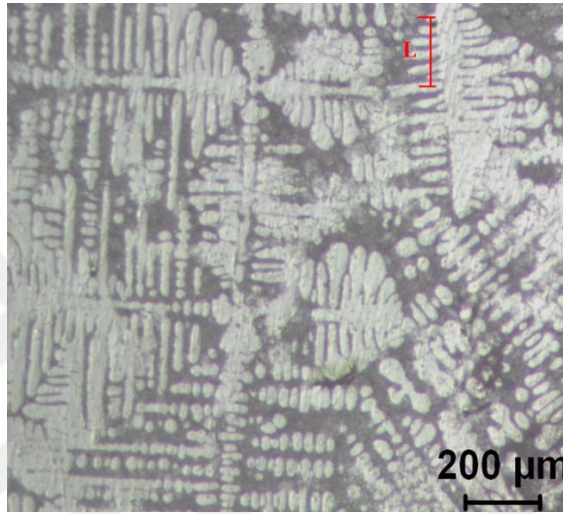


Şekil 3.34. Gözenek oluşumunun şematik görüntüsü (Melo ve ark., 2005)

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin mikroyapı görüntüleri çekilmiş ve bu görüntüler ImageJ görüntü analiz yazılımı ile açılmıştır. Ardından L uzunluğunda bir

çizgi çizilerek bu çizgi üzerinde n adet ikincil kol olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.35.). Buna göre ikincil dendrit kolları arası mesafe Denklem 3.9.'daki gibi formüle edilebilir (Spinelli ve ark., 2004).

$$\lambda_2 = \frac{L}{n - 1} \quad (3.9)$$



Şekil 3.35. İkincil dendrit kolları arası mesafenin hesaplanması

Her bir numune için bu ölçümler yapılmış ve bunun ile ilgili sonuçlar Bölüm 4.'te verilmiştir.

3.8. Gözeneklilik ölçümü

Döküm numunelerinde oluşan gözenekleri ve bu gözeneklerin katılaşma parametreleriyle ilişkisini tanımlayabilmek için üç farklı metot uygulanmıştır.

- Arşimet prensibine dayalı yoğunluk ölçümü
- 2 boyutlu mikroskobik inceleme
- Bilgisayarlı tomografi taraması

Bu üç metodun deney numuneleri üzerinde uygulaması alt başlıklar halinde şu şekilde anlatılmıştır.

3.8.1. Yoğunluk ölçümü

Arşimet prensibiyle yoğunluk ölçüm metodu, döküm parçalardaki porozite miktarını tespit edebilmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Anson, 2000). Bu yöntemle, porozite miktarı Denklem 3.10.'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\%P = \left(\frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t} \right) * 100 \quad (3.10)$$

Burada %P; gözeneklilik oranını, ρ_t ; teorik yoğunluğu ve ρ_d ise deneysel yoğunluğu göstermektedir. Bu metot ile yoğunluğu hesaplayabilmek için teorik yoğunluk ve deneysel yoğunluk değerlerini bilmemiz gerekmektedir. Bu yoğunluk değerleri de Denklem 3.11.de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\rho_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} * \rho_s \quad (\text{Dispınar, 2005}) \quad (3.11)$$

Burada ρ_n ; numune yoğunluğunu, m_h ; numunenin havadaki ağırlığını, m_s ; numunenin sudaki ağırlığını ve ρ_s ise ölçüm yapılan suyun özgül ağırlığını göstermektedir.

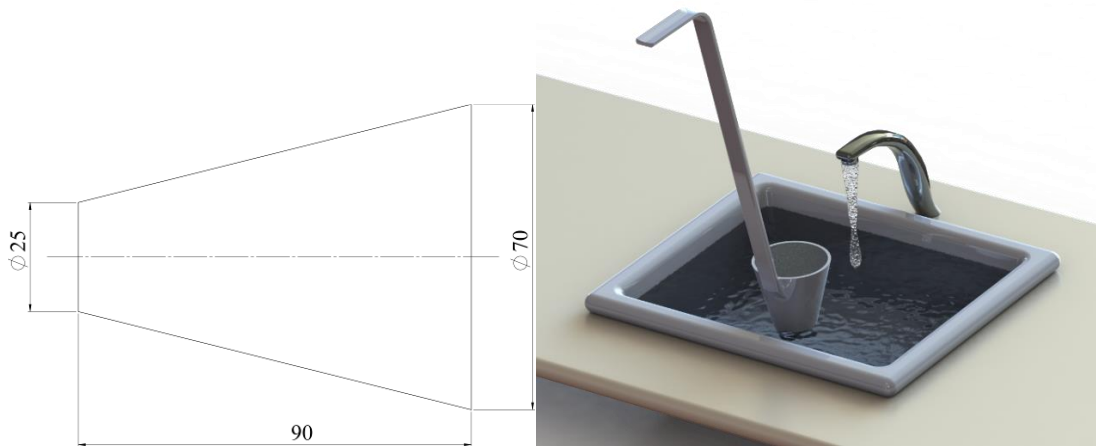
Yoğunluk ölçümleri Şekil 3.36.'da gösterilen 1,5 kg ağırlık tartım kapasiteli 0,02 gr hassasiyete sahip Dikomsan marka HT-SH1500 model Arşimet düzeneğinde yapılmıştır.



Şekil 3.36. Yoğunluk ölçümlerinin yapıldığı Arşimet düzeneği

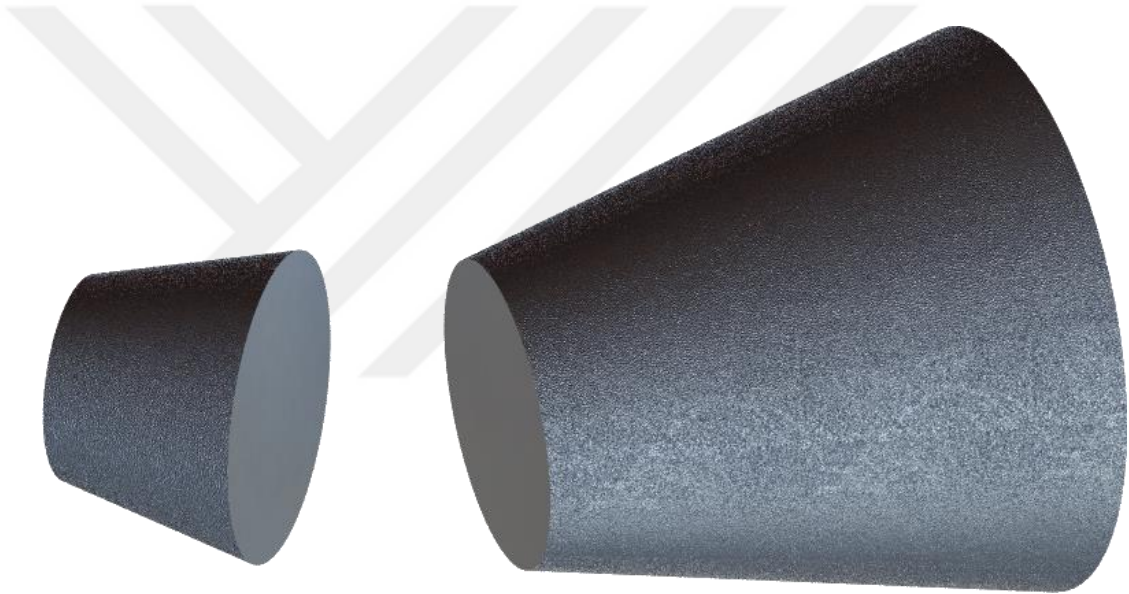
Hassas terazinin altında, numuneyi bağlayarak suya daldırabileceğimiz serbest halde hareket edebilen bir ipin bağlı olduğu kanca bulunmaktadır. Ölçümler 15°C sıcaklıkta, 0,99925g/cm³ yoğunluğundaki suda yapılmıştır.

Yoğunluk ölçüm metoduyla her bir döküm numunesindeki gözenekliliği belirlemek için teorik yoğunluk değerinin de bilinmesi gerekmektedir. Kontrollü katılaşma deneylerine geçmeden önce ilk olarak sıvı metalden RPT numunesi alınmış ardından da hızlı katılaşma düzeneğiyle malzemenin teorik yoğunluğu hesaplanmıştır. Teorik yoğunluk numunesinin ölçüleri ve hızlı katılaşma düzeneğinin görüntüleri Şekil 3.37.'de verilmiştir.



Şekil 3.37. a) Teorik yoğunluk numunesinin ölçüleri, b) Hızlı katılaşma düzeneği

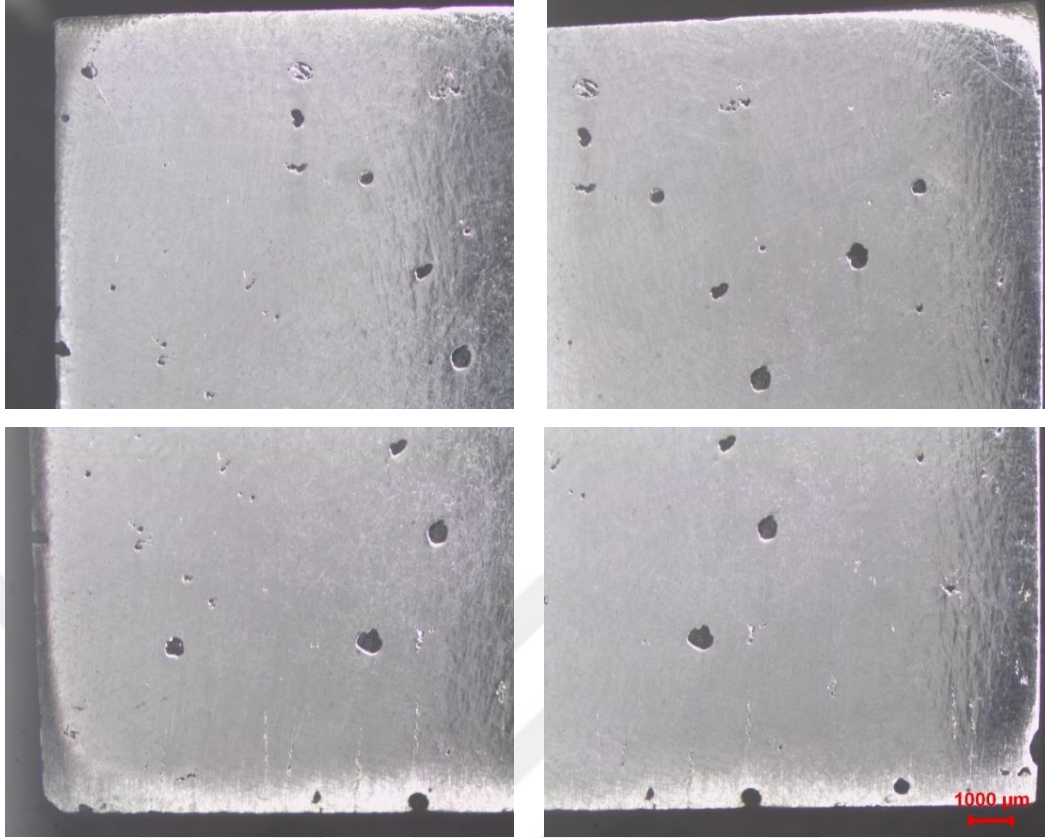
Hızlı katılaştırma düzeneğiyle teorik yoğunluk hesaplaması şu şekildedir. Yaklaşık 300 gr sıvı alüminyum alabilen metal bir kalıba ergitilmiş alüminyum dökülmüş ve bu kalıp (Şekil 3.37.b) akan suyun içine daldırılmıştır. Bu yöntemle numune hızlı bir şekilde katılaştırılarak Etial 171 alaşımının mümkün olan en yoğun halinin dökülebilmesi hedeflenmiştir. Dökülen bu numune, alt tarafının 25mm yukarisından kesilerek (Şekil 3.38.) Arşimet düzeneğinde yaş ve kuru ağırlıkları alınmış ve bu değerler Denklem 3.11.'de yerine yerleştirilerek kontrollü katılaştırılan numuneye ait teorik yoğunluk hesaplanmıştır.



Şekil 3.38. Teorik yoğunluk ölçümü yapılan hızlı katılaştırma numunesi

3.8.2. Görüntü analizi metodu ile gözeneklilik ölçümü

Görüntü analiz metodunda, incelenecek numunenin, parçanın tamamını temsil etmesini sağlamak ve daha geniş bir düzlemde inceleme yaparak sağlıklı sonuçlar elde edebilmek amacıyla numunenin birbirine komşu olan farklı kesitlerinden mikroyapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 3.39.).



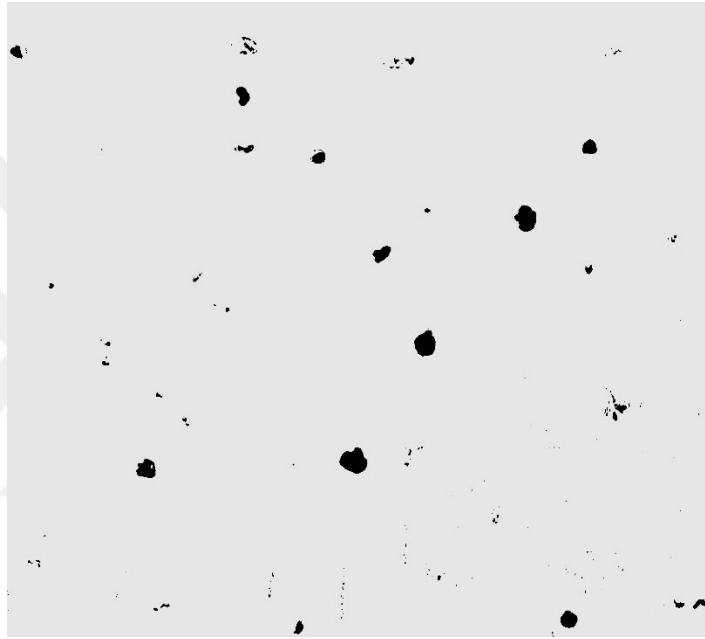
Şekil 3.39. Gözeneklilik incelemesi için farklı kesitlerden alınan mikroyapı görüntüleri

Farklı kesitlerden alınan bu mikroyapı görüntüleri bir resim düzenleme yazılımıyla, görüntüler üzerindeki ortak noktalar referans alınarak birleştirilmiş ve tek parça haline getirilmiştir (Şekil 3.40.).



Şekil 3.40. Farklı kesitlerden alınan mikroyapı görüntülerinin birleştirilmesi

Birleştirilen görüntüler ImageJ yazılımına aktarılarak görüntü analizine hazır hale getirilmiştir. İlk etapta alan ölçümlerinin doğru yapılabilmesi amacıyla *Analyze* → *Set Scale* menüsünde ölçü kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra yazılımın gözenekli alanlarla dolu alanları ayırt edebilmesi amacıyla *Process* → *Binary* → *Make Binary* menüsünden eşik ayarı yapılmıştır (Şekil 3.41.).



Şekil 3.41. Gözenekli alanlarla dolu alanların ayırt edilmesi

Son olarak gri ve siyah bölgelere ayrılan görüntü üzerinde alan hesabı yapmak için *Analyze* → *Analyze Particles* menüsüne girilmiş ve gri bölgelerin siyah bölgelere dolayısıyla gözenekli bölgelerin dolu bölgelere oranı hesaplanmıştır (Şekil 3.42.).

3.8.3. Bilgisayarlı tomografi taraması

Bilgisayarlı tomografi taraması (Xray-CT) mantık olarak radyografik muayenede olduğu gibi yüksek yoğunluklu X-ışın demetlerinin parçaya nüfuz ettirilmesi

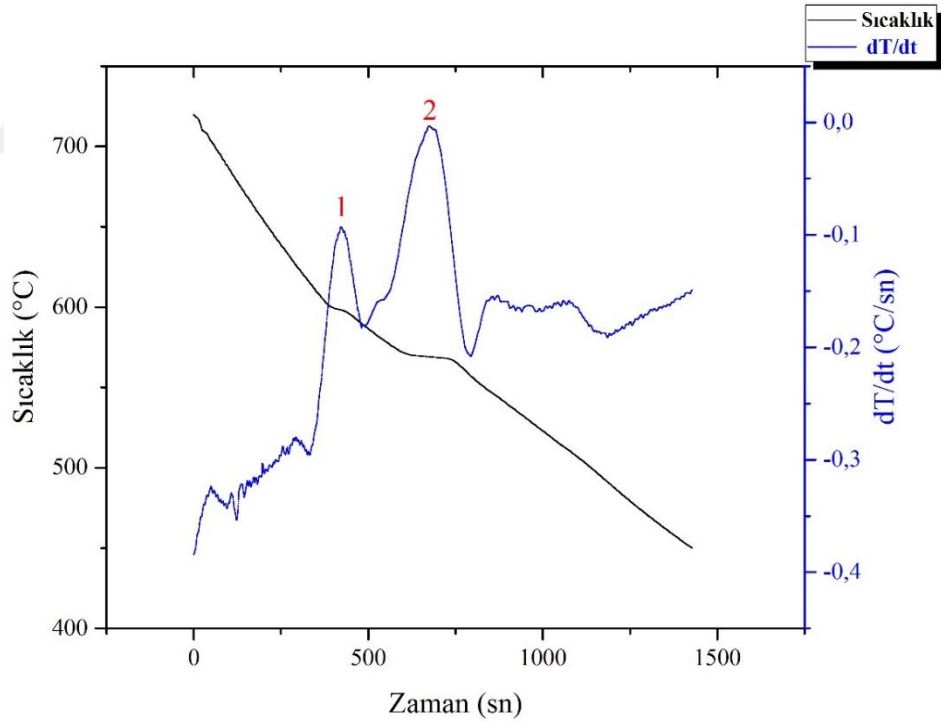
prensibiyle çalışmaktadır. Radyografik muayeneden farkı elde edilen sonuçların üç boyutlu olmasıdır. Bilgisayarlı tomografi taramasında, numune döner bir tabla üzerine oturtularak yavaşça döndürülür ve numuneye x-ışınları gönderilir. Döndürme esnasında gönderilen x-ışınlarından karşıya geçenler ve parça tarafından emilenler bir yazılım tarafından radyografik film karesi olarak bilgisayara kaydedilir. Kaydedilen bu kareler daha sonra bir yazılım tarafından birleştirilerek işlenir ve numunenin üç boyutlu hali ekranda gösterilir. Geçen ve emilen x-ışınları sayesinde gözenekli bölgelerdeki boşluklar, bu boşlukların hacmi bilgisayar ekranında görülebilmekte ve büyüklükleri hesaplanabilmektedir (Nicoletto ve ark., 2010).

Bilgisayarlı tomografi çalışmaları doğrulama numunesindeki gözenekli bölgeleri üç boyutlu olarak tespit edebilmek amacıyla Karfo Endüstriyel Ltd. Şti. firmasının bünyesinde bulunan Nikon XT H 225 cihazıyla yapılmıştır. Döner tablaya oturtulan numune üzerinde $0,24^\circ$ 'de bir kare alınarak toplam 1500 kare radyografik film çekilmiştir. Bu kareler birleştirilerek VGStudio Max programında işlenmiş gözenekli bölgelere ait bilgiler elde edilmiştir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Termal Analiz Sonuçları

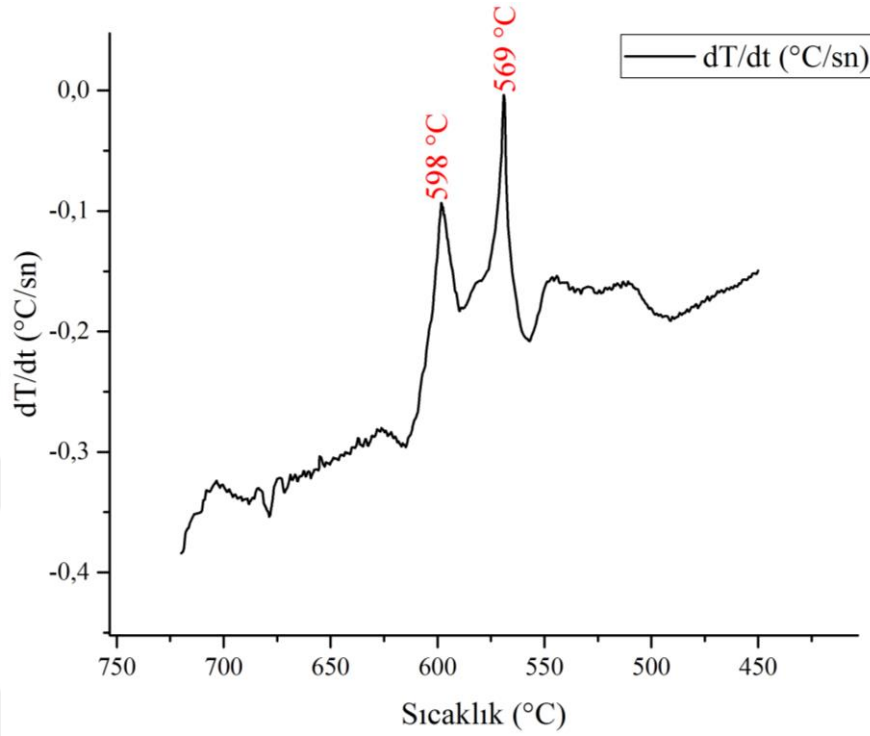
Soğuma eğrisinin birinci dereceden türevinin alınması eğri üzerindeki karakteristik nokta tespit hassasiyetini arttırmaktadır (Barlow ve Stefanescu, 2002). Bu yüzden soğuma eğrisinin türevi alınarak likidus ve solidus dönüşümlerinin eğri üzerinde daha belirgin hale getirilmesi sağlanmıştır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Soğuma eğrisi ve birinci türevi

Eğri üzerindeki 1 numaralı nokta likidus, 2 numaralı nokta ise solidus sıcaklığını vermektedir. Bu noktaların hangi sıcaklıklara denk geldiği belirlemek için Sıcaklık-

Türev eğrisi çizdirilmiştir (Şekil 4.2.). Çizdirilen eğriye göre likidus sıcaklığı 598°C ve solidus sıcaklığı 569°C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Sıcaklık-birinci türev eğrisi

4.2. Sıvı Metal Kalite Değerlendirme Sonuçları

Yapılan kontrollü katılaşma çalışmalarında farklı metal kalitelerinin mikroyapı parametrelerine etkilerini minimize edebilmek için her dökümden önce gaz alma işlemi yapılarak metal kalitesi test edilmiştir. Burada amaç, sıvı metal kalitesini belirli bir aralıkta tutarak her bir döküm için metal kalitesi etkisinin standart olmasını sağlamaktır.

Kontrollü katılaşma deneylerinden önce azot gazı ile temizlenen potadan kepçeyle sıvı metal alınarak atmosfer altında ve vakum altında RPT test numuneleri katılaştırılmıştır. Katılaştırılmış numunelerin, arşimet düzeneğine göre ağırlıkları ve

yoğunlukları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Denklem 3.1.'de yerine yerleştirilerek her numune için yoğunluk endeksi değeri hesaplanmıştır. Daha sonra vakum altında katılaştırılmış olan RPT test numuneleri ortadan kesilmiş ve gözle kontrol edilmiştir. RPT numunelerinin taranmış hali Şekil 4.3.'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Vakum altında katılaştırılan RPT numunelerinin taranmış görüntüsü

Atmosfer basıncıyla ve vakum altında katılaştırılan numunelere ait yoğunluk değerleri ve yoğunluk endeksi değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

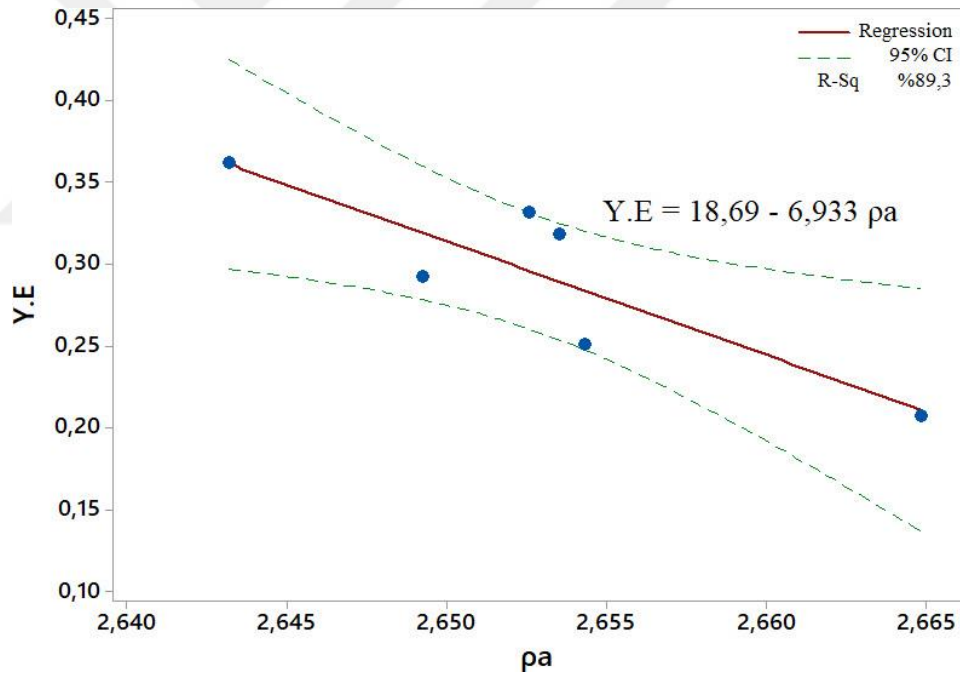
Tablo 4.1. RPT numunelerine ait yoğunluk ve yoğunluk endeksi değerleri

Numune No	ρ_a (g/cm ³)	ρ_v (g/cm ³)	Y.E
1	2,65351	2,64507	0,3181
2	2,64921	2,64148	0,2918
3	2,64318	2,63361	0,362
4	2,65255	2,64377	0,331
5	2,65431	2,64766	0,2505
6	2,66482	2,65931	0,2068

Yoğunluk endeksi değerinin düşüklüğü metal kalitesinin yüksek olduğunun bir göstergesidir (Djurđjevic ve ark., 2010). Aynı zamanda Al-Si alaşımları için üst limit 1,2 olarak kabul edilmektedir (DeWeese ve ark., 1992). Bu çalışmada hesaplanan

yoğunluk endeksi değerlerinin 1,2'nin oldukça altında olması sıvı metalin kalitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Yoğunluk endeksi değerleri belirli bir aralıkta tutularak metal kalitesinin mikroyapı parametreleri üzerine farklı etkilerinin minimize edilmesi sağlanmıştır. Bununla birlikte yoğunluk endeksinde azalmaya bağlı olarak RPT numunelerinin yoğunluklarında artış görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını açıklamak ve matematiksel bir model oluşturabilmek için regresyon analizi yapılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak atmosfer altında katılaştırılan numuneler ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki irdelenmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Atmosfer altında katılaştırılan numune ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki

Yukarıdaki şekilde kırmızı renkli eğri hesaplanan doğrusal regresyon analizi eğrisidir. Bu eğrinin denklemi, Denklem 4.1.'de verilmiştir.

$$Y.E = 18,69 - 6,933 \rho_a \quad (4.1)$$

R^2 (R-sq) değeri 1 sayısına ne kadar yakın bulunursa, bağımlı değişkenin bağımsız değişken tarafından o kadar açıklanabilir yorumu yapılmaktadır (Ergun, 1995). Bu çalışma için tespit edilen R^2 değeri %89,3'tür. Bu da Y.E. bağımlı değişkeninin, ρ_a bağımsız değişkeni tarafından %89,3 oranında açıklanabildiği anlamına gelmektedir. Şekil 4.4.teki grafikte yer alan bir başka sonuç ise yeşil kesik çizgilerle gösterilen güven aralığı (CI) sonuçlarıdır. Güven aralığı, hesaplanan değeri istatistiksel olarak kapsayacak olası değerler aralığı olarak yorumlanır (Nakagawa ve Cuthill, 2007). Bu çalışmada elde edilen sonuçlara dayanarak %95 güven aralığı eğrisi çizdirilmiş ve daha sonra yapılabilecek benzer çalışmalarda elde edilecek sonuçların %95 ihtimalle belirlenen aralıkta olacağı öngörüsünde bulunulmuştur.

Tablo 4.2.de atmosfer altında katılaştırılan numuneler ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlılığını incelemek için yapılan varyans analizi testi sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.2. Atmosfer altında katılaştırılan numuneler için varyans analizi tablosu

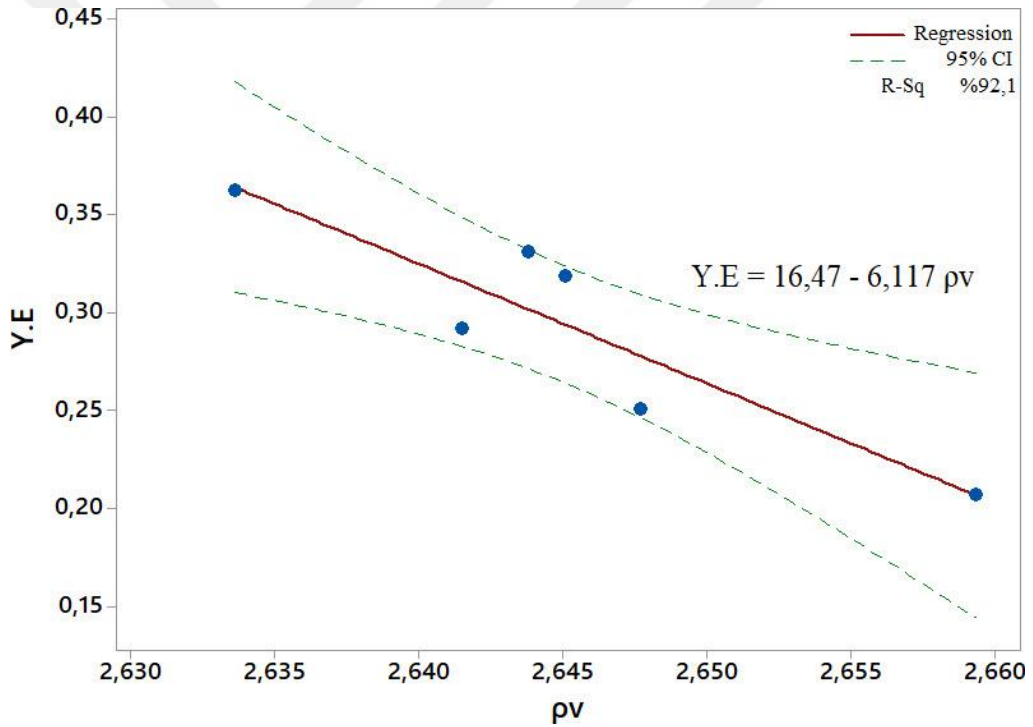
	DF	SS	MS	F	P
Regresyon	1	0,0340654	0,0340654	33,50	0,004
Hata	4	0,0040669	0,0010167		
Toplam	5	0,0381323			

Varyans analizi, her bir faktörün deney sonuçlarına katkısını ölçen istatistiksel bir yöntemdir (Gore ve ark., 2015). Bu tabloda bizim için önemli olan değer "P" değeridir. "P" değeri elde edilen sonuçların anlamlı mı yoksa tesadüfi olarak mı elde edildiği bilgisini verir ve 0,05'ten değerinden düşük bulunması elde edilen sonucun istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (Kul, 2014). Bu çalışmada hesaplanan "P" değeri, $0,004 < 0,05$ olduğu için elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak anlamlıdır denilebilir.

Atmosfer altında katılaştırılan numuneler ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki incelendikten sonra vakum altında katılaştırılan numuneler ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki benzer şekilde incelenmiştir.

Vakumlu RPT numuneleri için de Şekil 3.24.'te gösterilen adımlar takip edilerek regresyon analizi yapılmış ve elde edilen sonuçların anlamlı olup olmadığına, aynı zamanda istatistiksel olarak açıklanabilir olma durumuna bakılmıştır.

Regresyon analizi sonucunda Şekil 4.5.'teki grafik ve bilgiler elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Vakum altında katılaştırılan numune ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişki

Yukarıdaki şekilde kırmızı renkli eğri program tarafından hesaplanan doğrusal regresyon analizi eğrisidir. Bu eğrinin denklemini, Denklem 4.2.'de verilmiştir.

$$Y.E = 16,47 - 6,117\rho_v \quad (4.2)$$

Vakum altında katılaştırılan RPT numuneleri için tespit edilen düzeltilmiş R^2 değeri %92,1'dir. Bu da Y.E. bağımlı değişkeninin, ρ_v bağımsız değişkeni tarafından %92,1 oranında açıklanabildiği anlamına gelmektedir. Şekil 4.5.'teki grafikte yer alan bir başka sonuç ise yeşil kesik çizgilerle gösterilen güven aralığı (CI) sonuçlarıdır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara dayanarak %95 güven aralığı eğrisi çizdirilmiş ve daha sonra yapılabilecek benzer çalışmalarda elde edilecek sonuçların %95 ihtimalle belirlenen aralıkta olacağı öngörüsünde bulunulmuştur.

Tablo 4.3.'te vakum altında katılaştırılan numuneler ile yoğunluk endeksi arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlılığını incelemek için yapılan varyans analizi testi sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.3. Vakum altında katılaştırılan numuneler için varyans analizi tablosu

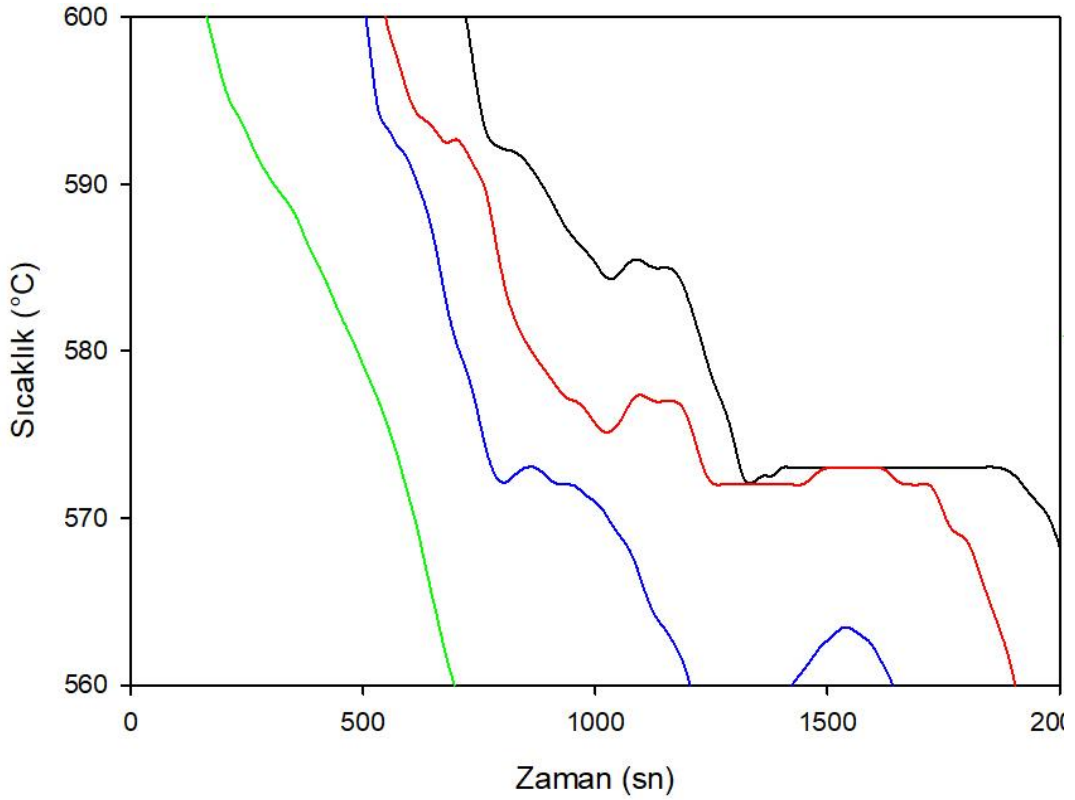
	DF	SS	MS	F	P
Regresyon	1	0,0351058	0,0351058	46,40	0,002
Hata	4	0,0030265	0,0007566		
Toplam	5	0,0381323			

Vakum altında katılaştırılan numuneler için hesaplanan "P" değeri, $0,002 < 0,05$ olduğu için elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak anlamlıdır denilebilir.

4.3. Katılma Parametreleri Sonuçları

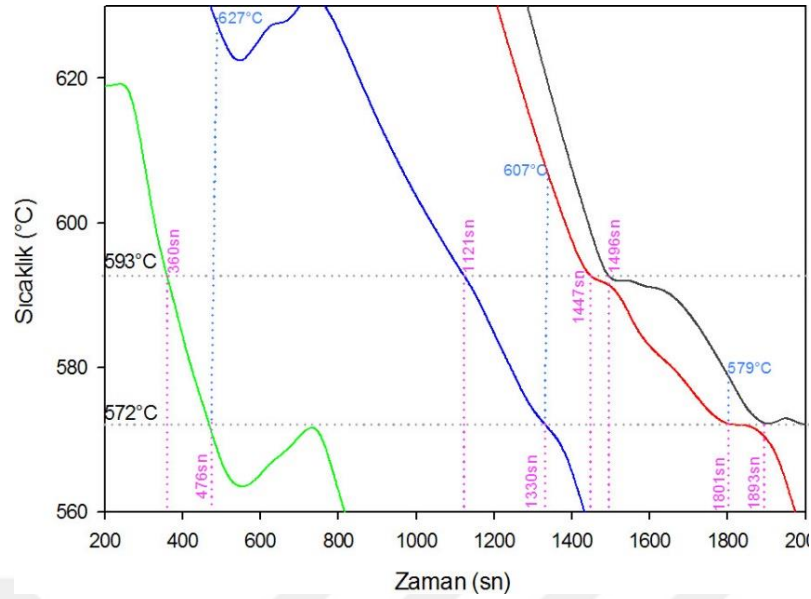
Kontrollü katılma deneyleri kapsamında 6 farklı deney setinden toplam 18 adet numune üretilmiştir. Elde edilen numunelerin katılma parametrelerinin nasıl hesaplandığı ile ilgili detaylar Bölüm 3.5.te detaylı olarak anlatılmıştı. 18 numune üzerinden elde edilen katılma parametreleri grafiği ve sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Şekil 4.6.'da gösterilen ilk deney setine göre 1 numaralı numunenin V_s değeri 0,1136 cm/sn, G değeri 0,7 °C/cm ve t_f değeri 573 sn olarak ölçülmüşken 2 numaralı numunenin V_s değeri 0,026 cm/sn, G değeri 1,043 °C/cm ve t_f değeri 246 sn olarak ve 3 numaralı numunenin de V_s değeri 0,054 cm/sn, G değeri 1,652 °C/cm ve t_f değeri 339 sn olarak ölçülmüştür.



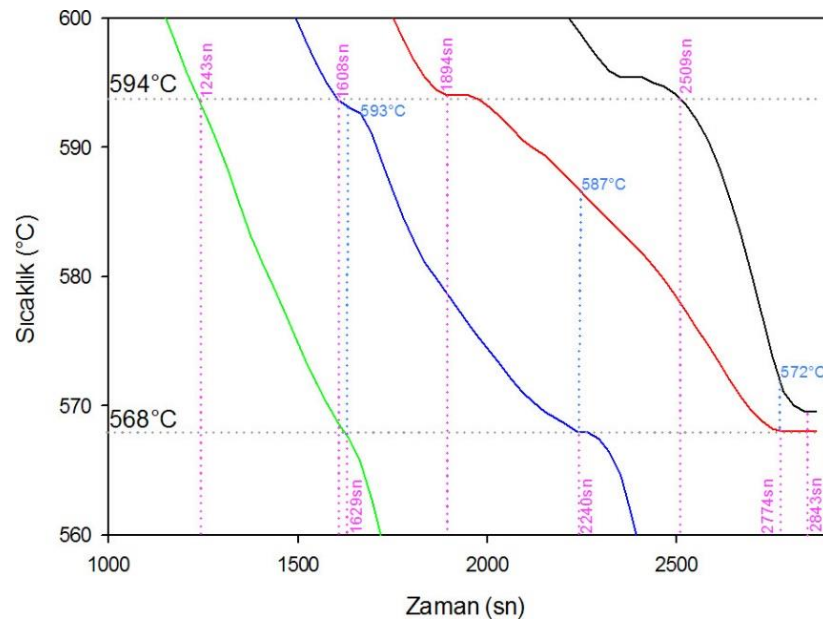
Şekil 4.6. Birinci deney setinden elde edilen soğuma grafikleri

Şekil 4.7.'de gösterilen ikinci deney setine göre 4 numaralı numunenin V_s değeri 0,1087 cm/sn, G değeri 0,7 °C/cm ve t_f değeri 354 sn olarak ölçülmüşken 5 numaralı numunenin V_s değeri 0,0259 cm/sn, G değeri 2,869 °C/cm ve t_f değeri 209 sn olarak ve 6 numaralı numunenin de V_s değeri 0,0126 cm/sn, G değeri 5,093 °C/cm ve t_f değeri 116 sn olarak ölçülmüştür.



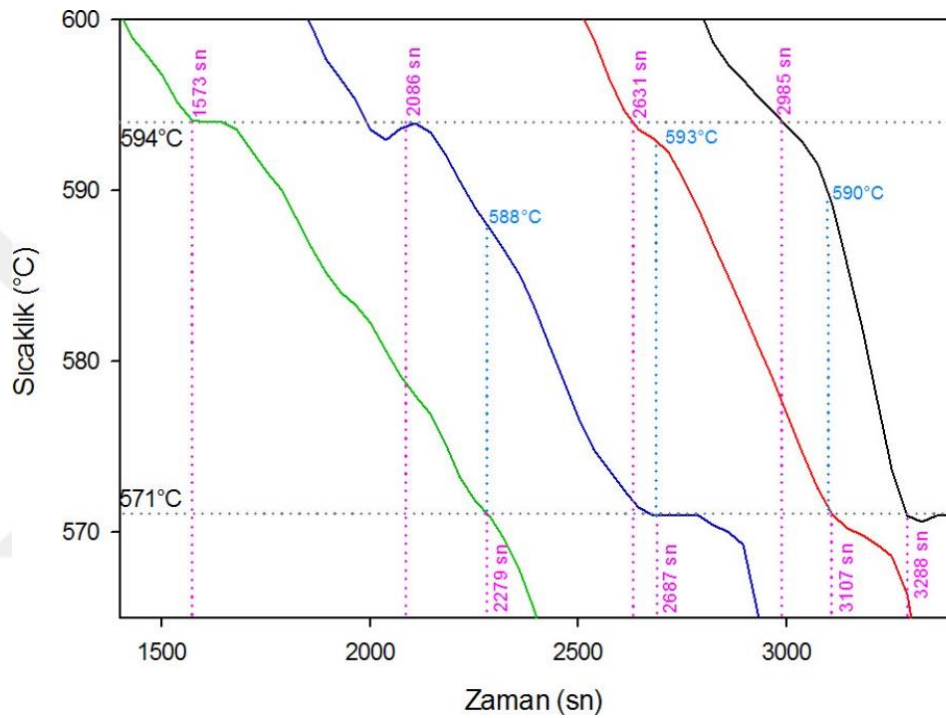
Şekil 4.7. İkinci deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri

Şekil 4.8.'de gösterilen üçüncü deney setine göre 7 numaralı numunenin V_s değeri 0,1449 cm/sn, G değeri 0,4 °C/cm ve t_f değeri 880 sn olarak ölçülmüşken 8 numaralı numunenin V_s değeri 0,0228 cm/sn, G değeri 1,557 °C/cm ve t_f değeri 578 sn olarak ve 9 numaralı numunenin de V_s değeri 0,0177 cm/sn, G değeri 2,315 °C/cm ve t_f değeri 386 sn olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.8. Üçüncü deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri

Şekil 4.9.'da gösterilen dördüncü deney setine göre 10 numaralı numunenin V_s değeri 0,0552 cm/sn, G değeri 1,9 °C/cm ve t_f değeri 475 sn olarak ölçülmüşken 11 numaralı numunenin V_s değeri 0,029 cm/sn, G değeri 1,803 °C/cm ve t_f değeri 601 sn olarak ve 12 numaralı numunenin de V_s değeri 0,0265 cm/sn, G değeri 1,574 °C/cm ve t_f değeri 706 sn olarak ölçülmüştür.

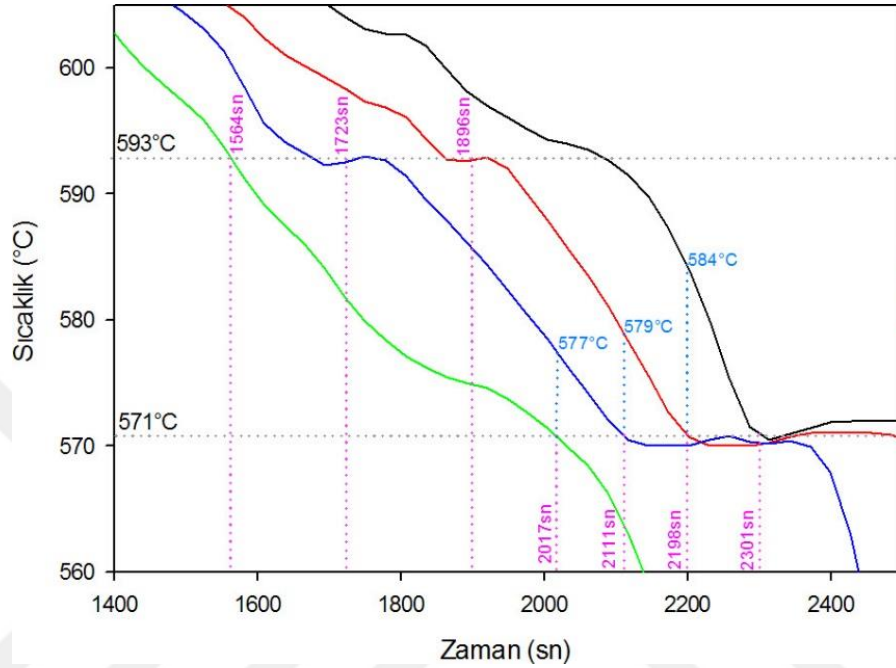


Şekil 4.9. Dördüncü deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri

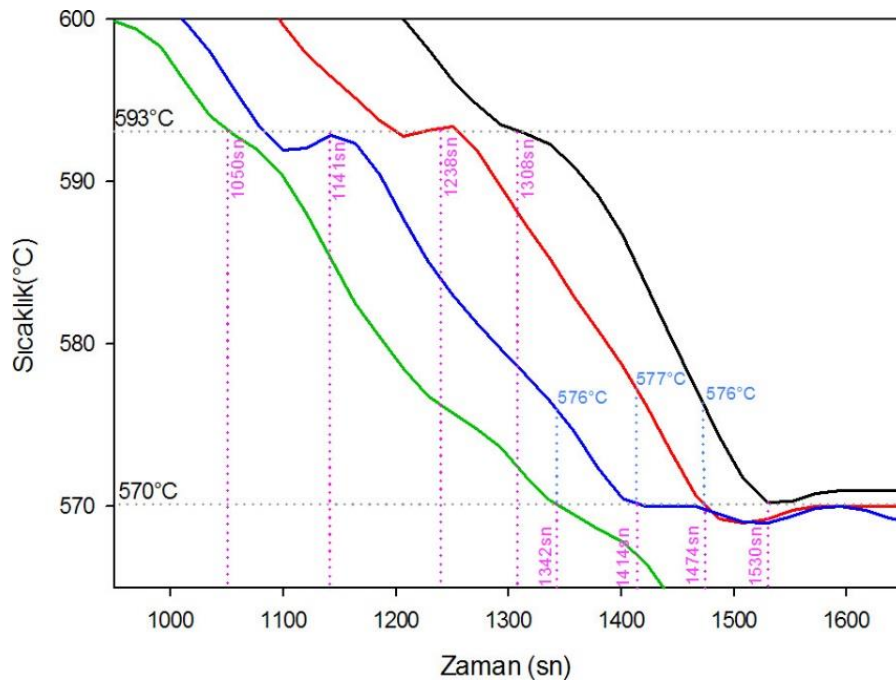
Şekil 4.10.'da gösterilen beşinci deney setine göre 13 numaralı numunenin V_s değeri 0,0971 cm/sn, G değeri 1,3 °C/cm ve t_f değeri 302 sn olarak ölçülmüşken, 14 numaralı numunenin V_s değeri 0,1402 cm/sn, G değeri 0,656 °C/cm ve t_f değeri 388 sn olarak ve 15 numaralı numunenin de V_s değeri 0,1149 cm/sn, G değeri 0,556 °C/cm ve t_f değeri 453 sn olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.11.'de gösterilen altıncı ve son deney setine göre 16 numaralı numunenin V_s değeri 0,1786 cm/sn, G değeri 0,6 °C/cm ve t_f değeri 191 sn olarak ölçülmüşken, 17

numaralı numunenin V_s değeri 0,2033 cm/sn, G değeri 0,574 °C/cm ve t_f değeri 273 sn olarak ve 18 numaralı numunenin de V_s değeri 0,1521 cm/sn, G değeri 0,556 °C/cm ve t_f değeri 292 sn olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.10. Beşinci deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri



Şekil 4.11. Altıncı deney verisinden elde edilen soğuma grafikleri

Numunelerden ölçülen katılma parametreleri sonuçları Tablo 4.4.'te toplu olarak verilmiştir.

Tablo 4.4. Ölçülen katılma parametreleri sonuçları

Numune No	Vs (cm/sn)	Vs (cm/dk)	G	tf (sn)	tf (dk)
1	0,1136	6,816	0,7	573	9,55
2	0,026	1,56	1,043	246	4,10
3	0,054	3,24	1,652	339	5,65
4	0,1087	6,522	0,7	354	5,90
5	0,0259	1,554	2,869	209	3,48
6	0,0126	0,756	5,093	116	1,93
7	0,1449	8,694	0,4	786	13,10
8	0,0228	1,368	1,557	578	9,63
9	0,0177	1,062	2,315	386	6,43
10	0,0552	3,312	1,9	475	7,92
11	0,029	1,74	1,803	601	10,02
12	0,0265	1,59	1,574	706	11,77
13	0,0971	5,826	1,3	302	5,03
14	0,1402	8,412	0,656	388	6,47
15	0,1149	6,894	0,556	453	7,55
16	0,1786	10,716	0,6	191	3,18
17	0,2033	12,198	0,574	273	4,55
18	0,1521	9,126	0,556	292	4,87

Ölçülen tüm bu parametreler daha sonraki bölümlerde YSA ve regresyon analizinde girdi olarak tanımlanacak ve gözeneklilikle ilişkisi incelenecektir. Bu çalışmalardan elde edilen bir denklem, model doğrulama çalışmalarında bir parçanın gerçek döküm ile döküm simülasyon çalışmasındaki sonuçlarının kıyaslanmasında kullanılacaktır. Denklem döküm simülasyon programına uygun hale getirilmesi için Vs ve t_f parametrelerinde birim dönüştürme yapılmıştır.

4.4. Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

Mikroyapı incelemelerinde iki farklı sonuca bakılmıştır. İlk aşamada katılma parametrelerinin dendrit kolları arası mesafeyle ilişkisi incelenmiş, ikinci aşamada ise mikroyapılar üzerinden yüzde gözenek miktarları hesaplanmıştır. Gözenek miktarları ile ilgili mikroyapı görüntüleri Gözenek Sonuçları başlığında paylaşılacaktır.

4.4.1. İkincil dendrit kolları arası mesafe sonuçları

İkincil dendrit kolları arası (İDKA) mesafe mekanik özelliklerle doğrudan ilişkilidir. Kollar arası mesafe kısaltıldıkça mekanik özelliklerde artış görülmektedir (Stefanescu, 2015).

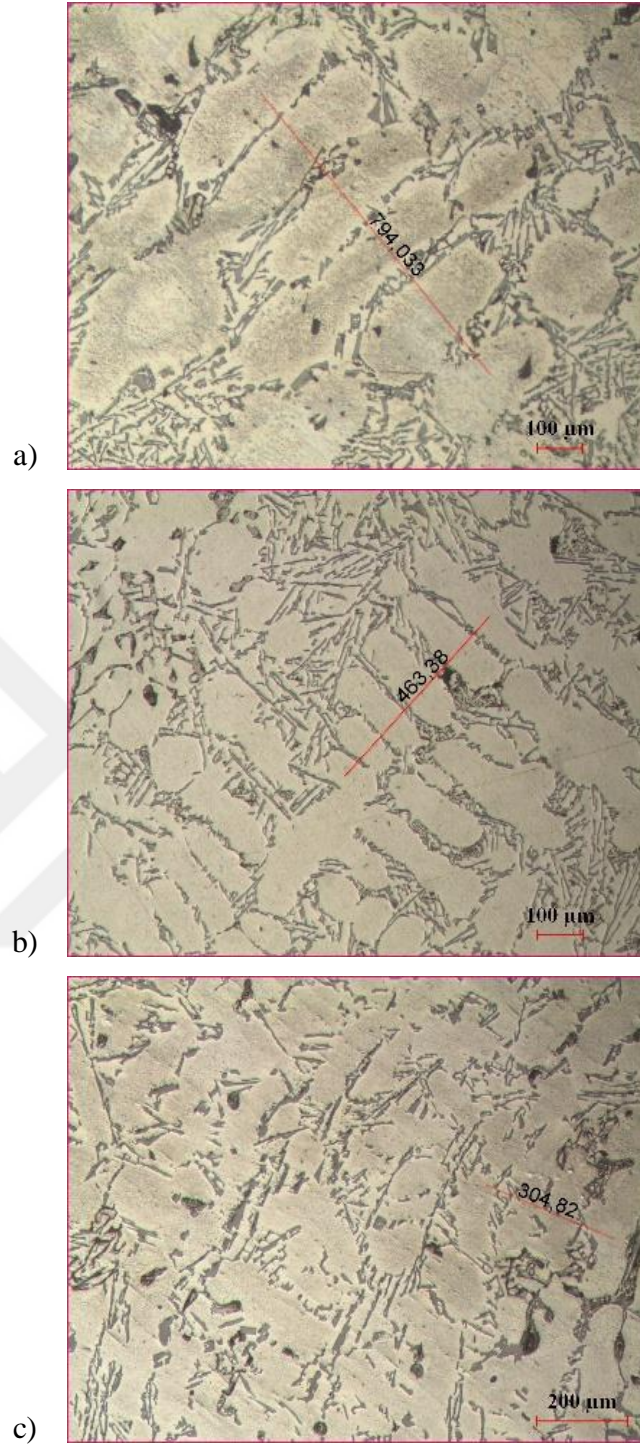
Boileau ve Allison (2003), A319 Alüminyum alaşımının yorulma özellikleriyle ilgili yaptıkları bir çalışmada ikincil dendrit kolları arası mesafenin yorulma dayanımını etkilediğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmaya göre İDKA mesafe arttıkça yorulma dayanımı düşmektedir.

Bir çok araştırmacı bu durumun sebebini açıklarken İDKA ile bölgesel katılma süresi arasındaki doğru orantıdan ve İDKA mesafesinin bölgesel katılma süresinin bir fonksiyonu olduğundan bahsetmişlerdir (Spinelli ve ark., 2004; Seifeddine ve ark., 2008; Nicoletto ve ark., 2010).

Bu kısımda, deney setlerinden elde edilen numunelerin mikroyapıları incelenerek İDKA mesafeleri ölçülmüş ve bu ölçümlerin bölgesel katılma süresiyle arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

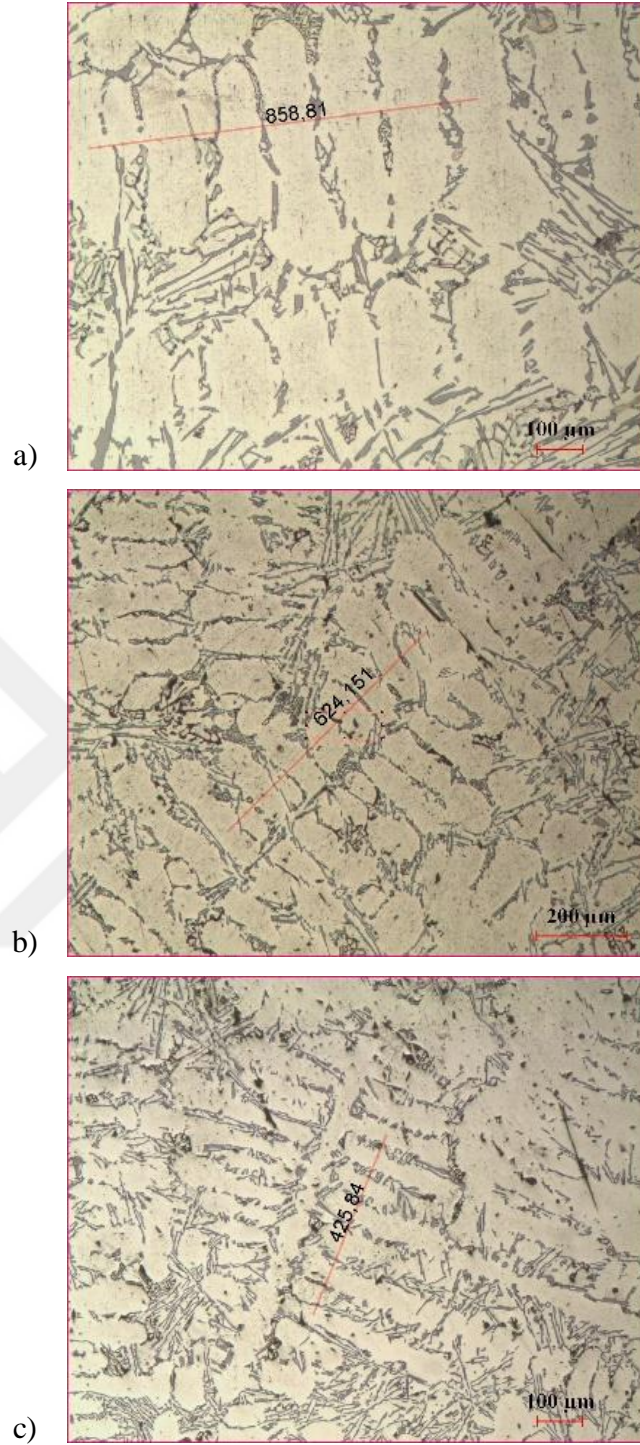
Numuneler, Bölüm 3.6.'da belirtilen adımlara uygun olarak zımparalanmış ve parlatılmıştır. Ardından 3.7.1.'de anlatıldığı şekliyle İDKA mesafeleri ölçülmüştür.

Birinci deney setinden elden edilen 1 numaralı numunede ölçülen İDKA mesafesi 158,81 μm , 2 numaralı numunede 92,68 μm , 3 numaralı numunede 101,61 μm dir (Şekil 4.12.).



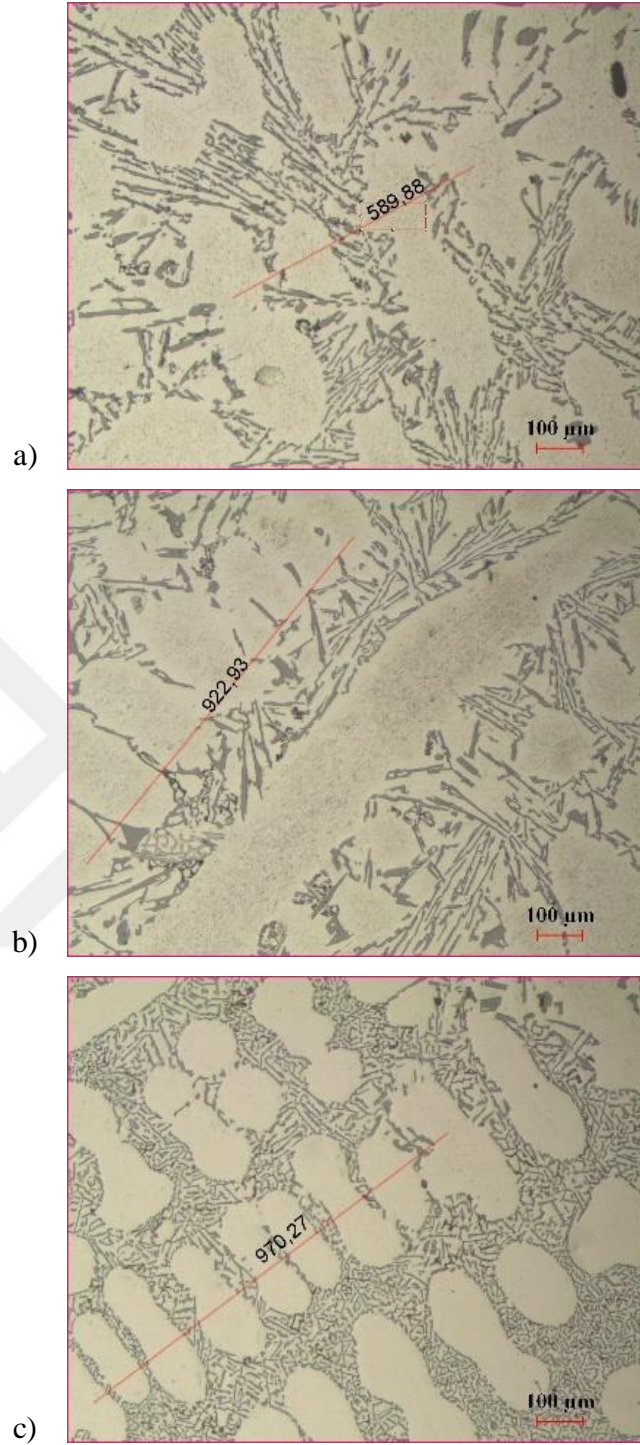
Şekil 4.12. a) 1 numaralı, b) 2 numaralı, c) 3 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri

İkinci deney setinden elden edilen 4 numaralı numunede ölçülen İDKA mesafesi 107,35 μm , 5 numaralı numunede 62,42 μm , 6 numaralı numunede 53,23 μm dir (Şekil 4.13.).



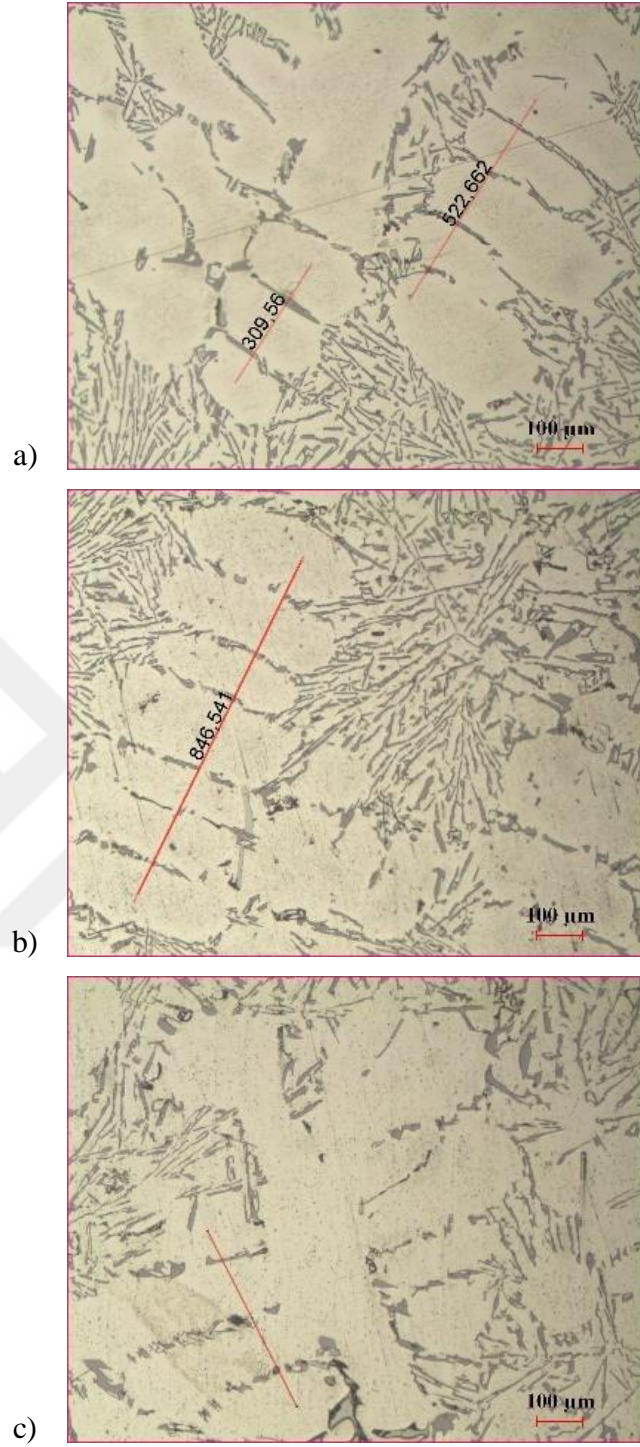
Şekil 4.13. a) 4 numaralı, b) 5 numaralı, c) 6 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri

Üçüncü deney setinden elden edilen 7 numaralı numunede ölçülen İDKA mesafesi 196,63 μm , 8 numaralı numunede 131,85 μm , 9 numaralı numunede 121,28 μm dir (Şekil 4.14.).



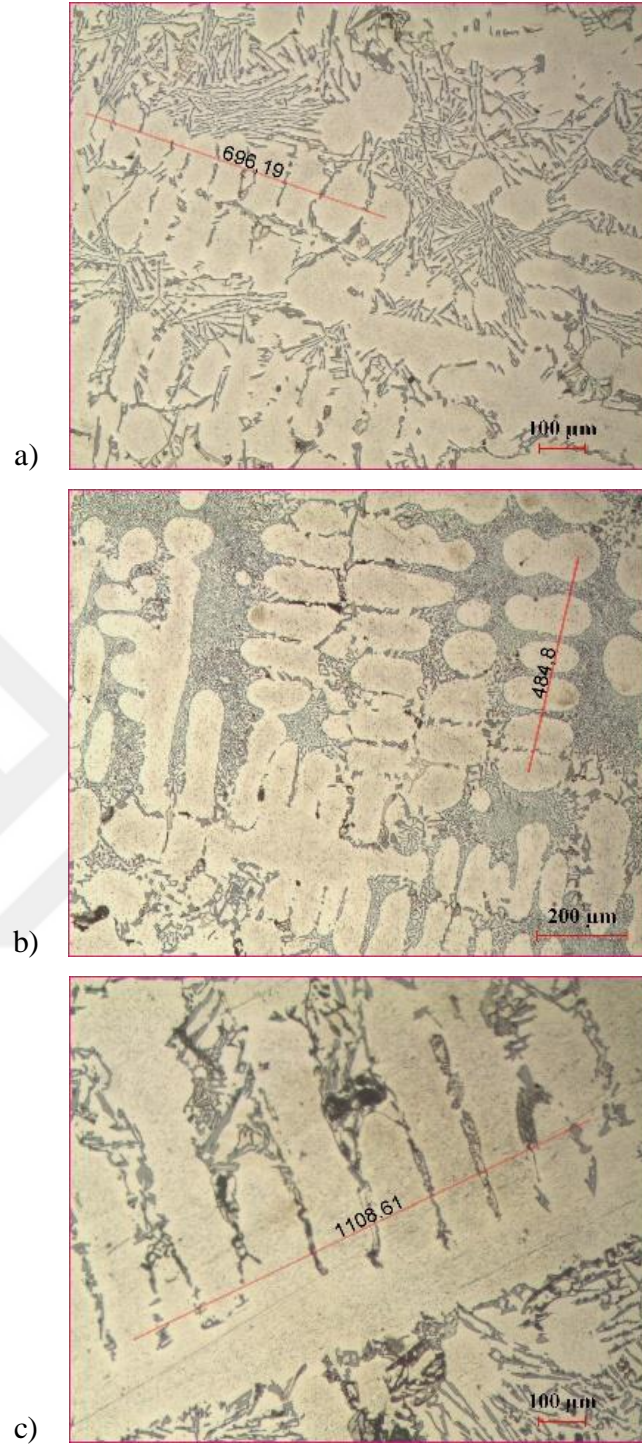
Şekil 4.14. a) 7 numaralı, b) 8 numaralı, c) 9 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri

Dördüncü deney setinden elden edilen 10 numaralı numunede ölçülen İDKA mesafesi 138,70 µm, 11 numaralı numunede 141,09 µm, 12 numaralı numunede 144,11 µm dir (Şekil 4.15.).



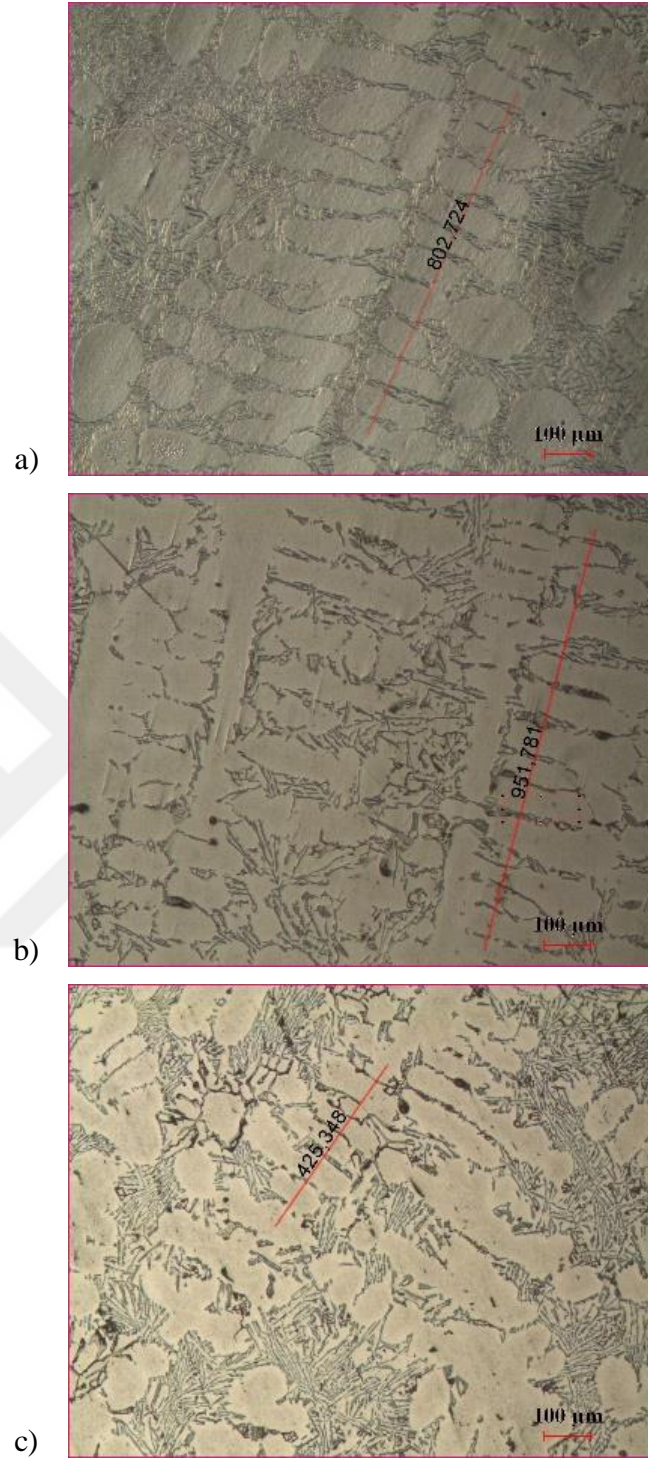
Şekil 4.15. a) 10 numaralı, b) 11 numaralı, c) 12 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri

Beşinci deney setinden elden edilen 13 numaralı numunede ölçülen İDKA mesafesi $69,62 \mu\text{m}$, 14 numaralı numunede $96,96 \mu\text{m}$, 15 numaralı numunede $110,86 \mu\text{m}$ dir (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. a) 13 numaralı, b) 14 numaralı, c) 15 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri

Altıncı deney setinden elden edilen 16 numaralı numunede ölçülen İDKA mesafesi 72,97 μm , 17 numaralı numunede 67,98 μm , 18 numaralı numunede 60,76 μm dir (Şekil 4.17.).



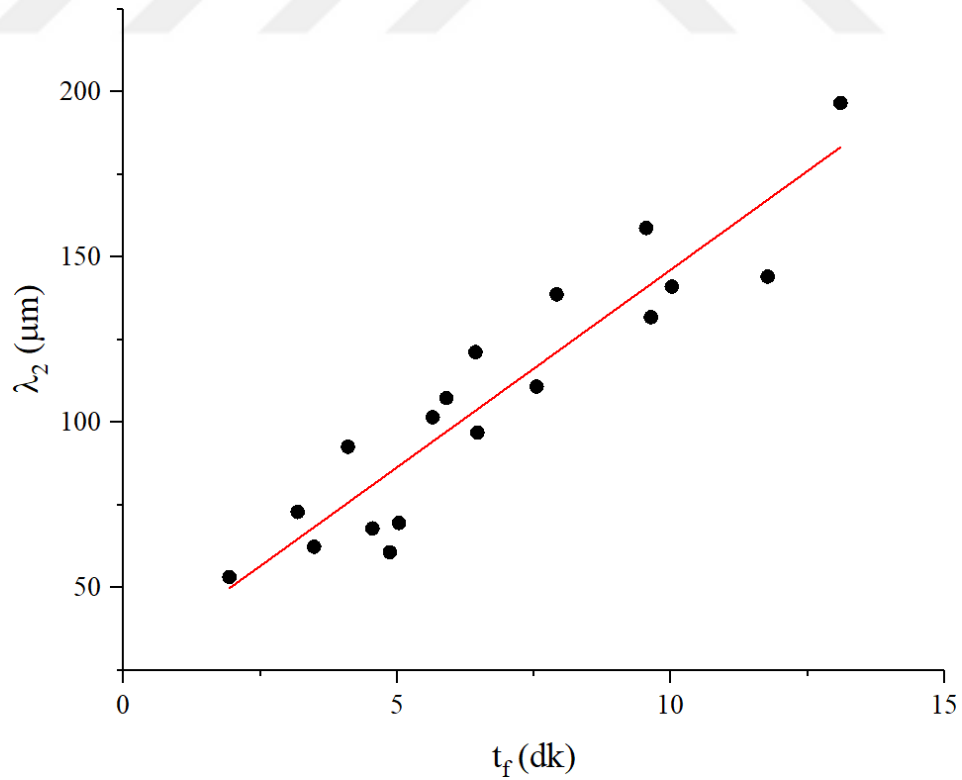
Şekil 4.17. a) 16 numaralı, b) 17 numaralı, c) 18 numaralı numunelerden ölçülen İDKA mesafeleri

Ölçülen bölgesel katılaşma süresi sonuçları ve İDKA mesafeleri Tablo 4.5.'te toplu olarak verilmiştir.

Tablo 4.5. Bölgesel katılma süresi ve İDKA mesafeleri sonuçları

Numune No	t_f (dk)	λ_2 (μm)
1	9,55	158,81
2	4,10	92,68
3	5,65	101,61
4	5,90	107,35
5	3,48	62,42
6	1,93	53,23
7	13,10	196,63
8	9,63	131,85
9	6,43	121,28
10	7,92	138,70
11	10,02	141,09
12	11,77	144,11
13	5,03	69,62
14	6,47	96,96
15	7,55	110,86
16	3,18	72,97
17	4,55	67,98
18	4,87	60,764

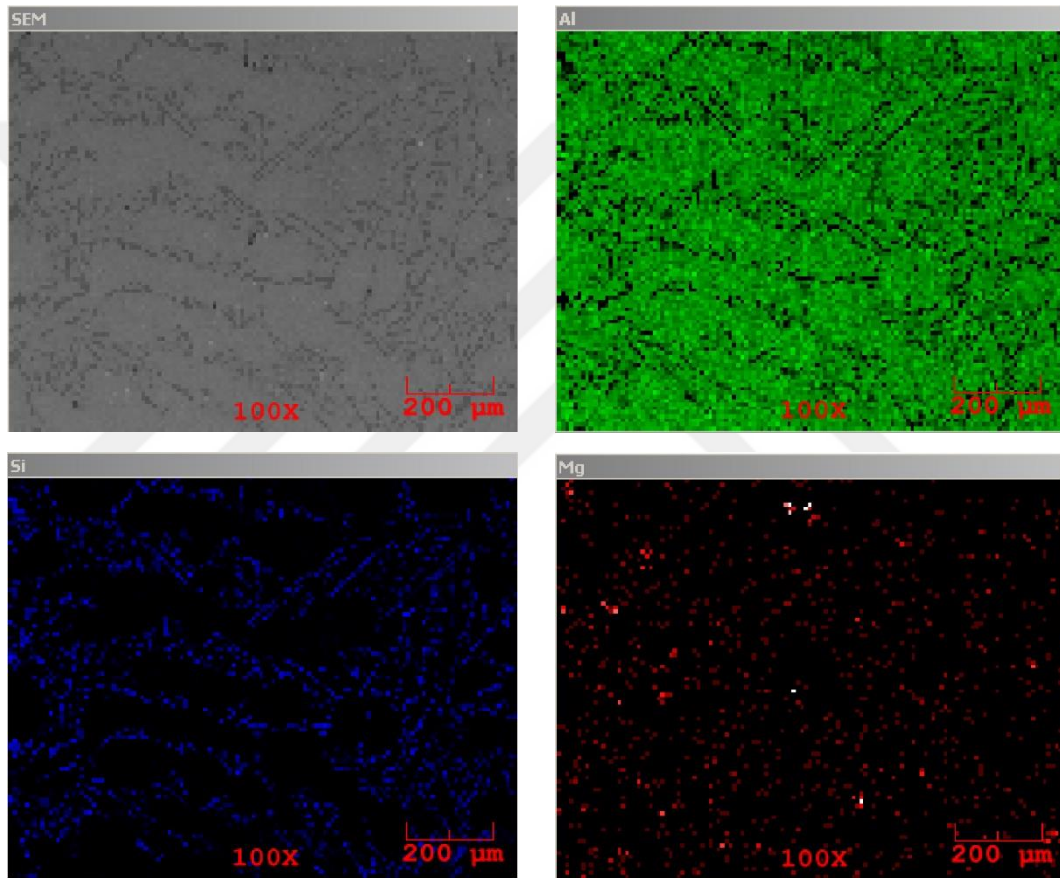
Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak İDKA mesafesiyle bölgesel katılma süresi arasındaki ilişkiyi incelemek istediğimizde Şekil 4.18.'deki grafik karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.18. İDKA ile bölgesel katılma süresi arasındaki ilişki

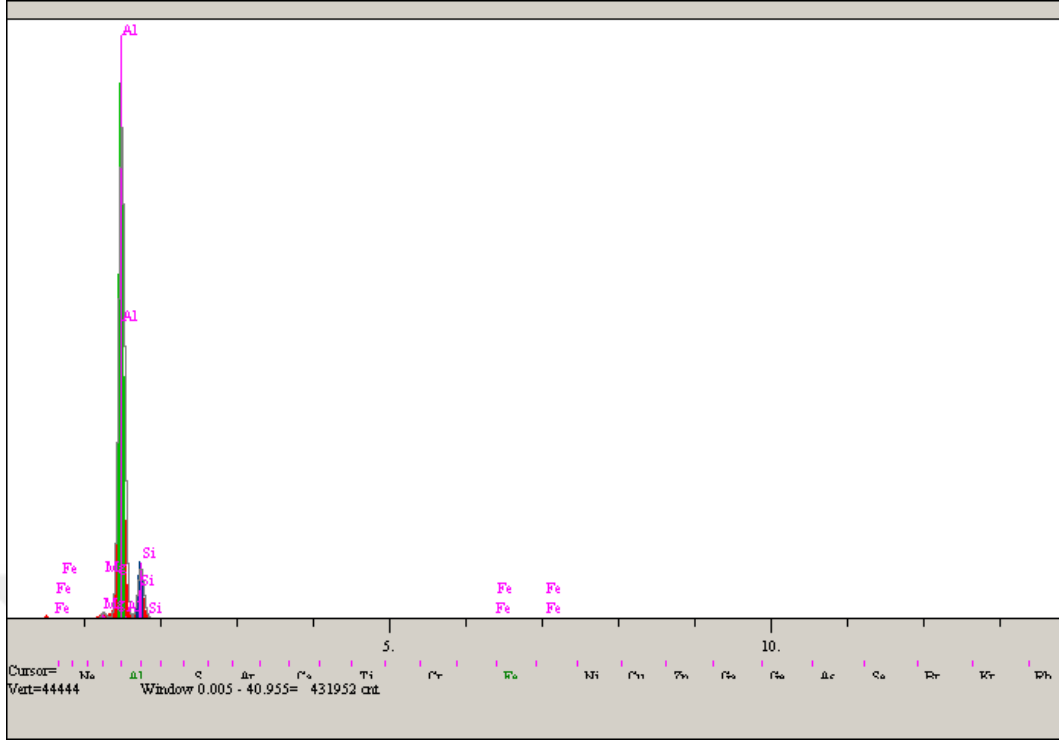
4.4.2. SEM analizi sonuçları

Katılaşma sonucunda oluşan mikoyapı bölgelerinde oluşan fazları analiz ve tespit edebilmek için SEM analizi yapılmıştır. 6 numaralı numunede çekilen SEM görüntüsü üzerinden yapılan elemental haritalama analizinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.19.'da verilmiştir.



Şekil 4.19. 100 büyütmede çekilerek elemental haritalama analizi yapılan 6 numaralı numuneye ait, a) SEM görüntüsü, b) Al içeren bölgeler, c) Si içeren bölgeler, d) Mg içeren bölgeler

Bu görüntülere göre dendritik bölgeler tamamen alüminyumdan meydana gelmektedir. Dendritler arasında kalan bölgelerde Si ve Mg elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Taranan alandaki elementlerin EDX grafiği Şekil 4.20.'de elementlerin ağırlıkça oranları Tablo 4.6.'da verilmiştir.



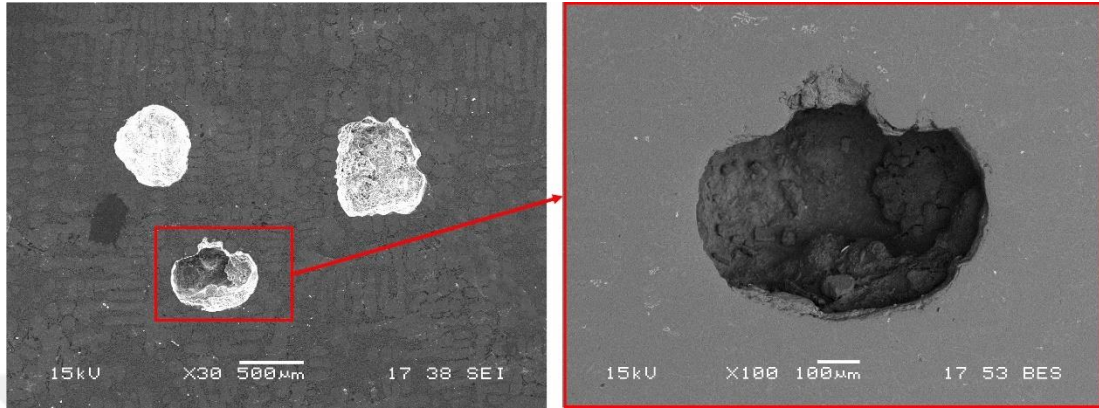
Şekil 4.20. Taranan alana ait EDX spektrumları

Tablo 4.6. Taranan alandaki elementlerin ağırlıkça oranları

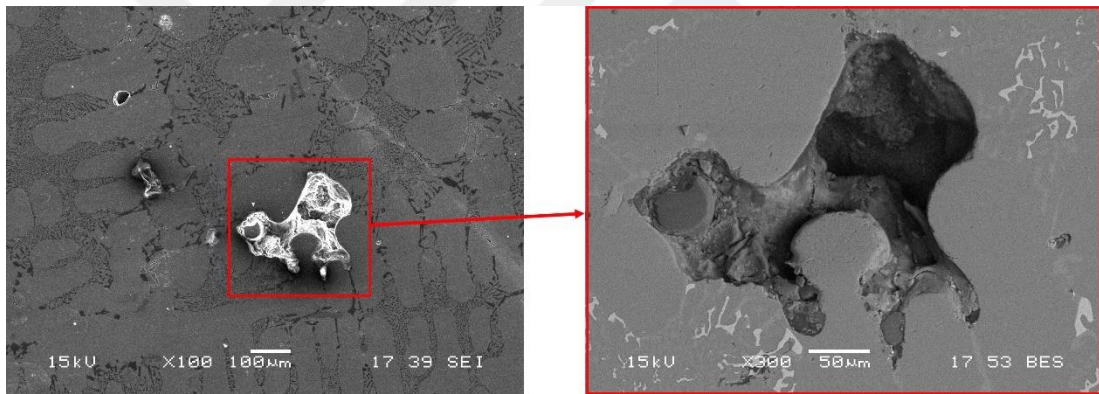
Element	Oran	Birim
Mg	0.842	% Ağırlık
Al	81.356	
Si	17.685	
Fe	0.117	

Gözenek oluşum tiplerini incelemek için alınan SEM görüntüleri Şekil 4.21. ve Şekil 4.22.'de verilmiştir. Stefanescu (2009), sıvı faz içerisinde çözünen gazın, katılaşma sırasında katı faz içerisinde çözünemediği için sıvı faz içeren ve gitgide gazca zenginleşen bölgeye aktarıldığını ve sonunda kritik basıncın aşılmasıyla birlikte küresel formda gaz kabarcıklarının oluşmasıyla birlikte gözenek oluşumunun meydana geldiğini belirtmiştir. 17 numaralı numuneden alınan Şekil 4.21.'deki SEM analizi görüntüsü bu duruma bir örnektir. Yine aynı çalışmada karmaşık şekilli ve dendrite benzer yapıda oluşan gözenekleşme de çekinti gözenekleşmesi olarak

adlandırılmıştır. 17 numaralı numuneden alınan Şekil 4.22.'deki SEM analizi görüntüsü çekinti gözeneği durumuna bir örnektir.



Şekil 4.21. 17 numaralı numune üzerinden alınan gaz gözeneği görüntüsü



Şekil 4.22. 17 numaralı numune üzerinden alınan çekinti gözeneği görüntüsü

Bu iki gözenek tipinin de ortak noktası dendritler arasında en son katlaşan bölgede meydana gelmesidir.

4.5. Gözeneklilik Sonuçları

Numunelerin gözeneklilik ölçümünde iki farklı teknikten yararlanılmıştır. İlk etapta arşimet prensibine dayalı yoğunluk ölçüm metodu kullanılmıştır. Daha sonra mikroskopik görüntüleri alınan numuneler üzerinden görüntü analizi yapılmıştır.

Ayrıca bazı numuneler üzerinde bilgisayarlı tomografi taraması yapılarak yöntemler arasında kıyaslama ve sonuç sağlaması yapılması amaçlanmıştır.

4.5.1. Yoğunluk ölçüm metoduna göre gözeneklilik sonuçları

Arşimet prensibine göre havada ve suda ağırlıkları ölçülen numunelerin Denklem 3.10. ile Denklem 3.11.'e göre hesaplanan gözenek oranları Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Numunelerin havada-suda ölçülen ağırlıkları ve yüzde gözeneklilik değerleri

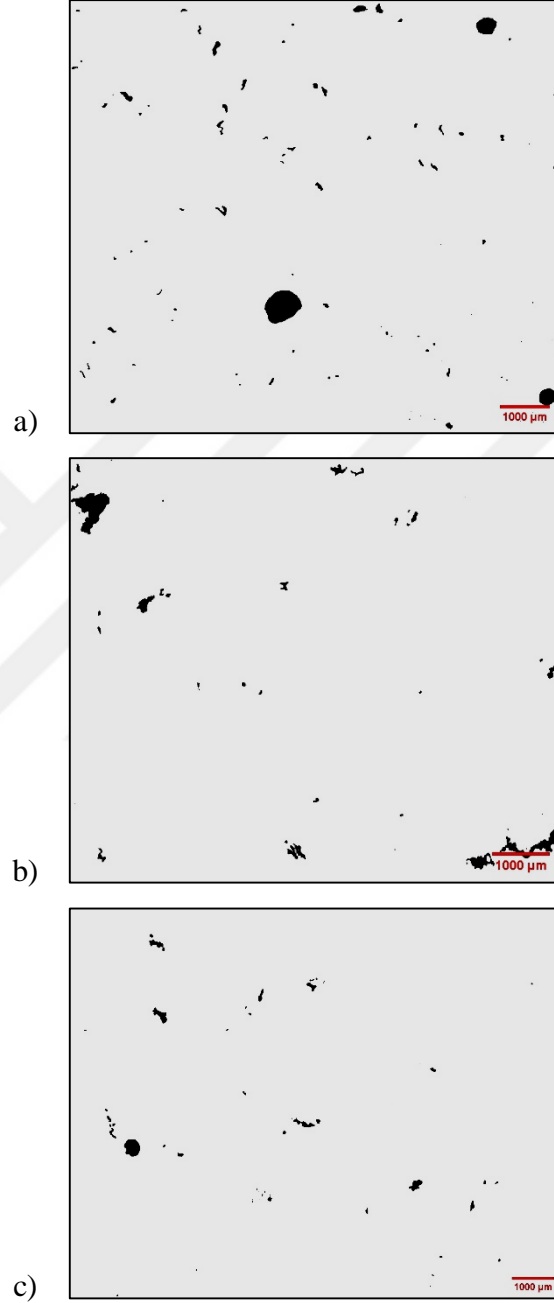
Numune No	m _h	m _s	%P
1	104,56	64,88	1,2361
2	127,30	79,04	1,1459
3	124,76	77,60	0,8471
4	133,26	82,58	1,1746
5	131,40	81,54	0,8668
6	131,22	81,60	0,6049
7	106,34	65,38	1,467
8	130,24	80,28	1,0551
9	121,14	74,80	0,7858
10	86,04	53,50	0,8617
11	93,64	58,18	0,9697
12	91,42	56,78	1,055
13	86,38	53,64	1,193
14	91,34	56,74	1,116
15	97,26	60,30	1,4334
16	81,54	50,62	1,4375
17	89,52	55,62	1,302
18	98,40	61,14	1,277

4.5.2. Görüntü analiz metoduna göre gözeneklilik sonuçları

Bölüm 3.8.2.'de anlatıldığı şekliyle analiz edilen numunelerin görüntü analiz metoduna göre gözeneklilik sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Birinci deney setinden elden edilen 1 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 107,95 mm², gözenekli alan 1,203 mm² ve gözenek oranı %1,115, 2 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 91,367 mm², gözenekli alan 0,963 mm² ve yüzde

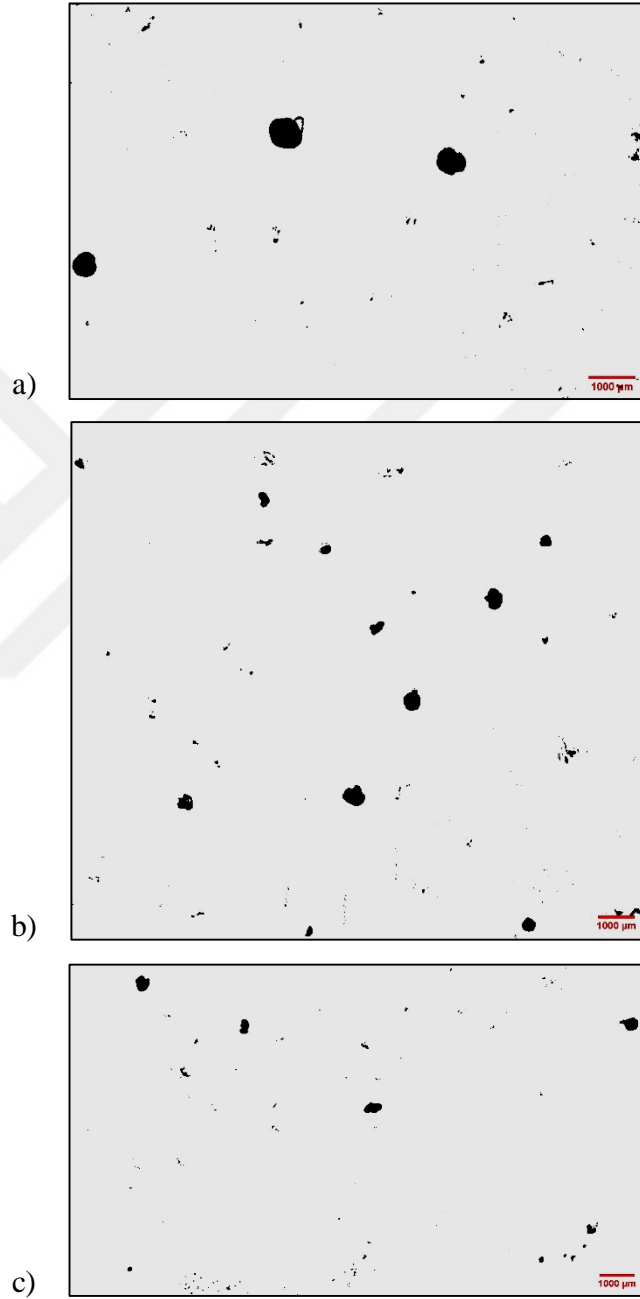
gözenek oranı %1,054, 3 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 127,794 mm², gözenekli alan 0,926 mm² ve yüzde gözenek oranı %0,724 tür (Şekil 4.23.).



Şekil 4.23. a) 1 numaralı, b) 2 numaralı, c) 3 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları

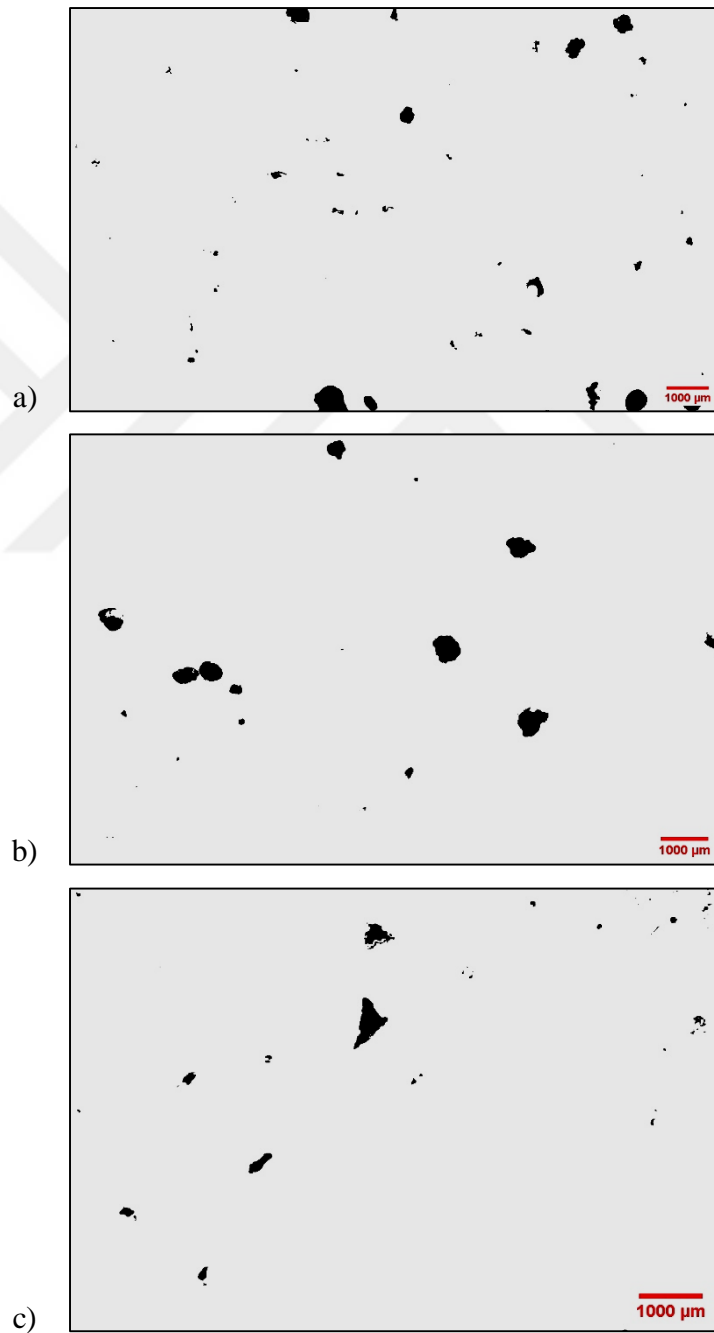
İkinci deney setinden elden edilen 4 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 103,11 mm², gözenekli alan 1,123 mm² ve gözenek oranı %1,089, 5 numaralı

numunede hesaplanan toplam alan 226,66 mm², gözenekli alan 1,776 mm² ve yüzde gözenek oranı %0,784, 6 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 157,891 mm², gözenekli alan 0,776 mm² ve yüzde gözenek oranı %0,491 dir (Şekil 4.24.).



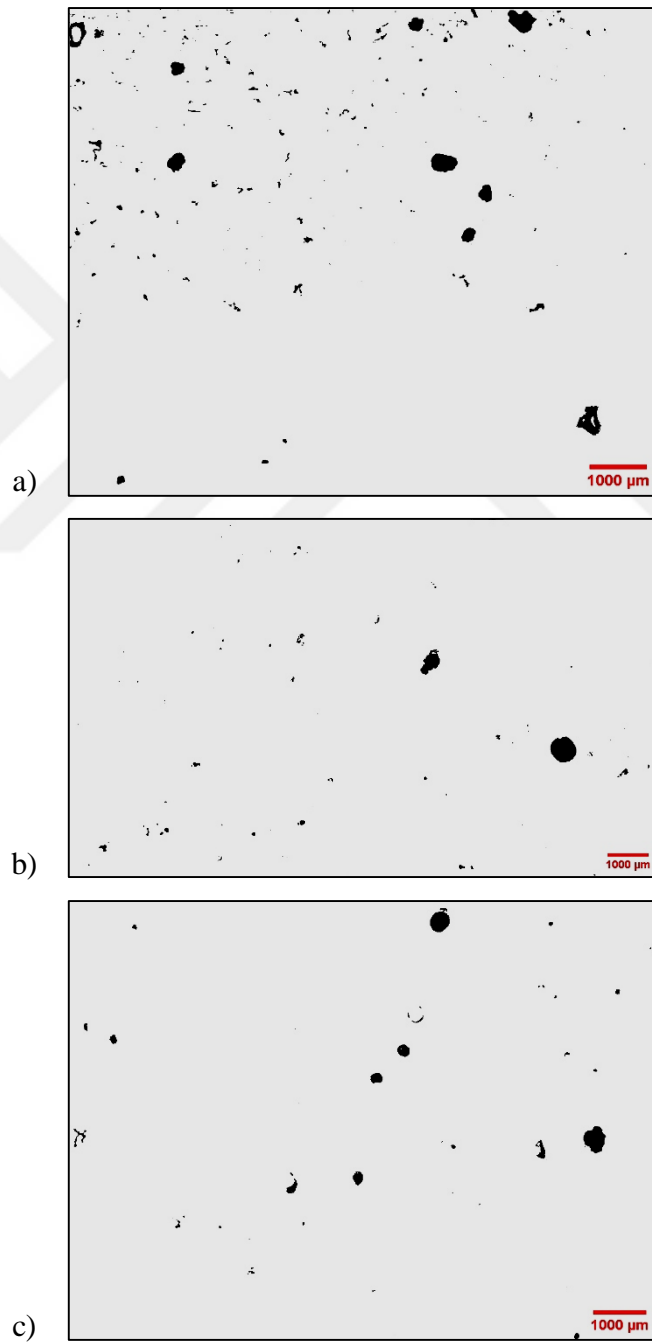
Şekil 4.24. a) 4 numaralı, b) 5 numaralı, c) 6 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları

Üçüncü deney setinden elden edilen 7 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 147,17 mm², gözenekli alan 1,912 mm² ve gözenek oranı %1,299, 8 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 124,32 mm², gözenekli alan 1,354 mm² ve yüzde gözenek oranı %1,084, 9 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 85,97 mm², gözenekli alan 0,582 mm² ve yüzde gözenek oranı %0,677 dir (Şekil 4.25.).



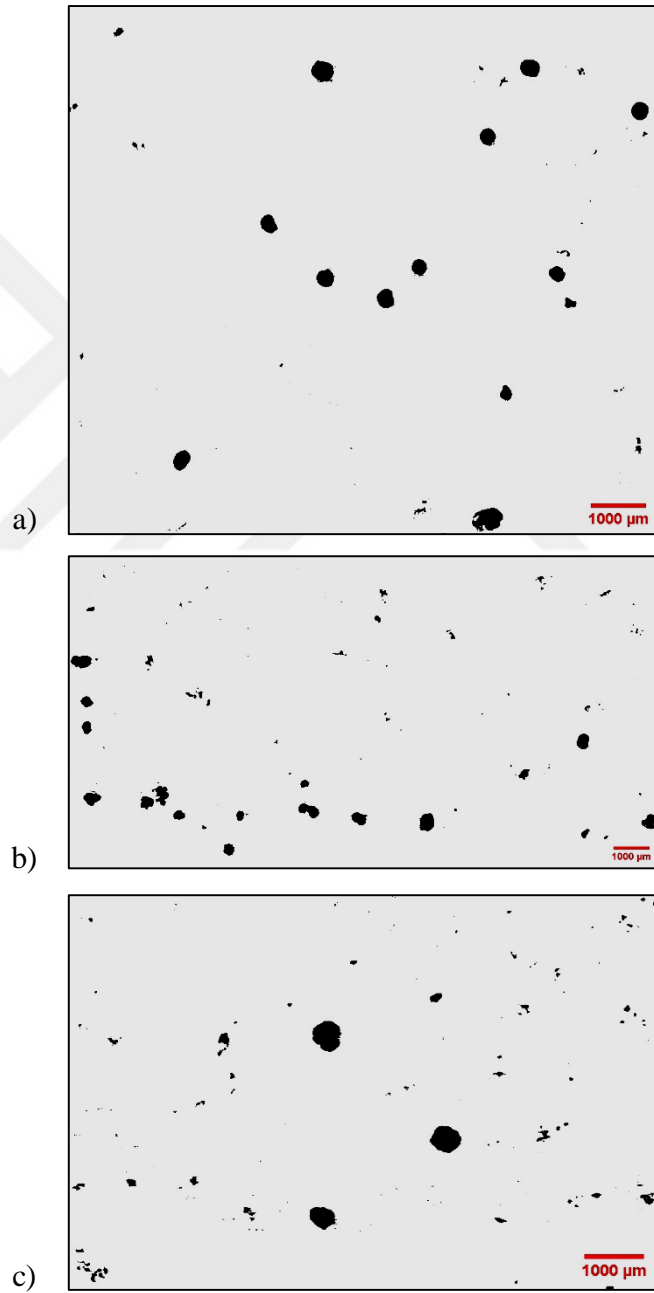
Şekil 4.25. a) 7 numaralı, b) 8 numaralı, c) 9 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları

Dördüncü deney setinden elden edilen 10 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 87,98 mm², gözenekli alan 1,047 mm² ve gözenek oranı %1,019, 11 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 122,08 mm², gözenekli alan 0,936 mm² ve yüzde gözenek oranı %0,766, 12 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 106,85 mm², gözenekli alan 0,793 mm² ve yüzde gözenek oranı %0,742 dir (Şekil 4.26.).



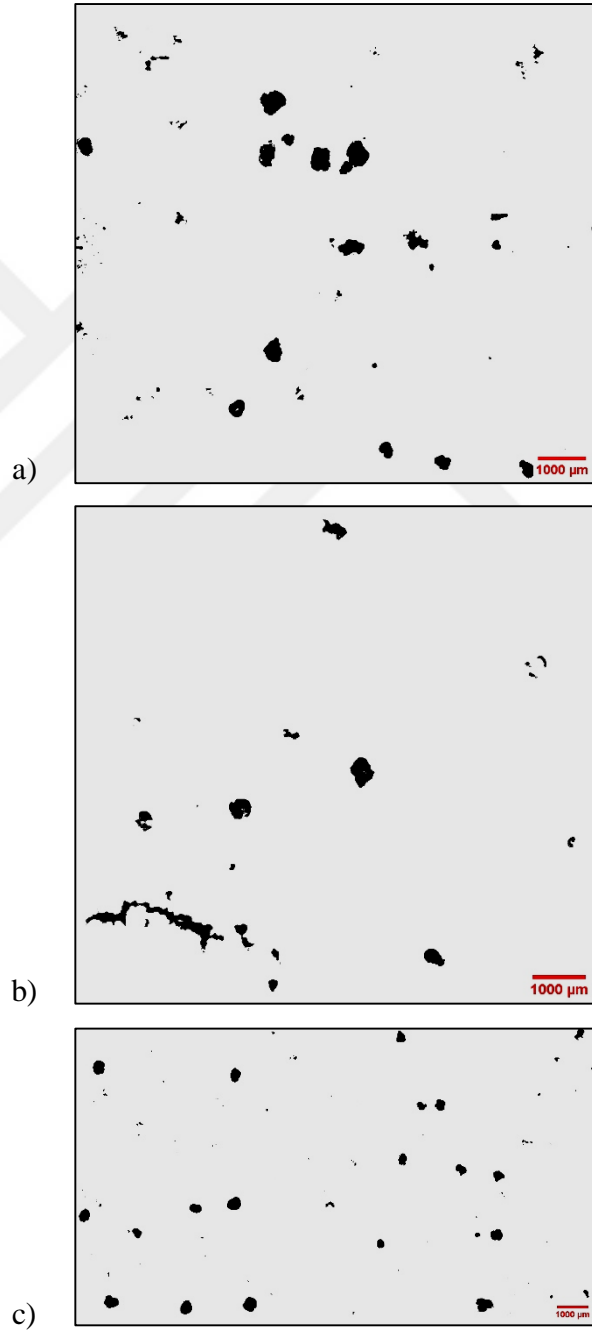
Şekil 4.26. a) 10 numaralı, b) 11 numaralı, c) 12 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları

Beşinci deney setinden elden edilen 13 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 100,99 mm², gözenekli alan 1,150 mm² ve gözenek oranı %1,139, 14 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 142,86 mm², gözenekli alan 2,01 mm² ve yüzde gözenek oranı %1,402, 15 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 66,18 mm², gözenekli alan 0,871 mm² ve yüzde gözenek oranı %1,316 dır (Şekil 4.27.).



Şekil 4.27. a) 13 numaralı, b) 14 numaralı, c) 15 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları

Altıncı deney setinden elden edilen 16 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 108,35 mm², gözenekli alan 1,817 mm² ve gözenek oranı %1,677, 17 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 91,94 mm², gözenekli alan 1,246 mm² ve yüzde gözenek oranı %1,355, 18 numaralı numunede hesaplanan toplam alan 155,39 mm², gözenekli alan 2,034 mm² ve yüzde gözenek oranı %1,309 dur (Şekil 4.28.).



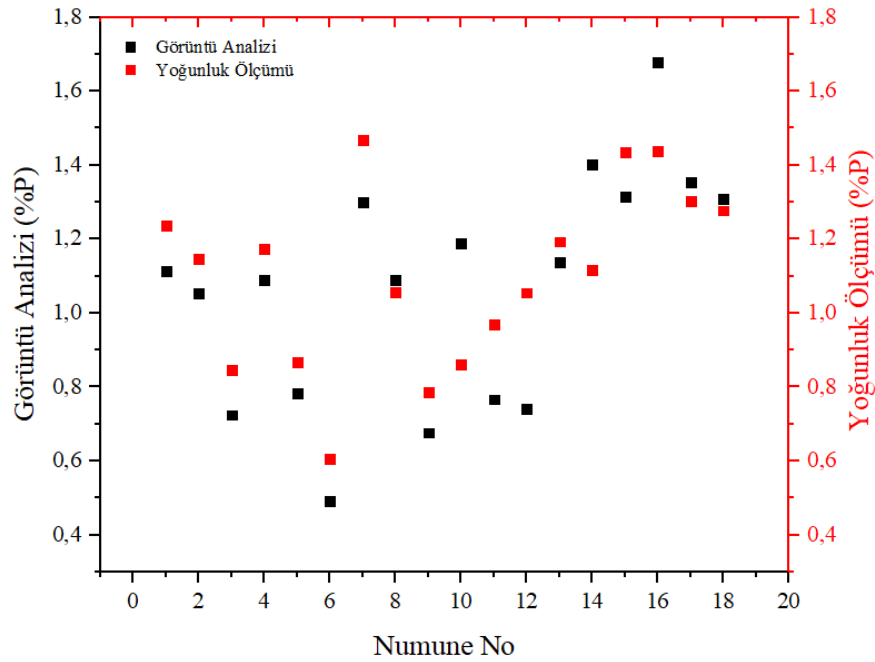
Şekil 4.28. a) 16 numaralı, b) 17 numaralı, c) 18 numaralı numunelerin görüntü analiz sonuçları

Görüntü analiz metoduna göre gözeneklilikleri ölçülen numunelere ait tüm sonuçlar Tablo 4.8.'de bir arada verilmiştir.

Tablo 4.8. Görüntü analiz metoduna göre gözeneklilik sonuçları

Numune No	Toplam Alan (mm ²)	Gözenekli Alan (mm ²)	%P
1	107,950	1,203	1,115
2	91,367	0,963	1,054
3	127,794	0,926	0,724
4	103,109	1,123	1,089
5	226,660	1,777	0,784
6	157,891	0,776	0,491
7	147,168	1,912	1,299
8	124,325	1,354	1,089
9	85,969	0,582	0,677
10	87,978	1,047	1,190
11	122,076	0,936	0,766
12	106,851	0,793	0,742
13	100,998	1,150	1,139
14	91,34	56,74	1,116
15	97,26	60,30	1,4334
16	81,54	50,62	1,4375
17	89,52	55,62	1,302
18	98,40	61,14	1,277

Şekil 4.29.'da yoğunluk ölçüm ve görüntü analiz metodlarına göre ölçülen gözeneklilik sonuçları kıyaslanmıştır.



Şekil 4.29. Yoğunluk ölçüm ve görüntü analiz sonuçlarının kıyaslanması

Yoğunluk ölçüm ve görüntü analiz metotlarıyla elde edilen gözeneklilik değerleri kıyaslandığında, sonuçlar birbirleriyle uyumlu gözükmemektedir. Fakat görüntü analiz metoduyla inceleme yapıldığında numune kesilerek kesit düzleminde inceleme yapılmaktadır. Bu durumda inceleme yapılan yüzey, bölgenin tamamını temsil etmeyeceği için model oluşturma ve doğrulama çalışmalarında yoğunluk ölçüm metodunun verileri kullanılmıştır.

4.6. Matematiksel Model Oluşturma

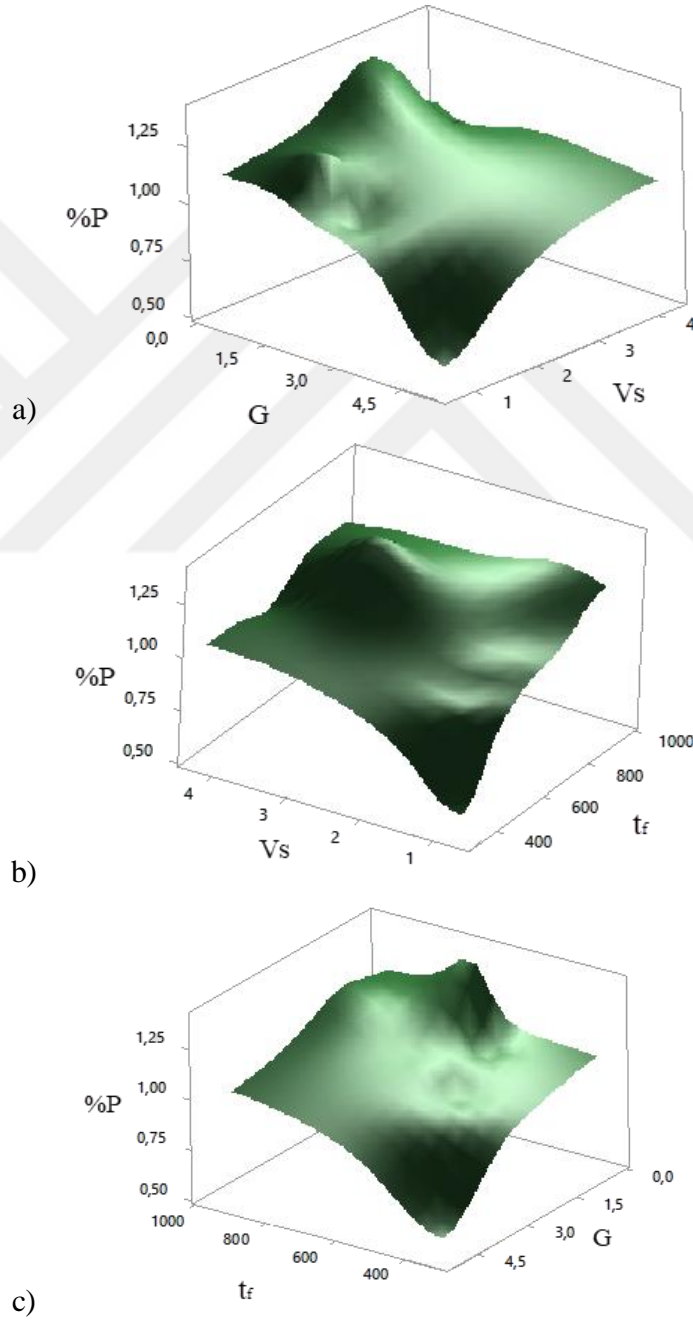
Deneylerden elde edilen tüm veriler Tablo 4.9.'da verilmiştir.

Tablo 4.9. Deneylerden elde edilen tüm veriler

Numune No	V _s (cm/sn)	V _s (cm/dk)	G (°C/cm)	t _f (sn)	t _f (dk)	λ ₂ (μm)	Y.E.	%P Tamamı	%P Bölge
1	0,1136	6,816	0,7	573	9,55	158,81			1,2361
2	0,026	1,56	1,043	246	4,10	92,68	0,3181	1,0763	1,1459
3	0,054	3,24	1,652	339	5,65	101,61			0,8471
4	0,1087	6,522	0,7	354	5,90	107,35			1,1746
5	0,0259	1,554	2,869	209	3,48	62,42	0,2918	0,8821	0,8668
6	0,0126	0,756	5,093	116	1,93	53,23			0,6049
7	0,1449	8,694	0,4	880	13,10	196,63			1,467
8	0,0228	1,368	1,557	578	9,63	131,85	0,362	1,1026	1,0551
9	0,0177	1,062	2,315	386	6,43	121,28			0,7858
10	0,0552	3,312	1,9	475	7,92	138,70			0,8617
11	0,029	1,74	1,803	601	10,02	141,09	0,331	0,9621	0,9697
12	0,0265	1,59	1,574	706	11,77	144,11			1,055
13	0,0971	5,826	1,3	302	5,03	69,62			1,193
14	0,1402	8,412	0,656	388	6,47	96,96	0,2505	1,2474	1,116
15	0,1149	6,894	0,556	453	7,55	110,86			1,4334
16	0,1786	10,716	0,6	191	3,18	72,97			1,4375
17	0,2033	12,198	0,574	273	4,55	67,98	0,2068	1,3388	1,302
18	0,1521	9,126	0,556	292	4,87	60,764			1,277

Elde edilen sonuçlar tek tek incelendiğinde katılma parametrelerinin (G, V_s, t_f) herhangi birisiyle gözeneklilik arasında doğrudan bir ilişki tespit edilememiştir. Bunun

üzerine katılma parametreleri ikili gruplar halinde incelenerek gözeneklilikle ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Gradyanın, Solidus hızının ve bölgesel katılma süresinin gözenekliliğe etkisi incelendiğinde (Şekil 4.30.), gradyan artışının gözenekliliği azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte Solidus hızı ve bölgesel katılma süresinin artmasıyla gözeneklilik artmaktadır.

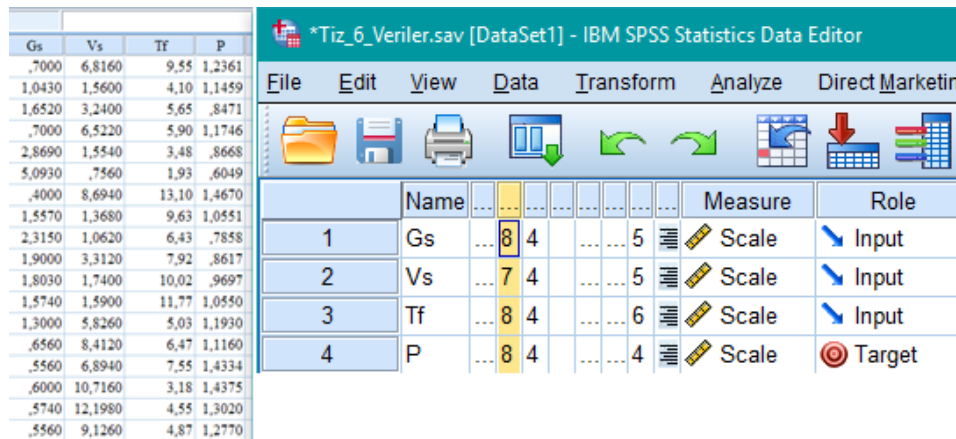


Şekil 4.30. a) G ile Vs'nin, b) Vs ile t_f 'nin, c) G ile t_f 'nin gözenekliliğe etkisi

Üç grafiği de incelediğimizde belli bölgelerde dalgalanmalar görülmektedir. Dolayısıyla katılma parametreleriyle gözeneklilik arasında doğrusal bir ilişki tespit edilememektedir. Yapay sinir ağları ve regresyon analizi teknikleri girdilerle sonuçlar arasında doğrusal ilişki olmadığı durumlarda kullanılan matematiksel model ve tahmin teknikleridir. Elde edilen veriler çalışmanın bu kısmından sonra regresyon analizi ve yapay sinir ağları teknikleriyle analiz edilmiş ve bir model oluşturulmuştur. Regresyon analizinden elde edilen model daha sonra doğrulama deneyinde kullanılmıştır.

4.6.1. Regresyon analizi uygulaması

Birden fazla değişken arasındaki ilişkinin hesaplanmasında regresyon analizi kullanılır. Regresyon analizinde temel amaç, ele alınan değişkenlerle matematiksel model oluşturmak ve bağımlı değişkende meydana gelen değişimin ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından oluşturulduğunun belirlenmesidir. Model oluşturmada çoğunlukla iterasyon yönteminden yararlanılmaktadır (Orman ve Gürcan, 2001). Bu çalışmada katılma parametreleri ile gözeneklilik arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve matematiksel bir model oluşturmak amacıyla regresyon analizinden yararlanılmıştır. Elde edilen veriler analiz programına eklenmiş ve girdiler (katılma parametreleri) ile çıktı (gözeneklilik) tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.31.).

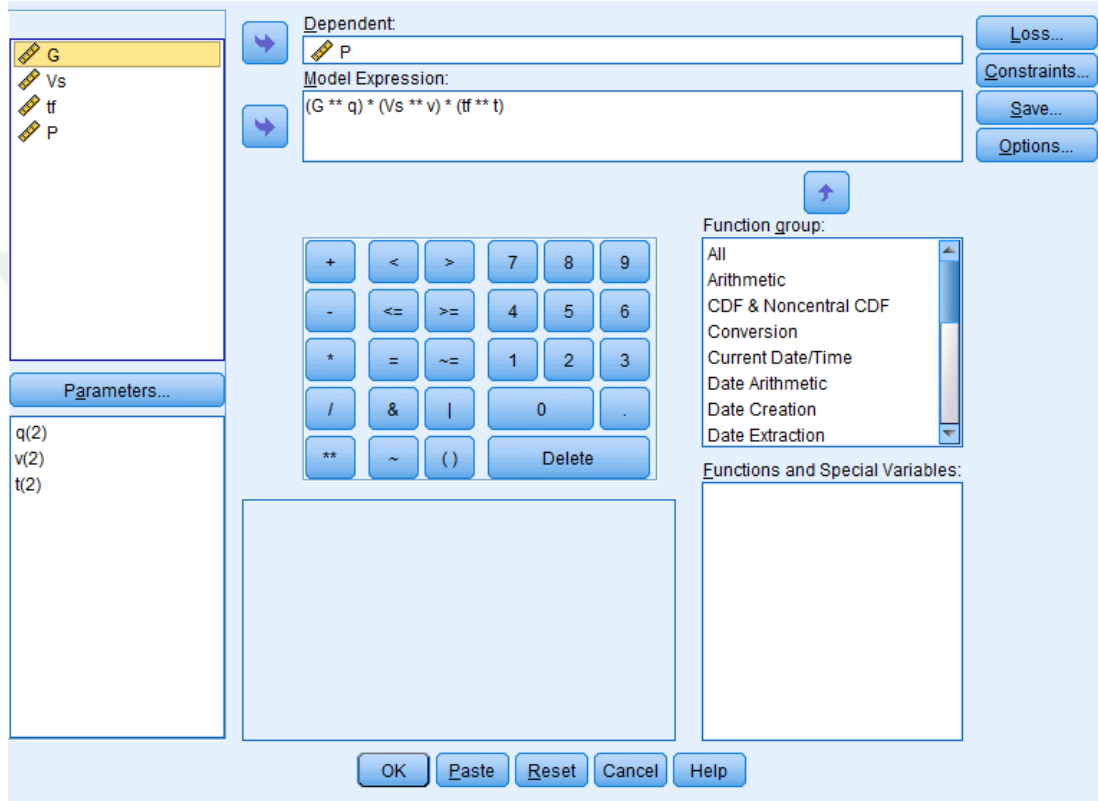


	Gs	Vs	Tf	P
	.7000	6,8160	9,55	1,2361
	1,0430	1,5600	4,10	1,1459
	1,6520	3,2400	5,65	,8471
	.7000	6,5220	5,90	1,1746
	2,8690	1,5540	3,48	,8668
	5,0930	,7560	1,93	,6049
	.4000	8,6940	13,10	1,4670
	1,5570	1,3680	9,63	1,0551
	2,3150	1,0620	6,43	,7858
	1,9000	3,3120	7,92	,8617
	1,8030	1,7400	10,02	,9697
	1,5740	1,5900	11,77	1,0550
	1,3000	5,8260	5,03	1,1930
	,6560	8,4120	6,47	1,1160
	,5560	6,8940	7,55	1,4334
	,6000	10,7160	3,18	1,4375
	,5740	12,1980	4,55	1,3020
	,5560	9,1260	4,87	1,2770

	Name	Measure	Role
1	Gs	Scale	Input
2	Vs	Scale	Input
3	Tf	Scale	Input
4	P	Scale	Target

Şekil 4.31. Verilerin analiz programına girilmesi ve tanımlanması

Veriler programa girildikten sonra kriter fonksiyonlara benzer ve daha sonra model doğrulama çalışmalarında kullanılabilir şekilde Denklem 4.3.'teki fonksiyon tanımlanarak (Şekil 4.32.) programın iterasyon yöntemiyle fonksiyona en uygun bağıntıyı tahmin etmesi hedeflenmiştir.



Şekil 4.32. Gözeneklilik tahmininde kullanılan matematiksel model

$$\%P = G^q \cdot V_s^v \cdot t_f^t \quad (4.3)$$

Denklemden q , v , t ifadeleri katılma parametrelerinin üstel katsayılarıdır. Bu aşamadan sonra regresyon analizi başlatılarak 26 iterasyon sonucunda en uygun katsayılar bulunmuştur (Tablo 4.10.). Bulunan q , v , t katsayıları sırasıyla $(-0,270)$, $(0,0258)$ ve $(0,0396)$ dir. Bu verilere göre denklem yeniden düzenlendiğinde Denklem 4.4. elde edilmektedir.

Tablo 4.10. Regresyon analizinde iterasyon yöntemiyle en uygun katsayıların bulunması

İterasyon Geçmişi				
İterasyon Numarası	Artık Kareler Toplamı	Parametreler		
		q	v	t
1.0	24154019,950	2,000	2,000	2,000
1.1	3313764,222	1,728	1,715	1,743
2.0	3313764,222	1,728	1,715	1,743
2.1	454962,291	1,452	1,435	1,480
3.0	454962,291	1,452	1,435	1,480
3.1	62291,395	1,170	1,158	1,212
4.0	62291,395	1,170	1,158	1,212
4.1	8418,004	,878	,883	,942
5.0	8418,004	,878	,883	,942
5.1	1091,066	,574	,613	,676
6.0	1091,066	,574	,613	,676
6.1	125,482	,265	,362	,425
7.0	125,482	,265	,362	,425
7.1	10,453	-,015	,160	,215
8.0	10,453	-,015	,160	,215
8.1	,483	-,203	,050	,084
9.0	,483	-,203	,050	,084
9.1	,145	-,266	,026	,043
10.0	,145	-,266	,026	,043
10.1	,144	-,270	,026	,040
11.0	,144	-,270	,026	,040
11.1	,144	-,270	,026	,040
12.0	,144	-,270	,026	,040
12.1	,144	-,270	,026	,040
13.0	,144	-,270	,026	,040
13.1	,144	-,270	,0258	,0396

$$\%P = G^{-0,27} \cdot V_s^{0,0258} \cdot t_f^{0,0396} \quad (4.4)$$

Tablo 4.11.de verilen varyans analizi tablosu incelendiğinde R² değerinin 0,857 olarak bulunduğu görülmektedir. Bu durum da %P bağımlı değişkeninin bağımsız değişkenler olan katılma parametreleri tarafından %85,7 oranında açıklanabildiğini göstermektedir.

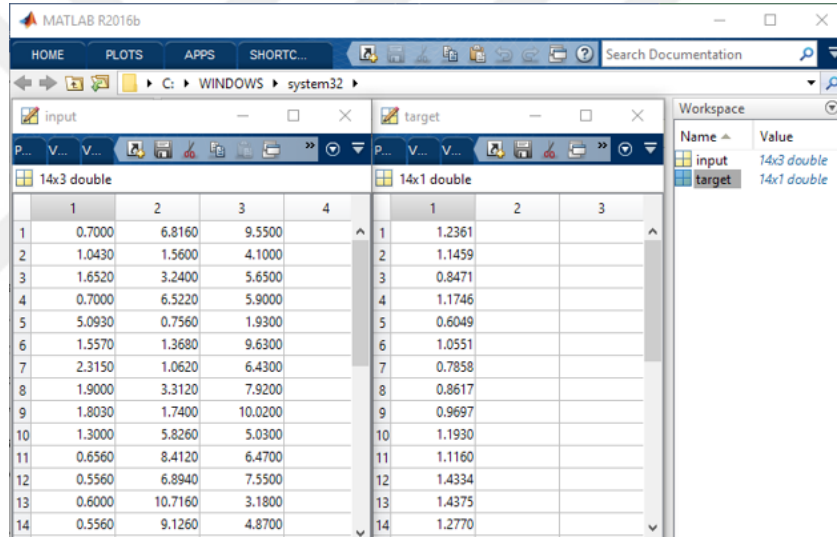
Tablo 4.11. Regresyon analizinin varyans analizi tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması
Regresyon	22,706	3	7,569
Artık	,144	15	,010
Düzeltilmemiş	22,850	18	
Düzeltilmiş	1,007	17	
R ² = 1 - (Artık Kareler Top.) / (Düzeltilmiş Kareler Top.) = 0,857			

Regresyon analizi sonucu elde edilen Denklem 4.4. model doğrulama çalışmalarında, SOLIDCast programında Custom Formula kısmında tanımlanacak ve elde edilen simülasyon sonuçları gerçek sonuçlarla kıyaslanacaktır.

4.6.2. YSA uygulaması

Yapay sinir ağları uygulaması MATLAB programında nntool aracıyla yapılmıştır. İlk etapta katılma parametreleri girdi (input) gözeneklilik sonuçları da çıktı (target) olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.33.).



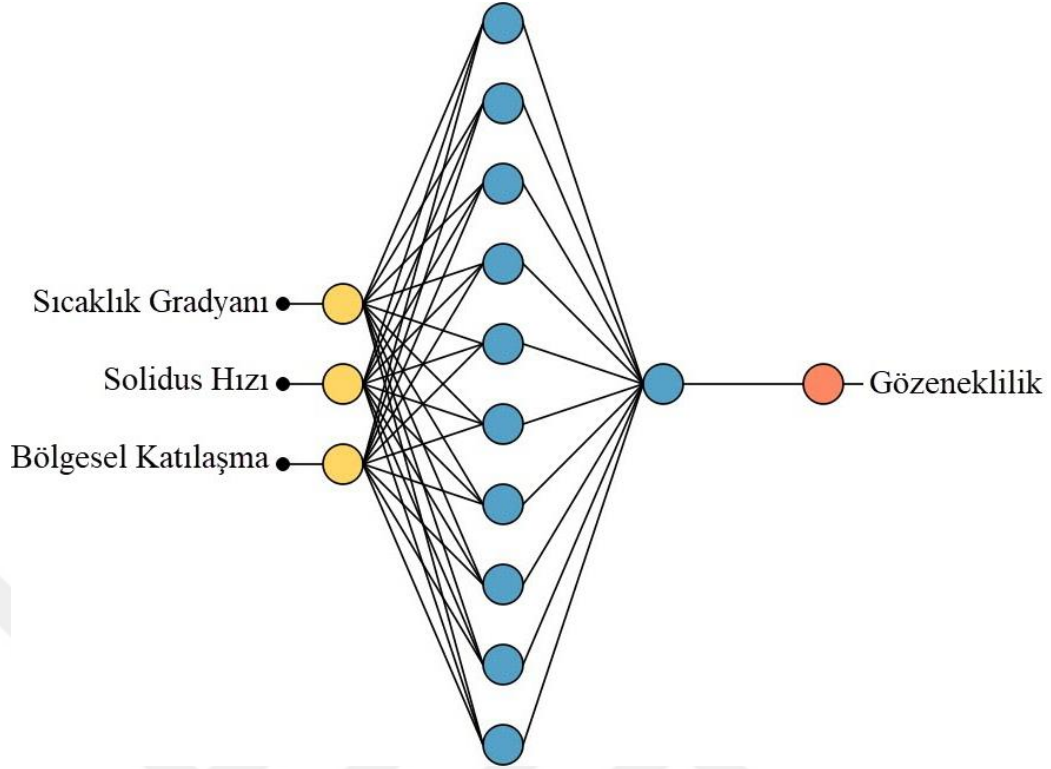
The screenshot shows the MATLAB R2016b workspace with two variables: 'input' (14x3 double) and 'target' (14x1 double). The 'input' table has 14 rows and 3 columns, and the 'target' table has 14 rows and 1 column.

	1	2	3	4
1	0.7000	6.8160	9.5500	
2	1.0430	1.5600	4.1000	
3	1.6520	3.2400	5.6500	
4	0.7000	6.5220	5.9000	
5	5.0930	0.7560	1.9300	
6	1.5570	1.3680	9.6300	
7	2.3150	1.0620	6.4300	
8	1.9000	3.3120	7.9200	
9	1.8030	1.7400	10.0200	
10	1.3000	5.8260	5.0300	
11	0.6560	8.4120	6.4700	
12	0.5560	6.8940	7.5500	
13	0.6000	10.7160	3.1800	
14	0.5560	9.1260	4.8700	

	1	2	3
1	1.2361		
2	1.1459		
3	0.8471		
4	1.1746		
5	0.6049		
6	1.0551		
7	0.7858		
8	0.8617		
9	0.9697		
10	1.1930		
11	1.1160		
12	1.4334		
13	1.4375		
14	1.2770		

Şekil 4.33. Girdiler ve çıktının programa tanıtılması

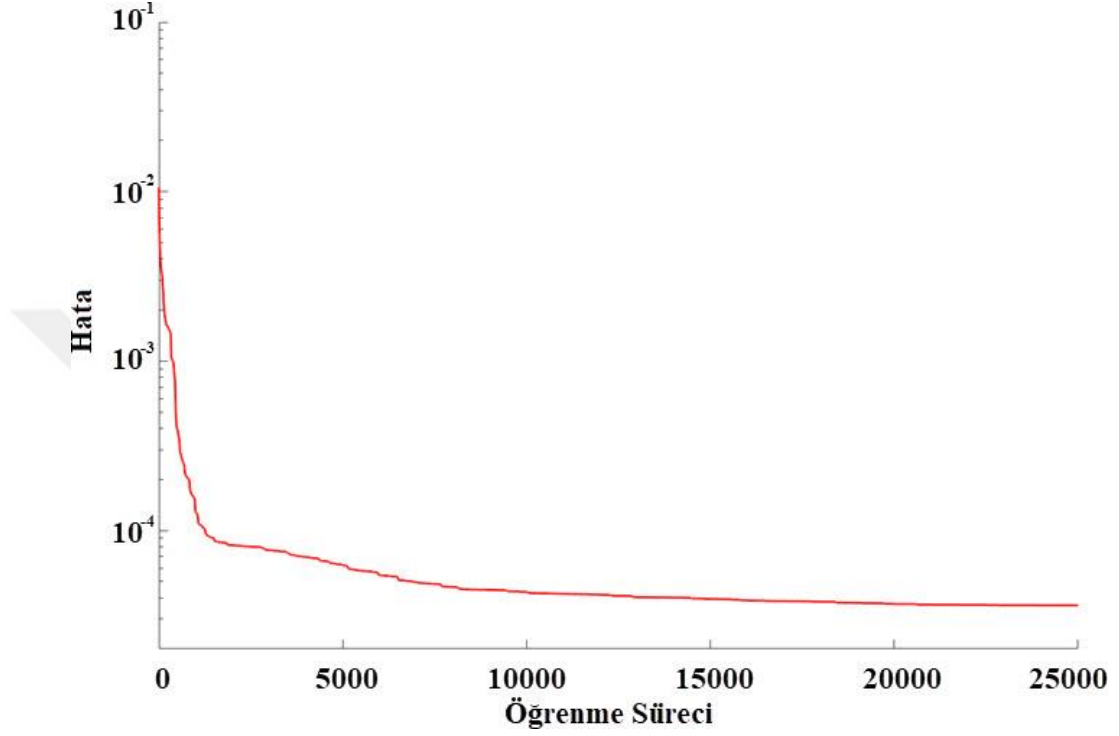
Yapay sinir ağları (YSA), insan sinir ağlarının beyin hücrelerine benzeyen, birbirine oldukça bağlı bir yapıya sahiptirler ve ağda farklı katmanlarda düzenlenmiş, nöron adı verilen çok sayıda basit işleme ögesinden oluşurlar. Her ağ bir girdi katmanı, çıktı katmanı ve bir veya daha fazla gizli katmandan oluşur. Ağ mimarisi tanımlandıktan sonra öğrenme süreci boyunca ağırlıklar istenilen çıktıyı verecek şekilde hesaplama yapılır (Hassan ve ark., 2009). Tek katmanlı ve 8 nöronlu olarak dizayn edilen ağ mimarisi Şekil 4.30.'da verilmiştir.



Şekil 4.34. Yapay sinir ağı mimarisi

YSA uygulamasında öğrenme sürecinde kullanılan birçok algoritma vardır. Araştırmacılar (Vosniakos ve ark., 2009; Patel ve ark., 2014; Kumar ve Rajasekhar, 2017) bu algoritmalar arasında yaptıkları kıyaslamalarda en verimli algoritmanın Levenberg-Marquardt (LM) algoritması olduğu sonucuna varmıştır. Bu çalışmada, Matlab yazılımıyla LM eğitim algoritmasıyla geliştirilmiş tek gizli katmanlı YSA kullanılmıştır (Şekil 4.34.). Giriş katmanında katılma parametreleri, çıktı katmanında ise gözeneklilik sonuçları tanımlanmıştır. Gizli katmanda ise mevcut bağlantı ağırlıklarını kullanarak belirli bir girdi modeli için çıktı değerleri üretilir. Ardından, gerçek ve istenen çıktılar arasındaki hatayı azaltmak için ağırlıkların değiştirilmesi için geriye dönük işlem gerçekleştirilir. Bu süreçte, gerçek çıktılar ile verilen girdilere yanıt olarak üretilen çıktılar arasında ortalama hata karesini en aza indirmek amacıyla iterasyon yöntemi kullanılır. Son olarak, girdi değeri yeni ağırlık güncellemeleri ile tekrar sinir ağından geçirilir ve eğer varsa, hatalar tekrar hesaplanır.

Bu teknik, hata ortalaması değeri kabul edilebilir değere inene kadar yinelenir (Koker ve ark., 2007). Bu çalışmada kullanılan ağıın öğrenme sürecindeki ortalama hata karesi grafiği Şekil 4.35.'te verilmiştir.

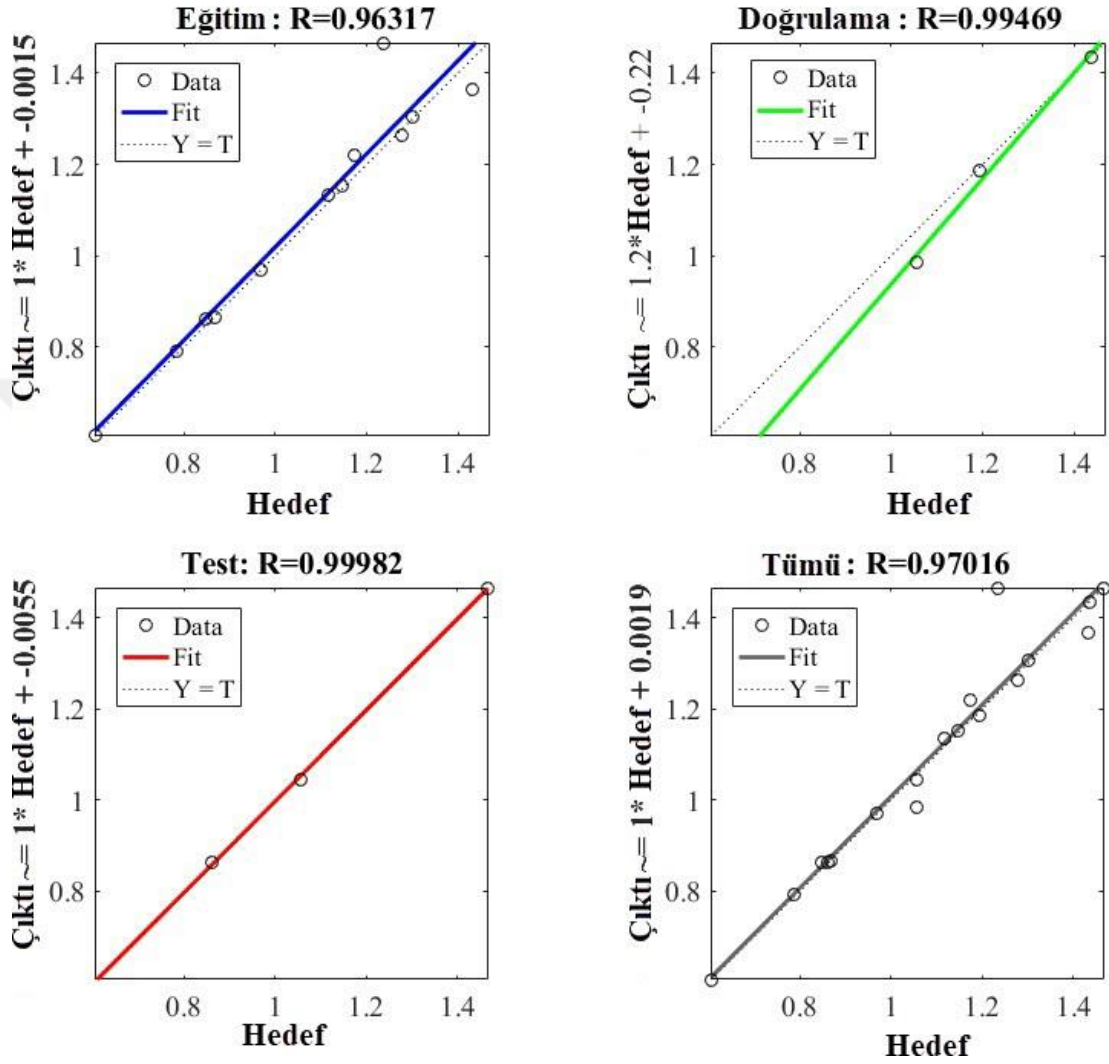


Şekil 4.35. Ağıın öğrenme süreci ile hata arasındaki ilişki

Grafik dikkatli bir şekilde ortalama hata karesi değerinin 10⁻⁴ civarında olduğu ve belli bir çevrim sonrasında artık sabitlendiği görülmektedir. Bu durum ağıın eğitildiğini göstermektedir. Öğrenme sürecinde kontrol edilen bir diğer parametre ise ağıın eğitim, test ve doğrulama süreçlerindeki regresyon eğrileridir. Eğrilerde hesaplanan R değeri 1'e yaklaştıkça çıktı ile girdiler arasında ilişkinin anlamlı olduğu, 0'a yaklaştıkça ise rastgele bir ilişki olduğu sonucuna varılır.

Ağıın öğrenme, test ve doğrulama süreçlerindeki regresyon eğrileri Şekil 4.36.'da verilmiştir. Tüm süreçlerin ortalaması olarak hesaplanan R değeri 0.97016'dır. Bu

değer, öğrenme süreci sonunda girdiler ile çıktı arasında oldukça anlamlı bir ilişki kurulabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.36. Ağın regresyon eğrileri ve hesaplanan R değerleri

Öğrenme süreci tamamlandıktan sonra mevcut girdilerle ağın simülasyonu yapılmış ve elde edilen gözeneklilik sonuçları gerçek sonuçlarla kıyaslanmıştır. Gerçek gözeneklilik sonuçları ile regresyon analizi ve YSA dan elde edilen sonuçlar Tablo 4.12.'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Gerçek gözeneklilik sonuçlarıyla modelleme tahminlerinin kıyaslaması

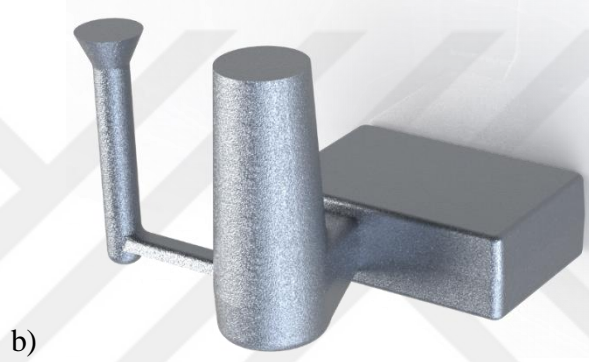
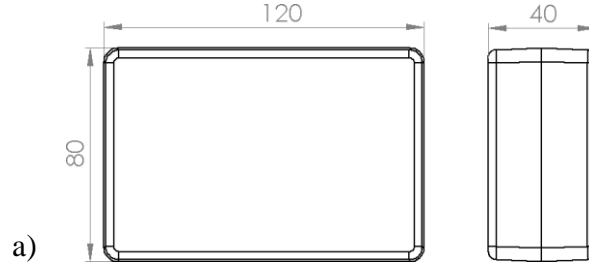
Gerçek Gözeneklilik	Regresyon		YSA	
	Tahmin	MYS	Tahmin	MYS
1,2361	1,2651	2,34	1,2671	2,51
1,1459	1,0575	7,71	1,1429	0,26
0,8471	0,9640	13,81	0,8354	1,38
1,1746	1,2398	5,55	1,1721	0,21
0,8668	0,7994	7,76	0,8616	0,59
0,6049	0,6566	8,55	0,6083	0,57
1,467	1,4994	2,21	1,4289	2,59
1,0551	0,9784	7,26	1,0586	0,32
0,7858	0,8595	9,38	0,7949	1,16
0,8617	0,9413	9,24	0,8175	5,13
0,9697	0,9477	2,26	0,9810	1,16
1,055	0,9871	6,43	1,0413	1,29
1,193	1,0393	12,88	1,0416	12,69
1,116	1,2746	14,22	1,1257	0,87
1,4334	1,3342	6,92	1,3861	3,29
1,4375	1,2775	11,12	1,4367	0,06
1,302	1,3157	1,06	1,3027	0,05
1,277	1,3207	3,42	1,1528	9,73
Ortalama MYS		7,34		2,43

Bu tabloda bahsedilen MYS değeri model ile gerçek sonuçlar arasındaki mutlak sapma yüzdesini belirtmektedir. Bu tabloya göre regresyon analizi sonuçları incelendiğinde en fazla sapma %14,22, en az sapma %1,06 ve ortalama sapma %7,34 olarak hesaplanmıştır. YSA'da ise en fazla sapma %12,69, en az sapma %0,05 ortalama sapma ise %2,43 olarak hesaplanmıştır.

4.7. Model Doğrulama

Model doğrulama aşamasında, fiziksel ortamda kum döküm yöntemiyle dökülen bir parçanın gözeneklilik sonuçları, oluşturulan matematiksel model aracılığıyla simülasyon ortamında dökülen bir parçanın sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Ayrıca, Tablo 2.1.'de verilen gözeneklilik tahmininde yaygın kullanılan kriter fonksiyonlar olan

Niyama ve FCC kriterleri de oluşturulan matematiksel model ile kıyaslanmıştır. Doğrulama deneyinde ilk etapta, hata çıkacak şekilde tasarlanarak katı modeli çizilen döküm modeli kum kalıp yöntemiyle kalıplanıp dökülmüştür (Şekil 4.37.).



Şekil 4.37. Doğrulama deneyinde kullanılan modelin, a) teknik resmi, b) montaj görünümü, c) döküm hali

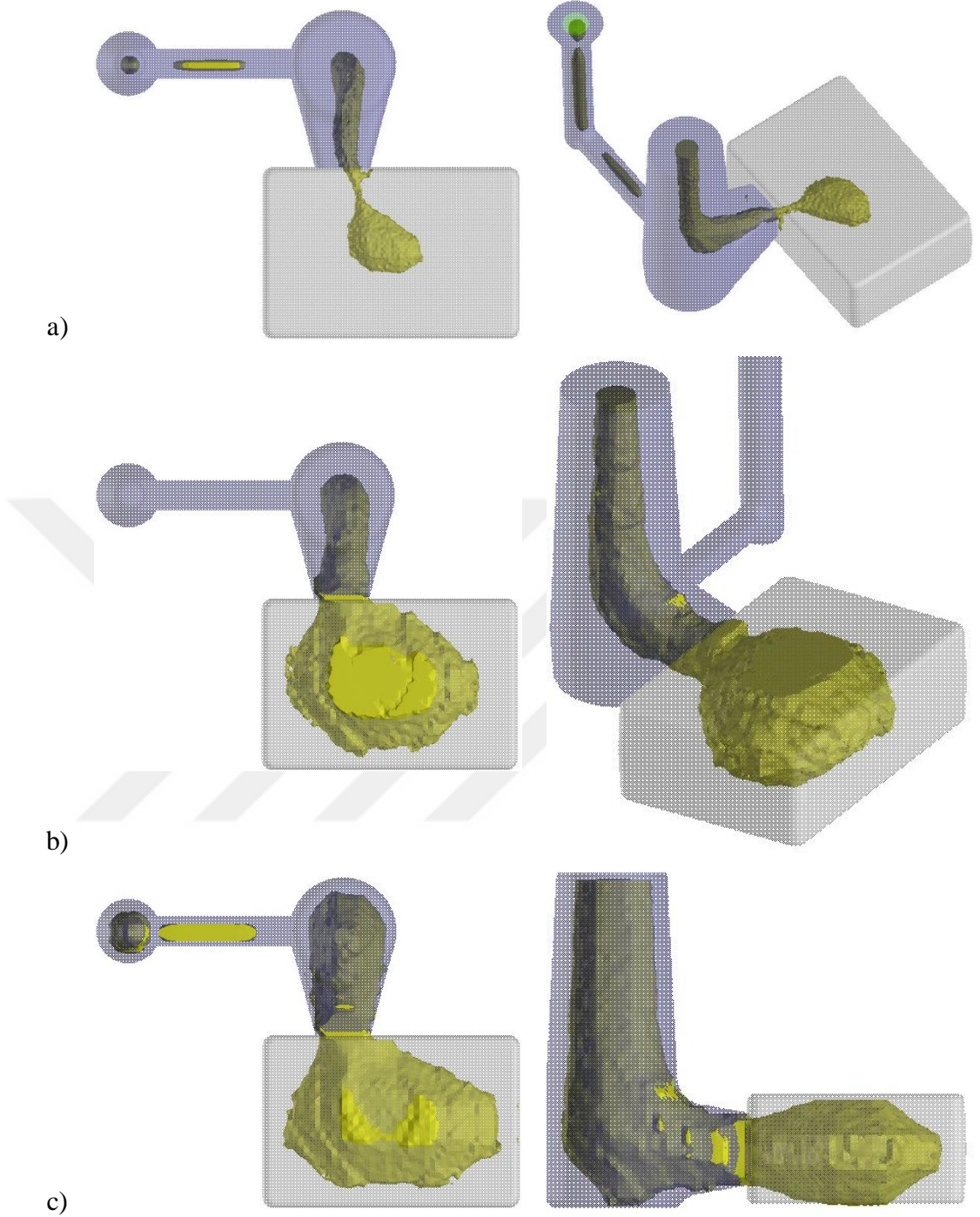
Döküm alaşımı olarak, deneylerde de kullanılmış olan Etial 171 alaşımı ve döküm sıcaklığı olarak 720°C seçilmiştir.

Ticari bir döküm simülasyon yazılımı olan SOLIDCast programında, belli şablonlarda denklemler girebileceğiniz “*Custom Formula*” adında bir menüsü bulunmaktadır. Regresyon analizinde elde edilen denklem bu menüye uygundur. Bu aşamadan sonra katılaşma parametrelerinin gözenekliliğe ilişkisinden türetilen Denklem 4.4.’teki değerler “*Custom Formula*” menüsüne girilerek, model doğrulama amacıyla simülasyon çalışması başlatılmıştır (Şekil 4.38.).

Parameter	Value
Constant	
Temperature Exponent	
Solidification Time Exponent	
Critical Fraction Solid (CFS) Time Exponent	
Temperature Gradient Exponent	-0.27
Cooling Rate Exponent	
Liquidus Time Exponent	
Local Solidification Time Exponent	0.0396
Solidus Velocity Exponent	0.0258

Şekil 4.38. Denklem Custom Formula menüsüne girilmesi

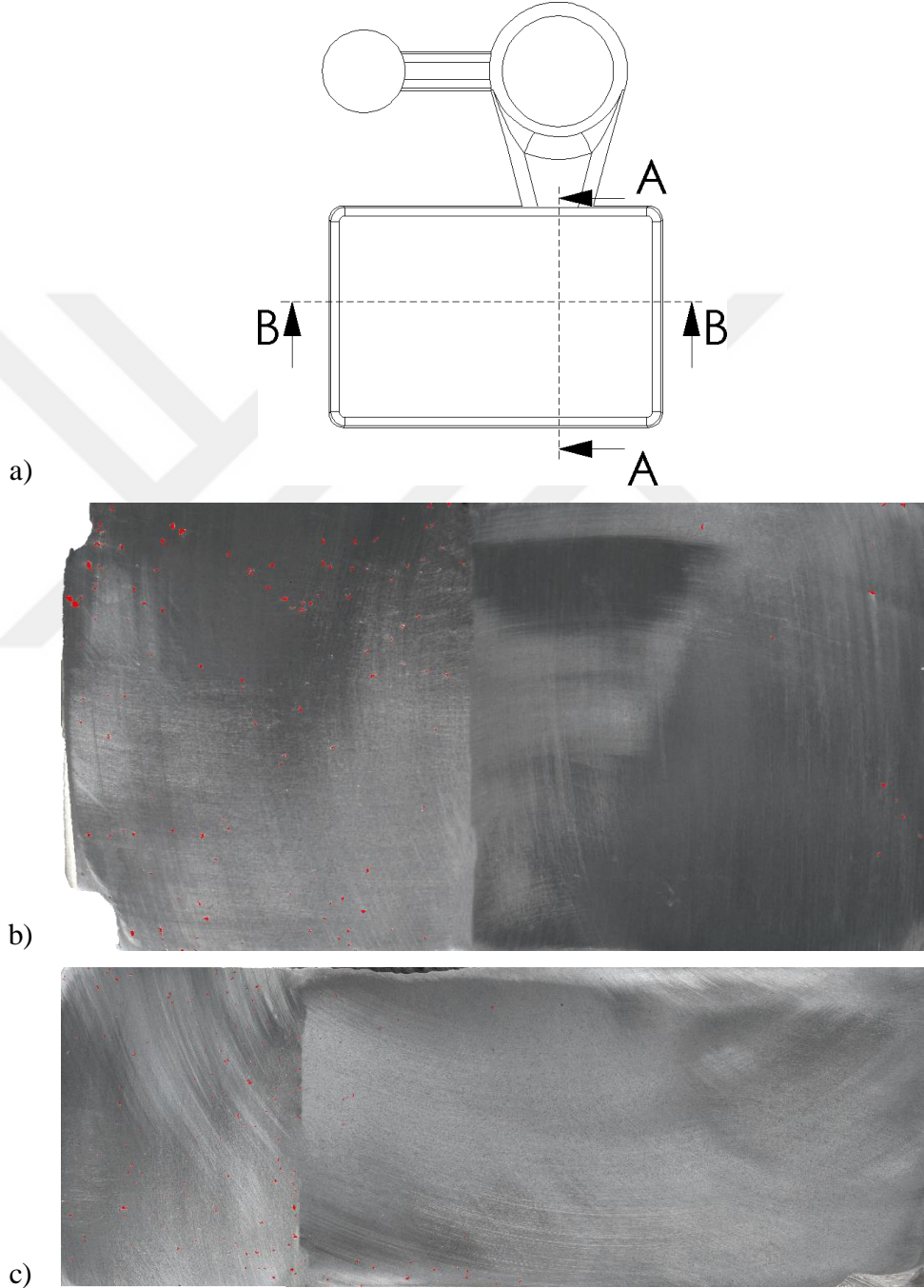
Simülasyon tamamlandıktan sonra bu çalışmada üretilen formüllerden elde edilen gözeneklilik sonuçları, Niyama ve FCC kriterleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.39.).



Şekil 4.39. a) Bu çalışmadan üretilen formüle göre, b) FCC kriterine göre, c) Niyama kriterine göre gözeneklilik sonuçları

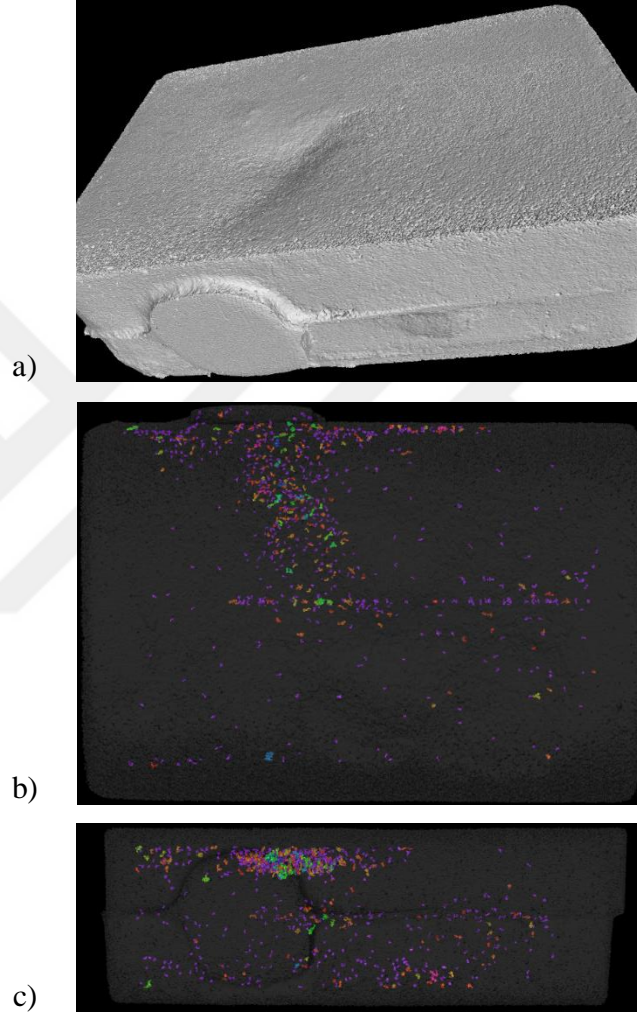
Simülasyon sonuçları gerçek sonuçlarla karşılaştırılmadıkça tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Simülasyon sonuçları ile matematiksel modelin tutarlılığını ve gerçeklerle ne kadar örtüştüğünü test etmek amacıyla gerçek numunede bilgisayarlı

tomografi taraması ve kesit incelemesi yapılmıştır. Döküldükten sonra Şekil 4.40.a da gösterildiği gibi AA ve BB kesitlerinden kesilen numuneler zımparalandıktan sonra Bölüm 3.8.2.de anlatıldığı şekliyle düzlemsel olarak incelenmiştir.



Şekil 4.40. a) Gerçek numunenin kesit inceleme düzlemleri, b) AA düzlemine, c) BB düzlemine ait gözeneklilik sonuçları

Kesit düzlemi incelemelerinde iki boyutlu düzlemsel inceleme yapıldığından parçanın tamamını görmek mümkün değildir. Bu yüzden parçanın tamamındaki gözeneklilik durumunu görebilmek ve simülasyon sonuçlarıyla daha sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla bilgisayarlı tomografi taraması yapılmıştır (Şekil 4.41.).



Şekil 4.41. Taranmış numunenin, a) genel, b) üstten, c) önden görünüşü

Oluşturulan matematiksel model ile çalıştırılan simülasyon sonuçları incelendiğinde hataların ağırlıklı olarak besleyici girişi civarında öbeğlendiği görülmektedir. Doğrulama numunesi sonuçlarını simülasyon sonuçlarıyla kıyasladığımızda hatalı bölgelerin örtüştüğü Şekil 4.39., Şekil 4.40. ve Şekil 4.41.'deki görsellerde görülmektedir.

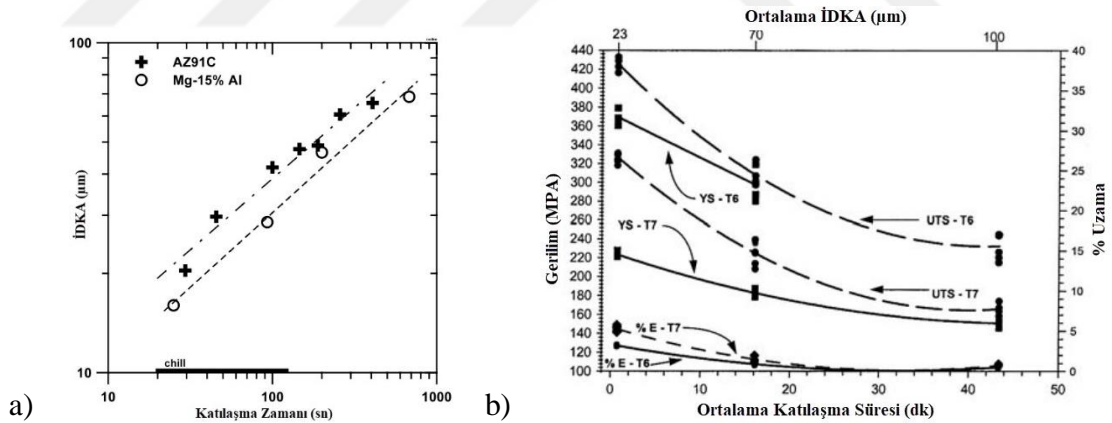
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Etial 171 alaşımında gözenek oluşum nedenleri ve gözenekliliği etkileyen parametreler incelenmiştir. Bunun için ilk olarak dört farklı bölgede sıcaklık kontrolü sağlanabilen bir yönlü katılaşma fırını imal ettirilmiştir. Bu fırın vasıtasıyla farklı sıcaklık gradyanları, katı-sıvı arayüzey ilerleme hızları ve bölgesel katılaşma sürelerinde katılaştırma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen numuneler üzerinde yoğunluk analizi ve mikroyapısal analizlerle gözeneklilik oranları hesaplanmıştır. Son olarak, gözeneklilik ile katılaşma parametreleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Her dökümden önce gazlılık tespitinde referans olarak alınan vakum altında katılaştırılan numunelerde 0,20 ile 0,362 arasında farklı değerlerde yoğunluk endeksi hesaplanmıştır (Tablo 4.1.). Yoğunluk endeksi malzemenin gazlılığı ile ilgili bilgi vermektedir. Farklı katılaşma parametrelerinde dökülen numuneler incelendiğinde döküm sonrası ölçülen gözeneklilik değerleriyle aynı numunenin referans RPT numunesinin yoğunluk endeksi değerleri kıyaslandığında sonuçlar arasında bir ilişki tespit edilememiştir (Tablo 4.8.). Bu durum dökümlerde oluşan gözenekliliğin sadece gazlılık veya hidrojen varlığıyla açıklanamayacağını ortaya koymaktadır.
- Caceres ve arkadaşları (2002), katılaşma şartlarının AZ91 magnezyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmalarında katılaşma zamanındaki artışın İDKA mesafesini de doğrudan arttırdığını

tespit etmişlerdir (Şekil 5.1.a.). Benzer bir çalışmada Zn-Al alaşımlarının mekanik özelliklerini inceleyen Osorio ve arkadaşları (2003), aynı şekilde bölgesel katılaşma süresinin artmasıyla İDKA mesafesinin arttığını ve bu artışın malzemede çekme ve akma mukavemetlerinde düşüşe yol açtığını tespit etmişlerdir. Boileau ve Allison ise (2003), A319 alüminyum alaşımının yorulma özelliklerine katılaşma zamanı ve ısıl işlemin etkisini inceledikleri çalışmalarında katılaşma zamanının artması sonucunda ortalama gözenek çaplarının büyüdüğünü ve bunun sonucunda da malzemenin yorulma ömrünün düştüğünü tespit etmişlerdir (Şekil 5.1.b.).

Bu çalışmada da yukarıdaki çalışmalara benzer şekilde bölgesel katılaşma süresinin artması sonucunda İDKA mesafesinin doğrusal bir şekilde arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.18.).



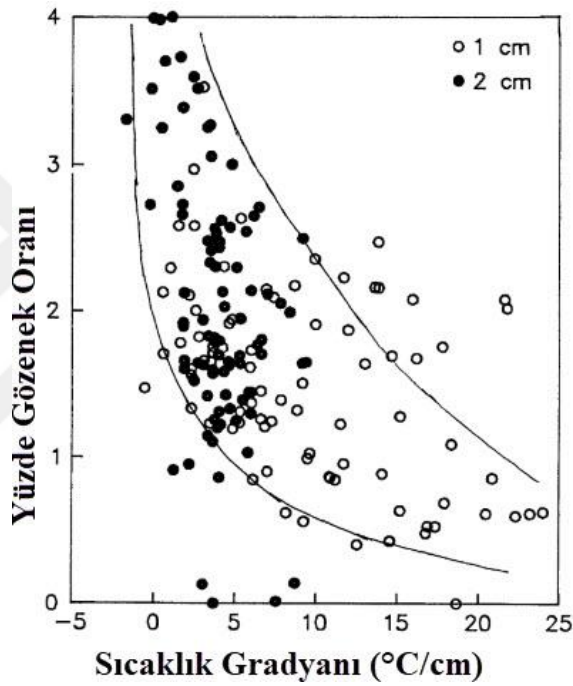
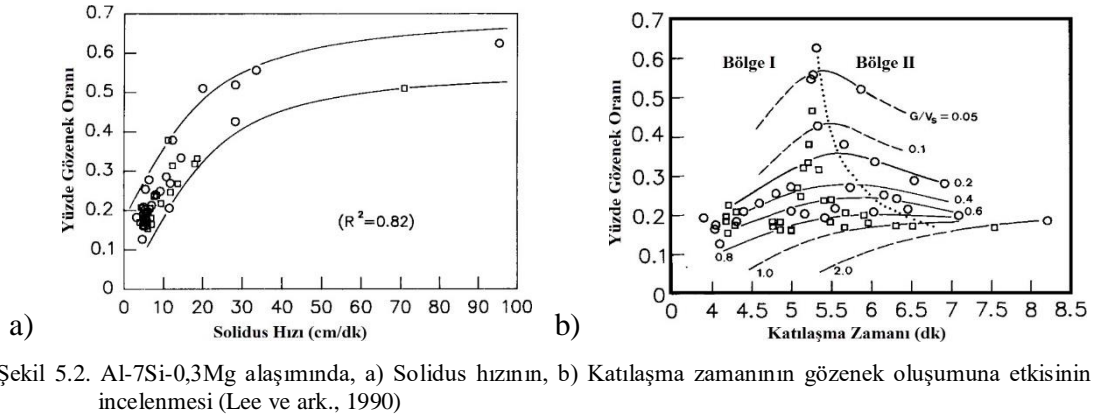
Şekil 5.1. a) AZ91 alaşımında katılaşma zamanı İDKA arasındaki ilişki (Cáceres ve ark., 2002), b) A319 alaşımında katılaşma zamanının İDKA ve mekanik özelliklere etkisi (Boileau ve Allison, 2003)

- Şekil 4.30.'daki grafikler incelendiğinde sıcaklık gradyanındaki artışın gözenekliliği azalttığı, solidus hızı ile bölgesel katılaşma süresindeki artışın ise gözenekliliği arttırdığı görülmektedir. Ayrıca regresyon analiziyle sonucu

gözeneklilikle katılma parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için aşağıda verilen matematiksel model geliştirilmiştir.

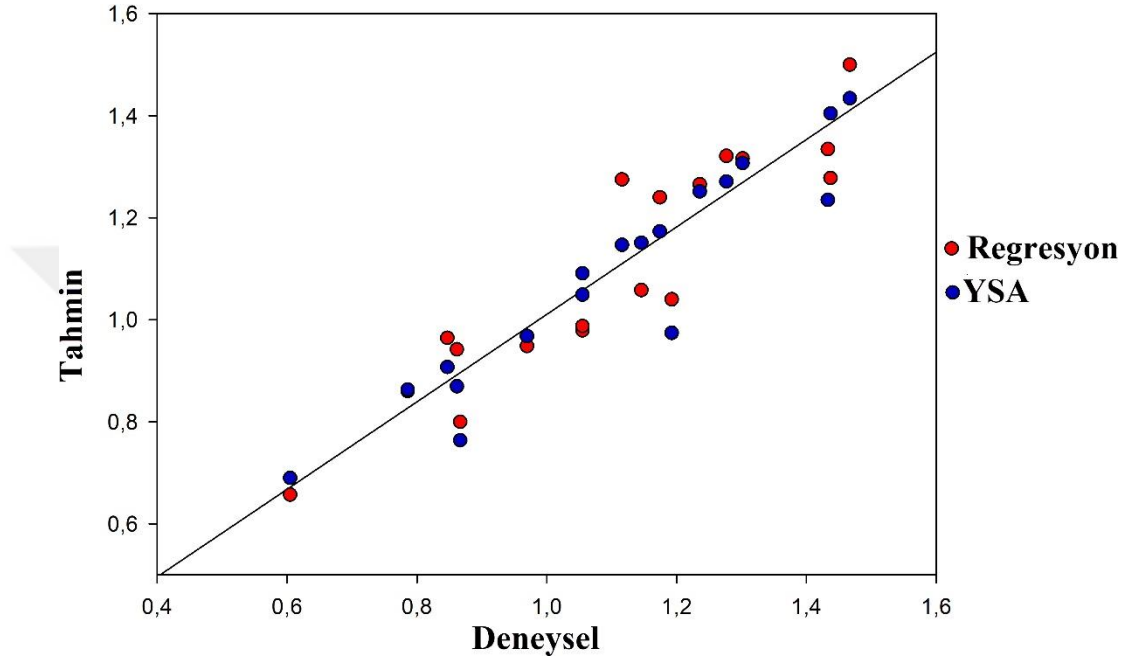
$$\%P = G^{-0,27} \cdot V_s^{0,0258} \cdot t_f^{0,0396}$$

Bu bağıntı incelendiğinde gözeneklilik ile sıcaklık gradyanı arasında ters orantı, solidus hızı ve bölgesel katılma süresi arasında doğru orantı bulunmuştur. Bu durum Şekil 4.30.'daki grafikleri desteklemektedir. Ayrıca Tablo 4.8.'deki verileri de inceleyecek olursak tüm numuneler içinde sıcaklık gradyanının en yüksek olduğu ve bölgesel katılma süresinin en kısa olduğu 6 numaralı numunede %0,6049 ile en düşük gözeneklilik değeri elde edilmiştir. Tam tersi bir durumda en düşük sıcaklık gradyanına ve en uzun bölgesel katılma süresine sahip olan 7 numaralı numunede ise %1,467 ile en yüksek gözeneklilik değeri elde edilmiştir. En yüksek solidus hızlarından ve en düşük sıcaklık gradyanlarından birinin birinin ölçüldüğü 16 numaralı numunede ise %1,4375 ile en yüksek ikinci gözeneklilik değeri elde edilmiştir. Lee ve arkadaşları (1990), Al-7Si-0,3Mg alaşımının besleme davranışlarını modelledikleri çalışmalarında, solidus hızının yüksek olması sonucunda dendritler arası beslemenin zorlaşacağını bu durumda gözenekliliği arttıracığını savunmuştur. Yine aynı çalışmada, besleme davranışlarının karakterize edilmesinde katılma parametrelerinin (G , V_s , t_f) birbirinden bağımsız değerlendirilemeyeceği iddia edilmiştir (Şekil 5.2.). Kuo (2012), A201 alaşımında sıcaklık gradyanının gözenekliliğe etkisini incelediği çalışmasında sıcaklık gradyanında artışın gözenek oranını azalttığını tespit etmiştir (Şekil 5.3.). Literatürdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kıyaslandığında bulgularda bir örtüşme gözlemlenmiştir.



- YSA ve regresyon analizi yöntemleri, matematiksel model ve tahmin amacıyla yaygın olarak kullanılan istatistiksel yöntemlerdir. Bu çalışmada, YSA ve regresyon analizi yöntemlerinin birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları tespit edilmiştir. YSA ile yapılan tahminlerde anlamlılık oranı %97 ve gerçek sonuçlardan sapma ortalama %2,43 olarak gerçekleşmiştir. Regresyon analizinde ise anlamlılık oranı %85 ve gerçek sonuçlardan sapma oranı %7,34 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda YSA ile yapılan tahmin regresyon

analizine göre daha başarılı ve gerçeğe yakın çıkmıştır (Şekil 5.4.). Bununla birlikte, regresyon analiziyle elde edilen denklem SOLIDCast gibi birçok simülasyon programında kullanılabilir basitliktedir. Yapay sinir ağlarını mevcut simülasyon yazılımlarına entegre etmek mümkün değildir.



Şekil 5.4. Deneysel sonuçlarla modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

- Şekil 4.35.'te regresyon analizinde elde edilen modelin simülasyon sonucuyla FCC ve Niyama kriterlerinin simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 4.40. ve Şekil 4.41.'de ise simüle edilen parçanın gerçek döküm sonuçları verilmiştir. Gerçek sonuçlar incelendiğinde parçadaki gözenekliliğin besleyici girişine yakın yerlerde toplandığı görülmektedir. Bu bilgi ışığında Şekil 4.39.'daki sonuçları tekrar inceleyecek olursak, tezde çalışılan modifiye edilmemiş ve gazlılığı belli bir aralıkta sabit tutulmaya çalışılmış Etial 171 alaşımı için regresyon analizinden elde edilen matematiksel model simülasyon sonuçları, FCC ve Niyama kriterlerine göre daha başarılı olmuş ve gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir.

Bu çalışmada yapılan deneyler ve elde edilen bulgulardan yola çıkarak gelecekte yapılacak çalışmalar için şu önerilerde bulunulabilir.

- Bu çalışmada katılma parametrelerinin gözenekliliğe etkisini net bir şekilde anlayabilmek amacıyla tek tip alaşım üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda farklı alaşım tiplerinde çalışmalar yapılabilir.
- Modifiye edici ve tane inceltici master alaşımların ötektik silyumun ve dendritlerini boyutlarını küçülttüğü bilinmektedir. Gözenek oluşumunda etkili mekanizmalardan biri de yarı-katı bölgedeki basınç düşüştür. Bu boyut küçülmesinin yarı-katı bölgede basınç düşüşünü etkileyip etkilemediği dolayısıyla gözenek oluşumuna etkileri incelenebilir.
- Bu çalışmada gözenek oluşumuna etki eden mekanizmaların anlaşılması üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde ise katılma parametrelerinin mekanik özellikleri etkilediği sıkça vurgulanmaktadır. Gelecek çalışmalarda bu konuya yoğunlaşarak katılma parametrelerinin mekanik özellikleri ne şekilde etkilediği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Anson, J. P. 2000. The Nucleation and Growth of Microporosity in Aluminum-7%Silicon Foundry Alloy. McGill University, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Doktora Tezi.
- AT Kearney. 2016. Türkiye İnovasyon Stratejisi 2023 : İhracat odaklı inovasyon yoluyla rekabet gücünü artırmak. A.T. Kearney Araştırma Raporu.
- Atwood, R. C., Lee, P. D. 2003. Simulation of the three-dimensional morphology of solidification porosity in an aluminium – silicon alloy. *Acta Materialia*, 51, 5447–5466.
- Barlow, J. O., Stefanescu, D. M. 2002. Computer-Aided Cooling Curve Analysis. *AFS Transactions*, 97(04), 349–354.
- Beeley, P. 2001. *Foundry Technology*. Butterworth-Heinemann (2nd Ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bichler, L. 2005. The Effect of LFC Process Variables on Solidification and Thermal Response of AZ91E Magnesium Alloy Castings. Ryerson University, Program of Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi.
- Bishop, H. F., Pellini, W. S. 1951. The Contribution of Riser and Casting End Effects to Soundness of Cast Steel Bars. *AFS transactions*, (59), 171.
- Boileau, J. M., Allison, J. E. 2003. The Effect of Solidification Time and Heat Treatment on the Fatigue Properties of a Cast 319 Aluminum Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(September), 1807–1820.
- Büchner, H. J., Gloßner, J. 2015. *Foundry Industry 2020 : Trends and Challenges*. Düsseldorf.
- Buffière, J. Y., Savelli, S., Jouneau, P. H., Maire, E., Fougères, R. 2001. Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model Al-Si7-MgO.3 cast Al alloys. *Materials Science and Engineering A*, 316(1–2), 115–126.
- Cáceres, C. H., Davidson, C. J., Griffiths, J. R., Newton, C. L. 2002. Effects of solidification rate and ageing on the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy. *Materials Science and Engineering A*, 325(1–2), 344–355.
- Campbell, J. 2004. *Casting Practice The 10 Rules Of Castings*. Burlington: Butterworth-Heinemann.

- Campbell, J. 2015. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design (2nd Ed.). Oxford: Elsevier.
- Cantor, B., O'Reilly, K. 2003. Solidification and Casting. (B. Cantor ve M. . Goringe, Ed.)Institute of Physics Publishing (2nd Ed.). London: Institute of Physics Publishing.
- Carlson, K. D., Beckermann, C. 2009. Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 40(1), 163–175.
- Chiesa, F., Mammen, J., Smiley, L. E. 1998. Use of Solidification Modeling to Predict Porosity Distribution in AL A356 Industrial Castings. AFS Transactions, 106, 149–153.
- Chintalapati, P. 2009. Solidification under Pressure of Aluminum Castings. The University of Alabama, Doktora Tezi.
- Coates, B., Luu, N. 2012. China's Emergence in Global Commodity Markets. Economic Roundup, (1), 1–26.
- Dahle, A. K., StJohn, D. H. 1998. Rheological behaviour of the mushy zone and its effect on the formation of casting defects during solidification. Acta Materialia, 47(1), 31–41.
- Davies, V. 1975. Feeding Range Determination by Numerically Computed Heat Distribution. AFS Cast Research Journal, 11, 33–34.
- De Obaldia, E. E. 2007. Simulation of Microporosity in Aluminum Plate Castings. Missisipi State University, Department of Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi.
- Dehnavi, M., Kuhestani, F., Sabzevar-Haddad, M. 2015. Cooling Curve Analysis in Binary Al-Cu Alloys : Part I- Effect of Cooling Rate and Copper Content on the Eutectic Formation. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 21(3), 195–205.
- DeWeese, S. K., Atkinson, R., Rasmussen, W. 1992. RPT measures hydrogen gas, effects on casting quality. Modern casting, 82(4), 29–31.
- Dispinar, D. 2005. Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys. The University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials, Doktora Tezi.
- Dispinar, D., Campbell, J. 2004. Critical assessment of reduced pressure test. Part 1: Porosity phenomena. International Journal of Cast Metals Research, 17(5), 287–294.
- Djurdjevic, M. B., Odanovic, Z., Pavlovic-Krstic, J. 2010. Melt quality control at aluminium casting plants. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 16(1), 63–76.
- Elhadad, S. 2003. Effect of Trace Elements on the Microstructure and Porosity

Formation in 319 Type Al-Si-Cu Alloys. Universite Du Quebec A Chicoutimi, Yüksek Lisans Tezi.

- Emadi, D., Whiting, L. V, Nafisi, S., Ghomashchi, R. 2005. Applications of Thermal Analysis in Quality Control of Solidification Processes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 81, 235–241.
- Ergun, M. 1995. *Bilimsel Araştırmalarda Bilgisayarla İstatistik Uygulamaları (SPSS for WINDOWS)*. Ankara: Ocak Yayınları.
- Eskin, D. G. 2008. *Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys*. CRC Press Book.
- Farahany, S., Ourdjini, A., Idris, M. H., Shabestari, S. G. 2013. Computer-Aided Cooling Curve Thermal Analysis of Near Eutectic Al – Si – Cu – Fe alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (114), 705–717.
- Felberbaum, M. 2010. *Porosity in Aluminum Alloys : Visualization , Characterization , and Modeling*. Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Doktora Tezi.
- Fornaro, O., Palacio, H. A. 2009. Study of Dilute Al – Cu Solidification by Cooling Curve Analysis. *Journal of Materials Science*, (44), 4342–4347.
- Fredriksson, H., Akerlind, U. 2006. *Materials Processing During Casting*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Gandin, C.-A. 2000. From Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification. *Acta Materialia*, 48, 2483–2501.
- Ghosh, I., Das, S. K., Chakraborty, N. 2013. An artificial neural network model to characterize porosity defects during solidification of A356 aluminum alloy. *Neural Computing and Applications*, 1–10.
- Gore, Y. V, Choudari, C. M., Narkhede, B. E. 2015. Investigation of Solidification Affecting Parameters of Sand Casting using ANOVA. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 1(12), 29–34.
- Groover, M. P. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Processes, and Systems*. (M. McDonald, Ed.) John Wiley & Sons, inc. (4th Ed.). John Wiley & Sons, inc.
- Günay, Y. 2013, Nisan. *Yeni Dünya, Yeni Eğilimler, Teknolojiler ve Türk Döküm Sektörü*. TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, (173), 22–40.
- Guthy, H. V. 2002. *Evolution of the Eutectic Microstructure in Chemically Modified and Unmodified Aluminum Silicon Alloys*. Worcester Polytechnic Institute, Materials Science and Engineering, MSc Thesis.
- Hassan, A. M., Alrashdan, A., Hayajneh, M. T., Mayyas, A. T. 2009. Prediction of density, porosity and hardness in aluminum-copper-based composite materials using ANN. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 894–899.

- Kao, S.-T., Chang, E. 1995. The Role of the Pressure Index in Porosity Formation in A356 Alloy Castings. *Cast Metals*, 7(4), 219–225.
- Kao, S.-T., Chang, E., Lee, Y.-W. 1994. Role of Interdendritic Fluid Flow on the Porosity Formation in A206 Alloy Plate Castings. *Materials Transactions*, 35(9), 632–639.
- Kao, S.-T., Chang, E., Lee, Y.-W. 1995. Simplified method of porosity prediction in directionally solidified Al-4.5 wt-%Cu alloy. *Materials Science and Technology*, 11(9), 933–938.
- Kaufman, J. G., Rooy, E. L. 2004. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. ASM International. Ohio: ASM International.
- Kaya, H. 2001. İkili Ötektik Alaşımların Doğrusal Katılaştırılması ve Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Kaya, H., Çadırılı, E., Büyük, U., Maraşlı, N. 2009. Investigation of directional solidified Al-Ti alloy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355(22–23), 1231–1239.
- Kaya, H., Gündüz, M., Çadırılı, E., Maraşlı, N. 2009. Dependency of microindentation hardness on solidification processing parameters and cellular spacing in the directionally solidified Al based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 478(1–2), 281–286.
- Koker, R., Altinkok, N., Demir, A. 2007. Neural network based prediction of mechanical properties of particulate reinforced metal matrix composites using various training algorithms. *Materials and Design*, 28(2), 616–627.
- Kubo, K., Pehlke, R. D. 1985. Mathematical modeling of porosity formation in solidification. *Metallurgical Transactions B*, 16(2), 359–366.
- Kul, S. 2014. İstatistik Sonuçlarının Yorumu: P Değeri ve Güven Aralığı nedir? *Plevra Bulteni*, 8(1), 11–13.
- Kumar, G. S., Rajasekhar, K. 2017. Performance analysis of Levenberg-Marquardt and Steepest Descent algorithms based ANN to predict compressive strength of SIFCON using manufactured sand. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(4), 1396–1405.
- Kuo, Y. S. 2012. Study of Thermal Gradient on Porosity Formation in A201 Aluminum Alloy Plate Castings. *Applied Mechanics and Materials*, 248, 9–13.
- Lee, P. D., Chirazi, A., See, D. 2001. Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: A review. *Journal of Light Metals*, 1(1), 15–30.
- Lee, P. D., Hunt, J. D. 1997. Hydrogen porosity in directional solidified aluminium-copper alloys: in situ observation. *Acta Materialia*, 45(10), 4155–4169.
- Lee, P., Wang, J. 2010. Modeling of Porosity Formation during Solidification. D. U.

- Furrer ve S. L. Semiatin (Ed.), ASM Handbook, Volume 22B, Modeling and Simulation: Processing of Metallic Materials içinde (C. 22, ss. 1–11). ASM International.
- Lee, Y. W., Chang, E., Chieu, C. F. 1990. Modeling of feeding behavior of solidifying Al-7Si-0.3Mg alloy plate casting. *Metallurgical Transactions B*, 21(4), 715–722.
- Maneesh, K. M., George, B. K. 2015. Job Safety Analysis and Elimination of Casting Defects by Application of Design of Experiments. *International Journal of Science and Research*, 4(8), 23–27.
- Mayr, E. 2010. Global FRP Industry. Global Trends Shaping World Aluminium Markets içinde . Hong-Kong: Global Trends Shaping World Aluminium Markets.
- McLean, M. 1983. Directionally Solidified Materials for High Temperature Service. London: The Metals.
- Muenprasertdee, P. 2007. Solidification Modeling of Iron Castings Using SOLIDCast. West Virginia University, Industrial and Management Systems Engineering, Yüksek Lisans Tezi.
- Nakagawa, S., Cuthill, I. C. 2007. Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. *Biological Reviews*, 82(4), 591–605.
- Nicoletto, G., Anzelotti, G., Konečná, R. 2010. X-ray computed tomography vs. metallography for pore sizing and fatigue of cast Al-alloys. *Procedia Engineering*, 2(1), 547–554.
- Niyama, E., Uchida, T., Morikawa, M., Saito, S. 1982. A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice. *International Foundry Congress içinde* (s. 10).
- Orman, M. N., Gürcan, S. İ. 2001. Doğrusal olmayan regresyon analizi ve biyoistatistikte kullanımı. *Ankara Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi*, (48), 195–199.
- Osório, W. R., Santos, C. A., Quaresma, J. M. V., Garcia, A. 2003. Mechanical properties as a function of thermal parameters and microstructure of Zn-Al castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144(1), 703–709.
- Patel, A. M. 2013. Mathematical Modelling of Microshrinkage Formation During Solidification of A356 Alloy Castings. University of Alabama. University of Alabama, Department of Metallurgical and Materials Engineering,.
- Patel, G. C. M., Mathew, R., Krishna, P., Parappagoudar, M. B. 2014. Investigation of Squeeze Cast Process Parameters Effects on Secondary Dendrite Arm Spacing Using Statistical Regression and Artificial Neural Network Models. *Procedia Technology*, 14, 149–156.
- Pellini, W. S. 1953. *AFS Transactions*, 61, 603–622.

- Pequet, C., Gremaud, M., Rappaz, M. 2002. Modeling of microporosity, macroporosity, and pipe-shrinkage formation during the solidification of alloys using a mushy-zone refinement method: Applications to aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(7), 2095–2106.
- Plotkowski, A. J. 2012. Refinement of the Cast Microstructure of Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys with an Applied Electric Potential.
- Rao, G. V. ., Panchanathan, V. 1973. End Chills Influence on Solidification Soundness of Al-Cu-Si (LM4) Alloy Castings. *AFS Transactions*, 81, 110–114.
- Sabau, A. S., Viswanathan, S. 2002. Microporosity prediction in aluminum alloy castings. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33(2), 243–255.
- Sata, A. V. 2010. Shrinkage Porosity Prediction Using Casting Simulation. Indian Institute of Technology Bombay, Department of Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi.
- Seifeddine, S., Johansson, S., Svensson, I. L. 2008. The influence of cooling rate and manganese content on the B-Al₅FeSi phase formation and mechanical properties of Al-Si-based alloys. *Materials Science and Engineering A*, 490(1–2), 385–390.
- Shang, L. H., Gruzleski, F. P. J. E., Mercadante, C. 2004. Prediction of microporosity in Al-Si castings in low pressure permanent mould casting using criteria functions. *International Journal of Cast Metals Research*, 17(4), 193–200.
- Shang, L. H., Paray, F., Gruzleski, J. E., Bergeron, S., Mercadante, C., Loong, C. A. 2004. Prediction of microporosity in Al-Si castings in low pressure permanent mould casting using criteria functions. *International Journal of Cast Metals Research*, 17(4), 193–200.
- Sharma, P. K., Jain, A., Bisht, P. 2016. Minimization of Defect in Aluminium Alloy Wheel Casting Using 7 QC Tools. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(3), 744–751.
- Soygüder, S., Alli, H. 2006. Programlanabilir Mantıksal Denetleyici Kullanarak PID Yöntemi İle Robot Hız Denetimi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 113–121.
- Spinelli, J. E., Rosa, D. M., Ferreira, I. L., Garcia, A. 2004. Influence of melt convection on dendritic spacings of downward unsteady-state directionally solidified Al-Cu alloys. *Materials Science and Engineering A*, 383(2), 271–282.
- Stefanescu, D. M. 2005. Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings – a review. *International Journal of Cast Metals Research*, 18(3), 129–143.
- Stefanescu, D. M. 2009. *Science and Engineering of Casting Solidification*, 2E.
- Stefanescu, D. M. 2015. *Science and Engineering of Casting Solidification Science and Engineering* (Third Edit.). Springer International Publishing Switzerland.

- Tynelius, K. E. 1992. A parametric study of the evolution of microporosity in Al-Si foundry alloys. Drexel University, Doktora Tezi.
- Vosniakos, G. C., Galiotou, V., Pantelis, D., Benardos, P., Pavlou, P. 2009. The scope of artificial neural network metamodels for precision casting process planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(6), 909–916.
- Whitesell, H. S. 2002. Influence of Solidification Variables on the Cast Microstructure and Porosity in Directionally Solidified MAR-M247. Auburn University, Doktora Tezi.
- Whitesell, H. S., Overfelt, R. A. 2001. Influence of solidification variables on the microstructure, macrosegregation, and porosity of directionally solidified Mar-M247. *Materials Science and Engineering A*, 318(1–2), 264–276.
- Yılmaz, M. 2013. Türkiye Alüminyum Sektörünün 2023 Projeksiyonu. *Türk Döküm*, (29), 62–69.
- Zipperian, D. C. 2011. *Metallographic Handbook*. Pace Technologies.

ÖZGEÇMİŞ

Selçuk ŞİRİN, 15.06.1982 de Sakarya'da doğdu. 2002 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünü 2007 yılında bitirdi. Aynı yıl başladığı yüksek lisans eğitimini 2010 yılında tamamladıktan sonra Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında doktora başladı. 2007 yılından itibaren 2017 yılına kadar döküm sektöründe çeşitli firma ve pozisyonlarda görev yaptı. Şu anda Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Hendek Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.