

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARININ
KATILAŞMASI SIRASINDA YARI-KATI BÖLGE SIVI
GEÇİRGENLİĞİNİN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Murat ÇOLAK

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI

Ocak 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARININ
KATILAŞMASI SIRASINDA YARI-KATI BÖLGE SIVI
GEÇİRGENLİĞİNİN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Murat ÇOLAK

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 15/01/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof.Dr. Adem DEMİR

Jüri Başkanı



Prof.Dr.İbrahim ÖZBEK

Üye



Doç.Dr.Ramazan KAYIKCI

Üye



Doç.Dr.Ahmet ÖZEL

Üye



Doç.Dr.Derya DIŞPINAR

Üye

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinden, deneylerin yapılmasına, deney sonuçlarının değerlendirilmesinden tezin yazımına kadar çalışmanın her aşamasında yol gösteren ve desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI' ya çok teşekkür ederim. Çalışmanın tüm aşamalarında destek veren ve katkıları ile bu tezin oluşmasında emeği geçen Doç. Dr. Neşet AKAR'a teşekkürü borç bilirim. Tez izleme komitesinde yer alan ve değerli görüşleri ile çalışmayı yönlendiren ve katkı sağlayan Prof. Dr. Âdem DEMİR ve Prof. Dr. İbrahim ÖZBEK hocalarıma teşekkür ederim. Çalışmanın çeşitli aşamalarında destekleri ve katkılarından dolayı değerli bölüm hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim. Model tasarımı, modelleme ve tezin görsel çizimlerdeki katkılarından dolayı Selçuk ŞİRİN' e, döküm deneyleri ve test aşamalarında katkılarından dolayı Engin KOCAMAN' a, deneysel tasarım, istatistiksel analiz ve değerlendirmelere yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Ferit FIÇICI' ya ve Doç. Dr. Derya DIŞPINAR' a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılmasına 112M422 Numaralı Proje desteği sağlayan TÜBİTAK'a ve bu projede “Destekleyen Kuruluş” statüsünde yer alarak, kokil ve alçak basınçlı kokil döküm deneylerinin gerçekleştirilmesinde bize her türlü imkânı sağlayan Altun Döküm Sanayi A.Ş. (Konya) firmasına ve Sayın Ahmet Cevdet ALTUN Bey'in nezdinde tüm Altun Döküm firması çalışanlarına şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmayı 2012-50-02-10 kodlu proje kapsamında kısmen destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na ve 2211 kodlu Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında beni kısmi zamanlı bursiyer olarak destekleyen TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca, bugüne değin öğrenim hayatım boyunca beni koşulsuz destekleyen tüm aileme şükranlarımı sunarım. Çalışmanın tüm aşamalarında gösterdiği sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşim ve çocuklarıma teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	4
2.1.1. Al-Si döküm alaşımları.....	9
2.1.2. Al-Cu döküm alaşımları.....	10
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Katılaşması.....	12
2.3. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Hazırlanması.....	13
2.4. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Tane İnceltme Uygulamaları...	13
2.4.1. Tane inceltmede titanyumun etkisi.....	15
2.4.2. Tane inceltmede borun etkisi.....	20
2.4.3. Tane inceltmenin besleme üzerine etkisi.....	23
2.5. Alüminyum Alaşımlarının Modifikasyonu.....	24
2.6. Döküm Simülasyon Programları.....	26
2.6.1. Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler.....	27
2.6.2. Döküm simülasyon programlarıyla belirlenebilen özellikler.....	28

2.6.3. Döküm simülasyon programlarının faydaları.....	29
2.7. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Porozite Oluşumu.....	30
2.7.1. Gaz Porozitesi.....	30
2.7.2. Çekme Porozitesi.....	32
2.7.3. Gaz ve besleme yetersizliğinden kaynaklanan porozite.....	34
2.8. Alüminyum Alaşımlarında İnklüzyon ve Çiftfilm Yaklaşımları.....	34
2.9. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Gaz Giderme.....	37
2.10. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde İnklüzyon Giderme.....	40
2.11. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları.....	40
2.12. Yarı Katı Bölgede Kritik Katı Oranı.....	43
2.12.1. Yarı-katı bölgede beslemenin simülasyon programları ile modellenmesi	45
2.12.2. Darcy kanunu.....	47
2.12.3. Kritik Katı Oranının belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar.....	48
2.13. Taguchi Yöntemi İle Deneysel Tasarım.....	53
2.13.1. Ortogonal dizinler.....	54
2.13.2. Sinyal gürültü oranı.....	55
2.13.3. Taguchi metodunda etkileşimlerin incelenmesi.....	55
2.13.4. Varyans analizi.....	55

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	56
3.1. Model Tasarımı Çalışmaları.....	57
3.1.1. Model – kalıp geometrisi tasarımı aşamaları.....	57
3.1.2. Model tasarımında esas alınan kriterler.....	60
3.1.3. Yolluk sistemi ve kalıp dolum tasarımları.....	63
3.1.4. Model geometrisinin farklı ölçeklerde deneme dökümleri.....	65
3.2. Alaşımların Seçimi ve Karakterizasyonları.....	66
3.2.1. Döküm alaşımlarının seçimi ve temini.....	66
3.2.2. Etial 220 alaşımlandırma çalışmaları.....	67
3.2.3. Soğuma eğrisi alma deneyleri.....	68
3.2.4. Termal analiz çalışmaları.....	70
3.3. Döküm Deneylerinin Tasarımı.....	71

3.3.1. Taguchi Yöntemi ile kum kalıba döküm deney tasarımı.....	71
3.3.2. Taguchi yöntemi ile kokil kalıba döküm deney tasarımı.....	72
3.3.3. Taguchi yöntemi ile alçak basınçlı döküm deney tasarımı.....	73
3.4. Ergitme İşlemlerinin Yapılması.....	74
3.5. Sıvı Metal Kalitesinin Belirlenmesi Deneyleri.....	75
3.5.1. Tablet ile sıvı metal temizleme işlemi.....	77
3.5.2. Azot gazı ile sıvı metal temizleme işlemi.....	78
3.6. Tane İnceltme Testlerinin Yapılması.....	79
3.7. Al-Si Alaşımlarında Ötektik Silisyumun Modifikasyonu	82
3.8. Deneme Dökümlerinin Yapılması.....	84
3.9. Model İmalatı.....	86
3.9.1. Kum kalıba döküm yöntemi için model plakası oluşturulması.....	86
3.9.2. Kokil kalıp tasarımı ve imalatı.....	87
3.9.3. Alçak basınçlı döküm kalıp tasarımı ve imalatı.....	88
3.10. Kum Kalıba Döküm Deneyleri.....	89
3.11. Kokil Kalıba Döküm Deneyleri.....	92
3.12. Alçak Basınçlı Döküm Deneyleri.....	93
3.13. Statik Sıvı Metal Basıncı Deneyleri.....	95
3.13.1. Statik sıvı basıncı model tasarımı ve imalatı.....	95
3.13.2. Kalıpların hazırlanması ve döküm işlemleri.....	97
3.14. Dökümlerin İnceleme Yöntemleri.....	98
3.14.1. Sıvı metal temizliği testleri.....	98
3.14.2. Döküm numunelerde yüzey çöküntüsü kontrolü.....	99
3.14.3. Radyografi incelemeleri.....	100
3.14.4. Yoğunluk ölçümleri.....	101
3.14.5. Döküm kesit yüzey incelemeleri.....	103
3.14.6. Döküm numunelerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi.....	105
3.14.7. Mikro yapı incelemeleri.....	105
3.15. Modelleme Çalışmaları.....	106
3.15.1. Kalıp geometrisi ve malzeme özelliklerinin programa girilmesi.	106
3.15.2. Kalıp dolumunun Flowcast yazılımı ile modellenmesi.....	109
3.15.3. Dökümlerin soğuma ve katılaşmasının Solidcast yazılımı ile modellenmesi	109

3.15.4. Çekinti oranının modellenmesi.....	111
3.15.5. Çekinti oranı modellenmesindeki işlem adımları.....	112
 BÖLÜM 4.	
DENEYSEL SONUÇLAR	116
4.1. Döküm Modeli Tasarımına Yönelik Modelleme Çalışmaları Sonuçları.	116
4.1.1. Döküm geometrisinin farklı ölçeklendirmeler ile modelleme sonuçları	119
4.1.2. Nihai döküm tasarım modelleme sonuçları.....	120
4.2. Alaşım Seçimi ve Karakterizasyonu	127
4.2.1. Deneylerde kullanılacak alaşımların kimyasal bileşimi analizleri..	127
4.2.2. Döküm alaşımlarının alınan sıcaklık-zaman değişimi verileri.....	128
4.2.3. Döküm alaşımlarının termal analiz sonuçları.....	129
4.2.4. Alaşımların katılaşma aralıklarının belirlenmesi.....	130
4.3. Sıvı Metal Temizleme Yönteminin Belirlenmesi Çalışması Sonuçları...	131
4.4. Deneme Dökümü Çalışması Sonuçları.....	133
4.4.1. Model-1 tasarımı ile yapılan deneme döküm sonuçları.....	133
4.4.2. Model-2 tasarımı ile yapılan deneme döküm sonuçları.....	136
4.4.3. Model-3 tasarımı ile yapılan deneme döküm sonuçları.....	137
4.4.4. Model geometrisinin farklı ölçeklerde boyutlandırılmış döküm sonuçları	140
4.5.Döküm Sonuçları	143
4.5.1. Sıvı metalde gaz ölçüm testleri (RPT sonuçları).....	144
4.5.2. Dökümlerin kimyasal bileşiminin kontrolü.....	146
4.5.3. Dökümlerin numunelerin yüzey kontrolü sonuçları	147
4.5.4. Radyografi incelemeleri.....	151
4.5.5. Yoğunluk ölçüm ve gözenek değerleri.....	161
4.5.6. Döküm kesit yüzeylerinin incelenmesi.....	165
4.6. Statik Sıvı Metal Basıncı Deney Sonuçları.....	174
4.6.1. Statik sıvı metal basıncı deney radyografi incelemeleri.....	174
4.6.2. Yoğunluk ölçüm sonuçları.....	176
4.6.3. Döküm kesit yüzey incelemeleri.....	177
4.7. Mikroyapı İncelemeleri Sonuçları.....	177

4.8. Döküm simülasyon sonuçları üzerinden gözenek oranlarının belirlenmesi	187
--	-----

BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	192
5.1. Taguchi Deneysel Tasarım Sonuçlarının Değerlendirilmesi	192
5.1.1. Kum kalıba döküm sonuçlarının analizi	192
5.1.2. Kokil kalıba döküm Taguchi deneysel sonuçları	197
5.1.3. Alçak Basıncılı Döküm Yöntemi Taguchi deney sonuçları	200
5.1.4. Döküm yönteminin gözenekliliğe etkisi Taguchi deney sonuçları.	203
5.2. Alaşım Çeşidi Değişiminin Gözenek Oluşumu Üzerinde Etkisi.....	206
5.3. Tane İnceltici ve Modifiye Edici İlavesinin Gözenek Oluşuma Etkisi...	207
5.4. Kokil Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığının Gözenek Oluşumuna Etkisi.....	212
5.5. Kalıp Dolum Basıncının Gözenek Oluşumu Üzerinde Etkisi.....	215
5.6. Statik Sıvı Basıncı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	218
5.7. Döküm Yöntemi Farkının Porozite Üzerine Etkisi.....	220
5.8. Model Kriter Çalışmaları.....	221
5.8.1. Kum kalıba döküm için model kriter belirlenmesi	221
5.8.2. Kokil kalıba döküm için model kriter belirlenmesi	224
5.8.3. Alçak basınçlı döküm için model kriter belirlenmesi	226

BÖLÜM 6.

GENEL SONUÇLAR.....	229
KAYNAKLAR	234
ÖZGEÇMİŞ	248

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AFS	: American Foundryman Society(Amerikan Dökümcüler Birliği)
Ağ (%)	: Yüzde Ağırlık
AlB ₂	: Alüminyum Diborid
ALCAN	: Aliminium Canada
Al-Cu	: Alüminyum – Bakır
Al-Si	: Alüminyum – Silisyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Al-Ti-B	: Alüminyum Titanyum Bor
Al5Ti1B	: %94 Alüminyum, %5 Titanyum, %1 Bor
BN	: Bor Nitrür
°C	: Santigrad derece
CFS	: Critical Fraction of Solid (Kritik Katı Oranı)
dk	: Dakika
ETİAL	: ETİ Alüminyum
H	: Hidrojen
HCl	: Hidrojen Klorür
KKO	: Kritik Katı Oranı
Mg	: Magnezyum
MPa	: Megapaskal
RPT	: Reduced Pressure Test (Düşürülmüş Basınç Testi)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskop)
SiC	: Silisyum Karbür
STL	: Üç Boyutlu Model Dosya Transfer Biçimi
Ti	: Titanyum

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	2005 yılında Amerika’da üretimi gerçekleştirilen toplam dökümün alaşım çeşidine göre dağılımı	5
Şekil 2.2.	Otomobilde alüminyum kullanımının yıllara göre değişimi.....	5
Şekil 2.3.	Dünyada en çok kullanılan metallerin karşılaştırmalı büyüme oranları.....	6
Şekil 2.4.	2011 yılında Türkiye’de üretilen alüminyum ürünlerinin üretim türüne göre dağılımı.....	7
Şekil 2.5.	Al - Si denge diyagramı	10
Şekil 2.6.	Al - Cu denge diyagramı	11
Şekil 2.7.	a) Yüksek çekirdeklenme ve yavaş büyüme sonucu oluşan ince taneli, b) düşük çekirdeklenme ve hızlı büyüme sonucu oluşan kaba taneli yapı görüntüsü.....	14
Şekil 2.8.	(a) Tane inceltilmemiş, (b) Al ₅ Ti ₁ B mastır alaşımı ilave edilmiş alüminyum alaşımının tane yapıları	15
Şekil 2.9.	Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı	16
Şekil 2.10.	a) Alüminyumun TiAl ₃ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin gösterimi	17
Şekil 2.11.	Etial 160 primer alaşımına katılan Al ₅ Ti ₁ B mastır alaşımının bekletme zamanına göre tane boyutu değişimi	19
Şekil 2.12.	% 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları	20
Şekil 2.13.	A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları	21
Şekil 2.14.	Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları	22

Şekil 2.15. Tane boyutuna bağlı kritik katı oranı değişimi, b) tane boyutunun küçülmesiyle gözenek boyutuyla ilişkisinin şematik görünüşü	23
Şekil 2.16. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi	24
Şekil 2.17. a) Modifiye edilmemiş, b) Sr ile modifiye edilmiş, c) Sb ile modifiye edilmiş mikroyapı resimleri	25
Şekil 2.18. Alüminyum alaşımları içerisinde sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü (1 atm. basınç altında)	31
Şekil 2.19. Döküm yapısında gaz porozitesi görüntüsü	32
Şekil 2.20. Sıvı metalin katılaşması esnasındaki hacimsel değişim ve çekme biçimlerinin gösterilmesi	33
Şekil 2.21. Döküm yapısında çekinti porozitesi görüntüsü	33
Şekil 2.22. Döküm yapısında gaz ve çekintinin birlikte görüldüğü porozite görüntüsü	34
Şekil 2.23. a) Yüzey türbülansı ile çift film oluşum mekanizmasının şematik gösterimi, b) Çift film çevresinde dentritlerin oluşması, c) Çift film içersine hidrojen dolması ile yanlara açılma ve d) Oluşan porozitenin katılaşma süresince üç boyutlu büyümesi	35
Şekil 2.24. Döküm yapısında çiftfilm tabakalarının SEM görüntüsü	36
Şekil 2.25. Sıvı metalin a)kalıp malzemesi ile, b) maça malzemesi ile reaksiyonu sonucu oksit oluşumu	37
Şekil 2.26. Döner tip rotary gaz giderme	39
Şekil 2.27. a) Azot gazı ile yıkanmış, b) Azot gazı ile yıkanmamış Al alaşımının RPT test numunesi görüntüsü	39
Şekil 2.28. Sıvı fazdaki metalin, katılaşması esnasındaki üç farklı şekilde çekmesi; (a) sıvı, katılaşma ve katı çekmesi (b) katılaşma sırasında oluşan besleme mekanizmaları	41
Şekil 2.29. Katılaşan bir dökümde beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi	42
Şekil 2.30. a) Belirli bir alaşımın soğuma eğrisi üzerinde CFS noktasının gösterimi, b) Kritik Katı oranı değerine ulaşan metalin belemesinin kesilmesi	44
Şekil 2.31. Alaşımlarda katılaşma cephesi	45

Şekil 2.32. Darcy Kanunda tanımlanan gözenekli ortamda sıvı akışın şematik gösterimi.....	47
Şekil 2.33. Tork ölçüm tekniği deneysel düzeneğinin şematik görünümü	49
Şekil 2.34. Yarı-katı bölgede sıvı geçirgenliğini ölçmek amacı ile geliştirilen bir düzeneğin şematiği	50
Şekil 2.35. a. Dar katılaşma aralığına sahip alaşımda açık huni tip ve kapalı çekintiler ve b. geniş katılaşma aralığına sahip bir alaşımda sadece yüzey çökmesi (surface sink) şeklinde çekinti oluşumu x-ray düzlemi görüşleri	50
Şekil 3.1. Kritik katı oranı belirlenmesi amacıyla denenmiş model örnekleri..	58
Şekil 3.2. Deneme dökümleri yapılan model tasarımı çalışmaları örnekleri....	59
Şekil 3.3. Döküm deneylerinde kullanılan nihai model tasarımı geometrisi ve ölçüleri.....	59
Şekil 3.4. Model tasarımı görüntü ve ölçüleri.....	60
Şekil 3.5. SolidCast döküm simülasyon programında yeni model tasarımı için elde edilen modül değerlerinin gösterilmesi.....	62
Şekil 3.6. Döküm haznesi, düşey yolluk tasarımı esasları	63
Şekil 3.7. Kalıplama tasarımı görüntüsü.....	64
Şekil 3.8. Model tasarımı görüntü ve ölçüleri.....	65
Şekil 3.9. Kum kalıpta soğuma eğrisi alım işleminin şematik görüntüsü.....	69
Şekil 3.10. Kokil kalıpta soğuma eğrisi alım için kullanılan kalıp termokopul düzeneği.....	69
Şekil 3.11. Fırın içinde soğuma eğrisi alımı için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi.....	70
Şekil 3.12. Çan tip elektrik direnç ergitme ocağı.....	75
Şekil 3.13. a) RPT test numunesi ölçüleri, b) numune kalıbı, c) RPT cihazı şematik görüntüsü.....	76
Şekil 3.14. Sıvı metalin tabletle temizleme işlemi şematik görüntüsü.....	78
Şekil 3.15. Sıvı metalin azot gazı ile temizleme işlemi şematik görüntüsü.....	79
Şekil 3.16. a) Tane inceltme deney numunesi ölçüleri, b) Numune inceleme yüzeyi, c) Soğutma düzeneği görünüm.....	79
Şekil 3.17. Al5Ti1B mastır alaşımı mikro yapı resimleri.....	80
Şekil 3.18. Al5Ti1B mastır alaşımı SEM görüntüsü.....	81

Şekil 3.19. a) Tane inceltici ilave edilmemiş, b) Al ₅ Ti ₁ B mastır alaşımı ilave edilmiş alüminyum alaşımının Alcan testi ile elde edilen tane yapıları.....	82
Şekil 3.20. Al ₁₀ Sr mastır alaşımı mikroyapı resmi.....	83
Şekil 3.21. a) Modifiye edici ilave edilmemiş, b) Al ₁₀ Sr ilave edilmiş Etial 140 alaşımı mikroyapı resimleri.....	84
Şekil 3.22. Dökümlerin incelenmek üzere kesilmesinin şematik görünüşü.....	86
Şekil 3.23. Model plakası görüntüsü.....	87
Şekil 3.24. Kokil kalıp görüntüsü.....	88
Şekil 3.25. Alçak basınçlı döküm kalıp görüntüsü.....	88
Şekil 3.26. Deneylerde kullanılan 90-110 AFS silis kumuna ait tane boyut dağılımı	89
Şekil 3.27. Kum kalıplama işlemlerinde örnek görüntüler.....	90
Şekil 3.28. Dökümlerde kullanılan seramik filtre örnekleri, b) Filtre yerleştirilmiş bir kum kalıp CAD çizim görüntüsü.....	90
Şekil 3.29. Döküme hazır kalıp görüntüsü.....	91
Şekil 3.30. Döküm sonrası kalıp görüntüsü.....	91
Şekil 3.31. Kokil kalıba döküm sonrası kalıp görüntüsü.....	92
Şekil 3.32. Alçak basınçlı döküm yöntemi şematik görüntüsü.....	93
Şekil 3.33. a) Döküm öncesi yolluğun ısıtılması, b) Seramik yolluk görüntüsü.	94
Şekil 3.34. Statik sıvı basıncı deney model geometri ölçüleri ve plak model görüntüsü.....	97
Şekil 3.35. a) RPT cihazı görüntüsü, b) RPT numunesi.....	99
Şekil 3.36. a) Kum kalıp, b) Kokil kalıp, c) Alçak basınçlı döküm numune örnekleri.....	99
Şekil 3.37. Radyografi incelemesi çekim yönlerini ve kodlanmasının gösterilişi	101
Şekil 3.38. Döküm numunesinin yoğunluk ölçümleri için kesilen bölgesi.....	101
Şekil 3.39. Yoğunluk ölçüm düzeneği şematik görünüşü (Terazinin yerleştiği masada ipin serbestçe hareket edebilmesi için bir delik bulunur.....	102
Şekil 3.40. Referans yoğunluk numunesi için döküm yapılan kokil kalıp görüntüsü ve ölçüleri.....	103
Şekil 3.41. Döküm kesit inceleme yüzeyinin gösterilmesi.....	104

Şekil 3.42. Test numunesinin incelemek üzere kesilmesinin şematik gösterimi.	105
Şekil 3.43. SolidCast döküm simülasyon yazılımında malzeme ve özelliklerinin örnek olarak gösterilmesi.....	108
Şekil 3.44. Simetri düzleminden kesilmiş döküm ve kalıp geometrisinin meş edilmiş hali.....	108
Şekil 3.45. FlowCast ile kalıp dolumunda a)sıcaklık dağılımı, b) akış hızı dağılımı görüntüsü.....	109
Şekil 3.46. SolidCast programından farklı sürelerde alınan katılaşma görüntüleri.....	110
Şekil 3.47. Solidcast döküm simülasyon programında çekinti boşluklarının tespiti.....	112
Şekil 3.48. Hatalı bölgenin koordinatlarının tespiti.....	113
Şekil 3.49. Solidworks vasıtasıyla hatalı bölgenin katı modelinin oluşturulması ve hacminin hesaplanması.....	113
Şekil 3.50. Solidcast programından alınan hatalı bölge koordinatlarına göre çekintili bölgenin Solidworks programında çizimi.....	114
Şekil 4.1. Kokil kalıba döküm çalışmaları yapılan geometri için modelleme sonuçları.....	117
Şekil 4.2. Kokil kalıp kritik katı oranı çalışmaları yapılan model kalıplama tasarımı farklı alaşımlarla kum kalıba döküm % 99,8 değerine göre yoğunluk sonuçları görüntüsü.....	118
Şekil 4.3. Makroporozite (Çekinti) riski analizi (% 99,9 yoğunluk değerine göre).....	119
Şekil 4.4. Katılaşma analizi kesit görüntüsü.....	120
Şekil 4.5. Nihai tasarım için Etial 110 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.....	121
Şekil 4.6. Nihai tasarım için Etial 140 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.....	122
Şekil 4.7. Nihai tasarım için Etial 160 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.....	123
Şekil 4.8. Nihai tasarım için Etial 171 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.....	124

Şekil 4.9. Nihai tasarım için Etial 177 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.....	125
Şekil 4.10. Nihai tasarım için Etial 110 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.....	126
Şekil 4.11. Döküm deneylerinde kullanılan alaşımlara ait soğutma ve ısıtma sıcaklık zaman eğrileri.....	128
Şekil 4.12. Alaşımların ısıtma ve soğutma esnasında alınan termal analiz deneyi sıcaklık ısı akışı grafikleri.....	129
Şekil 4.13. RPT test numunesi görüntüleri.....	132
Şekil 4.14. RPT test numunesi kesit görüntüsü sonuçları.....	132
Şekil 4.15. a) Dökülmüş bir kalıp, b) döküm sonrası kalıbın açılmış hali, c) kalıptan çıkarılmış döküm resmi.....	134
Şekil 4.16. a) Etial 110, b) Etial 140, c) Etial 220 alaşımlarından Model-1 tasarımıyla alınan döküm numunelerde oluşan yüzey çökmelerine ait tipik görüntüleri.....	134
Şekil 4.17. Model 1 tasarımı ile üretilen dökümlere ait kesit yüzey görüntüleri.....	135
Şekil 4.18. a) Etial 110, b) Etial 140 alaşımı döküm numune görüntüleri.....	137
Şekil 4.19. Deneme dökümü numuneleri yüzey görüntüleri.....	138
Şekil 4.20. Model 3 ile yapılan döküm numunelerin kesit yüzey görüntüleri....	139
Şekil 4.21. Kum kalıp döküm görüntüsü.....	140
Şekil 4.22. Döküm numune görüntüleri.....	140
Şekil 4.23. Döküm numune radyografi film sonuçları.....	141
Şekil 4.24. Döküm numuneleri kesit yüzey görüntüleri.....	142
Şekil 4.25. Döküm numunelerin kesit yüzeylerinden stereoskop ile alınmış 10X ve 25X görüntüleri, a) 3.Model 10X, b) 4.Model 10X, c) 5.Model 10X, d) 3.Model 25X, b) 4.Model 25X, c) 5.Model 25X büyütme.....	143
Şekil 4.26. a) Azotla temizleme öncesi, b) temizleme sonrası Etial 110 alaşımı RPT numunesi kesit görüntüleri.....	144
Şekil 4.27. Azotla temizlemeye tabi tutulan kum kalıba döküm öncesi farklı alaşımlardan alınan RPT kesitleri.....	144
Şekil 4.28. Kokil kalıba döküm deneyleri öncesinde ocaktan alınan RPT numunelerine ait kesit görüntüleri.....	145

Şekil 4.29. Alçak Basıncılı Döküm deneylerinden önce alınan RPT numunelerine ait kesit görüntüleri.....	146
Şekil 4.30. Kum kalıba tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz dökülen numune yüzey görüntüleri.....	148
Şekil 4.31. Kokil kalıba döküm numune resimleri.....	149
Şekil 4.32. Etial 110 alaşımı a) Tane inceltici ve mastır alaşımı ilavesiz, 200°C kalıp sıcaklığı, b) Al5Ti1B ilaveli 300°C kalıp sıcaklığı, c) Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli 400°C kalıp sıcaklığında kokil kalıba döküm.....	150
Şekil 4.33. Etial 171 alaşımı ile 300 °C kalıp sıcaklığında a) Mastır alaşımı ilavesiz, 0,25bar basınçlı, b) Al5Ti1B ilaveli, 0,5bar basınçla, c) Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli 1bar basınçla dökülen alçak basınçlı dökümler.....	150
Şekil 4.34. Etial 110 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	151
Şekil 4.35. Etial 140 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	152
Şekil 4.36. Etial 160 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	152
Şekil 4.37. Etial 171 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	153
Şekil 4.38. Etial 177 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	153
Şekil 4.39. Etial 220 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	154
Şekil 4.40. Etial 110 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	154
Şekil 4.41. Etial 140 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	155
Şekil 4.42. Etial 160 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	155
Şekil 4.43. Etial 171 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	156

Şekil 4.44. Etial 177 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	156
Şekil 4.45. Etial 220 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	157
Şekil 4.46. Etial 110 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	157
Şekil 4.47. Etial 140 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	158
Şekil 4.48. Etial 160 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	158
Şekil 4.49. Etial 171 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	159
Şekil 4.50. Etial 177 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	159
Şekil 4.51. Etial 220 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.....	160
Şekil 4.52. Etial 110 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.....	165
Şekil 4.53. Etial 140 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.....	166
Şekil 4.54. Etial 160 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.....	166
Şekil 4.55. Etial 171 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.....	166
Şekil 4.56. Etial 177 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.....	167
Şekil 4.57. Etial 110 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.....	167
Şekil 4.58. Alaşım farklılığının kokil kalıba döküm porozite oluşumu üzerine etkisinin kesit yüzeyde incelenmesi.....	168
Şekil 4.59. Al5Ti1B ve Al10Sr ilavesinin Etial 160 alaşımında gözenekleşmeye etkisinin kesit yüzey incelemesi.....	169

Şekil 4.60. Kokil kalıp ön ısıtma sıcaklığının Etial 177 dökümünde porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi.....	170
Şekil 4.61. Alaşım farklılığının döküm porozite oluşumu üzerine etkisinin kesit yüzeyde incelenmesi.....	171
Şekil 4.62. Alçak basınçlı döküm yönteminde Al5Ti1B ve Al10Sr ilavesinin Etial 171 dökümü porozite oluşumu üzerine etkisi kesit yüzeyde incelenmesi.....	171
Şekil 4.63. İlavesiz Etial 171 alaşımının alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretiminde sıvı metalin kalıp doldurma basınç değişiminin porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi.....	172
Şekil 4.64. Dökümlerin çekinti türünün belirlenmesi için stereoskopik mikroskop ile çekilen görüntüleri.....	173
Şekil 4.65. Kesit yüzey incelemelerinde incelenen kesit farklılığından kaynaklanan hataların gösterilmesi.....	174
Şekil 4.66. Etial 160 alaşımı kum kalıba döküm statik sıvı basıncı deneyi numuneleri radyografi film görüntüleri.....	175
Şekil 4.67. Etial 160 alaşımı ile dökülen statik sıvı basıncı deneyi döküm numuneler kesit yüzey görüntüsü.....	177
Şekil 4.68. Mastır alaşımı ilavesiz olarak kum kalıba dökülen farklı alaşımlara ait mikroyapı görüntüleri.....	178
Şekil 4.69. Etial 110 alaşımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.....	180
Şekil 4.70. Etial 140 alaşımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.....	181
Şekil 4.71. Etial 160 alaşımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.....	182
Şekil 4.72. Etial 171 alaşımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.....	183
Şekil 4.73. Etial 177 alaşımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.....	184
Şekil 4.74. Etial 220 alaşımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.....	185

Şekil 4.75. Etial 171 alaşımının dökümünde alaşım elementi ilavesi ve döküm yönteminin mikroyapıya etkisi.....	186
Şekil 5.1. Faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.....	196
Şekil 5.2. Kokil kalıba döküm deneyleri için faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.....	199
Şekil 5.3. Alçak basınçlı döküm deneyleri için faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.....	202
Şekil 5.4. Döküm yöntemi farkının gözenek etkisi için faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.....	205
Şekil 5.5. Master alaşımı ilavesiz olarak yapılan dökümlerde alaşım çeşidinin boşluk oluşumu üzerine etkisi.....	207
Şekil 5.6. Kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumuna etkisi.....	208
Şekil 5.7. Kokil kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumuna etkisi.....	211
Şekil 5.8. Alçak basınçlı döküm deneylerinde tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumuna etkisi.....	212
Şekil 5.9. Tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz olarak kokil kalıba döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etkisi.....	213
Şekil 5.10. Tane inceltici ilaveli kokil kalıba döküm deneylerinde ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etki.....	214
Şekil 5.11. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli olarak kokil kalıba döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etkisi.....	215
Şekil 5.12. Master alaşımı ilavesiz olarak dökülen alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının gözenek oluşumuna etkisi.....	216
Şekil 5.13. Tane İnceltici ilaveli olarak dökülen alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının gözenek oluşumuna etkisi.....	217
Şekil 5.14. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli olarak dökülen alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının gözenek oluşumuna etkisi.....	218

Şekil 5.15. Etial 160 alaşımı ile statik sıvı basıncı deneyi için kum kalıba döküm numuneleri gözenek ölçümü.....	219
Şekil 5.16. Döküm yöntemi farkının gözenek oluşumu üzerinde etkisi.....	220

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Türkiye'nin alüminyum üretimi (Ton).....	7
Tablo 2.2.	Alüminyum Birliği standartlarına göre alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması.....	8
Tablo 2.3.	Alüminyum alaşımlarının standartları ve uluslararası karşılaştırma tabloları.....	9
Tablo 2.4.	Alaşımlar elementlerinin tane büyüme önleme kapasiteleri	18
Tablo 2.5.	Bazı alüminyum alaşımlarında kuma döküm tekniği ile ölçülen maşi bölgesi besleme sınırı (Kritik Katı Oranı) değerleri.....	52
Tablo 3.1.	Model ölçüleri.....	65
Tablo 3.2.	Deneylerde kullanılan alaşımların Etinorm standardına göre kimyasal bileşimleri (% Ağ.)	66
Tablo 3.3.	Deneylerde kullanılan alaşımlara ait tipik özellikler	67
Tablo 3.4.	Kum kalıba döküm yöntemi deney parametreleri.....	71
Tablo 3.5.	L18 (16 x 13) ortogonal dizinine göre yapılması gereken döküm deneyleri.....	72
Tablo 3.6.	Kokil kalıba döküm yöntemi deney parametreleri.....	72
Tablo 3.7.	L18(16x23) ortogonal dizinine göre kokil kalıba döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri.....	73
Tablo 3.8.	L18(16x23) ortogonal dizinine göre alçak basınçlı kokil kalıba döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri.....	74
Tablo 3.9.	Alçak Basınçlı Döküm yönteminde yapılan deneyler.....	74
Tablo 3.10.	Deneme dökümler ve döküm şartları.....	84
Tablo 3.11.	Kum kalıba döküm yönteminde yapılan döküm deneyleri.....	97
Tablo 3.12.	Jmatpro yazılımı ile belirlenen deney alaşımlarına ait termofiziksel özellikleri	107
Tablo 3.13.	Model geometrisi tasarımı için yapılan modelleme çalışmaları.....	110

Tablo 3.14. Modelleme sınır şartları.....	111
Tablo 3.15. Kokil ve alçak basınçlı döküm modellemelerinde kullanılan ısı transfer katsayıları.....	111
Tablo 3.16. Modelleme programından alınan çekinti boşluğunun hacminin hesaplanmasına ait örnek bir uygulama.....	115
Tablo 4.1. Alaşımlara ait Etinorm standardı ve külçelerden alınan numunelerden ölçülen kimyasal bileşimleri (% Ağ.).....	127
Tablo 4.2. Alaşımlara ait katılma aralık farklarının karşılaştırılması.....	130
Tablo 4.3. Model-2 tasarımı ile yapılan deneme döküm şartları.....	136
Tablo 4.4. Döküm döküm şartları.....	137
Tablo 4.5. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü sonuçları.....	138
Tablo 4.6. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü sonuçları.....	142
Tablo 4.7. Kum kalıba döküm deneyleri kimyasal bileşim sonuçları (% Ağ.).	147
Tablo 4.8. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü ve gözenek değerleri.....	161
Tablo 4.9. Kokil kalıba döküm numunelerin yoğunluk ölçümü ve gözenek değerleri.....	163
Tablo 4.10. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü sonuçları.....	164
Tablo 4.11. Statik sıvı basıncı deneyi için kum kalıba döküm numuneleri yoğunluk ölçümü sonuçları.....	176
Tablo 4.12. Kum kalıba döküm modellemelerinde simülasyon üzerinden belirlenen % porozite değerleri.....	187
Tablo 4.13. Modelleme programı ile gerçek döküm değerlerinin eşleştirilmesi	188
Tablo 4.14. Kokil kalıba döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % porozite değerleri.....	189
Tablo 4.15. Kokil kalıba döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % porozite değerleri.....	189
Tablo 4.16. Alçak basınçlı döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % gözenek değerleri.....	190
Tablo 4.17. Alçak basınçlı döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % porozite değerleri.....	191
Tablo 5.1. Kum kalıba döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.....	193
Tablo 5.2. Kum kalıba döküm yönteminde yapılması gereken döküm deneyleri için hazırlanan L18 ($1^6 \times 1^3$) dizisi.....	193

Tablo 5.3.	Faktörlerin ve deney sonuçlarının programa girişi.....	194
Tablo 5.4.	Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları	195
Tablo 5.5.	Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları	195
Tablo 5.6.	Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri için ANOVA tablosu.....	197
Tablo 5.7.	Kokil kalıba döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.....	197
Tablo 5.8.	Kokil kalıba döküm yönteminde yapılması gereken döküm deneyleri için hazırlanan L18 ($1^6 \times 2^3$) dizisi.....	198
Tablo 5.9.	Kokil kalıba döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri, gözenek ve S/N oranı sonuçları.....	198
Tablo 5.10.	Kokil kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları	199
Tablo 5.11.	Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri için ANOVA tablosu.....	200
Tablo 5.12.	Alçak basınçlı döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.....	201
Tablo 5.13.	Alçak basınçlı döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri, gözenek ve S/N oranı sonuçları.....	201
Tablo 5.14.	Alçak basınçlı kokil kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları.....	202
Tablo 5.15.	Alçak basınçlı döküm deneylerinde gözenek değerleri için ANOVA tablosu.....	203
Tablo 5.16.	Döküm yöntemi farkının etkisi için döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.....	204
Tablo 5.17.	Döküm yöntemi farkı etkisinin belirlenmesi için yapılan döküm deneyleri, gözenek ve S/N oranları.....	204
Tablo 5.18.	Döküm yöntemi farkının belirlenmesi için yapılan deneylerde gözenek değerleri S/N oranları.....	205
Tablo 5.19.	Döküm yöntemi farkının gözenek değerlerine etkisi için ANOVA tablosu.....	206
Tablo 5.20.	Kum kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.....	222
Tablo 5.21.	Revize değerlere göre kum kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.....	224
Tablo 5.22.	Revize değerlere göre kokil kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.....	226

Tablo 5.23. Revize değerlere göre kokil kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.....	228
---	-----

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Döküm, Kritik Katı Oranı, Yarı-katı Bölge, Döküm Simülasyonu

Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler döküm proseslerinin modellenmesi ile yolluk ve besleyici tasarımı ve buna bağlı olarak döküm parçada oluşabilecek mikro ve makro çekinti boşluğu risklerinin kolayca tahmin edilebilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, döküm modellemesi ile tutarlı sonuçlar alınabilmesi birçok parametrenin ve sınır şartlarının doğru girilmesine bağlıdır. Bu parametrelerin en önemlilerinden biri katı-sıvı bölgesinde besleme sıvısının akıcılığına karşı büyüyen katı dendritlerin oluşturduğu direncin tanımlanmasıdır. Katı-sıvı aralığı, besleme sıvısı geçişine tıkanmış anda besleme durmaktadır. Bu nokta kritik katı oranı (KKO) olarak tanımlanmaktadır. Kritik katı oranı değeri; alaşımın katılaşma aralığına, soğuma hızına, sıvı metal temizliğine ve statik sıvı metal basıncı gibi birçok faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple bir çok simülasyon – döküm uygulamasında yetersiz kritik katı oranı bilgisi yüzünden tutarlı olmayan sonuçların alınması oldukça yaygındır.

Bu çalışmanın hedefi, ticari alüminyum döküm alaşımlarının katılaşması sırasında farklı döküm yöntemleri ve farklı alaşım şartlarına bağlı olarak KKO değerlerinin incelenmesidir. Deneylerde Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 171, Etial 177 ve Etial 220 döküm alaşımları kullanılmıştır. Dökümler, kuma döküm, kokil döküm ve alçak basınçlı kokil döküm yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Tane inceltme ve ötektik silisyumun modifikasyonu ile alaşım kondisyonu değiştirilmiştir. Kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı kokil döküm deneylerinde sırası ile kalıp ön ısıtma sıcaklıkları ve uygulanan doldurma basıncı değiştirilmiştir. Çalışma kapsamındaki deneyler Taguchi istatistiksel deney tasarım yöntemi ile belirlenmiştir ve sonuçlar bu yöntemle incelenmiştir. KKO değerleri gerçek dökümler üzerinden ölçülen verilerle bilgisayar modellemelerinden elde edilen veriler karşılaştırılarak tespit edilmiştir. Döküm simülasyon programı için FlowCast ve katılaştırma modellemesi için SolidCast yazılımları kullanılmıştır. Döküm iç kesitlerinin incelenmesinde metalografi ve optik mikroskop yöntemleri kullanılmıştır. Döküm kesitlerinde yetersiz besleme sonucu oluşan çekinti boşluklarının boyutları ve hacimleri Arşimet yoğunluk düzeneği ile ölçülmüş, radyografi film çekimleri ve kesit yüzey incelemeleri yapılarak sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir. Deneysel ve modelleme çalışmalarının değerlendirilmesiyle alüminyum alaşımlarının dökümlerinde döküm şartları ve model geometrisine bağlı olarak KKO değerleri nicel olarak tanımlanmış ve model kriter belirlenmiştir.

Sonuçlar, döküm ve alaşım şartlarına bağlı olarak KKO değerinin %30 ile %60 arasında değişebileceğini göstermiştir. Tane inceltme, ötektik silisyumun modifikasyonu ve soğuma hızının KKO değerini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. En düşük KKO değeri kuma dökülmüş işlemsiz alaşım ile elde edilirken en yüksek KKO değeri tane inceltme ve modifikasyon uygulanmış alçak basınçlı kokil döküm ile elde edilmiştir.

MODELLING OF MUSHY ZONE PERMEABILITY DURING SOLIDIFICATION OF ALUMINIUM CASTING ALLOYS

SUMMARY

Key Words: Casting, Critical fraction of solid, Semi-solid region, Casting simulation.

Rapid developments in computer technologies have enabled modelling of casting processes through design of runners and feeders which also provide that macro and micro shrinkage risks can easily be estimated. However, achievement of reliable results from casting simulations requires many parameters and boundary conditions be entered correctly. One of the most important parameters of these is the definition of the resistance by the growing dendrites to the flowing feeding liquid in the mushy zone. Feeding ends when the liquid metal flow is immobilized by the dendrite blockage. This point is referred as “critical fraction of solid” (CFS). The value of the critical fraction of solid point might differ depending on many factors such as, the solidification interval of the alloy, cooling rate, liquid metal cleanness and static pressure of the liquid metal. Thus, it is common to have unrealistic results due to inadequate knowledge of CFS point, in many foundry and casting simulation practices.

This study is aimed at investigation CFS point during solidification of commercial aluminium casting alloys with different castings and alloy conditions. During experiments, Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 171, Etial 177 ve Etial 220 casting alloys were used. Sand casting, permanent mould (PM) casting and low pressure permanent mould casting methods were employed. Alloy conditions were changed by grain refining and modification of eutectic silicon. Mould initial temperature and filling pressure were also changed during PM and low pressure PM castings respectively. Experiments conducted in accordance with test plan set Taguchi statistical experimental design methods and the results were analyzed by this method. CFS values, the data obtained on actual measured data with computer modeling on the castings solid critical value by comparing experimental conditions were determined. FLOWCast and SOLIDCast mould filling and casting modelling software were employed during modelling respectively. Metallography, optical microscope, image analysis, Archimedes density measurement and x-ray radiography techniques have been used. Experimental modeling and casting conditions in the casting of aluminum alloys by evaluating operation and CFS values depending on the model geometry is defined quantitatively.

Results showed that, depending on the casting and alloying conditions, the critical fraction of solid point varied between 30 % to 60 % of solid. Grain refining, modification of eutectic silicon and the increasing cooling rate were seen to increase the CFS point significantly. The lowest CFS was obtained with sand casting and non-grain refined condition, whereas the highest CFS point was obtained with low pressure PM Casting in grain refined and modified alloy conditions.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sıvı metal ve alaşımlarının kalıp boşluğuna düzgün bir şekilde doldurulabilmesini ve katılaşma sırasında boşluksuz bir döküm elde edilmesini sağlayan döküm parçaların yolluk ve besleyicileri ile bütünleştirilmiş olan tasarımı kalıplama tasarımı olarak tanımlanmaktadır. Kalıplama tasarımı yapılırken özellikle günümüz piyasa rekabet şartlarında en az metal kullanımı ile (maksimum verim) kaliteli döküm parça üretimi amaçlanmaktadır. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler döküm sektöründe döküm simülasyon yazılımlarının kullanmasını sağlamıştır. Bu yazılımlar sayesinde döküm parçaların muhtemel kalite sorunlarının henüz tasarım aşamasında tahmin edilebilmesi ve gerekli önlemlerin alınabilmesi dökümhanelerde deneme yanılma pratiklerinin en aza indirerek üretim verimliliği ve kalite artışında önemli bir rol oynamıştır. Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Bütün modelleme ve tasarımların bilgisayar üzerinde yapılabilmesine olanak sağlayan döküm simülasyon yazılımları ile bu hesaplamalar çok kısa sürelerde yapılabilmektedir. Bu programlar genellikle sonlu fark veya sonlu elamanlar teknikleri ile hesaplama yaparak verilen döküm geometrisini farklı döküm ve kalıp malzemeleri için kendi veri tabanlarında bulunan veya kullanıcı tarafından da girilebilen malzemenin termo-fiziksel özellikleri ve sınır şartları ile modelleyebilme yeteneğine sahiptirler. Ancak döküm simülasyon programlarında başarılı sonuçlar elde etmek için, fiziksel ortamda gerçekleşen döküm şartlarının, simülasyon programında sayısal veri olarak doğru ve fiziksel ortamı birebir yansıtır şekilde girilmesi gerekmektedir. Dökümlerin katılaşması esnasında simülasyon programında etkili olan ve doğru girilmesi gereken sınır şartlarından bazıları; döküm-kalıp geometrisi (döküm modeli), ısıнын döküm-kalıp ara yüzeyindeki transfer hızı, kalıp malzemesinin ısı özellikleri, döküm sıcaklığı, alaşımın çekme oranı, sıvı metalin kalıbı doldurma süresi, katı-sıvı aralığında beslemenin devam edebileceği kritik katı oranı değeridir. Bu değerlerden

kritik katı oranı (KKO) değeri dışındaki sınır değerleri malzeme özellikleri ve kullanıcı tercihinine bağlı değerler olduğundan simülasyon ortamında tanımlanması oldukça kolaydır. Ancak KKO değeri değişen döküm ve katılaşma şartlarına göre farklı değerler alabildiğinden nicel olarak tanımlanması zordur. Çünkü KKO değeri yalnızca alaşımın bir fonksiyonu olmadığı gibi yalnızca sıcaklığın da bir fonksiyonu değildir. Çoğunlukla geniş katılaşma aralıkları gösteren alüminyum döküm alaşımlarında KKO değerleri döküm ve katılaştırma şartlarının etkisinde birden fazla parametreye bağlı olarak değişen değerler alabilmektedir. KKO değeri değişimi; alaşım, soğuma ve katılaşma şartlarından etkilenmektedir. Bir dökümün farklı bölgelerinde ve farklı kesitlerinde farklı soğuma ve katılaşma şartları olduğundan doğal olarak bu şartlara bağlı KKO değerleri de farklılık gösterebilmektedir. Ancak, halen kullanılmakta olan ticari döküm simülasyon paket programlarında KKO için ortalama sabit bir değer girilmektedir. SolidCast döküm simülasyon programında CFS-Critical Fraction of Solid (KKO-Kritik Katı Oranı) olarak tanımlanan bu değer 0 ile 100 arasında, kullanıcı tarafından tanımlanması gereken bir değer olarak yer almaktadır. Örneğin alüminyum alaşımları için önerilen KKO değeri %30 dur. Öte yandan, iyi bir tane inceltme uygulaması ile yüksek ısı gradyanı altında ve yüksek soğuma hızı altında bir alüminyum dökümde KKO oranının % 55-60 seviyelerine yükseldiği bilinmektedir. Örneğin, gerekenden daha düşük girilen bir KKO değeri ile sonuçlandırılan bir modelleme, gerçeğinden daha fazla döküm boşluğu gösterirken bunun aksine, gerekenden daha yüksek girilen KKO değeri ile yapılan bir modelleme ise gerçeğinden daha az döküm boşluğu gösterecektir. KKO değeri değişimi; alaşımın kimyasal bileşimi, katılaşma gradyanı(ısı gradyanı), katılaşma aralığı, kalıp malzemesinin termal iletkenlik katsayısı, döküm alaşımının termal iletkenlik katsayısı, soğuma hızı, tane boyutu ve yapısı, sıvı metal kalitesi, statik sıvı metal basıncı, döküm mikroyapısı, modifiye edici ilavesi, soğuma hızı ve katılaşma şartlarına bağlı ısı faktörlerinden etkilenmektedir. Bu yüzden özellikle dökümün kritik bölgeleri için geçerli olacak KKO değerlerinin doğru bir şekilde bilinmesi döküm-katılaştırma modellemelerinin doğruluğu açısından gereklidir.

Bu tez çalışmanın amacı; alüminyum döküm alaşımlarının katılaşması sırasında yarı-katı bölge sıvı geçirgenliğine etki eden faktörlerin incelenmesi, bu faktörlerin etkilerinin belirlenmesi ve döküm simülasyon programlarında kullanılacak şekilde

bir model kriter geliştirilmesidir. Bu amaçla çalışmada; alüminyum döküm parça üretiminde yaygınca kullanılan alüminyum döküm alaşımlarının kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde katılaştırılması sırasında yarı katı bölge sıvı metal geçirgenliğine etki eden parametreler, deneysel çalışmalar ve bilgisayar modellemeleri ile araştırılmıştır. KKO değerleri gerçek dökümler üzerinden ölçülen verilerle bilgisayar modellemelerinden elde edilen veriler karşılaştırılarak deneysel KKO değerleri tespit edilmiştir. Deneysel ve modelleme çalışmalarının değerlendirilmesiyle alüminyum alaşımlarının dökümlerinde döküm şartları ve model geometrisine bağlı olarak KKO değerleri nicel olarak tanımlanmıştır. Bu parametrelere bağlı olarak bilgisayar modellemelerinde kullanılan “kritik katı oranı” (KKO) değerlerinin tespit edilerek, bu alaşımların ticari döküm simülasyon programlarında her geometri için otomatik olarak bilgisayar tarafından hesaplanabileceği, formüle edilmiş model kriterler haline getirilmesi için deneysel hesaplama esaslı verilerin oluşturulması sağlanmıştır.

Modelleme içeren deneysel ağırlıklı bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tez çalışmasının ortaya çıkmasına sebep olan problem tanımlanarak çalışmanın amacı hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde konu ile ilgili yapılan çalışmalar, literatür çalışması detaylı bir şekilde verilmiştir. Bölüm 3’de tez çalışmaları kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, kullanılan malzeme ve özellikleri, uygulanan yöntem ve teknikler anlatılmıştır. Bölüm 4’de deneysel ve modelleme çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bölüm 5’de deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalarla kıyaslanarak sebepleri incelenmiştir. Son bölümde çalışmadan çıkarılan genel sonuçlar sıralanmıştır.

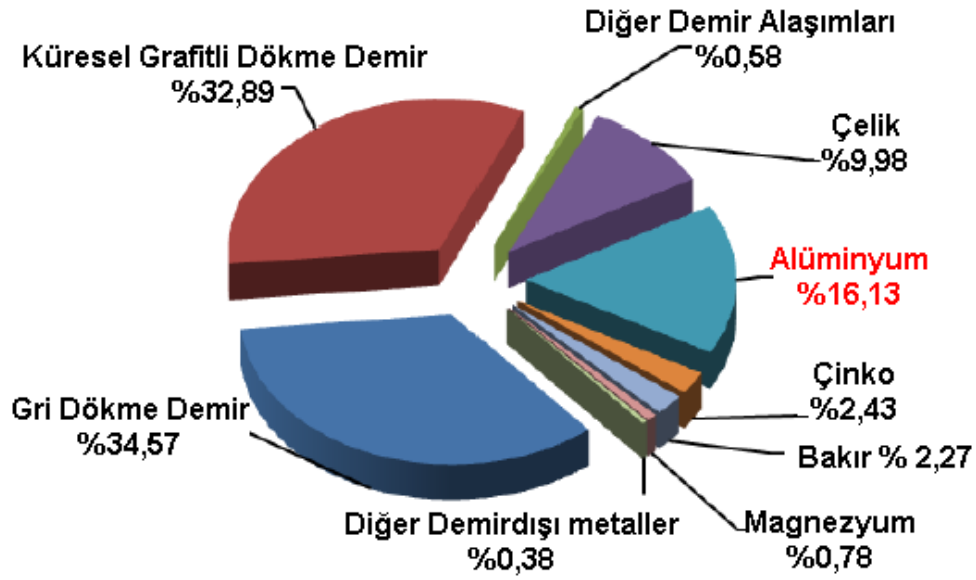
BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Alüminyum Döküm Alaşımları ve Sınıflandırılması

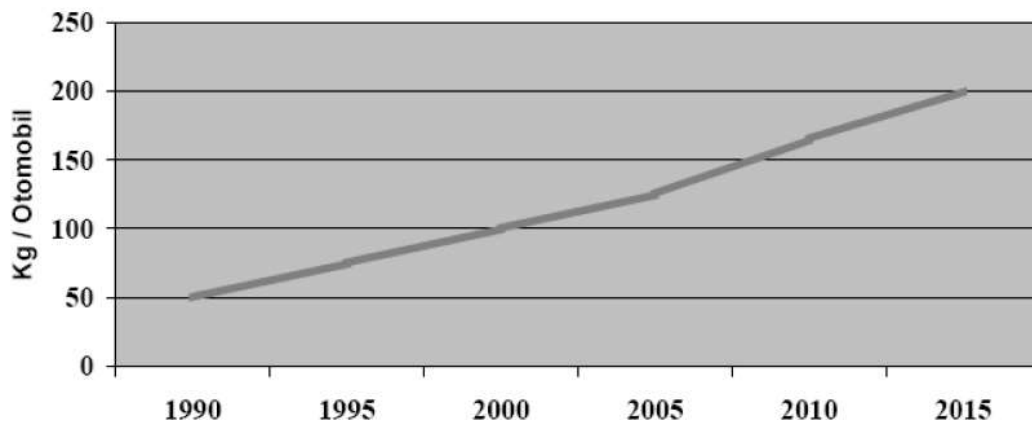
Döküm, metal veya alaşımların ergitilerek önceden hazırlanmış bir kalıp boşluğuna doldurulması ile parça imalatını kapsamaktadır. Bu yöntem karmaşık şekilli parçaların bile ergitilebilen herhangi bir malzemeden kolayca üretilebilmesini sağlamaktadır. Döküm yoluyla üretilen parçaların boyutları, birkaç milimetreden birkaç metreye ve ağırlıkları da birkaç gramdan birkaç tona kadar değişebildiği gibi, basit ya da karmaşık şekilli parçaların üretimi bu yöntemle mümkündür. Ayrıca seri imalata uygun olan bu yöntemde çok sayıda parça kısa zamanda ve diğer yöntemlere nazaran daha düşük maliyetle üretilebilir. Bu belirgin avantajlarından dolayı döküm, imal usulleri içerisinde büyük bir öneme sahiptir [1].

Gallo [2] yaptığı bir çalışmada Amerika'daki döküm üretiminin 2005 yılında 14 milyon tonun üzerinde olduğunu belirtmiştir. Şekil 2.1'de demir esaslı alaşımların bu üretim içerisinde büyük bir paya sahip olduğu görülmektedir. Aynı çalışmada demir dışı döküm alaşımları arasında en çok üretimi gerçekleştirilen metalin %16,13'lük bir oranla alüminyum olduğu tespit edilmiştir. Bu oran toplam demir dışı metal üretimi arasında % 73,3 gibi ciddi bir orana denk gelmektedir. Ayrıca özellikle otomotiv sektöründe alüminyum alaşımlarına her geçen gün daha fazla oranda ihtiyaç duyulduğu ve bu oranın giderek arttığı belirtilmiştir. Alan [3] tarafından hazırlanan bir raporda alüminyumun ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisi olduğu ve alüminyum kullanımının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının üretimine ait olduğu belirtilmiştir. Taşıt araçları ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye gerek duyulur. Günümüzde bir otomobilde 50 kg alüminyum kullanılmaktadır. Bu sayede, yaklaşık 100 kg demir, çelik ve bakır malzeme tasarrufu yapılmaktadır. Yapılan hesaplar ve deneyimler sonucunda, alüminyum kullanılan bir otomobilin, yeterince alüminyum kullanılmamış bir

otomobile kıyasla, ekonomik ömrü boyunca 1500 litre daha az yakıt harcadığı anlaşılmıştır. Bu durumun gerek sürücülerin akaryakıt masraflarına sağlayacağı ekonomi ve çevre sağlığı açısından atmosfere yayılan atık egzoz gazının düşürülmesi yönünden çok büyük faydası bulunmaktadır. Otobüs ve tren gibi sık sık hareket eden ve duran araçlarda, aracın hafif olması daha da fazla önem kazanmaktadır. Şekil 2.2’de otomobilde alüminyum kullanımının yıllara göre değişimini gösteren bir grafik verilmiştir [3].

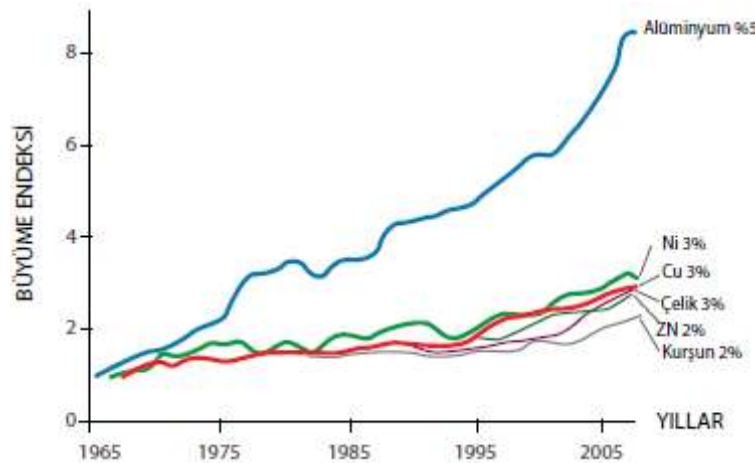


Şekil 2.1. 2005 yılında Amerika’da üretimi gerçekleştirilen toplam dökümün alaşım çeşidine göre dağılımı [2].



Şekil 2.2. Otomobilde alüminyum kullanımının yıllara göre değişimi [3].

Alüminyum, metal pazarında demir-çelikten sonra ikinci sırayı almaktadır. 1900’lü yılların başlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanan alüminyumun birçok üstün özellikleri sayesinde endüstride kullanım alanı her geçen gün artmaktadır [4]. Bronz, bakır, kurşun ve demir gibi yüzyıllardır bilinen ve üretilen malzemelere rağmen çok daha yeni bir malzeme olmasına karşın günümüzde en çok kullanılan demir dışı metal alüminyumdur. Yapılan araştırmalara göre alüminyum kullanımının yılda yaklaşık 20 milyon tondan daha fazla olduğu tahmin edilmektedir [5,6]. Alüminyum, otomotiv, havacılık, gıda endüstrisi, dekorasyon, ısı yalıtımı gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [7]. Alüminyum döküm parçalarına olan talepte, dünya genelinde önümüzdeki 5 yıl içerisinde, her yıl ortalama %9,5 oranında artış beklenmektedir. Otomotiv sektörünün Türkiye’de kapasite artırması, ayrıca yurt dışı siparişlerin sürekli artması nedeniyle önümüzdeki 5 yıl içinde Türkiye’de yılda ortalama %15 seviyesinde talep artışı beklenmektedir. Üretilen döküm parçalarının yaklaşık %85’i ihraç edilecektir. Dünya genelinde toplam üretim 2004 yılında 29,9 milyon tondan 2005 yılında 31,8 milyon tona ulaşmıştır [3]. Şekil 2.3’de dünyada en çok kullanılan metallerin karşılaştırmalı büyüme oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi alüminyum kullanımı diğer metallere göre çok daha yüksek bir hızla artış göstermektedir. Bu artışın temelde üç ana sebebi bulunmaktadır. Bir tanesi alüminyumun mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle kolaylıkla alternatif malzemeler ile yer değiştirilebilmesi, ikinci ana sebep, artan dünya nüfusu ve artan talepler karşısında dünyadaki bulunurluğunun yüksek oluşu nedeniyle, üçüncü sebep ise artan çevre kirliliği, ısınan dünya gibi konuların getirdiği çevre koruma mevzuatlarıdır [8,9].



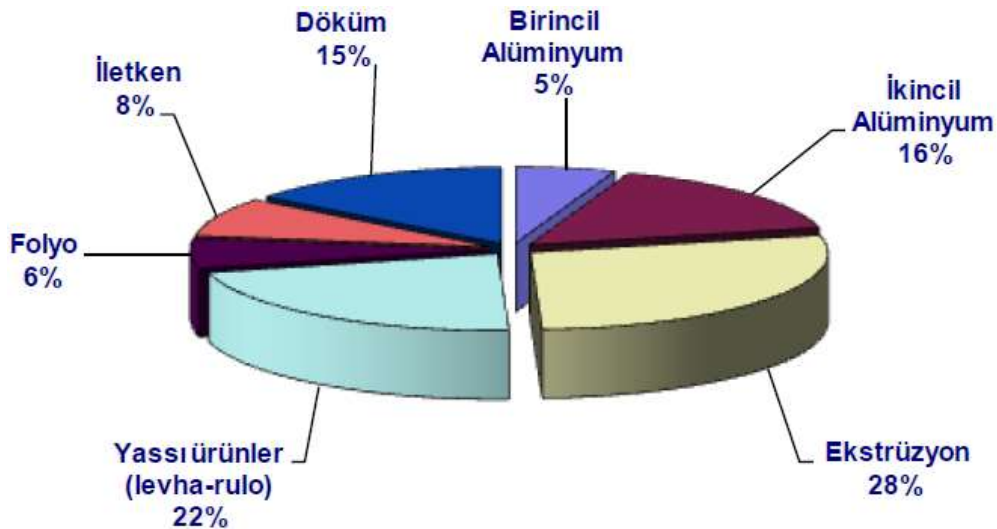
Şekil 2.3. Dünyada en çok kullanılan metallerin karşılaştırmalı büyüme oranları [10].

Türkiye’de alüminyum sektöründe faaliyet gösteren firmaların toplam üretim kapasitelerinin 1.400.000 ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Yapılan yeni yatırımlarla yıllık üretim kapasitesi, ekstrüzyon ürünlerinde 675 bin ton, yassı ürünlerde 390 bin ton, döküm ürünlerinde 200 bin ton, iletkenlerde ise 100 bin ton olarak tahmin edilmektedir. Tablo 2.1’de Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneğinin verilerine göre ülkemizde alüminyum üretiminin 2006-2011 yılları arasında değişimi verilmiştir [11].

Tablo 2.1. Türkiye’nin alüminyum üretimi (Ton) [11].

Üretim	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2010-2009 % değişim	2011-2010 % değişim
Birincil Al.	60000	63000	61000	30000	54000	56000	80,0	3,7
İkincil Al.	70000	80000	94000	120000	150000	165000	25,0	10,0
Ekstrüzyon	215000	235000	265000	230000	275000	290000	19,6	5,5
Yassı Ürünler	125314	146281	140584	135230	198016	224000	46,4	13,1
Folyo	35059	39504	43173	50721	60000	65000	18,3	8,3
İletken	33000	35000	33150	50000	70000	85000	40,0	21,4
Döküm	82500	112150	122000	96500	128000	150000	32,6	17,2

Şekil 2.4’de 2011 yılında üretilen alüminyum ürünlerinin üretim türüne göre değişimi verilmiştir. Döküm yöntemi %15 lik 150.000 ton üretim ile üretim yöntemleri arasında ciddi bir paya sahiptir üretimi her geçen sene giderek artmaktadır [11].



Şekil 2.4. 2011 yılında Türkiye’de üretilen alüminyum ürünlerinin üretim türüne göre dağılımı [11].

Alüminyum endüstrisindeki hızlı büyüme, bu metalin mükemmel karakteristiklerine sahip olmasından ileri gelmektedir. Bu karakteristikler alüminyumu çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri haline getirmektedir. Alüminyumun yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ olup, çeliğin yaklaşık üçte biri ağırlığındadır. Mukavemet/ağırlık kıyaslamasında çelikten daha fazla mukavemet sağlanmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarının hafifliği dışında yüksek korozyon dayanımı, iyi elektrik ve ısı iletkenliği, ışığı yansıtma özelliği, düşük sıcaklıklardaki iyi dayanımı, süneklik ve geri dönüşüm özellikleri gibi avantajları da mevcuttur [8].

Alüminyum döküm alaşımları bileşiminde bulunan ana alaşım elementine göre Alüminyum Birliği tarafından sınıflandırılması Tablo 2.2’de görülmektedir [12]. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen isimlendirmeye göre, son rakam diğer üç rakamdan bir “nokta” ile ayrı yazılır. “Nokta” ile ayrı yazılan bu son basamaktaki rakam, üretimin döküm ya da ingot olma durumunu göstermektedir. İlk rakam grup içerisindeki ana alaşımlandırma elementini ifade etmektedir. Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solundaki iki rakam alaşım içerisindeki en az alüminyum içeriğini belirtmektedir. 2xx.x’den 9xx.x grubuna kadar olan aralıkta noktanın solundaki iki rakam sadece grup içerisindeki alaşımları ayırt etmek için kullanılmakta olup özel bir anlam taşımamaktadır [12,13].

Tablo 2.2. Alüminyum Birliği standartlarına göre alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması [12].

1xx.x	Saf Alüminyum (% 99 dan fazla Al içeren alaşımlar)
2xx.x	Bakır (Başlıca alaşım elementi)
3xx.x	Silisyum, bakır ve /veya magnezyum ile.
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer Elementler
6xx.x	Kullanılmayan seri

Tablo 2.3’de alüminyum alaşımlarının standartları ve uluslararası karşılaştırma tabloları verilmiştir.

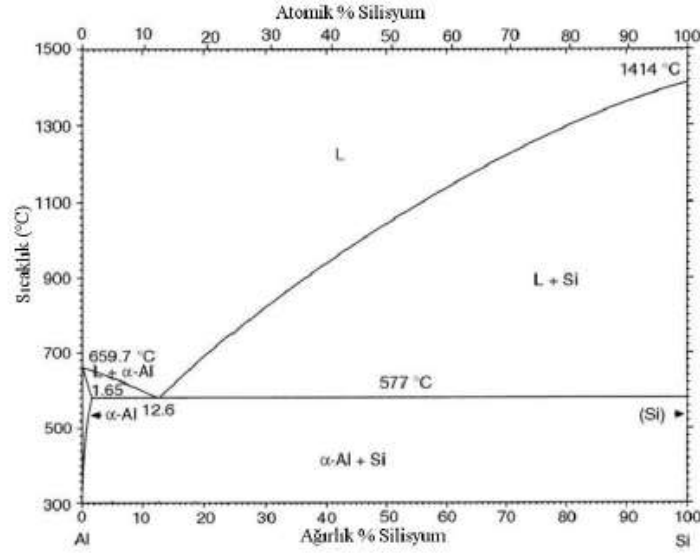
Tablo 2.3. Alüminyum alaşımlarının standartları ve uluslararası karşılaştırma tabloları [14].

ETİNORM	TSE	GERMANY	USA	FRANCE	ENGLAND	ISO	CSA	A.S.T.M
		DIN	AA	NF	BS			
ETİAL-110	AlSi5Cu3	-	319	A-S5U3	LM4	AlSi5Cu3	SC53	BC640
ETİAL-120	AlSi 5	AlSi5	B443	-	LM18	AlSi 5	S5	S5A
ETİAL-140	AlSi 12	G-AlSi 12	A413	AS13	LM6	AlSi 12	-	A13
ETİAL-141	AlSi 12Fe	GD-AlSi 12	413	A-S 12	LM 20	AlSi 12Fe	S12P	S12C
ETİAL-145	-	-	A332	A-S 12UN	LM 13	-	L2551	SN122A
ETİAL-147	-	-	-	-	-	-	-	-
ETİAL-150	-	-	-	-	-	-	-	-
ETİAL-160	AlSi 8Cu3Fe	G-AlSi 8Cu3	A-380	A-S 9U3A	LM 24	AlSi8Cu3Fe	L2630	380
ETİAL-171	AlSi10Mg	G-AlSi10Mg	A-360	A-S9GU	-	-	-	360
ETİAL-175	-	-	Fe332	-	LM 26	-	-	SC103A
ETİAL-177	-	-	A357	-	-	-	C135	-
ETİAL-178	-	-	-	-	-	-	-	-
ETİAL-180	-	-	-	-	LM2	-	-	A03831
ETİAL-195	-	-	392,,1	-	-	-	-	392
ETİAL-220	AlCu4Si	GAlCu4,5	-	A-U50-T	L91	-	225	-
ETİAL-221	AlCu4Ti	GAlCu4Ti	-	-	LM11	AlCu4Ti	226	-
ETİAL-509	-	GDAIMg9	-	-	-	-	-	-

2.1.1. Al-Si döküm alaşımları

Alüminyuma alaşımlarına silisyum ilavesi ile akışkanlık, korozyon direnci, kaynak kabiliyeti artar ve sıcak çatlama eğilimini azalır. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme sağlanır. Bu özelliklerinden dolayı Al-Si alaşımları bütün alüminyum döküm alaşımlarının büyük bir kısmını oluştururlar [15,16]. Alasım içerisinde silisyumun yanı sıra özellikleri iyileştirmek için farklı elementlerde bulunabilir. Özellikle Cu, Ni ve Mg ile birlikte ilave edilirse yaşlanma ısıl işlemi ile sertleştirilebilir alaşım elde edilir. Fakat bu alaşımların mukavemet artışı silisyum artışı ile orantılıdır [17,18]. Çünkü alüminyum içerisine ilave edilen silisyum belli bir orana kadar alüminyum kafesi içerisinde çözünür ve fazla Si atomları Al atomlarından yarıçaplarının farklı olması dolayısıyla yapı içerisinde gerilme

oluşturur. Bu gerilme deformasyon esnasında dislokasyon hareketini engel olarak malzemenin mukavemeti artmasına sebep olur [19].



Şekil 2.5. Al - Si denge diyagramı [20].

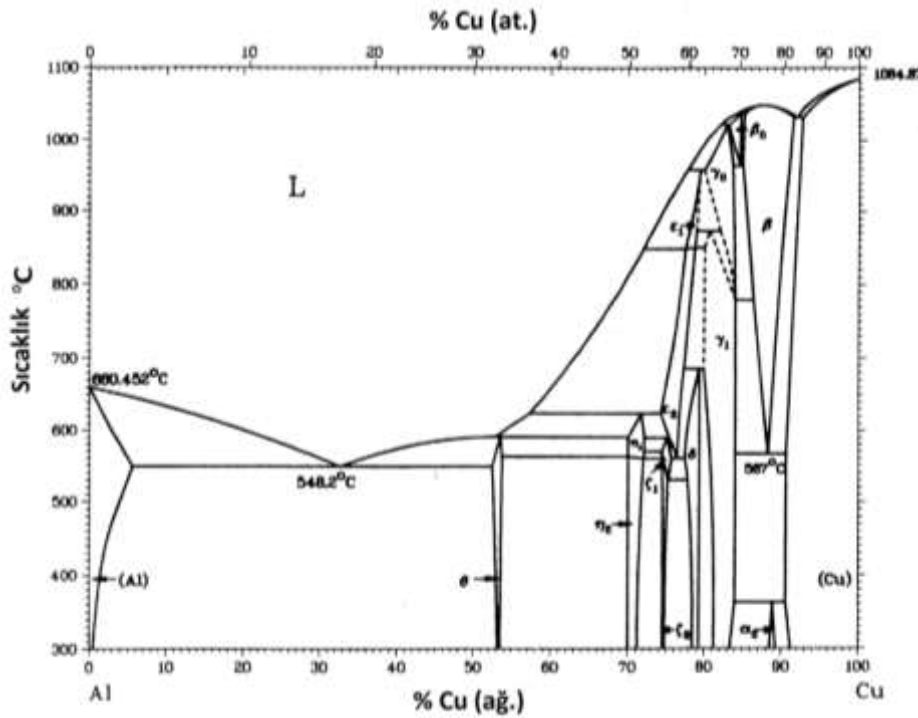
Şekil 2.5’de Al-Si alaışımının faz diyagramından da görüldüğü gibi, alaşım %12,6 silisyum değerinde ve 577 °C sıcaklıkta bir ötektik göstermektedir. Farklı silisyum içeriklerinde; malzemenin mikro yapısını oluşturan fazlar, bu fazların şekli ve dağılımı değişmektedir. Bu değişimler malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Küçük ve yuvarlak primer faz (veya ötektik yapı) yüksek mukavemet ve süneklik verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini artırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür [19].

2.1.2. Al - Cu döküm alaşımları

Alüminyumda alaşım elementi olarak kullanılan ilk element olan Cu ve alaşıma sertlik kazandıran başlıca elementtir [21]. Döküm alaşımlarında en fazla %12 oranında kullanılır ve bu orana kadar mukavemeti arttırır. % 12’den fazlası yapıda gevreklik meydana getirir. Isıl işleme tabi tutulmuş veya tutulmamış halde iken alaşımın kopma mukavemetini artırır. Bakırın, alüminyum içinde katı halde çözünürlüğü artan sıcaklıkla beraber artar ve çözünürlük 548 °C’de % 5,65’e ulaşır. Böylece çökeltme sertleşmesi mümkün olur. Çökeltme için gerekli zaman, alaşımın

bileşimine ve sıcaklığına bağlıdır. Çökelmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır [21, 22]. Çökelti sertleşmesi ile mukavemetleri arttırılabilen Al-Cu alaşımlarının mukavemet değerleri Al-Si alaşımlarına göre daha yüksektir. Ancak katılaşma aralığının çok geniş olması bu alaşımların metal kalıba dökümünde sıcak yırtılma problemlerinin ortaya çıkmasına neden olur [23]. Bu nedenle genellikle kum kalıba dökülerek şekillendirmeleri tavsiye edilir. Bir diğer dezavantajı ise birçok alüminyum alaşımına göre düşük korozyon dayanımına sahip olmalarıdır [24, 25]. Şekil 2.6'da Al-Cu alaşımının faz diyagramından da görüldüğü gibi, 548 °C'de ve % 33,2 Cu içeriğinde bir ötektik gösterir.

Al - Cu alaşımları vida, cıvata, uçak konstrüksiyon, perçin, yüksek sıcaklıklarda çalışan dövme silindir kafa ve pistonları gibi yerlerde kullanılırlar. Standart Al-Cu ikili alaşımları genellikle oda sıcaklığı ya da yüksek sıcaklıkta yüksek mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulduğu parçaların üretiminde kullanılır. Tüm döküm alüminyum alaşımları içerisinde en kararlı alaşımlar Al-Cu alaşımlarıdır [26].



Şekil 2.6. Al - Cu denge diyagramı [20].

2.2. Alüminyum Alaşımlarının Katılaşması

Hemen hemen tüm metal ve alaşımları, üretimlerinin bir aşamasında sıvıdır ve katılaşma sıcaklığının altına soğutulduğunda katılaşması beklenir. Katılaşma süreci içerisinde ortaya çıkan yapı; mekanik özellikleri, tane boyutu ve şeklini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple katılaşmada mikro yapının temeli ve kontrolü, döküm kalitesini artırmada büyük önem taşımaktadır. Ayrıca döküm parçalarda katılaşma sonucu oluşan içyapı parça ömrü boyunca etkili olduğundan ve döküm malzemelerin özelliklerinin kontrol edilebilmesi için katılaşma olayının çok iyi kontrol edilmesi zorunludur [27]. Katılaşma iki aşamadan meydana gelir. Bunlar; çekirdeklenme ve büyümedir. Çekirdeklenme, küçük katı parçacıklarının sıvıdan embriyolaşması ile olur. Sıvı metal kalıp boşluğuna döküldüğünde; kalıp duvarlarından, ergiyik içerisinde bulunan veya alaşımın diğer bileşiklerinden ya da özellikle tane inceltme amacıyla katılmış çekirdekçiklerden katılaşma başlar. Katının büyümesi, atomların sıvıdan oluşan çekirdek yüzeyine yayınımla gerçekleşir ve bu şekildeki büyüme katılaşma tamamlanana kadar devam eder. Alüminyum döküm alaşımlarının katılaşması da kalıp duvarlarından, ergiyik içerisindeki bileşiklerin çekirdek merkezleri oluşturması ve genellikle α alüminyum dendritlerinin oluşumu ile başlar. Katılaşma bunların birleşerek büyümesi ile devam eder. Katılaşma ilerledikçe alaşım bileşimine bağlı olarak değişen çeşitli fazların çökmesi gerçekleşir ve katılaşma genellikle ötektik reaksiyon ile tamamlanır [28].

Katılaşma, öncelikle soğumanın hızlı olduğu ince kesitlerde başlar ve bu sırada oluşan hacim azalmaları nedeniyle o ana kadar katılaşmamış olan kalın kesitlerdeki sıvı bu bölgeleri besler. İyi tasarlanmış bir kalıpta, katılaşma kalın kesitlerin ince kesitleri beslemesiyle kademeli olarak ilerlemeli ve en son katılaşan bölgelerin dışa açık olan yolluk ve besleyicilerde kalması sağlanmalıdır [29]. Böylece çekme boşluğu veya diğer kusurların parça içinde oluşması önlenir. Bu sebeple kalıplama tasarımının çok iyi yapılması gerekmektedir. Çünkü alüminyum döküm alaşımlarından yapılan parçaların kullanıldığı yerler ve beklenen performans düşünüldüğünde çekinti ve gözenek hatalarına karşı çok sınırlı bir tolerans aralığı bulunmaktadır.

2.3. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Hazırlanması

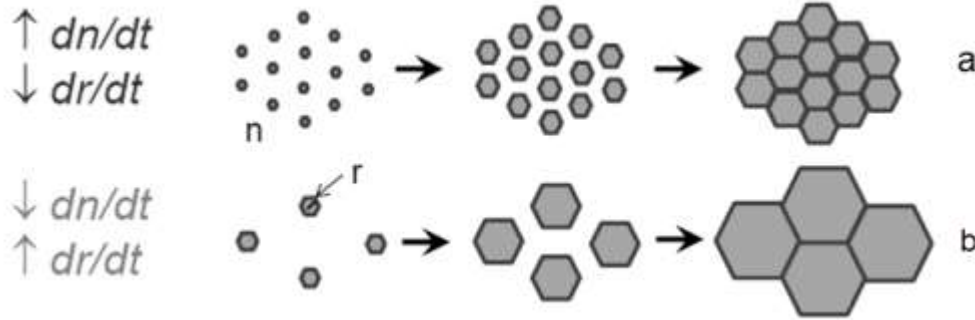
Alüminyum sıvı halde iken serbest atomlar sebebiyle atmosferik oksijen ile etkileşimi sonucu, Al_2O_3 ve metal oksitler şeklinde cüruf oluşmaktadır. Oluşan bu metal oksitler döküm yapıncaya kadar metalle atmosferin etkileşimini önler ve döküm yapılmadan önce temizlenir. Yüzeydeki oksit tabakasının kalınlığı; oksitlenmiş ve korozyona uğramış hurdaların kullanılması, fırındaki sıvı metalin aşırı türbülansı, Mg elementinin varlığı ve ortamın sıcaklığı ile artmaktadır. Alüminyum alaşımlarının üretilmesi sırasında temiz ve homojen sıvı metal eldesi için, dökümden önce sıvı metale birtakım ilaveler yapılmaktadır [30]. Bunların başında cüruf yapıcı madde ilavesi gelmektedir. Bu ilave; metal banyosunun hava ile temasını kesme, ergiyiği temizleme, cüruf giderimi ve gazlardan arıtma gibi işlemlerin gerçekleşmesini sağlaması bakımından gereklidir. Metalin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla ilave edilen cürufatıcıların kullanımının ana nedenleri; metalin ergimesi sırasında oluşan kayıpları, sıvı metal tarafından gazların absorblanmasını önlemek ve metaldeki istenmeyen impuritelere gidermektir. Cürufatıcı olarak çeşitli gaz ve katı ilaveler kullanılmaktadır [31].

Bir diğer işlemde gaz giderme işlemidir. Alüminyum alaşımlarında gaz problemlerinin çözümünde klor ve azot gazı kimyasal aktivitesine bağlı olarak en çok kullanılan gazlardır. Mekanik olarak düşük basınçlı kabarcıklar şeklinde H ve diğer metalik olmayan kalıntıları süpürmekte ve metal olmayan kalıntıları yüzeye çıkarmaktadır. Döküm kalitesinin iyi olması gaz giderme işleminin yapılmasına bağlıdır. İşlem sonunda yüzeydeki cüruf temizlenir ve derhal döküme geçilir [30,31].

2.4. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Tane İnceltme Uygulamaları

Dökümlerin katılaşması çekirdeklenme ile başlayıp büyüme ile devam etmektedir. Bu sebeple nihai döküm iç yapısında ince taneli bir yapı elde etmek için katılaşma esnasında yüksek bir çekirdeklenme hızı ve sonrasında çekirdeklenen tanelerin yavaş büyümeleri gerekmektedir. Çekirdeklenme kalıp duvarlarından başlayabileceği gibi alaşıma bilinçli olarak katılan heterojen çekirdeklerle de sağlanabilir [32]. Şekil 2.7’de yüksek çekirdeklenme ve yavaş soğuma sonucu oluşan tane yapısı ile düşük

çekirdeklenme ve hızlı büyüme sonucu oluşan tane yapıları şematik olarak verilerek karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 2.7. a) Yüksek çekirdeklenme ve yavaş büyüme sonucu oluşan ince taneli, b) düşük çekirdeklenme ve hızlı büyüme sonucu oluşan kaba taneli yapı görüntüsü (dn/dt = zamana bağlı olarak değişen çekirdek çapı değişimi) [33].

Tane inceltici olarak görev yapacak çekirdekleyicilerin, katılaştıran metal ile kristalografik uyumlu, sıvı metal içinde çözünmeden katı halde kararlı bir şekilde kalabilen ve benzer yoğunlukta olması tercih edilir [33]. Alüminyumda tane inceltme uygulamaları, sıvı metale bir miktar titanyum ve bor ilavesi ile gerçekleştirilir. Böylece döküm tane yapısında önemli ölçüde küçülme sağlanarak, alaşımın dökülebilirliği, mukavemeti, sızdırmazlık ve döküm kalitesi artırılabilir [33-37]. Tane inceltici olarak kabul gören titanyum (Ti) ve bor (B) elementleri %0,01 gibi az miktarlarda bile alüminyuma ilave edildiğinde hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi göstermektedir. Bu etki herhangi bir şekilde Ti ve B ilave edilmemiş ve bir miktar Ti ve B ilave edilmiş iki alüminyum külçenin kesilmesi ve yüzeylerinin parlatılmasından sonra uygun şekilde dağlanması ile ortaya çıkan tane yapısında net olarak görülebilmektedir [34-39]. Ti ve B ilavesi ile bir alüminyum alaşımının tane yapısında ortaya çıkan değişime bir örnek Şekil 2.8'de görülmektedir.

Tane inceltme özellikle, ikinci faz partiküllerinin dağılımını değiştirdiğinden döküm parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Tane inceltme sayesinde ince ve eş eksenli tanelerden oluşan, homojen bir döküm yapısı elde edilir. Bu durum Şekil 2.8'de gösterilen tane inceltilmemiş ve tane inceltirilmiş yapıların karşılaştırılması ile daha net görülebilir. Şekil 2.8.a'da görülen tane inceltilmemiş yapıda uzun kanat şeklinde alüminyum tanelerinin olduğu görülmektedir. Sıvı

metalde bulunan veya katılaşma sırasında oluşan gevrek intermetalik bileşikler ve porozite bu iri tanelerin aralarına dizilerek bu tanelere dik gelen uzama kabiliyetini zayıflatacaktır. Şekil 2.8.b’de küçük, düzenli ve eşeksenli bir tane yapısına sahip olan tane inceltmiş bir alaşımanın mikroyapısı görülmektedir. Bu yüzden mekanik özellikler daha izotropiktir ve alaşım daha mukavemetlidir [40-43].



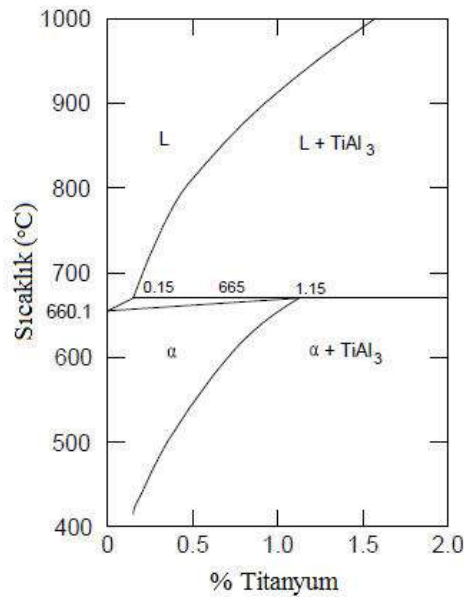
Şekil 2.8. a) Tane inceltilmemiş, (b) Al5Ti1B mastır alaşımı ilaveli alüminyum alaşımasının tane yapıları [34].

Alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme işlemi porozite miktarını azaltmakta ve porozite boyutunu küçültmektedir. Aynı zamanda besleme kabiliyetini arttırmakta olduğundan alüminyum alaşımları çoğunlukla tane inceltme işlemine tabi tutulmaktadır [32-39].

2.4.1. Tane inceltmede titanyumun etkisi

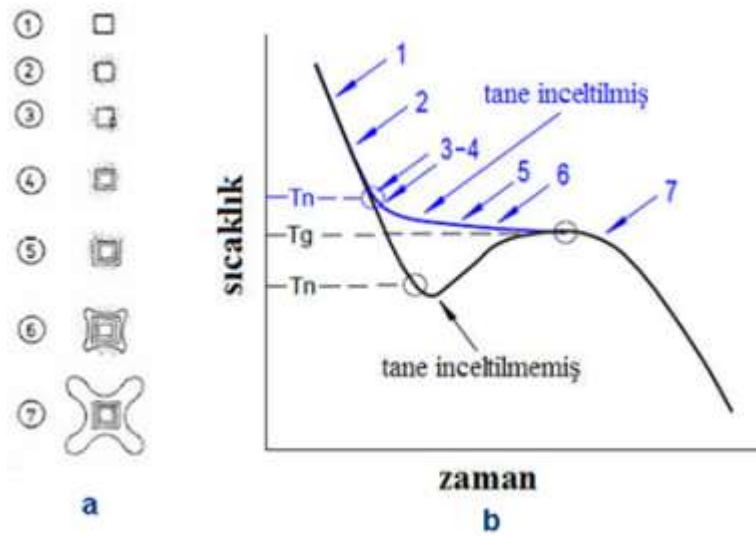
Alüminyum dökümlerinde titanyum ilavesinin tane inceltme etkisi gösterdiği 1930’lu yıllardan bu güne bilinmektedir. Titanyumun bu etkiyi nasıl gösterdiği konusunda en yaygın görüş ise titanyumun alüminyum ile $TiAl_3$ bileşiği oluşturarak bu bileşiklerin sıvı alüminyumda heterojen çekirdeklenme noktaları oluşturduğu şeklindedir [33-39]. Şekil 2.9’da Al-Ti faz diyagramının alüminyumca zengin tarafı gösterilmiştir. Faz diyagramından görüldüğü gibi %0,15 oranında Ti ilavesi alüminyumun ergime derecesini $660^{\circ}C$ ’dan $665^{\circ}C$ ’ye yükseltmektedir. Diğer bir nokta ise alüminyum içerisinde Ti oranı %0,15’i geçtiği anda sıvı içerisinde heterojen çekirdeklenme altlıklarını oluşturduğu var sayılan katı $TiAl_3$ bileşiklerinin oluşmasıdır [44]. $TiAl_3$

bileşiği, alüminyumla kristalografik uyumu % 97,2 seviyelerinde iken [45], Al-Ti faz diyagramından da görülebileceği gibi ağırlıkça %0,15 (1500 ppm) seviyesinin altında kararlı değildir ve sıvı alüminyum içinde zamanla çözünür. Bu nedenle $TiAl_3$ bileşiğinin çekirdeklendirici kapasitesinden yararlanabilmek için alüminyum alaşımlarına en az % 0,15 seviyesinde Ti ilave etmek gerekir. Soğuma sürecinde herhangi bir aşırı soğumaya (ΔT) gerek kalmaksızın alüminyum $TiAl_3$ bileşiği üzerinde heterojen çekirdeklenme mekanizması ile çekirdeklenmekte ve ince taneli yapı kendiliğinden oluşmaktadır [44]. Titanyum ilavesi ile alüminyum alaşımlarında tane inceltilmeyi açıklamada ana teori olarak görülen bu teoriye (Peritektik Teori) göre alüminyum tane inceltilmesi aşağıda verilen reaksiyon ile ilişkilidir [46].



Şekil 2.9. Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı [44].

Backerud [47] katı $TiAl_3$ partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenerek büyümesini ve bu yolla tane inceltme mekanizmasını Şekil 2.10.a'da gösterilen şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn [32] bu şemayı Şekil 2.10.b'de gösterilen başka bir şematik soğuma eğrisi ile ilişkilendirerek açıklamışlardır. Buna göre, tane inceltici olarak ilave edilen titanyum içeren mastır alaşımı içerisinde çok sayıda $TiAl_3$ intermetalik bileşiği bulunmaktadır. Dökümden birkaç dakika önce tane inceltici mastır alaşımı ilave edildiğinde milyonlarca mikroskobik $TiAl_3$ partikül sıvı metal içerisine dağılmaktadır.



Şekil 2.10.a) Alüminyumun TiAl₃ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi [47], b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin gösterimi (T_n = Çekirdeklenme sıcaklığı, T_g= Büyüme sıcaklığı) [32].

Bunlardan bir tanesinin Şekil 2.10.a'da şematik olarak 1 ile gösterilen parçacık olduğunu varsayabiliriz. TiAl₃ sıvı alüminyum ile temas ettikten sonra çözünmeye başlar. Bunun sonucu partikül çevresinde partikül ile temas eden alüminyum titanyumca zenginleşmeye başlayacaktır. Bu olay Şekil 2.10.a'da 2 nolu nokta ile temsil edilmektedir. Bu anda Şekil 2.9'da verilen faz diyagramından görüleceği gibi ilk önce partikül etrafında titanyumca zengin sıvı ana metale göre daha yüksek likidüs sıcaklığına sahip olması nedeni ile katılaşmaya başlayacaktır. Böylece Şekil 2.10.a'da 3 nolu nokta ile gösterildiği gibi partikül yüzeylerinde ilk katı çekirdeklenme başlamış olacaktır. Aynı şekilde 4 ve 5 ile işaretlenen skeçlerde gösterildiği gibi partikül etrafındaki çözünmüş titanyumca zengin alüminyumu tüketerek büyümeye devam edecek ve büyüme bu sıvı tükenince duracaktır. Metal soğumaya devam ederken bu kez çekirdekler etrafında dendritik büyüme başlayacak ve 6-7 de gösterildiği gibi devam edecektir [47].

Şekil 2.10.b'de ayrıca TiAl₃ partiküllerinin tane inceltme etkisini soğuma eğrisine yansıtması açısından da önemlidir. Tane inceltici ilave edilmemiş bir dökümün soğuma eğrisi incelendiğinde çekirdekleşmenin kendiliğinden oluşabilmesi için sıvının T_g (büyüme) sıcaklığı altında bir T_n (çekirdekleşme) sıcaklığına kadar birkaç derecelik alt soğuma gerçekleştirmesi gerekmektedir. Buna karşılık mavi çizgi ile görüntülenen tane inceltici ilave edilmiş bir dökümün soğuma eğrisi ise T_g

sıcaklığının hemen üzerinde 3-4 noktalarında alüminyumun çekirdeklenebildiğini göstermektedir. Buna göre basit bir termal analiz yöntemi ile bir alüminyum dökümünde etkili bir tane inceltmenin gerçekleşip gerçekleşmediği kolayca anlaşılabilmektedir.

Titanyumun alüminyumda tane inceltme etkisini teyid eden diğer bir faktör ise bazı araştırmacıların [48] alüminyum tane merkezlerinde titanyumca zengin bölgelerin varlığını göstermiş olmasıdır. Bununla birlikte titanyum ile tane inceltmede dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli nokta titanyumun, alüminyum içerisinde çözünbilmesidir. Genellikle dökümhane uygulamalarında Ti ilave oranı 100 ppm (part per million) (% 0,01 Ti) oranı civarındadır. Bu oranda Ti, ticari saflıkta bir alüminyuma ilave edildiğinde $TiAl_3$ kümeleşmeleri, faz diyagramında da görülebileceği gibi belirli bir süre içerisinde tamamen çözünecek tane inceltme etkisini kaybedecektir. Bu olay uzun bekletme süreleri ile dökülen tane inceltici ilave edilmiş alüminyum alaşımlarında tane inceltme etkisinin zamanla azalarak yok olmasına neden olduğunu belirtmektedir.

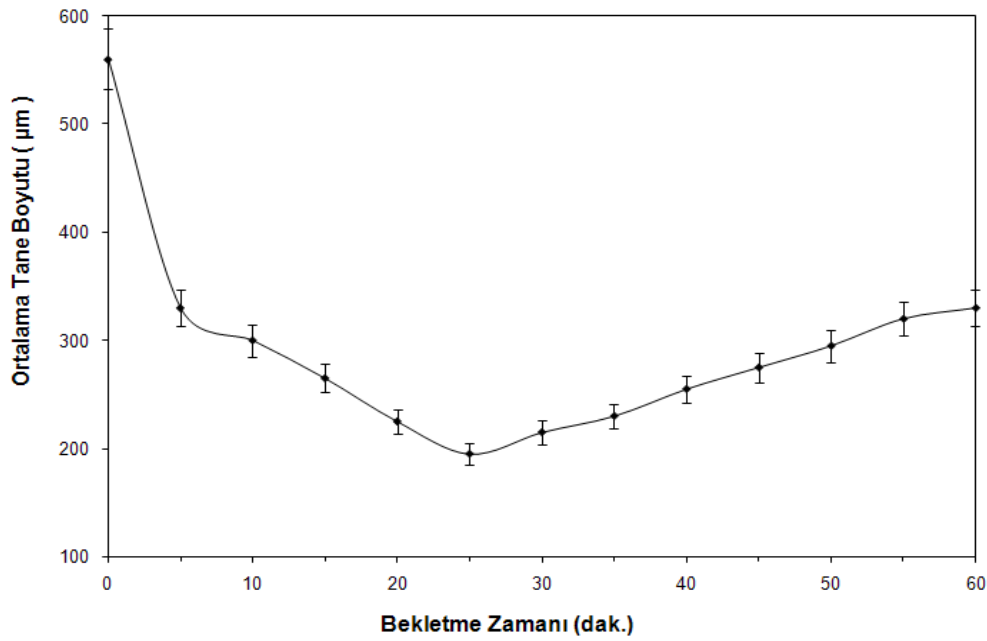
Ti elementinin tane inceltme konusunda bir diğer etkisi de büyümeyi yavaşlatma özelliğinden kaynaklanmaktadır. Büyüme kontrolü, katılaşma ile açığa çıkan ergime gizli ısı ile sıvı metalden uzaklaşan ısı arasındaki dengenin korunması ile mümkündür ve alaşımın saflığı azaldıkça büyüme hızı düşer. Alaşım elementlerinin bu becerisi büyümeyi engelleme faktörü ile tarif edilir [49, 50]. Titanyum, Tablo 2.4’de görüldüğü gibi alaşım elementlerinin içerisinde en fazla büyümeyi geciktirici rolü olan elementtir.

Tablo 2.4. Alaşım elementlerinin tane büyüme önleme kapasiteleri [33].

Element	Ti	Si	Cr	Ni	Mg	Fe	Cu	Mn
Büyüme Önleme Faktörü	246	5,9	3,5	3,3	3	2,9	2,8	0,1

Tane inceltici ilavesinin etkisinin Etial 160 alaşımının dökümünde zamanla değişimi üzerine yapılan bir çalışmada; hem hurda hemde primer alaşımın dökümünde bekletme süresinin tane boyutunu etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.11’de verilen grafikte görüldüğü gibi tane boyutunun TiB

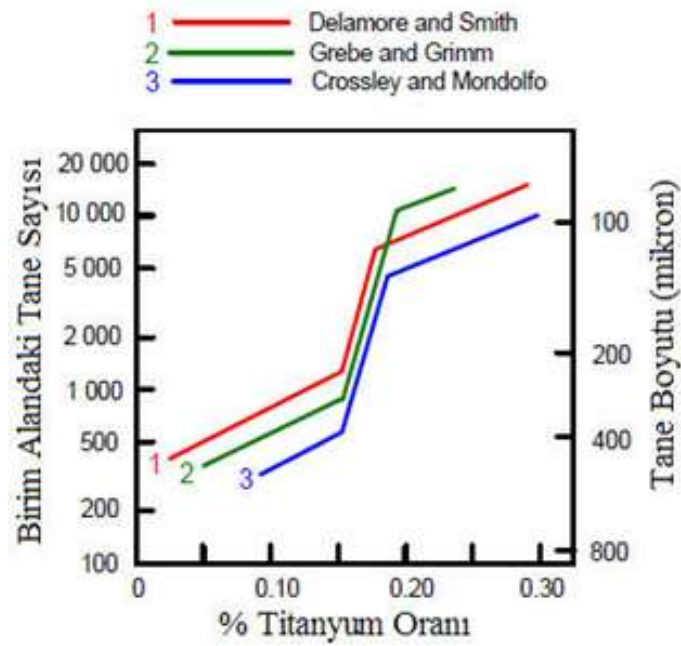
ilavesinden sonra yaklaşık 25 dakika içinde minimum seviyelere kadar azaldığı ve daha sonra zaman artışıyla ölçülen tane boyutunun da arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise; Al – Ti faz diyagramı incelendiğinde tane incelticiden gelen $TiAl_3$ partiküllerinin sıvı alüminyum içerisinde çözündüğü ve dolayısıyla inceltme etkisinin zamanla azaldığı veya birbiriyle birleşerek büyümesi olarak görülmektedir Bu durum literatürde yanma kaybı (fading) veya solma olarak ifade edilmektedir [51, 52].



Şekil 2.11. Etial 160 primer alaşımına katılan Al5Ti1B mastır alaşımının bekletme zamanına göre tane boyutu değişimi [51].

Tane inceltici Ti içeren master alaşımlarının tane inceltme etkilerinin zayıflama süreleri bir çok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlisi mastır alaşımı içerisinde bulunan $TiAl_3$ partiküllerinin boyut dağılımıdır. Daha büyük boyuta sahip $TiAl_3$ partikülleri içeren mastır alaşımlarında tane incelticilerde etki geç başlamakta ve geç bitmektedir. Yapısında daha kaba taneli ve daha az $TiAl_3$ fazı bulunduran mastır alaşımının; daha ince taneli ve çok $TiAl_3$ fazı içeren mastır alaşımına göre tane inceltme performansı açısından daha az başarılı olduğu bilinmektedir [52]. Bu durum göz önünde bulundurularak günümüz modern dökümhane uygulamalarında benimsenen yaklaşıma göre ilave Ti oranının genel alüminyuma oranı en az % 0,15 olacak şekilde yapılmasıdır. Aksi takdirde mastır alaşımı çok hızlı bir şekilde tane inceltme etkisini kaybedecektir [33].

Bu konuda Cole ve arkadaşları [53] tarafından bir araya getirilen üç farklı çalışmadan alınan sonuçlar Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Şekil 2.12’de verilen deneysel sonuçlardan % 0,15’ten daha az oranlarda Ti ilavesi ile düzgün bir tane inceltmenin mümkün olmadığı ve tutarlı bir tane inceltme yapılabilmesi için Ti oranının mutlaka % 0,15’in üzerinde olması gerektiği görülmektedir. Bu değer aynı zamanda sıvı alüminyum içinde çözünebilir maksimum titanyum sınırıdır.



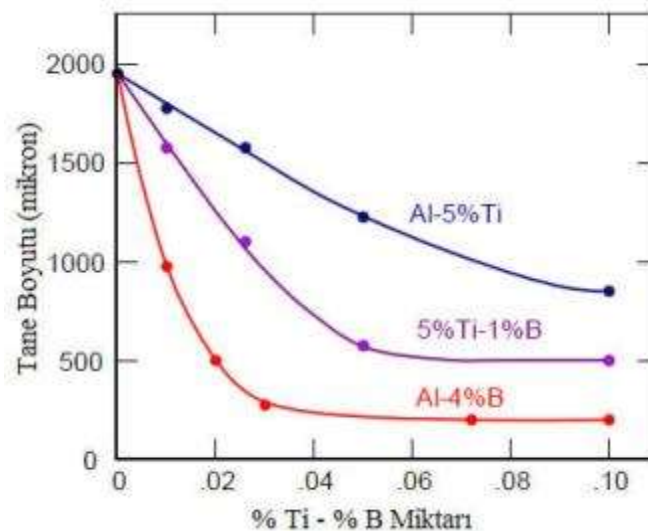
Şekil 2.12. % 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları [53].

2.4.2. Tane inceltmede borun etkisi

Tane inceltme işleminde kullanılan Al-Ti-B mastır alaşımlarında bor elementi özellikle Al-Si alaşımlarının dökümünde oldukça önemlidir. Ti/B oranında bor miktarının fazla olması AlB_2 parçacıklarının oluşumuna sebep olmaktadır. AlB_2 parçacıklarının çekirdekleyici olarak görev yapıp tane inceltmeye etkileri konusunda çelişkiler söz konusudur. Maxwell ve Hellevall [49] yaptığı araştırmada saf alüminyum için AlB_2 'nin çekirdekleyici olmadığını ileri sürerken, Cibula [40] alüminyum dökümünde çekirdekleyici özelliği kabul görmüş olan TiB_2 parçacıklarına benzer yapıda olması dolayısıyla AlB_2 parçacıklarının alüminyumda tane inceltmeye etkisinin olduğunu ileri sürmektedir. Konuyla ilgili çalışmalar yapan Birol [54] $AlSi7Mg$, $AlSi8Cu3$, $AlSi11Cu2$ vb. alüminyum döküm alaşımlarında

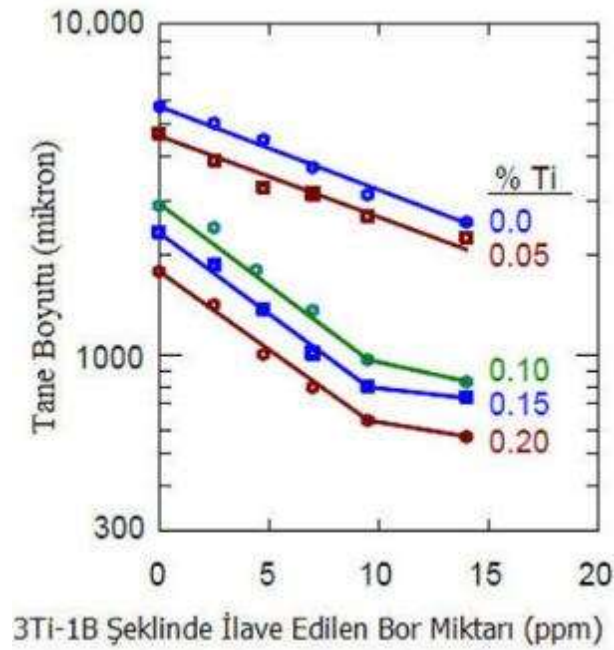
Al₃B mastır alaşımı ilavesi sonrası elde edilen tane yapılarının AlTi₅B₁ ilavesi ile benzer oluşunu ortaya koymuştur. AlB₂ parçacıklarının çekirdeklenme performansının, dökümü yapılan alaşımın Ti içeriğine bağlı olduğunu ve ağırlıkça %0,04-0,1 arası Ti içeren alaşımlara katılan B elementinin TiB₂ bileşiğine dönüştüğünden AlB₂ taneciklerinin çok iyi olan çekirdeklenme performanslarından yararlanamadığını ortaya koymaktadır. Ancak laboratuvar şartlarında hazırlanan titanyumsuz alaşımlarda AlB₃ ile tane inceltme yapıldığında çok ince ve eş eksenli tane yapısına sahip olunduğunun ve alaşıma ilave edilen borun tamamının alüminyum için mükemmel çekirdeklendirici olan AlB₂ taneciklerine dönüştüğünü belirtmektedir. Ayrıca AlB₂ taneciklerinin alüminyumdan hemen önce oluşmalarından dolayı solma etkisi olmaması ve tekrar ergitmelerde tane inceltme performansını koruması önemli bir avantaj olarak görülmektedir.

Lu, Wang ve Kung [55] tarafından ötektik altı bir Al-Si alaşımı olan A356 alaşımında üç farklı tane inceltici mastır alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmasına ait bir sonuç Şekil 2.13’de verilmiştir. Bunlar Al-%5Ti, Al-%5Ti-%1B ve Al-%4B alaşımlarıdır. Şekil 2.13’de borun tane inceltici olarak titanyumdan daha etkili olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışmada Sigworth ve Guzowski [56] AlB₂ partikülleri içeren Al-B mastır alaşımlarının çok daha mükemmel tane inceltme etkisi gösterdiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 2.13. A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları [55].

Pasciak ve Sigworth [57] tarafından A319 alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmalarından alınan diğer bir sonuç Şekil 2.14’de gösterilmiştir. Buna göre tane inceltici olarak bor miktarı artırılrsa bile titanyum ilave etmeksizin etkili bir tane inceltme yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir.



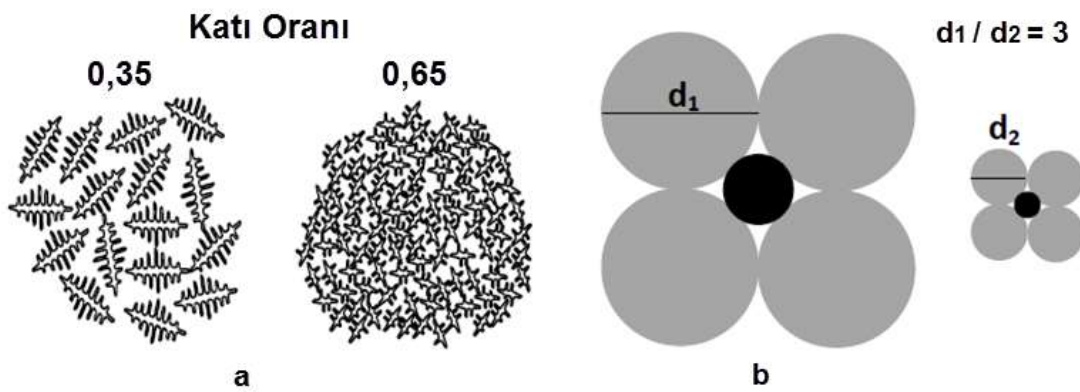
Şekil 2.14. Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları [57].

Yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda $TiAl_3$, TiB_2 ve AlB_2 parçacıklarının tane inceltmeye önemli etkileri olduğu ve performanslarının alaşımın kimyasal bileşimine ve ilave miktarına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. $TiAl_3$ intermetalik bileşiklerinin alüminyum içerisinde çözünürlüğü yüksektir ve mikro yapıda 30-40 μm büyüklüğünde bulunmaktadır. TiB_2 intermetalik bileşikler ise sıvı alüminyum içerisinde çözünürlüğü çok azdır ve mikro yapıda 1-2 μm büyüklüğünde bulunmaktadır [53,58]. Özellikle akışkanlığı artırmak için alüminyum alaşımlarında yaygınca kullanılan Si elementi hem $TiAl_3$ hem de TiB_2 ile reaksiyona girer. Böylece TiB_2 taneciklerinin yüzeylerinde oluşan Ti-Si bileşikler çekirdeklenme etkinliğine zarar verirken geciktirme işini üstlenen serbest Ti’de çözüldüğüden Ti-Si bileşikler olarak ayrılmak zorunda kalır [59-61]. Bu sebeple döküm alaşımlarında kullanılacak tane inceltici, silise rağmen etkin olabilmelidir. Ayrıca günümüzde özellikle alüminyum sektörü için hurdadan geri dönüşümle üretilen alüminyumda Ti içeriği yüksek olduğundan sadece AlB_3 master alaşımları ilavesi ile etkin tane inceltmenin

mümkün olmadığı ve TiB içeren mastır alaşımlarının kullanımının gerekli olduğu anlaşılmaktadır. Alaşımın dökümünde AlTiB ilavesi ile oluşan TiB₂ partiküllerinin en iyi çekirdekleyiciler olduğu ve düşük ilave oranlarında bile mükemmel tane inceltme sağladığı kabul edilmektedir. Al-Ti-B üçlü tane inceltici sistemlerinin en büyük avantajı, eriyik alüminyum sisteminde bulunan TiAl₃ partiküllerinin zamanla çözünmesini engellemek ve yine aynı anda eriyik içerisinde bulunan TiB₂ partiküllerinin topaklanma eğilimlerini en aza indirmektir [53]. Bu sebeple kullanılacak master alaşımı seçiminde kimyasal bileşim göz önüne alınarak uygun miktarda ilave ile başarılı sonuçlar alınabilecektir.

2.4.3. Tane inceltmenin besleme üzerine etkisi

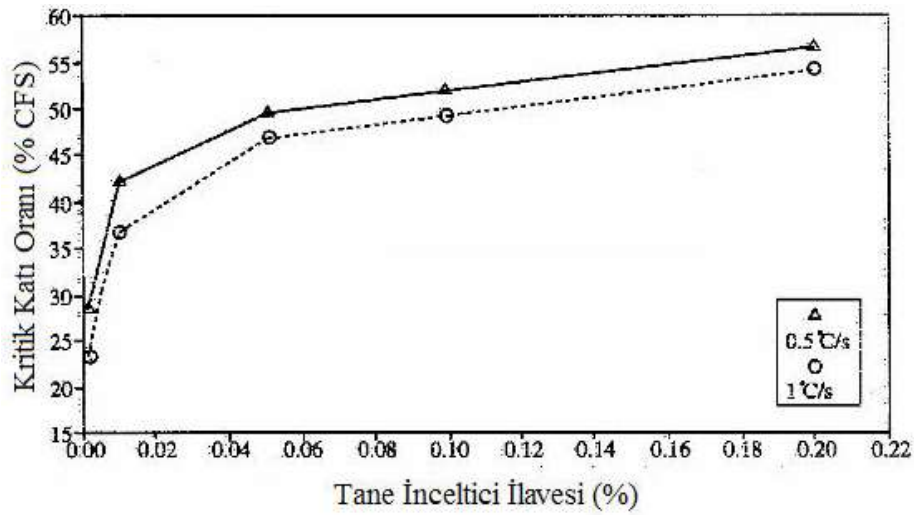
Tane inceltme işlemi ile birlikte dökümde oluşan ince taneli yapı sayesinde dentritlerin birbirleri ile kavuşması daha yüksek katı oranlarında gerçekleşir ve besleme süresi daha uzun olur. Kritik katı oranının yüksek olması döküm parçanın daha uzun süre beslenebileceği anlamına gelmektedir. İnce, eş eksenli ve homojen taneli bir yapıda kendilerine taneler arasında yer bulan gözeneklerin boyutları da tane boyutunun küçülmesine bağlı olarak küçülür ve dağılımları homojen hale gelir. Şekil 2.15’de tane boyutunun küçülmesi ile kritik katı oranının artması ve gözenek miktarının küçülmesi şematik olarak verilmiştir [33].



Şekil 2.15. Tane boyutuna bağlı kritik katı oranı değişimi, b) tane boyutunun küçülmesiyle gözenek boyutuyla ilişkisinin şematik görünüşü [33].

Tane inceltirilmiş dökümlerde maşı bölgesi boyunca beslenebilirliğin arttığı bilinmektedir [62]. Chai [63], yavaş hızda dönerek soğuyan silindirik bir dökümün

içine yerleştirdiği kanat ile katılaşma sürecinde büyüyen dendritlerin kanata uyguladığı yükteki değişimi ölçmüştür. Al-%4 Cu alaşımı ile yapılan bu ölçümlerin sonuçları Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tane inceltici ilavesine bağlı olarak dentrit blokajı (dendrite coherency) gecikmektedir. Tane inceltilmemiş bir dökümde dendrit blokajı yaklaşık %25 katı oranı seviyesinde iken %0,20 oranında tane inceltici ilave edilmiş dökümde bu oran %50 seviyesine çıkmaktadır. Şekil 2.16'da ayrıca soğuma hızının da dendrit blokajı üzerinde bir miktar etkisinin olduğu görülmektedir. Soğuma hızı 0,5 °C/s' den 1 °C/s ye çıktığında dentrit blokajı bir miktar erken başlamaktadır [63].



Şekil 2.16. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi [63].

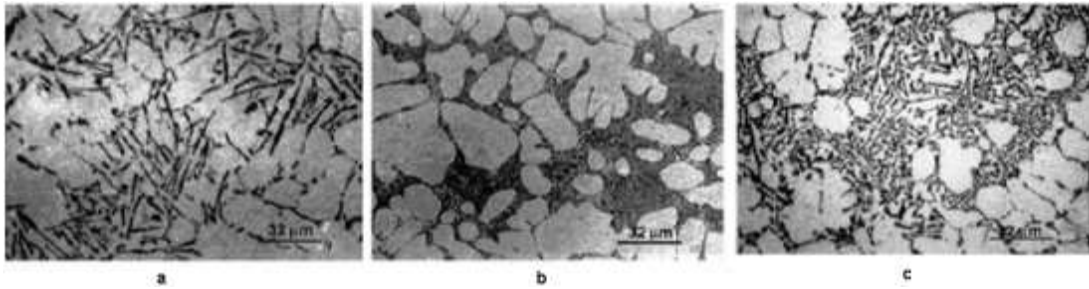
Tane inceltmenin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelendiği farklı bir çalışmada; ETİAL160 alüminyum döküm alaşımı ile yapılan kum dökümlerde besleme etkinliğinin, tane boyutunun küçülmesi ile arttığını ve buna bağlı olarak makro porozite oluşumunun azaldığını göstermiştir. İyi derecede tane inceltirilmiş bir dökümde dendrit blokajı sınırını belirleyen kritik katı oranı (CFS) %50 iken bu oran tane inceltilmemiş bir dökümde %35 olarak ölçülmüştür [64].

2.5. Alüminyum Alaşımlarının Modifikasyonu

Al-Si alaşımlarına Na, Sr, K, Rb, Cs, Li, Ca, Ba, Mg, La, P, Bi, Cd, Mn, Ni, Pb gibi alkali metallerin ilavesi ile yapı içerisindeki ötektik silisyum tanelerinin boyut ve dağılımlarının değişmesine modifikasyon denir. Modifikasyon işlemi element ilavesi

ile olabileceği gibi, hızlı katılaştırma, katılma esnasında uygulanan vibrasyon, yüksek basınç etkisiyle ve ısı işlem ile küreleştirme sonucu da olabilmektedir. Döküm yapısının modifiye edilmesi ötektik Si yapısının lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüşmüş olmasıdır [65-68].

Modifiye işlemi için en pratik ve yaygın uygulama, element ilavesi ile modifikasyon işlemidir ve en etkili modifikasyon Na, Sr ve Sb ile yapılabilmektedir [65,67]. Şekil 2.17’de Sr ve Sb ile modifiye işlemlerine ait mikroyapı resimleri verilmiştir. Ancak endüstriyel uygulamalarda yalnız Na ve Sr’ un düşük yoğunlukta güçlü etkileri vardır [67-69]. Na ve Sr başlangıç etkileri çok iyidir, ancak sodyumun oksidasyon ve buhar basıncı kayıplarından dolayı etkileri geçicidir. Ayrıca stronsiyumla modifiye edilen alaşımların yüzde uzama değeri ve dökülebilirlikleri sodyum ile modifiye edilen alaşımlardan daha yüksektir [67]. Yapılan bir çalışmada; Sr ilavesinin sadece Si kristallerinin ötektik dönüşüme etkileri dışında α - Al dentritlerinin yapısını da olumlu yönde değiştirdiği ve artan soğuma hızlarında etkinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir [70]. Stronsiyum ilavesi genelde %10 Sr içeren Al10Sr mastır alaşımları şeklinde sıvı alüminyuma katılmaktadır.



Şekil 2.17. a) Modifiye edilmemiş, b)Sr ile modifiye edilmiş, c) Sb ile modifiye edilmiş mikroyapı resimleri [69].

Modifiye edilmiş ve edilmemiş alaşımların katılmasında temel farklılıklar vardır. Bu farklılıklar ötektik silisyumun büyüme modundan kaynaklanmaktadır. Modifiye edilmemiş ve yavaş soğuma hızlarında silisyum levhalar şeklinde katılırken, modifikasyon ile silisyum, levhasal yapıdan çubuk yapıya dönüşür. Modifikasyon işlemi; ötektik içindeki silisyum kristallerinin büyümesini yavaşlatarak, silisyum-matris büyüme hızlarını dengeler ve bu şekilde ince lamelli yapı oluşturur. Modifiye edilmemiş alaşımlarda ötektik silisyum, önce alüminyum tarafından çekirdeklendirilir. Silisyum dentiritik şeklinde sürekli olarak ara yüzeyden

alüminyumun önünden sıvıya doğru ilerler. Fakat modifiye işlemi ile silisyum alüminyumun önünde büyümaz. Bu katılama şekilleri için, modifiye edilmemiş alaşımlarda içten dışa doğru, modifiye edilmiş alaşımlarda ise dıştan içe doğru katılama olduğunu belirtmiştir [66,72].

Al-Si yapılarında kaba şekilde bulanık ve kırılmayı kolaylaştıran silisyum plakaları, modifiye işlemi ile birlikte daha ince taneli ve yuvarlak hale gelir. Bu durum, alaşımanın mekanik özelliklerini, özellikle kopma uzamasını geliştirmektedir [65,73]. Örnek olarak T6 ısıt işlemi uygulanmış A356 alüminyum alaşımı, 179MPa akma dayanımı, 226 MPa çekme dayanımı ve %4,8 uzamaya sahip iken, Sr ile modifikasyon sonucu alaşıma ait akma dayanımı 207 MPa, çekme dayanımı 297 MPa ve uzaması da % 8 değerine ulaşmıştır [66].

Modifiye işleminin alaşımanın katılama şartlarına ve gözenek oluşumuna etkisinin araştırıldığı bir çalışmada ise modifiye edici ilave edilmemiş yapılarda oluşan gözeneklerin küçük, düzensiz ve dentritler arası bölgelerde salkımlı şekilde olduğu gözlenmiştir. Fakat modifiye işlemi uygulanmış yapıda gözeneklerin daha çok yuvarlak biçimli ve dentritler arası bölgelerde olduğu belirtilmiştir [74]. Ayrıca farklı bir çalışmada, Na ve Sr ileveleri ile porozite ve döküm kusurları üzerinde yararlı etki ortaya koyduğu tespit edilmiştir [75].

2.6. Döküm Simülasyon Programları

Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağılı olarak döküm proseslerinin modellenenebilmesi, döküm mikro ve makro yapılarının önemli ölçüde tahmin edilebilmesini döküm simülasyon programları sayesinde sağlamaktadır. Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Piyasada birçok döküm simülasyonu programı mevcuttur, MagmaSoft, SolidCast, ProCast, Pam-Quick Cast, Nova Flow&Solid ve Vulcan, Anycast, Cast Designer Döküm simülasyonları bunlar arasında yaygın olarak bilinen programlardır [76-81].

Döküm simülasyon programları; yeni bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımını kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bütün tasarım ve analizlerin bilgisayar ortamında yapılması ile model ve kalıp hazırlama ve boşuna hurda malzeme üretmeye gerek kalmaksızın dökümhane ortamında deneme-yanılma yapmayı ve gereksiz hurda döküm üretmeyi ortadan kaldırmaktadır. Simülasyon kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatla besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk-besleyici tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir. Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistem tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak yapılabilir. Tüm bunların hepsi çok kısa zamanda yapılabilir. Yani model, kalıp ve ilk döküm yapıldığında yüksek oranda başarı ve yüksek oranda verim elde edilir. Bu şekilde; gecikmesiz teslimat, tek seferde başarılı üretim ve döküm parça servis süresince daha yüksek kalite ve daha düşük maliyet sağlanabilir. Literatürde döküm simülasyon programlarıyla tasarımı yapılarak başarılı sonuçlar alınmış çalışmalar mevcut olup, simülasyon programlarından daha başarılı sonuçlar almak için araştırmalar devam etmektedir [76-81].

Döküm proses modellemesi için işlem basamaklarını; malzeme ve özelliklerinin seçimi, döküm ve kalıp modeli oluşturma, modelin tanelere ayrılması ve simülasyon yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi şeklinde sıralamak mümkündür. Sonuçları inceledikten sonra isteğe bağlı olarak veya gerekiyorsa revizyon ve tekrar simülasyon yapılabilir. Simülasyon, tekrarlanabilen bir işlem olduğundan istediğimiz parametreyi değiştirerek simülasyona devam edebiliriz ve optimum tasarımı kısa zamanda masrafsızca belirleyebiliriz [76-78].

2.6.1. Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler

Döküm simülasyon programlarında neredeyse bütün alaşımların dökümü modellenabilir ve dökümhane ortamındaki herşey birebir programda tanımlanabilir.

Başarılı sonuçlar elde edilmesindeki en önemli etken gerçek dökümhane şartlarının simülasyon programında tam ve doğru olarak girilmesine bağlıdır. Çünkü döküm ve katılaşma işlemi bu parametrelerden etkilenmektedir ve bunların modelleme esnasında eksik girilmesi yanlış sonuçlar verebilir [76-81]. Döküm simülasyon programları ile döküm simülasyon özelliğine bağlı olarak; kum kalıba döküm, kabuk kalıba döküm, kokil kalıba döküm, alçak basınçlı döküm, basınçlı döküm, hassas döküm, yarı-katı döküm, devirmeli döküm gibi yöntemlerde modelleme yapmak mümkündür.

2.6.2. Döküm simülasyon programlarıyla belirlenebilen özellikler

Modelleme sonucu döküm parça üzerinde neredeyse istenilen bütün özellikler belirlenebilir. Bunları sıralayacak olursak;

1. Kalıp dolumu esnasında sıvı metalin hızı, basıncı, yönü, türbilanslar, soğuk birleşme bölgeleri vb.,
2. Döküm parçanın katılaşma süresi,
3. Döküm parça üzerinde oluşan sıcak noktalar, beslenmesi gereken noktalar ve modülleri,
4. Besleyici yeri ve boyutları,
5. Parça üzerinde oluşan çekinti (makro porozite),
6. Niyama ve FCC gibi kriterlere göre mikroporozite tahmini, Döküm parça kesitleri üzerinde soğuma süresince sıcaklık-zaman analizleri,
7. Döküm parça kesitleri üzerinde katılaşma zamanı analizi,
8. Döküm parçanın herhangi bir bölgesindeki sertlik ve çekme mukavemeti değerleri,
9. Döküm mikroyapısı,
10. Döküm parça üzerinde oluşan gerilme (stres) analizi,
11. Sıcak yırtılma riski taşıyan bölgeler,
12. Segregasyon analizi,
13. Yönlendirilmiş katılaşma analizi,
14. Doldurma ve Katılaşma esnasındaki sıcaklık dağılımı,
15. Herhangi bir zamandaki sıvı faz, katı faz, kritik katı oranları,

16. Döküm parçada oluşan kritik katı oranına ve katıya bağlı sıcak nokta oluşumları,
17. Döküm parça hacim ve ağırlıkları,

olarak sıralanabilir ve bunlar aynı zamanda hareketli görüntü formatlı video olarak oluşturulabilir. Görüntü sayısı, görüntü hızı ve gösterilecek veri aralığı kontrol edilebilir. Bu videolar Windows'un standard AVI formatında kaydedilerek, bilgisayarlarda fazladan bir yazılım ya da donanım ihtiyacı duymadan izlenebilir [76-81].

2.6.3. Döküm simülasyon programlarının faydaları

Döküm simülasyon programlarının kullanım faydalarını genel olarak özetlemek gerekirse;

1. Döküm parça tasarımını; deneme yanılma yönteminde olduğu gibi, modeller, kalıplar hazırlamaya ve gereksiz hurda malzeme üretmeye gerek kalmadan bilgisayarda yapmaya olanak sağlaması,
2. Tasarım aşamasında, kaç tane ve hangi ebatta besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirilmesi gerektiğinin belirlenmesi,
3. Döküm için en uygun yolluk sisteminin seçilmesi,
4. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılaşma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonucun görüntülenmesi,
5. Simülasyon sonucu elde edilen sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilmesi,
6. Döküm parça tasarım süresinin kısalması ve tek seferde başarılı üretim,
7. Yüksek kaliteli ve düşük maliyetli parçalar üretmek,
8. Teslimat gecikmelerini önleyerek müşteri ilişkilerini iyileştirmek ve pazar payını geliştirmek,
9. Teknik personelin eğitimi (tasarım aşamasında muhtemel hataları bilgisayar üzerinde deneyerek gördüğünden her bir parçada yeni bir şeyler öğrenmektedir),
10. Döküm hatalarını henüz tasarım aşamasında görebilmek [76-81].

2.7. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Porozite Oluşumu

Alüminyum dökümlerinde başlıca problemlerden biri olan porozite oluşumu birçok dökümün hurdaya ayrılmasına neden olmaktadır. Döküm parça içerisinde gözle görülmeyen mikro porozite oluşumu da; mukavemet, süneklik, yüksek basınç altında sızdırmazlık gibi alaşımın mekanik özelliklerini azaltmakta ve alaşımın kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bu sebeple kaliteli bir döküm oluşturabilmek için makro ve mikro porozitenin mutlaka kontrol altına alınması gereklidir [82,83]. Döküm içerisinde gözenek oluşumu; katılaşma sırasında yetersiz besleme ve sıvı metal içerisinde çözünmüş olan gazlar sebebiyle oluşabilmektedir [84]. Sıvı metal içerisinde çözünmüş hidrojen oranı, ısı koşulları, sıvı metalin temizliği, sıvı metale uygulanan işlemler ve yanlış besleyici tasarımı porozite oluşumuna etki eden en önemli faktörlerdir [85].

Al-Si döküm alaşımlarının katılaşması sırasında termal parametrelerin gözenek oluşumuna etkisi bilinmektedir. Döküm simülasyon programlarında gözenek oluşumunu modellemek için termal parametrelere bağlı olarak bazı kriterler geliştirilmiştir. Bu kriter fonksiyonları çalışmaları yapan araştırmacıların isimlerinin baş harfleri ile aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

$$NUS = G.R^{0.5} \quad [86] \quad (2.2)$$

$$LCC = G.T_s^{2/3} \cdot v_s \quad [87] \quad (2.3)$$

$$KCC = G^{0.38} \cdot v_s^{1.62} \quad [88] \quad (2.4)$$

$$FCC = K.T_s^m \cdot v_s^n \quad [85] \quad (2.5)$$

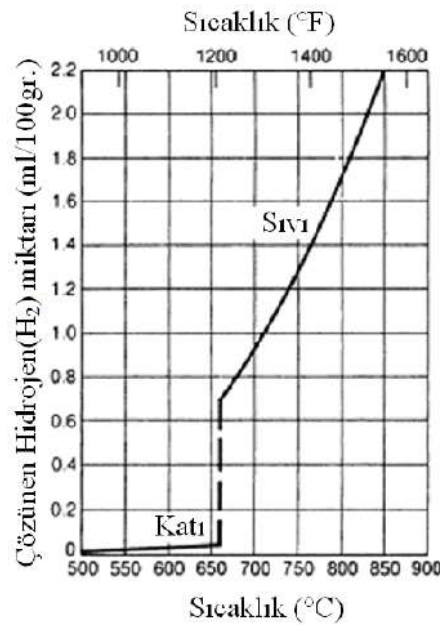
[G: Termal gradyan, R: Soğuma hızı, Ts: local katılaşma zamanı, v_s : local katılaşma hızı, NUS= Niyama, Uchida, Saito, LCC= Lee, Chang, Chieu, KCC= Kao, Chang, Chieu, FCC= Franco Chiesa]

2.7.1. Gaz porozitesi

Alüminyum alaşımlarının dökümünde sıvı ve katı halde çözünen hidrojen miktarının farklı olması ve kokil kalıp içerisinde dolumdan kaynaklanan hava boşlukları

sebebiyle gaz boşlukları oluşmaktadır. Ergitmede kullanılan şarj malzemesinden, ortamdaki nem ve yağlardan, kalıp malzemesi ve refrakter malzemenin tam kurutulmamış ve nemli olmasından, sıvı metale ilave edilen mastır alaşımlarının, fluksların ve uygulama aparatlarının nemli olmasından dolayı sıvı metalde hidrojen çözünmektedir [89-91]. Ayrıca alaşım ergitilmesi ve ergitilmiş sıvı metalin pota ve kalıplara aktarılması esnasında oluşabilecek türbülans atmosferdeki nemden hidrojenin emilimini hızlandırır [66].

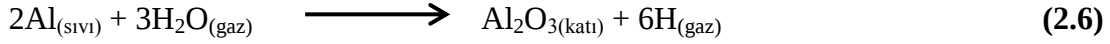
Alüminyum alaşımlarında önemli ölçüde çözünabilen tek gaz hidrojendir. 1 atm. basınç altında çözünen hidrojen miktarı her 100 gr metalde 0,69 ml iken katı alüminyumda çözünme miktarı ise 0,036 ml'dir. Şekil 2.18'de alüminyum içerisinde sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü verilmiştir [66].



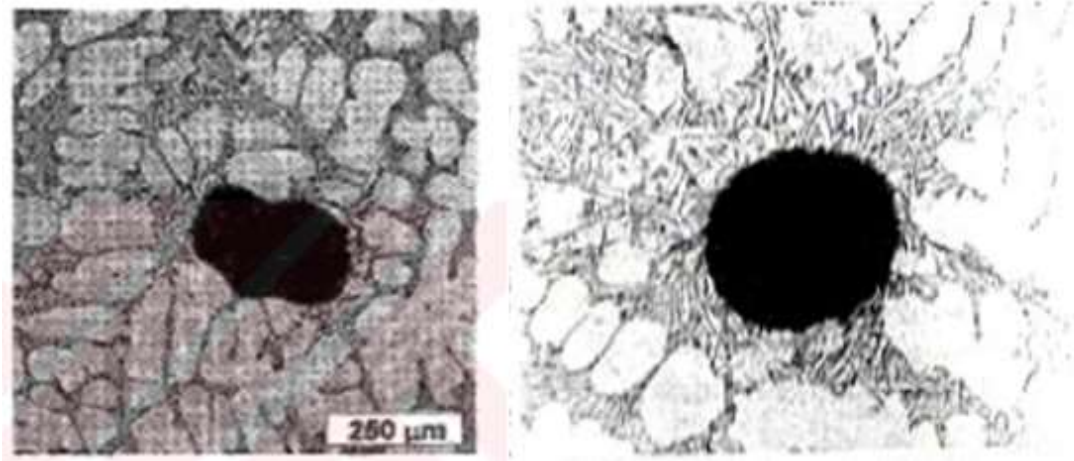
Şekil 2.18. Alüminyum alaşımları içerisinde sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü (1 atm. basınç altında) [66].

Hidrojenin alüminyumdaki çözünürlüğü sıcaklıkla ve basıncın karesiyle direkt olarak değişir, çözünürlük likidus eğrisi üzerindeki yükselen sıcaklıkla birlikte artar. Alüminyum içerisinde çözünen hidrojen miktarı Şekil 2.18'de görüldüğü gibi katı halde düşük çözünürlük değerlerine sahipken, katı-sıvı dönüşüm bölgesinde çözünürlüğün arttığı ve sıvı alüminyum içerisinde sıcaklık artışına bağlı olarak çözünürlük miktarının katı duruma nazaran hemen hemen 20 kat daha fazla olduğu anlaşılmaktadır [73]. Yapılan bir çalışmada gaz konsantrasyonunun en fazla katı-sıvı

dönüşümünde olduğu ve katılaşma oranına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir [94]. Sıvı ve katı halde çözünen hidrojen miktarının farklı olması, beraberinde çözünemeyen gazların yapıda kalması ile katılaşan metalde gaz boşlukları oluşmakta ve sıvı alüminyumda çözünen hidrojen miktarındaki artışa bağlı olarak artmaktadır. Alüminyum ve hidrojen arasındaki tepkime aşağıdaki verilmektedir [67, 90, 93, 94].



Eşitlikde verildiği gibi katılaşma sırasında çözünmemiş hidrojen gazı yapıda dentrit kolları arasında en son katılaşan bölgelerde boşluk olarak ortaya çıkar. Yapılan çalışmalarda gaz porozitesinin yapısının küresel şekle benzer biçimde düzenli bir görünüm sahip olduğu belirtilmiştir [95-96]. Şekil 2.19'da döküm iç yapısı içerisinde gaz porozitesine örnek bir resim verilmiştir.

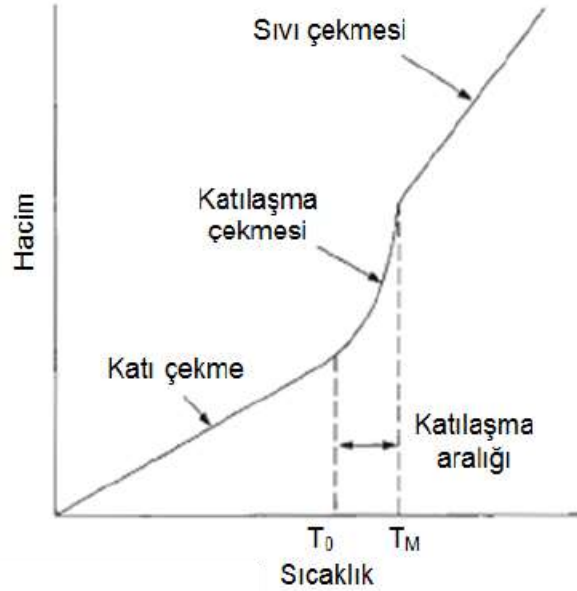


Şekil 2.19. Döküm yapısında gaz porozitesi görüntüsü [74,97].

2.7.2. Çekme porozitesi

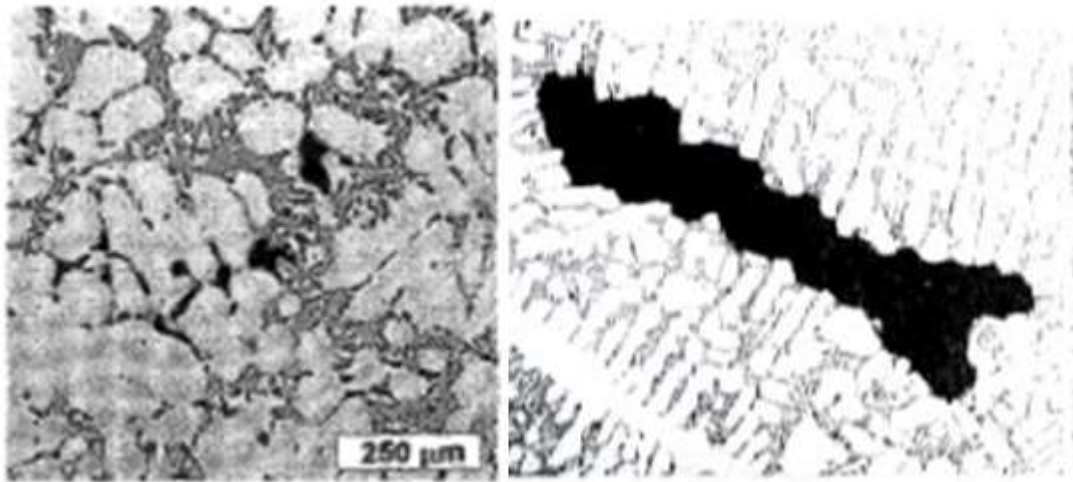
Alüminyum alaşımları, sıvı halden katı hale geçiş esnasında kimyasal bileşime bağlı olarak hacimsel olarak %3,5'den % 8,5'e varan oranlarda büzülürler [67]. Bu hacimsel daralmanın kalıplama tasarımında uygun yerlere gerekli ebatlarda konulan besleyicilerle tamamlanması gerekir. Hacimsel azalmanın yeterli şekilde besleyicilerle beslenememesi durumunda katılaşma sonrası yapı içerisinde çekme boşlukları meydana gelir. Çekinti porozitesi oluşumu üzerinde alaşımın katılaşma

aralığı da büyük öneme sahiptir. Şekil 2.20’de döküm sıcaklığından oda sıcaklığına kadar soğuyan alaşımın hacimsel değişimi örnek olarak verilmiştir [67,98].



Şekil 2.20. Sıvı metalin katılaşması esnasındaki hacimsel değişim ve çekme biçimlerinin gösterilmesi [99].

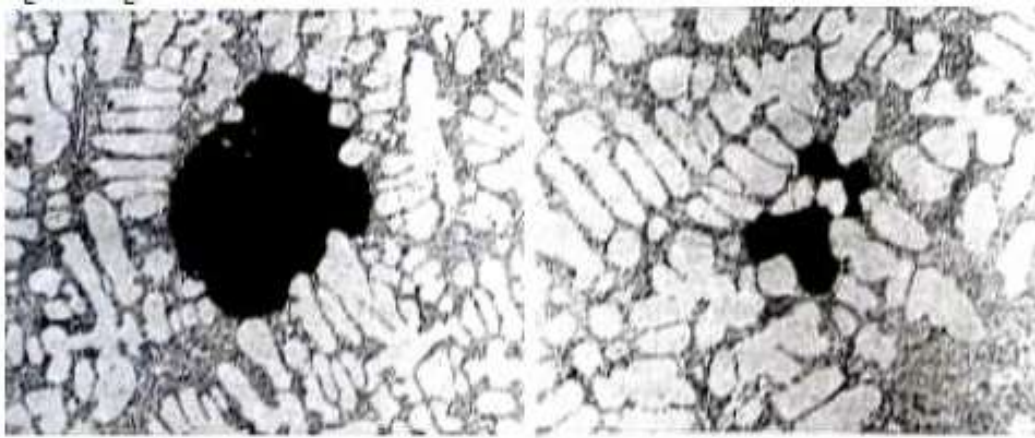
Çekinti boşlukları, dağılmış gözenek şeklinde, dentrit kolları arasında mikroboşluklar şeklinde, hücrelerin merkezinde uzantısal şekilde meydana gelebilir. Sıvı metalin temizlenmesi, tane inceltme ve modifikasyon işlemleri ile çekinti boşluklarının azaltıldığı bilinmektedir [66]. Yapılan çalışmalarda çekme porozitesinin biçiminin salkımlı ve düzensiz bir şekle sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır [97].



Şekil 2.21. Döküm yapısında çekinti porozitesi görüntüsü [74,97].

2.7.3. Gaz ve besleme yetersizliğinden kaynaklanan porozite

Gaz porozitesi ve çekinti porozitesi oluşumları ve etkileyen mekanizmalar bakımından birbirinden bağımsız olmakla birlikte, hidrojen kaynaklı gaz boşlukları ve hacimsel çekmenin beslenemediği durumlarda oluşan çekme boşlukları, yapı içerisinde birlikte de görülebilir. Genelde katılaşma esnasında dentrit kolları arasında gaz çekirdeklenmesi ve sonrada bu çekirdeklenmeye yetersiz beslemenin etkisi ile birleşik poroziteler ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda mikro porozite oluşumuna sıvı metal kalitesi ve dökümün bölgesel ısı özelliklerinin etkili olduğu bilinmektedir [66,83,85]. Şekil 2.22’de çekinti ve gaz kaynaklı porozitenin birlikte etkileşimi sonucu oluşan örnek mikroyapı resimleri verilmiştir.



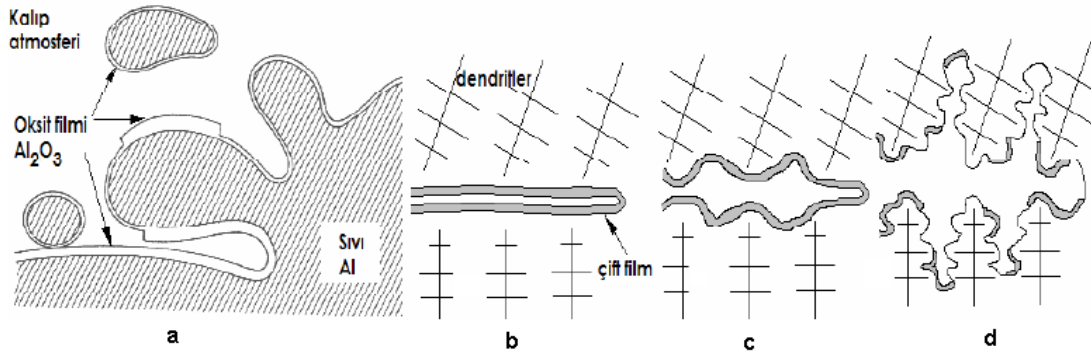
Şekil 2.22. Döküm yapısında gaz ve çekintinin birlikte görüldüğü porozite görüntüsü [73,97].

2.8. Alüminyum Alaşımlarında İnküzyon ve Çiftfilm (Bifilm) Yaklaşımları

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkisi bilinen inklüzyonlar; alaşımın likidüs sıcaklığı üzerinde bulunan herhangi dış kaynaklı katı veya sıvı faz şeklinde bulunan parçacıklardır. Ergiyik içerisinde ocak cürufu, temizleme flaks ve tuzları, oksitler, ergimemiş elementler şeklinde inklüzyonlar bulunabilir. Bu inklüzyonlar sıvı metal ergiyik içerisine şarj malzemesinden veya çeşitli operasyonlar sırasında girebilir [100,101]. Özellikle oksidasyona yüksek oranda meyilli olan alüminyum ve alaşımların dökümünde sıvı metal içinde kalan oksit filmler, başta sıvı metalin yüzeyinin atmosferdeki oksijen ile reaksiyona

girmesi ve kirlenmesinin sonucu, ergitme ve taşıma potası, refrakter malzeme ve kullanılan gereçlerin nemli olması sonucu ortaya çıkmaktadır [102-104].

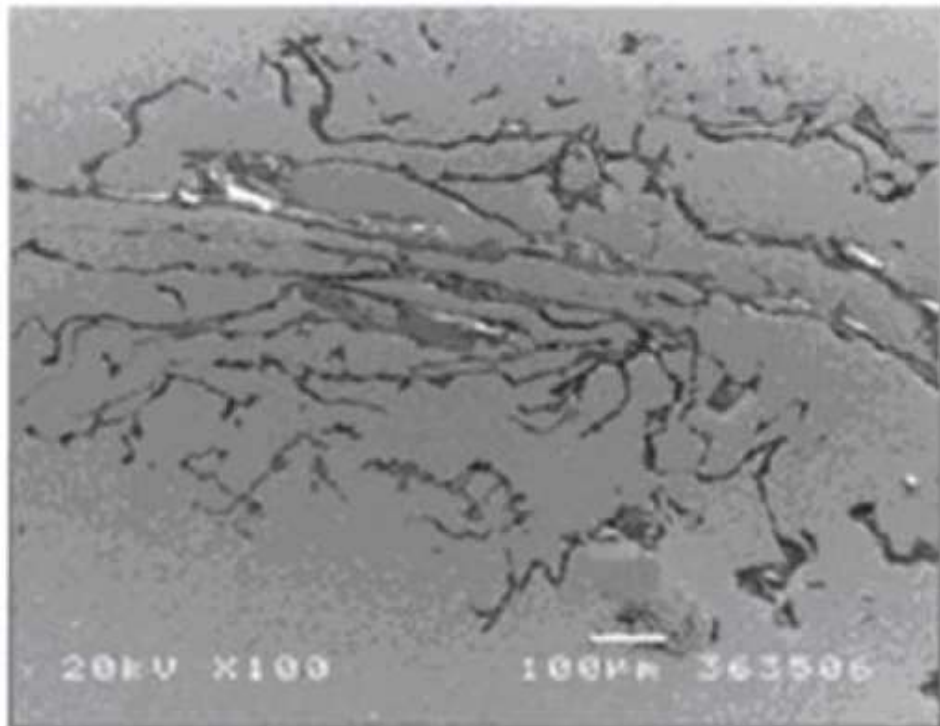
Ayrıca alüminyum alaşımlarının dökümünde yanlış yolluk tasarımı sonucu ve döküm kalıbın dolması sırasında oluşan türbülansın, sıvı alüminyumun atmosferle temasını artırarak oksitlenmeyi çoğalttığı ve oluşan oksitlerin, sıvı içerisine girmesine neden olduğu bilinmektedir [105-110]. Campbell yaptığı birçok çalışmada döküm içerisine giren oksit filmlerinin katlanması halinde bir birini ıslatmayan çift film (bifilm) tabakaları oluşturduğunu ve porozite çekirdeklenmesi ve büyümesinin ancak bu filmler arasında mümkün olabileceğini öne sürmektedir [109-112]. Campbell'in bifilm teorisi Şekil 2.23'de şematik olarak gösterilmiştir [109].



Şekil 2.23.a) Yüzey türbülansı ile çift film oluşum mekanizmasının şematik gösterimi, b) Çift film çevresinde dendritlerin oluşması, c) Çift film içersine hidrojen dolması ile yanlara açılma ve d) Oluşan porozitenin katılaşma süresince üç boyutlu büyümesi [109].

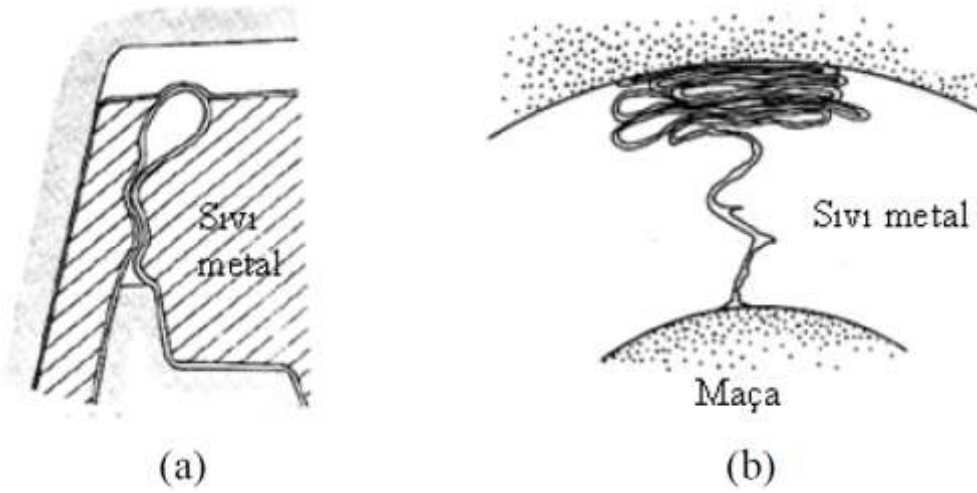
Sıvı halde iken alüminyum yüzeyinde oluşan oksit filmleri yüzeyden itibaren atom atom bağlanarak büyür ve alt tarafı, sıvı ile mükemmel atomik temas halinde olur. Ancak üst yüzeyi ise Al_2O_3 olarak kuru ve kristal halinde koruyucu bir tabakadır. Altında yer alan sıvı metalin daha ileri oksitlenmesini engeller ve bu film yüzeyde kaldığı sürece bir zarar teşkil etmez. Ancak problem, bu yüzeydeki ince oksit tabakasının parçalanıp, çeşitli sebeplerden dolayı döküm sırasında katlanarak, birbirlerini ıslatmayan ve kuru oksit yüzeyleri temas eden (edecek şekilde), bununla birlikte arasında bir miktar boşluk da içerecek şekilde sıvı metal içerisine dağılmaları ile başlar. Bu hatalar çiftfilm olarak adlandırılır ve katılaşma işlemi sonrasında mikroyapı içerisinde çatlak gibi görev görür [113].

Sıvı metal yüzeyinde oluşan oksit film tabakasının oluşumu; kimyasal bileşime, sıcaklığa, eritme ortamına ve zamana bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Oksit film kalınlığı, ergiyik metalin bulunduğu ortam sıcaklığı ve nemine bağlı olarak birkaç atom seviyesinde, yaklaşık 20 nanometredir [114]. Farklı alaşım elementi içeren alüminyum alaşımlarında oluşan oksit filmlerin reaksiyon zamanları ve mekanik dayanımları birbirlerinden farklıdır [98,115]. Ocak şarj malzemesi, döküm gereçleri ve eritme şartlarından kaynaklanan ve büyümeye fırsat bularak daha kalın oluşan oksitler yaşlı oksit filmleri olarak adlandırılırken, sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurması sırasında yüzey türbülansı ile oluşan oksit filmleri genç oksit filmleri olarak adlandırılmaktadır [115,116]. Şekil 2.24’de kalıp dolumu sırasında türbilans sonucu oluşan çift film tabakasına ait örnek bir SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.24. Döküm yapısında çiftfilm tabakalarının SEM görüntüsü [116].

Döküm yapısında görülen bir diğer oksit türü de; kalıp malzemesinin içerdiği nem ve kimyasal kalıp bağlayıcılarının sıvı metalle reaksiyonu sonucu ortaya çıkan gazlarla ortaya çıkmaktadır. Bu boşluklar, uygun olmayan yolluk tasarımı, kalıp ve sıvı metal sıcaklık farklarından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.25’de Campbell’in yaptığı çalışmalarda kalıp ve maça malzemesinden kaynaklanan oksit oluşumu şematik olarak verilmiştir [98].



Şekil 2.25. Sıvı metalin a) kalıp malzemesi ile, b) maça malzemesi ile reaksiyonu sonucu oksit oluşumu [98].

Döküm içerisinde oluşan inklüzyon, çiftfilm ve diğer oksitler döküm malzemenin başta çekme, uzama, yorulma gibi mekanik özellikler olmak üzere, işlenebilirlik, korozyon dirençleri, malzemenin sızdırmazlık özelliklerinde olumsuz etkilere sahiptir ve sıcak yırtılma riskini artırmaktadır [106,113,118,119]. Bu sebeple inklüzyon ve oksitlerin giderilmesi veya yapı içerisinde minimize edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple sıvı metal, temizleme gazları ile gaz giderme ve inklüzyonların filtre edilmesi gibi işlemlere tabi tutulur. Bu işlemlerin etkinliği döküm parçanın kalitesini belirler [100].

2.9. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Gaz Giderme

Ergiyik içindeki az miktarda bile olsalar inklüzyonlar, gözenek oluşumu için heterojen çekirdeklenme merkezleri sağladıklarından gözenek oluşumuna destek olurlar. Sıvı metal içerisindeki inklüzyonların kalıp içerisine girmesi ile birlikte, porozite oluşumu için gerekli kritik hidrojen konsantrasyonu miktarı düşmektedir [100]. Sıvı metalde porozite oluşturmak için gerekli aktivasyon bariyerini tahmin etmek amacıyla yapılan çalışmalarda, sıvı alüminyum içinde $10\text{\AA}$ çapında homojen bir porozitenin çekirdeklenmesi için 30.000 atm gibi çok yüksek basınç değerlerine ihtiyaç duyulduğu ancak, heterojen çekirdeklenme de bu değerin 1500 atm'e kadar düştüğü tespit edilmiştir [113]. Bu değerler bir dökümde ulaşamayacak kadar büyük değerlerdir. Döküm içerisindeki hidrojen, katıdaki düşük çözünürlüğünden dolayı katılaşma esnasında çözeltilen ayrılıp porozite oluşturmaya çalışacaktır. Ancak ne

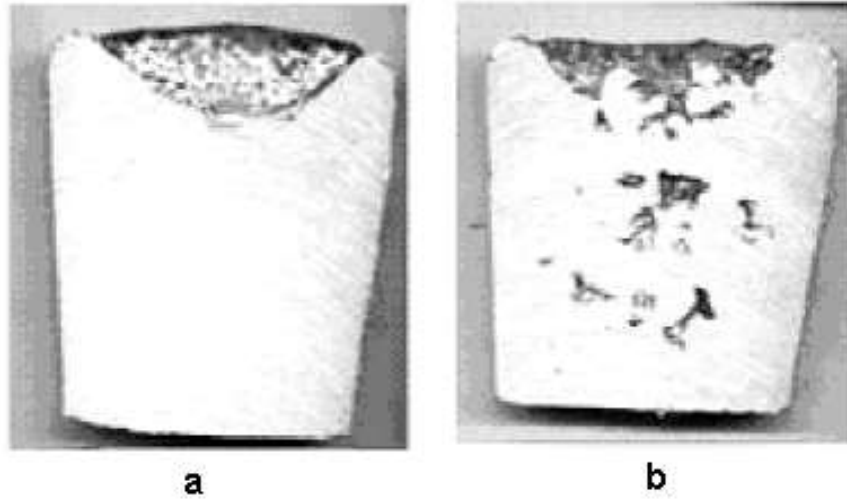
homojen ne de heterojen olarak çekirdekleşemeyeceğinden dolayı, ya aşırı doymuş olarak katı yapı içerisinde kalacak, ya da arasında zaten bir miktar boşluk içeren çift film ile karşılaştığında bu boşluk içerisine difüze olarak poroziteyi oluşturacaktır [118]. Yani porozite oluşumu aslında çekirdekleşme kademesi ile değil büyüme kademesi ile oluşacaktır. Yapı ve oluşum mekanizması itibariyle içerisinde zaten var olan hava ile ortamda bulunabilecek olan (sıvıda çözünmüş olan) hidrojenin bu boşluğa difüzyonu ile oluşan porozite, aslında tamamen büyüme kademesinden ibarettir. Hidrojen ise gerçek sebep değil, sadece yardımcı (veya itici) bir güçtür [113,118,119]. Aynı hidrojen miktarında, inklüzyon yoğunluğuna bağlı olarak değişen miktarlarda porozitenin oluşabileceğini gösteren bir çalışma bu bilgiyi doğrular niteliktedir [100]. Bu sebeple porozite oluşumunun önlenmesi için hem inklüzyonların hem de itici görev gören gazların sıvı metalden uzaklaştırılması döküm kalitesi için önem taşımaktadır [113].

Ticari alüminyum alaşımlarında gaz giderme için; flaks tablet kullanımı, gazla temizleme, vakumlu gaz giderme ve ultrasonik titreşim uygulama gibi yöntemler mevcuttur. Tablet kullanımı özellikle son senelerde çevreye zararlı etkilerinden dolayı çok sık kullanılmamaktadır. Yöntem sıvı metal içerisine daldırılan tabletin klor gazı çıkarması ve bu gazın hidrojenle birleşerek sıvı yüzeyine cüruf olarak çıkması esasına dayanmaktadır. Gaz giderme yönteminde ise azot, klor, SF₆ ve azot-freon, argon karışımı gibi bir soygaz yada gaz karışımının sıvı metal içerisine tatbik edilmesi ile yapılır. Dökümhanelerde pratik ve etkili sonuçlar vermesinden dolayı ve ekonomik nedenlerle yaygınca azot gazı ile temizleme yöntemi kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de oluşan gaz kabarcıklarının büyüklüğü, etkilediği yüzey alanı, pota derinliği, sıvı metal sıcaklığı gaz giderme işleminin başarısında etkilidir. Döküm sıcaklığının artmasına bağlı olarak sıvı metal içerisindeki hidrojen çözünürlüğünün artmasından dolayı sıvı metal sıcaklığının artırılmaması yada zorunlu olarak sıcaklığın arttırıldığı durumlarda daha uzun süre gaz giderme işlemi uygulanması önemlidir. Ayrıca sıvı metal içerisinde gaz giderme işleminde oluşan kabarcık büyüklüğünün 5 mm'den küçük olması verimlilik açısından önem taşımaktadır [100]. Gaz giderme işleminin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için son yıllarda geliştirilen döner tip gaz giderme cihazına ait bir görüntü Şekil 2.26'de verilmiştir.



Şekil 2.26. Döner tip rotary gaz giderme [120].

Sıvı metale uygulanan gaz giderme işlemini sonucu mevcut hidrojen durumu RPT (düşürülmüş basınç testi) yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Şekil 2.27’de sıvı azotla yıkanarak hidrojeni giderilmiş ve hidrojen giderme işlemi uygulanmamış numune örnekleri mevcuttur.



Şekil 2.27.a) Azot gazı ile yıkanmış, b) Azot gazı ile yıkanmamış Al alaşımının RPT test numunesi görüntüsü [110].

Campbell ve çalışma arkadaşları alüminyum dökümlerinde sıvı metal kalitesinin RPT tekniği ile ölçülerek bifilm indeksinin çıkarılması gerektiği konusunu önemle vurgulamışlardır. Bifilm indeksi, alüminyum alaşımlarının dökümünde, döküm öncesinde sıvı metal kalitesi hakkında bir sayısal değer verebilecek şekilde

tasarlanmış bir yöntemdir [118]. Bifilm indeksi belirlenmesinde; RPT test numunelerinde oluşan porozitelerin toplam uzunluğu belirlenerek dökümlerin birbiri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Bifilmelerin toplam uzunluğunun yanı sıra toplam bifilm sayısı da sıvı metal kalitesi ve temizliği hakkında fikir veren önemli bir parametredir [119].

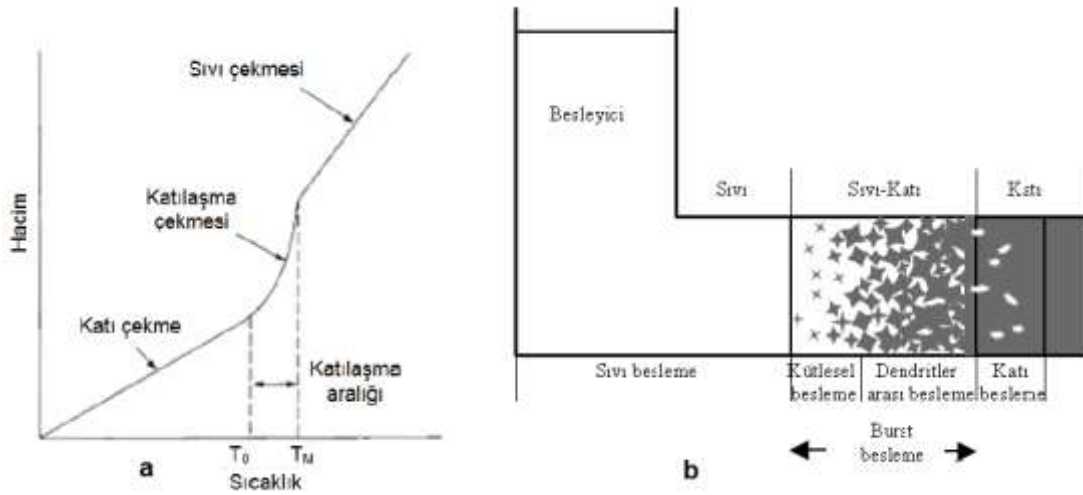
2.10. Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde İnküzyon Giderme

Döküm öncesinde sıvı alüminyum içerisinde inküzyonların bulunması üretimden kaynaklanan bir özelliktir. Herhangi bir işleme tabi tutulmamış ergiyikte inküzyon konsantrasyonu toplam hacmin % 0,005-0,02'si arasında değişebilmektedir[100]. Çok düşük seviyelerde bile ergiyik içinde çok sayıda inküzyon bulunabileceği gibi bunlar döküm özelliklerini olumsuz yönde etkilerler [100].

Döküm parça içindeki inküzyonları azaltmak için dibe çökeltme, sıvı metal içerisinde yüzdürme, uygun yolluk tasarımı, filtre kullanımı gibi çözüm yöntemleri mevcuttur. Ancak dibe çökeltme yöntemi 90-100 µm üstü, yüzdürme yöntemi de 30-40 µm altı inküzyonların giderilmesine yardımcı olduğundan sınırlı yöntemlerdir [101]. Ancak filtrasyon yöntemi ile inküzyonlar sıvı hareketi esnasında yüzey kuvvetleri nedeniyle filtre malzemesinde tutulurlar. Son yıllarda dökümhanelerde değişik ölçü ve şekillerde üretilen seramik köpük filtrelerin uygulanmaya başlamasıyla birçok problem başarılı filtrasyon sayesinde büyük ölçüde çözülmektedir. Seramik köpük filtre sıvı metalin türbülansını azaltma bakımından oldukça etkilidir ve eriyiğin kirlenmesine sebep olmaz [100-102].

2.11. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları

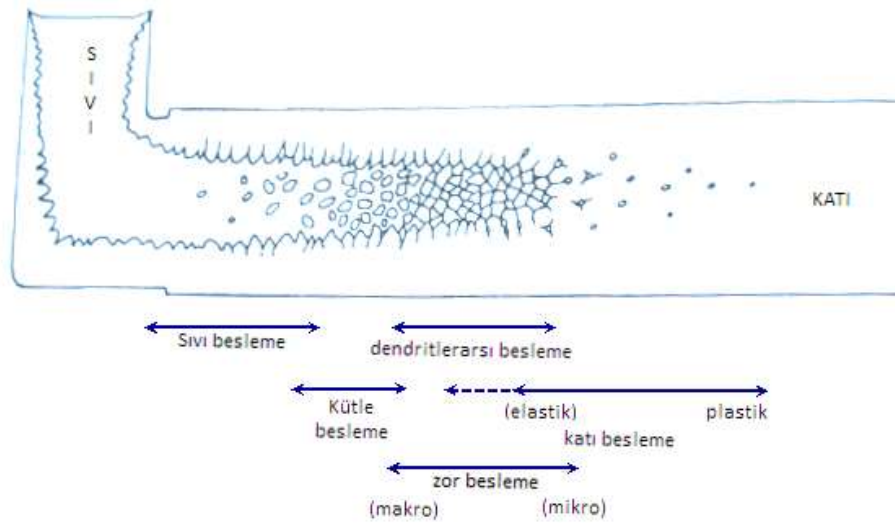
Sıvı metaller katılaşma esnasında özel birkaç metal ve alaşım hariç sürekli büzülecek şekilde hacim değişimine uğramaktadır. Hacimsel daralma, alaşımın katılaşması sırasında katı ve sıvı fazlarının yoğunluk farklarından kaynaklanmaktadır. Saf alüminyum, sıvı ve katı fazların yoğunluk farkından dolayı, sıvı hacminin yaklaşık %7 si kadar hacimsel daralma gösterir [98]. Şekil 2.28.a'da döküm sıcaklığından oda sıcaklığına kadar soğuyan alaşımın hacimsel değişimi görülmektedir.



Şekil 2.28. Sıvı fazdaki metalin, katılaşması esnasındaki üç farklı şekilde çekmesi; (a) sıvı, katılaşma ve katı çekmesi (b) katılaşma sırasında oluşan besleme mekanizmaları [98,99].

Bakır ve alüminyum temelli alaşımlarda termal iletkenliğin yüksek olması düşük termal gradyana neden olmakta ve özellikle geniş sıvı-katı aralığına sahip alaşımlarda katı bir kabuk oluşumu gecikmektedir. Bu gibi alaşımlarda döküm neredeyse katılaşmanın sonuna kadar sıvı ve sıvı içersinde oluşmuş olan katı dendritlerin bir arada bulunduğu yarı katı (maşi) durumunda soğumaktadır. Bu gibi alaşımlarda porozite veya yüzey çökmesi gibi kusurlardan arındırılmış bir döküm istenmesi halinde sıvının beslenmesi tamamen bu yarı katı ortamda dendritler arasından sağlanmak zorundadır [121]. Alaşımların katılaşması genellikle belirli bir aralıkta gerçekleşmekte ve katı-sıvı ara yüzeyi dendritik karakteristiğe bürünmektedir. Dendritik karakterli katı-sıvı aralığı (maşi bölgesi) soğuma gradyanına bağlı olarak genişlemekte ve neredeyse bazen dökümün tamamını kaplayabilmektedir [131].

Geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda sıkça görülen karakteristik besleme mekanizmaları Şekil 2.29'da şematik olarak gösterildiği gibi Campbell [86] tarafından açıklanmıştır. Sıvı besleme en açık ve en kolay olan besleme mekanizmasıdır ve genellikle diğer besleme mekanizmaları sıvı beslemeyi takip eder. Bu besleme mekanizması kabuk yaparak katılaşan veya ötektik katılaşan ortamlarda tek besleme mekanizmasıdır [74].



Şekil 2.29. Katılaşıp bir dökümde beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi [1].

Kütle besleme terimi sıvı ile birlikte bir miktar katı kütlenin de besleme sıvısına ile birlikte hareket ederek dendritler arası bölgede besleme yapmasıdır. Çekirdeklenme sıcaklığının altına düşmesi ile sıvı içerisinde katı dendritler çekirdeklenerek büyümeye başladığı sırada etrafından akan sıvı ile birlikte beslenen bölgeye hareket eder. Katı kristaller genellikle dendritik formda büyümeye devam ederken sıvı ile birlikte besleme bölgesine hareket etmeye devam ederler. Bu iki fazlı akış bulamaç (slurry) olarak tanımlanabilir ve katı dendritlerin iyice büyümesi ile besleme kanalını katı ve sağlam bir ağ ile tamamen kapatmasına kadar besleme aktivitesine katkıda bulunurlar. Dendrit blokajı tabir edilen kritik bir katı oranına erişildiğinde dendritler bir birine tutunarak rijit bir ağ oluşturur. Bu noktaya ulaşıldığında dendrit blokajı daha fazla kütle beslemeye izin vermez [1]. Bunun yerine beslenmesi gereken sıvı katılaşma çekmesini hala telafî edebilmek için dendrit örgüsü aralarından sızarak besleme aktivitesine bir süre daha devam eder. Düşük katı oranlarında dendrit örgüsünün geçirgenliği henüz yüksek olduğundan sıvı sızıntısına tamamen karşı koyamaz. Katı oranı giderek artarken dendrit örgüsü de giderek güçlenmektedir, ancak geçirgenlikte azalmaktadır. Bu noktada dendrit örgüsü daha fazla artan besleme sıvısı basıncına ve zorlamasına dayanamamakta ve sıvı dendrit örgüsünü kırarak zorlamalı olarak bir süre daha besleme bölgesine sızmaya devam etmektedir[1]. Campbell [62] bu noktada kritik katı oranının %68 civarında olduğunu bildirmiştir. Ancak, alaşımin türü, tane boyutu ve döküm şartları bu oran üzerinde önemli etkilere sahiptir. Büyüyen katı oranı ile birlikte dendrit örgüsü arasından sıvı

geçirgenliği giderek azalırken dendritler üzerindeki gerilmede giderek artmaktadır. Artan gerilme ile bazen dendrit örgüsü dağılmakta ve katı dendrit parçaları bir miktar sıvı beraberinde besleme bölgesine taşınabilmektedir.

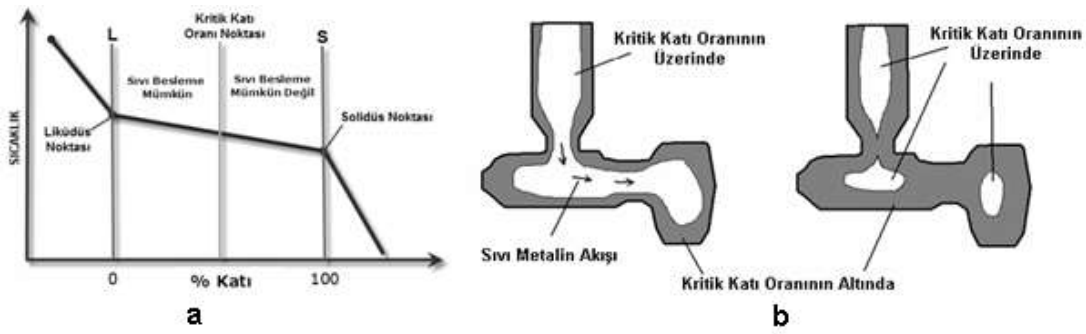
Katı besleme terimi besleme işleminin henüz katılaşmış ve yeterince güçlenmemiş katının deformasyonu ile oluşan bir beslemedir. Bununla birlikte besleme işleminin katı besleme mekanizmasına gerek duyulmadan diğer besleme mekanizmalarından birisi ile gerçekleşmesi daha çok istenen bir durumdur. Hatasız bir dökümün üretilebilmesi için katılaşma sırasında yeterli miktarda sıvı metalin sağlanabilmesi zorunludur. Eğer besleme metali yetersiz kalırsa dökümde makro ve mikroporozite, yüzey çökmesi gibi birçok kusur oluşabilir [122].

Bunların haricinde döküm malzemelerdeki bifilmelerden kaynaklanan boşlukların oluşmasında iki önemli mekanizma olduğu öne sürülmektedir. Bu durum yeterli ve yetersiz besleme olmak üzere iki kısımda ele alınmaktadır. Eğer yeterli besleme var ise bifilmin çevresindeki basınç, metalostatik basınç ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir ve bifilmin içine difüze olan gaz basıncı, sadece katılaşma oranı ile kontrol edilir. Yetersiz beslenme durumunda ise ortalama büyüme oranı, çekme (hacimsel daralma) ve kompozisyonun içerdiği hidrojen miktarı tarafından kontrol edilir. Çözünen gazların bifilm içine birikmesi difüzyon ile kontrol edilmektedir. Bu yüzden katılaşma oranının artmasıyla gözenek miktarı azalmaktadır. Döküm malzemedeki boşluğun olmaması bifilmelerin olmadığı anlamına gelmemektedir [123].

2.12. Yarı Katı Bölgede Kritik Katı Oranı

Alüminyum alaşımlarının katılaşması likidüs sıcaklığı ile solidüs sıcaklığı arasında, sıvı ve katı fazların bir arada görüldüğü bir katılaşma sıcaklık aralığında gerçekleşir [1]. Bu yarı katı bölgede, katılaşmanın ilerlemesiyle birlikte büyüyen dendrit kolları sebebiyle sıvı alaşımın viskozitesi artmakta ve sıvı akışı zorlanmaktadır, ancak halen besleme devam etmektedir. Katılaşmanın ilerlemesi ile dendrit ağları kurulur ve dendritler birbirlerine tutunarak sağlamlaşır [30]. Dendritler arası ara bölgelerden sıvı akışına karşı bir direnç oluşmaya başlar. Katılaşmanın daha da ilerlemesiyle, yarı katı bölgede katı oranının sıvının geçişine karşı koyacak bir orana ulaşmasıyla

besleme durur ve daha fazla sıvı akışına müsaade edilmez. Katılaşmanın ilerlemesiyle büyüyen dendritlerin sıvı akışına daha fazla müsaade etmediği bu noktaya kritik katı oranı denir [124]. Şekil 2.30'da örnek bir alaşımın soğuma eğrisi üzerinde kritik katı oranı gösterilmiştir. Kritik katı oranı değerine ulaşıncaya kadar parça üzerindeki çekinti besleyici tarafından karşılanabilmektedir ve besleme yolu açık olacağından parça üzerinde bir çekinti oluşmaz. Fakat kritik katı oranı değerinin altında besleme yolu tıkanır ve besleyicide parçayı beslemeye yetecek sıvı metal olsa bile sıvı akışı kesildiğinden döküm parça içinde beslenemeyen bölgeler oluşur. Böylece ürün hurdaya ayrılmak zorunda kalınır. Bu yüzden her bir parça için kritik kesitlerdeki kritik katı oranının belirlenmesi sağlam ve kaliteli parça üretimi için çok önemlidir [77].

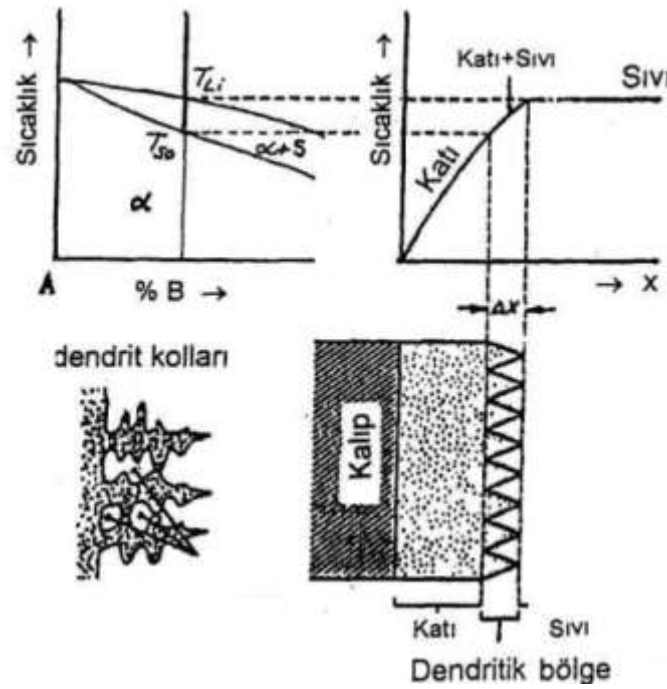


Şekil 2.30.a) Belirli bir alaşımın soğuma eğrisi üzerinde CFS noktasının gösterimi, b) Kritik Katı oranı değerine ulaşan metalin beslemesinin kesilmesi [77].

Kritik katı oranı değeri sadece alaşıma bağlı olarak değişen sabit bir değer değildir. Kritik katı oranı değeri değişim, alaşımın soğuma ve katılaşma koşullarından etkilenmektedir. Katılaşma sıcaklık aralığı dar olan alaşımlarda katılaşması esnasında oluşacak dendritlerin boyu daha kısa olacağından, kritik katı oranı değerlerinin yüksek çıkması yani daha uzun süre parçanın dendrit blokajına maruz kalmadan beslenmesinin mümkün olması anlamına gelmektedir [125].

Benzer şekilde katılaşma sıcaklık aralığı daha geniş olan alaşımlarda dendritlerin oluşumu ve büyümesi için zaman bulabileceğinden, daha az katı oranı seviyelerinde sıvı akışı zorlanacak, besleme kesilecektir. Şekil 2.31'de alaşımların katılaşma esnasında, katılaşma sıcaklık aralığı ile dendrit oluşumu arasındaki ilişki şematik olarak verilmiştir. Ayrıca farklı katılaşma sıcaklık aralıklarına sahip alaşımlar

üzerine yapılan bir çalışmada dar katılaşma sıcaklık aralığına sahip alaşımlarda çekme boşluklarının iç kesitlerde, geniş katılaşma sıcaklık aralığına sahip alaşımlarda ise çekme boşluklarının yüzeyde yani dış kısımlarda olduğu gözlenmiştir[126].



Şekil 2.31. Alaşımlarda katılaşma cephesi [29].

Katılaşma mekanizması ve kritik katı oranı değerini etkileyen faktörlerin başlıcalarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [30,64];

1. Döküm alaşımının katılaşma aralığı
2. Kalıp malzemesinin termal iletkenlik katsayısı
3. Döküm alaşımının termal iletkenlik katsayısı
4. Katılaşma sıcaklık derecesi
5. Soğuma hızı

2.12.1. Yarı katı bölgede beslemenin simülasyon programları ile modellenmesi

Döküm simülasyon programları ile bilgisayar ortamında kalıplama tasarımı ve modelleme yapılarak tek seferde sağlam döküm üretmek mümkündür. Ancak başarılı olabilmek için dökümhane ortamındaki gerçek döküm sınır şartlarının bilgisayar

programında doğru ve eksiksiz girilmesi gerekmektedir. Bilgisayar programı kullanıcının tanımlayacağı sınır şartlarına ve malzeme özelliklerine göre hesaplama yapmaktadır. Dolayısıyla yanlış veriler girerek doğru sonuçlar alınması mümkün olmayacaktır [77,80].

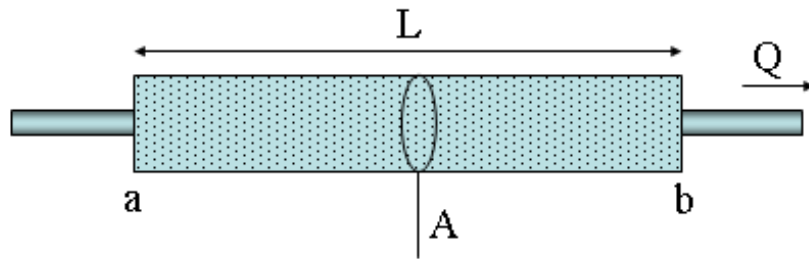
Dökümlerin katılaşması esnasında simülasyon programında etkili olan ve doğru girilmesi gereken sınır şartlarından bazıları; katılaşma hızı, sıcaklık gradyanı, ısıtının döküm-kalıp ara yüzeyindeki transfer hızı, kalıp malzemesinin ısı özellikleri, döküm sıcaklığı, alaşımın çekme oranı, sıvı metalin kalıbı doldurma süresi, katı-sıvı aralığında beslemenin devam edebileceği kritik katı oranı değeridir. Kritik katı oranı değeri dökümlerin katılaşması esnasında besleme üzerinde önemli faktörlerden biridir.

Kritik katı oranı değeri koşullara göre değişkenlik gösterdiğinden net olarak tanımlanması oldukça zordur. SolidCast döküm simülasyon programında CFS-Critical Fraction of Solid (KKO-Kritik Katı Oranı) olarak tanımlanan bu değer 0 ile 100 arasında kullanıcı tarafından tanımlanması gereken bir değer olarak yer almaktadır. Örneğin genel bir uygulama olarak alüminyum alaşımları için programda ortalama %30 değeri kullanılmaktadır. Ancak değişen şartlara göre KKO değerleri gerçekte daha yüksek olabilmektedir. Olması gerekenden daha düşük KKO değerleri girildiğinde gerçekte sağlam çıkan bir tasarım, bilgisayar modelleme sonuçlarında hatalı görülebilecektir. Aksi durumda olması gerekenden daha yüksek KKO değeri girildiğinde bilgisayar üzerinde sağlam çıkan parça gerçekte hatalı çıkabilecektir. Bu yüzden özellikle dökümün kritik bölgeleri için geçerli olacak KKO değerlerinin doğru bir şekilde bilinmesi döküm-katılaştırma modellemelerinin doğruluğu açısından oldukça önemlidir.

Besleme yetersizliğinden kaynaklanan çekinti boşluklarının en önemli nedenlerinden biri yarı katı bölge dentritler arasındaki sıvı hareketleridir. Bu nedenle modelleme çalışmalarında yarı katı bölge özelliklerini hesaba katmak gereklidir. Darcy kanunu bu hesaplamalar için gerekli yaklaşımlardan biridir.

2.12.2. Darcy kanunu

Darcy kanunu bir sıvının gözenekli bir ortamda özgül debisi ile laminar akım koşullarındaki hidrolik eğim arasındaki oransallığı ifade eden yasadır. Bu yasa gözenekli ortamdaki laminar akımlar için geçerlidir [127]. Dendrit kristalleri arasındaki sıvı akımı da Darcy kanunuyla açıklanır. Bu kanuna göre dendritler arası sıvı metal hızı; ortamın geçirgenliğine, oluşan basınç gradyanına, yerçekimine, sıvının viskozitesine ve ortamdaki sıvının faz yüzdesine bağlıdır [128]. Darcy kanunu gözenekli bir ortamdan birim zamanda geçen akışkan miktarını verilen mesafe boyunca oluşan basınç düşmesi ve akışkanın viskozitesi ile doğrusal bir ilişki ile açıklamaktadır [129]. Şekil 2.32’de Darcy kanununda tanımlanan gözenekli ortamda sıvı akışın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.32. Darcy Kanunda tanımlanan gözenekli ortamda sıvı akışın şematik gösterimi [127].

Genellikle yarı-katı (maşi) bölgede sıvı akışını modellemek için kullanılan Darcy Kanununun denklemsel ifadesi aşağıda verilmiştir. Formüldeki negatif işaret akışkanın yüksek basınçtan düşük basınca doğru akması için gereklidir. Eğer ortamda basınç değişimi negatif yönde ise ($P_a > P_b$ ise), a-b doğrultusunda bir akış gerçekleşecektir.

$$Q = \frac{-KA}{\mu} \frac{(P_b - P_a)}{L} \quad [127] \quad (2.7)$$

Q = Belirli bir zamanda toplam akış oranı (m^3 / sn)

K = gözenekli ortamın geçirgenliği (m^2)

A = Akış kanallarının toplam kesit alanı (m^2)

P_a = A noktasındaki basınç (Pa)

P_b = B noktasındaki basınç (Pa)

L = mesafe (m)

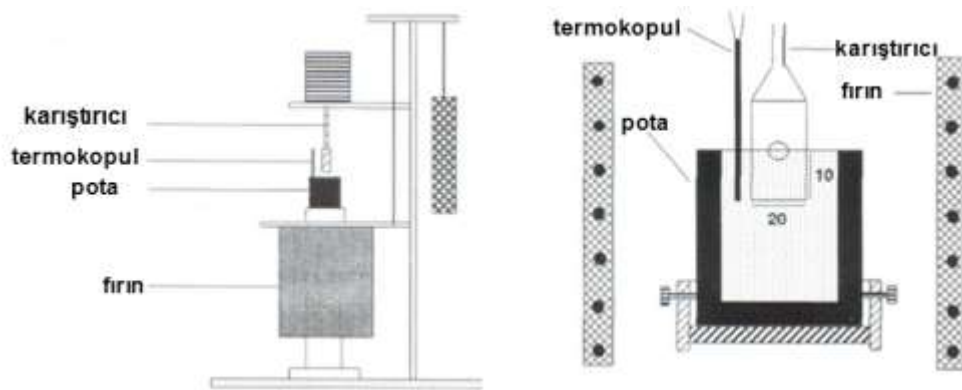
μ = Akışkan vizkositesi (Pa.sn)

Darcy Kanununu esas alınıp revizyonlar yapılarak döküm modellemelerinde de kullanılan bir çok çalışma mevcuttur [130-132]. Bu çalışmalardan birinde, dendritik katılaşılan alaşımlarda maşi bölgede geçirgenlik gradyanını esas alan bir sıvı akış modeli sunulmuştur. Darcy denkleminin uyarlanan ‘Geçirgenlik Gradyanı’ modeline göre yarı katı bölgede dendritler arası sıvının akışını belirlenebilmektedir [130]. Bu modelden elde edilen sonuçlara göre yarı-katı bölgede geçirgenliğin büyük ölçüde sıvı hacim oranına ve dendrit kol mesafesine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir [130]. Darcy denkleminin modifiye edilerek yapılan farklı bir çalışmada porozite modeli oluşturularak makro ve mikro gözenek oluşumunda gaz difüzyonunu etkisini de hesaba katılmıştır [133].

2.12.3. Kritik katı oranının belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar

Çekinti kaynaklı gözenek oluşumunun döküm simülasyon programlarıyla belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde parça üzerinde oluşacak makro gözenek yerlerinin etkili bir şekilde belirlenebildiği, ancak hata boyutlarının ve mikro gözenek tahmininin oldukça zor olduğu gözlenmiştir [80]. Bu sonuçlar modelleme süreçlerinde henüz tam olarak hesaba katılamayan bazı etkenlerin var olduğunun bir göstergesidir [80]. Bu etkenlerden en önemlilerinden birisi, yarı katı bölgede sıvı akış davranışlarının farklı şartlara göre sınır şartlarının belirlenmesidir [64]. Yarı katı bölge geçirgenliğini etkileyen şartlardan bazıları; alaşım çeşidi, bileşimi, katılaşma aralığı, tane boyutu, sıvı metal kalitesi, döküm mikroyapısı, modifiye edici ilavesi, soğuma hızı ve katılaşma şartlarına bağlı ısıl faktörler olarak sıralamak mümkündür. Bu nedenle, döküm modelleme çalışmalarında yarı-katı bölge özelliklerini etkileyen bu parametreleri hesaba katmak gerekmektedir. Kritik katı oranı üzerine etki eden parametrelerin incelendiği çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

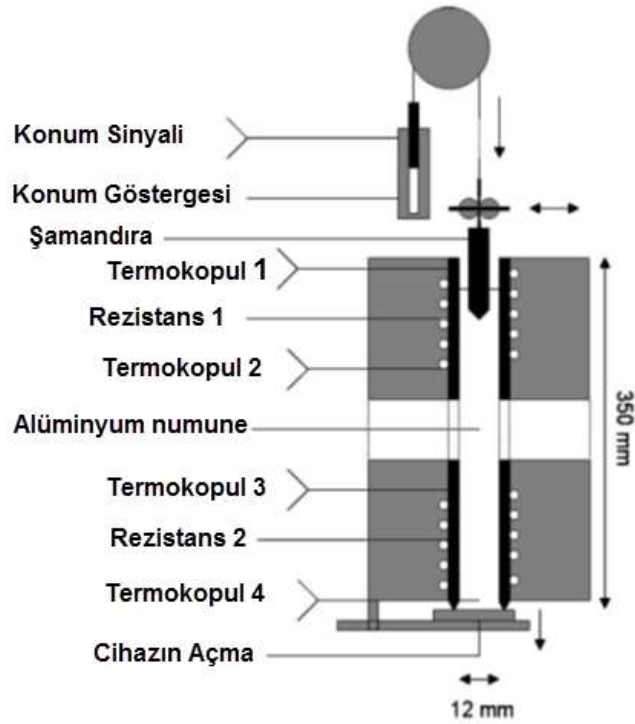
Alüminyum alaşımlarının katılaşmasında yarı-katı bölgedeki geçirgenlik sınır değerini ölçmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Arnberg ve arkadaşları tarafından alüminyum alaşımlarında yarı katı bölge geçirgenlik katsayılarının belirlenmesi üzerine tork yöntemiyle yapılan çalışmalar Amerikan Dökümcüler Birliği (AFS) tarafından yayınlanan bir kitapta [134] toplanmıştır. Tork yönteminde Şekil 2.33’de verilen deneysel düzenek resminde de görüldüğü gibi kontrollü olarak soğutulan döküm içerisine yerleştirilen kanatın dönmesine katılaşmanın ilerlemesiyle uygulanan kuvvetin ölçümü esasına dayanmaktadır.



Şekil 2.33. Tork ölçüm tekniği deneysel düzeneğinin şematik görünümü [134].

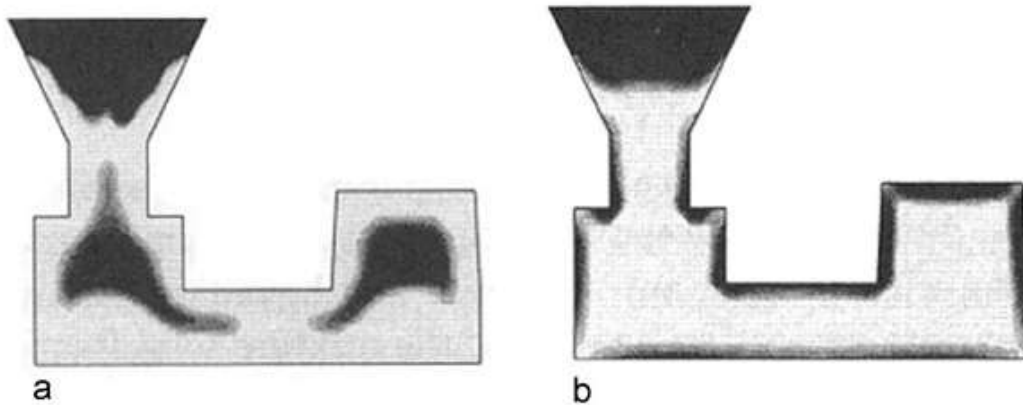
Tork ölçüm yöntemi ile yarı katı bölgenin direncini ölçmeye yönelik olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar çoğunlukla alüminyum alaşımlarının yarı katı şekillendirilmesine yönelik döküm prosesleri için kullanışlıdır. Ancak normal döküm-katılaştırma deneylerinde ve döküm modelleme çalışmalarında bu verilerin kullanımı oldukça sınırlıdır.

Nielsen ve Olsen [135] Şekil 2.34’de şematik olarak verilen bir düzenek ile alüminyum alaşımları üzerinde beslenebilirlik ve geçirgenlik değerlerini ölçmeye yönelik deneyler yapmışlardır. Bu çalışmadan alınan sonuçlar modifiye edilmemiş AlSi7Mg (A356) ve AlSi10Mg alaşımlarında dendritik büyüme süresince beslemenin devam ettiğini fakat Al-Si ötektik reaksiyon başlar başlamaz bittiğini göstermiştir. Aynı alaşımlarda Sr ilavesi ile ötektik modifikasyon uygulandığında ötektik reaksiyon başlasa bile interdendritik beslemenin bir süre daha devam edebildiği ifade edilmiştir.



Şekil 2.34. Yarı-katı bölgede sıvı geçirgenliğini ölçmek amacı ile geliştirilen bir düzeneğin şematığı [135].

Farklı bir çalışmada, dar ve geniş katılaşma aralığı gösteren alaşımların katılaşma davranışlarını incelemek üzere Reis ve Houbaert [126] deneyler yapmışlardır. Çalışmalarda dar katılaşma aralığına sahip alaşımlarda çekme boşluklarının iç kesitlerde oluştuğunu belirtmişlerdir. Geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda ise çekme boşluklarının yüzey çekmeleri şeklinde dökümlerin dış kısımlarında oluştuğu rapor edilmiştir. Şekil 2.35’de çalışmadan alınan çekinti oluşumu x-ray düzlemi görünüşleri verilmiştir.



Şekil 2.35.a) Dar katılaşma aralığına sahip alaşımda açık huni tip ve kapalı çekintiler ve b. geniş katılaşma aralık sahip bir alaşımda sadece yüzey çökmesi (surface sink) şeklinde çekinti oluşumu x-ray düzlemindeki görünüşleri [126].

Termal analiz ve sürekli tork ölçümü metodu kullanarak alüminyum alaşımlarının KKO değeri için teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda KKO değeri, alaşım sistemi ve alaşım içerisindeki çözünen içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. KKO, dentrit büyüme hızı V_a ve çekirdeklenme hızı (tane boyutu d) arasındaki rekabete bağlıdır. Yapılan çalışmada; KKO değerinin, d / V_a oranı ile orantılı olduğu ve katılaşma esnasında KKO noktasına ulaşılması ile tanelerin oluşup, beslemenin sona erdiği belirtilmiştir [136].

A319 ve A356 alaşımları için termokopul yöntemi ile KKO değerleri belirlenmesi için yapılan bir çalışmada diğer ısıt yöntemlerle belirlenen değerlerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [137]. Ancak bazı çalışmalarda termal analiz yönteminin alaşım içerisindeki elementlerin çözünürlük oranından etkilendiği bu sebeple uyumsuz sonuçlar sergilediği belirtilmiştir [138].

Emadi ve Whiting tarafından yapılan bir çalışmada farklı Si içeriğine sahip Al-Si alaşımlarının 0,3 ve 3,5 °C/sn soğuma hızlarında kritik katı oranları incelenmiştir. Gizli ısı ve katı oranları Fourier ve Newton yöntemleri ile hesaplanan değerler termal yöntemlerle uyumlu değerler vermiştir. Ayrıca Si içeriği ve soğutma hızına bağlı olarak dentritler arası kol mesafesi tane boyutu ve buna bağlı olarak kritik katı oranı değerlerinin değiştiği rapor edilmiştir [139]. Soğutma hızının A319 alüminyum alaşımının katı oranı üzerine etkisinin incelendiği farklı bir çalışmada soğutma hızının artmasının kritik katı oranını artırdığı ve böylece beslemenin daha uzun süre devam ettiği gözlenmiştir [140]. A356 alaşımlı levha dökümlerde besleme verimliliği üzerinde kalıp sıcaklıklarının etkisi besleyici boyutu değişikliklere dayalı bir deneyde araştırılmıştır. Porozite içeriği, termal gradyan, G / R^2 (R =soğuma hızı) ve G / t (t =katılaşma zamanı) olarak iki farklı bantta incelenmiştir. Kum kalıp sıcaklığının 298 °K'den 353 °K'e yükseltilmesi gözenekliliğin azaltılması üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [88].

Sakarya üniversitesinde yapılan çalışmalarda kuma dökülen Etial 110, Etial 160 ve Etial 177 alüminyum döküm alaşımının katılaşması sırasında hacimsel küçülmeye bağlı çekme ile oluşan makro ve mikro porozitenin modellenmesi SOLIDCast döküm simülasyon yazılımı kullanılarak incelenmiştir [30,141-142]. Alaşımlar

ergitildikten sonra makro ve mikro porozite oluşturmak üzere özel olarak hazırlanan kum kalıplara dökülmüştür. Katılaşıp ve soğuyan dökümlerin iç kesitlerinde oluşan makro ve mikro porozite değerleri ölçülerek döküm simülasyon programında, aynı şartlarda modellenen dökümlerden ölçülen porozite değerleri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon modellemeleri için programa girilen soğuma eğrileri gerçek dökümlerin katılaşması sırasında ölçülen zaman-sıcaklık değerleri ile tanımlanmış ve böylece gerçek dökümler ile modellenen dökümler arasında bire birlik sağlanmıştır [30,141-142]. Porozite oluşumunun modellenmesi sırasında sıvı-katı bölgesinin (maşi bölgesi) geçirgenlik sınırını tanımlayabilmek açısından dökümlerde ve modellemelerde hiç tane inceltilmemiş ve çok iyi tane inceltilmiş dökümler kullanılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, kullanılan alaşımların dökümünün simülasyon programında modellenmesi ile elde edilen porozite dağılımı ile kuma dökülen gerçek dökümlerden ölçülen porozite dağılımı arasında bire bir benzerlik bulunduğunu göstermiştir [30,141-142]. Sonuçlar ayrıca dökümlerin bilgisayar modellemelerinde en önemli sınır şartlarından birisi olan ve “kritik katı oranı” olarak tanımlanan maşi bölgesi geçirgenlik sınırının tane inceltme uygulanmış dökümlerde hiç tane inceltilmemiş dökümlere göre daha yüksek olduğunu ve besleme süresinin buna bağlı olarak uzadığını göstermiştir. Kuma döküm çalışmalarından sonuçların sayısal değerleri Tablo 2.5’de verilmektedir[30,141-142].

Tablo 2.5. Bazı alüminyum alaşımlarında kuma döküm tekniği ile ölçülen maşi bölgesi besleme sınırı (Kritik Katı Oranı) değerleri [30,141-142].

Alaşım	Ölçülen Kritik Katı Oranı (KKO) Değeri (%)	
	Tane İnceltilmemiş	AlTiB ilavesi ile Tane inceltilmiş
Etial 110	33	57
Etial 160	34	52
Etial 177	35	50

Gazi Üniversitesi’nde yürütülen benzer bir yüksek lisans tezi çalışmasında [143] ise alüminyum alaşımlarının dökümünde kritik katı oranı (KKO) faktörünün katılaşma hızına bağlı olarak modellenmesi konusu özel geliştirilen bir kokil kalıp kullanılarak deneysel ve modelleme teknikleri ile çalışılmıştır. Etial 220 alaşımı kullanılan dökümlerde tane inceltmesiz alaşımlar ve AlTiB ilavesi ile tane inceltilmiş alaşımlar

kullanılmıştır. Kokil kalıbın dökümlerden önce ön sıcaklıkları 100-155 ve 210°C'ye ayarlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, tane inceltmesiz dökümler için 100°C, 155°C ve 210°C kalıp sıcaklığında sırasıyla 2,30 cm³, 1,46 cm³ ve 1,16 cm³ makro çekme boşluğu oluştuğunu göstermiştir. Bu boşluk değerleri için sırasıyla KKO değerleri %30, %40 ve %55 olarak tespit edilmiştir. AlTiB ilavesi ile tane inceltilmiş dökümler için 100°C, 155°C ve 210°C kalıp sıcaklığında sırasıyla 1,70 cm³, 1,25 cm³ ve 0,94 cm³ makro çekme boşluğu elde edilmiş ve bu boşluk değerleri için sırasıyla KKO değerleri %45, %52 ve %65 olarak tespit ölçülmüştür. Bu çalışmalar maşi bölgesinde besleme için gerekli olan minimum kritik katı oranı hakkında bazı sayısal bilgiler vermekle birlikte problemin sadece tane boyutuna göre incelenemeyeceği ve başka faktörlerinde hesaba katılması gerektiği anlaşılmaktadır.

2.13. Taguchi Yöntemi ile Deneysel Tasarım

Deneysel çalışmalarda incelenmesi gereken birçok parametre ve faktör ve bu faktörlerin sistem üzerine ayrı ayrı etkisinin incelenmesi gerektiği durumlarda çok sayıda deney yapılması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda bütün bu faktörlerin farklı seviyelerdeki etkisini belirlemek amacıyla yapılacak deneylerin tasarlanmasında çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır [144]. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden bazıları; Taguchi metodu, regresyon analizi, yüzey cevap modelleme ve yapay sinir ağları şeklinde sıralamak mümkündür [144-146]. Bunlar arasında Taguchi metodu genel olarak basit, etkili ve sistematik bir yaklaşım sağladığı için, yüksek kaliteli sistemlerin tasarım ve optimizasyonunda kullanılabilen güçlü bir araçtır [144-145]. Taguchi metodu, çözümün sadece en az sayıda deneyle elde edilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zaman da yüksek kalitede süreç ve ürün geliştirilmesini birçok açıdan destekler [146].

Ürün ve üretim performansını geliştirmek için kullanılan Taguchi deneysel metodu, sisteme etki eden proseslerin saptanması, etkinlik derecelerinin belirlenmesi ve sisteme ait faktörlerin etkileşim durumlarını belirlemeye yönelik olarak sistem optimizasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem optimizasyonu için güçlü bir araç olarak kabul edilen Taguchi deneysel metodunda sistemde kalite kaybına neden olan etmenler ortaya konularak sistemin optimizasyonuna olanak

sağlamaktadır. Taguchi deneysel metoduna göre kalite kayıp fonksiyonu aşağıda verilmiştir [146].

$$L = k(y-m)^2 \quad (2.8)$$

Kayıp fonksiyonunu hesap etmeye yarayan bu Taguchi kayıp formülü proseste görülen değişiklikleri ölçmek için kullanılmaktadır. Taguchi kayıp fonksiyonu en yüksek en iyi, nominal en iyi ve en küçük en iyi şeklinde üçe ayrılmaktadır [147].

$$\text{En yüksek – en iyi} \quad k (1/y^2) \quad (2.9)$$

$$\text{Nominal – en iyi} \quad k (y - m)^2 \quad (2.10)$$

$$\text{En düşük – en iyi} \quad k (y)^2 \quad (2.11)$$

Deneylerde alüminyum alaşımlarının değişen döküm şartlarında % porozite miktarı inceleneceğinden En küçük – en iyi kayıp karakteristiği kullanılacaktır.

2.13.1. Ortogonal dizinler

Taguchi deneysel tasarım metodunda, deneysel durumlar ortogonal diziler oluşturularak ifade edilir. Hazırlanan ortogonal deney dizileri faktör seviyelerini tek tek değiştirmek yerine, faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değişimine olanak sağlar. Örneğin 3 seviyeli 5 faktörlü oluşturulan bir deneyde kombinasyonlar kullanıldığında $5^3 = 125$ tane deney yapılması gerekli iken geliştirilen ortogonal tablolarla bu sayı 36'ya düşmektedir. Buna ek olarak geliştirilen ortogonal serilerde karşılıklı etkileşimlerde ifade edilebilmektedir. Taguchi deneysel metodu için geliştirilen bu ortogonal dizilerde genellikle faktörler, 2, 3 ve 4 seviyeli olmaktadır. Ancak bu faktör seviyeleri bir takım metotlar ile artırılabilir. Deneysel çalışmalarda en çok L4, L8, L16, L9, L18 ve L27 ortogonal dizileri kullanılmaktadır [148].

2.13.2. Sinyal gürültü oranı

Taguchi deneysel metodunda kalite karakteristiğini ifade eden sinyal/gürültü oranı bir performans ölçütü olarak düşünülmektedir ve kayıp fonksiyonu ile ilgilidir. S/N (Sinyal / Gürültü) oranı çok sayıda tekrarı tek bir değerde toplamaktadır. Örneğin deneysel durum için alınan 5 adet porozite değerini tek bir S/N oranı ile ifade edilebilmektedir [149]. S/N oranları, kayıp fonksiyonunun 3 tane S/N oranı bulunmaktadır [148-150]. Taguchi deneysel tasarımında daha güvenilir değerlerin alınabilmesi için güçlü bir kalite ölçütü olan S/N oranlarının kullanılması önerilmektedir [148].

Performans karakteristiğinin en düşük – en iyi olduğu durumda;

$$\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (2.12)$$

2.13.3. Taguchi metodunda etkileşimlerin incelenmesi

Taguchi metodunda etkileşim, deneysel tasarımda yer alan faktörlerin karşılıklı etkileşim durumlarını ifade etmektedir [148]. A x B şeklinde ifade edilen karşılıklı etkileşimde, A ve B faktörlerinin etkileşim durumunu ifade eder. Her ikisinin de yer alması durumunda sistem üzerinde etkiye sahip olması durumu olarak ifade edilmektedir [148].

2.13.4. Varyans analizi

Bir deneysel çalışmada, sisteme etki eden faktörlerin belirlenmesi ve sistem üzerine olumsuz etkiye sahip faktörlerin, negatif etkilerinin azaltılmasına çalışılır. Sistem üzerine etki eden faktörlerinin kontrol altına alınması gerekir. Taguchi deneysel tasarımında faktörlerin etkinlik ve etkinlik derecelerini belirlemek amacı ile deneysel verilerin yorumlanması varyans (ANOVA) analizleri metodu ile yapılmaktadır [149]. Varyans analizlerinde, kareler toplamı, serbestlik derecesi, karelerin ortalaması gibi matematiksel niceliklerden yararlanılmaktadır [149].

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Deneysel çalışmalar genel olarak tasarım, döküm, modelleme ve inceleme, analiz ve değerlendirme çalışmaları olarak dört ana başlık altında toplanmıştır.

Tasarım çalışmaları kapsamında döküm deneylerinde kullanılacak model geometrisi, kalıplama tasarımı ve deneysel tasarım yöntemleri açıklanmıştır. Farklı döküm şartlarında parça içerisinde ölçülebilir nitelikte farklı değerlerde gözenek bırakacak şekilde geometri ve kalıplama tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan döküm geometrilerinin uygunluğu döküm simülasyon programı yardımıyla modelleme çalışmaları yapılarak kum, kokil ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Ayrıca çalışılması gereken parametre sayısının çok fazla olması, her bir parametrenin tek başına ve birlikte etkileşimleri sonucu mevcut sisteme etkilerinin incelenmesi için çok sayıda döküm deneyi yapılması gerektiğinden deneylerin tasarlanmasında kullanılan Taguchi deney tasarım metodu ve bu şekilde belirlenen deney şartları ileriki aşamalarda detaylıca açıklanmıştır.

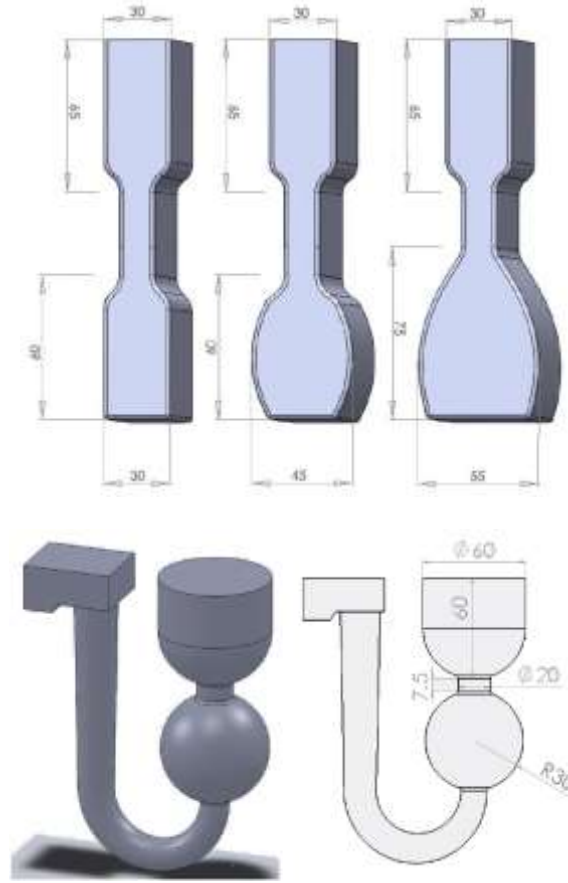
Döküm deneylerinde, endüstride yaygın kullanılan, farklı kimyasal bileşim ve özelliklere sahip Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 171, Etial 177 ve Etial 220 alaşımları kullanılmıştır. Kum, kokil kalıp ve alçak basınçlı döküm yöntemleri ile dökümler yapılmıştır. Döküm yöntemi ve alaşım farkının dışında alaşımın katılaşması sırasında yarı katı bölge sıvı geçirgenliğine etki ettiği var sayılan tane inceltici alaşım ilavesi, modifiye edici alaşım ilavesi, statik sıvı basıncı, kokil kalıpta kalıp ön ısıtma sıcaklığı etkisi, alçak basınçlı dökümde potaya uygulanan basıncın etkisi gibi önemli parametreler deneysel tasarım ve deneysel çalışmalarda göz önüne alınmıştır.

3.1. Model Tasarımı Çalışmaları

Döküm deneylerinde kullanılacak model geometrisinin tasarımı bundan sonra yapılacak bütün çalışmaları etkilediğinden oldukça önemlidir. Model tasarımında göz önüne alınan en önemli parametre katılma sırasında döküm parça iç kesitinde ölçülebilir oranda çekinti boşluğu oluşumunu sağlanmaktır. Bu amaçla model üzerinde dar boğaz oluşturan kesit olmalı, bu kesitin erken katılması ile besleme yolu tıkanan döküm parça iç kesimlerinde yetersiz besleme yüzünden çekinti boşluklarının oranı üzerinden oluşan kritik katı oranının etkisi nicel olarak incelenebilmelidir. Ayrıca kum kalıp, kokil kalıp ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde yapılan döküm deneylerinde elde edilen sonuçların birbirleriyle kıyaslama yapılabilmesine olanak vermesi açısından aynı model geometrisinin bu döküm yöntemlerinin tümüne uygun olması gerekmektedir. Özetle, tasarlanan geometrinin farklı döküm yöntemleri, farklı alaşımlar ve farklı kritik katı oranı değerlerinde belirgin bir gözenek oluşturacak geometride olması amaçlanmıştır.

3.1.1. Model – kalıp geometrisi tasarımı aşamaları

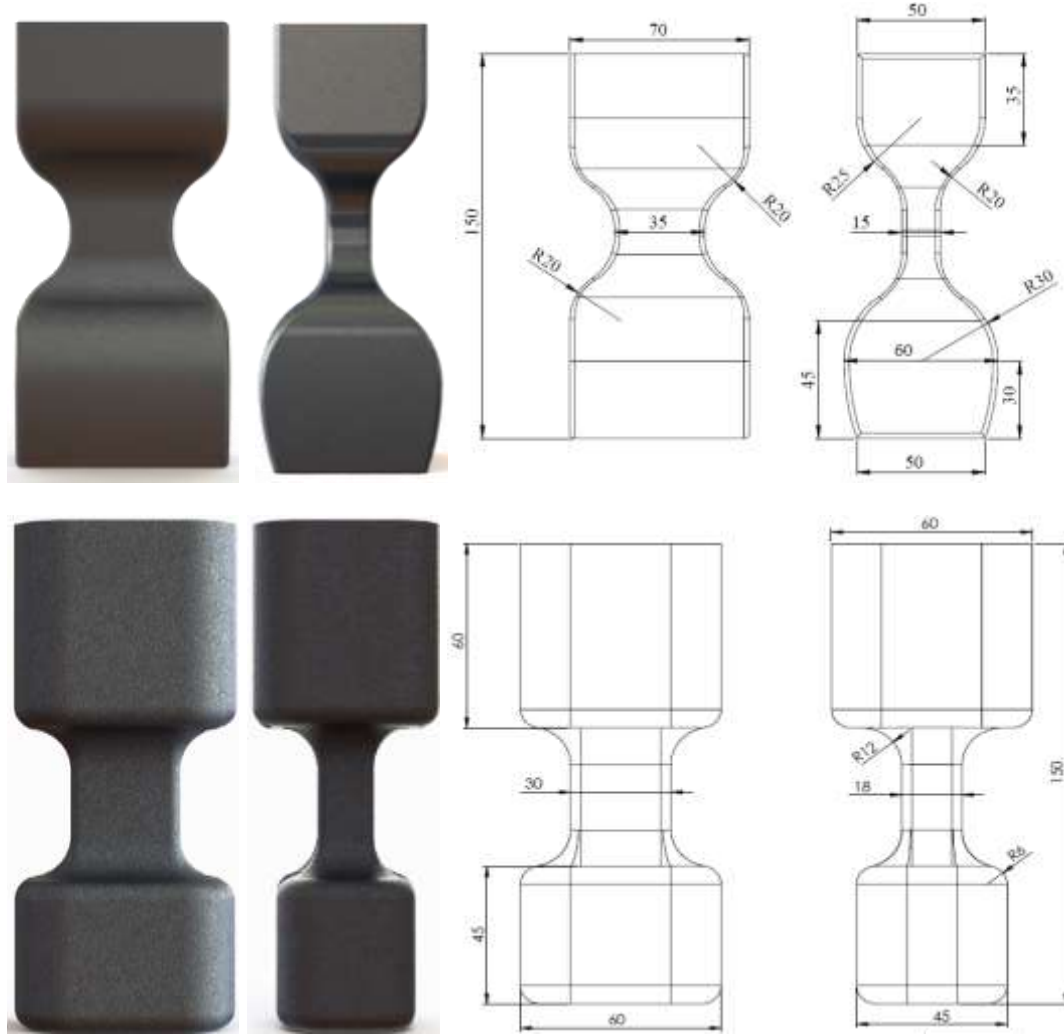
Geometrik tasarım ve çizimler 3 boyutlu bilgisayar destekli çizim programı SolidWorks yardımıyla yapıldıktan sonra döküme uygun şekilde montajlanarak STL(binary) formatına getirilmiş ve 3 boyutlu modelleme için SolidCast döküm simülasyon programı ortamına alınmıştır. Tasarım çalışmalarına daha önceden bu amaçla yapılan ve Şekil 3.1’de verilen geometrilerin denemesiyle başlanmıştır. Döküm deneylerinde oluşması muhtemel farklı şartlarda yapılan modelleme sonuçlarına göre çalışmalara devam edilmiştir. Kullanılan geometriler üzerinde yapılan modellemelerde bütün döküm yöntemlerinde ölçülebilir büyüklükte (makro) gözenek içeren sonuçlar elde edilemediğinden farklı geometri arayışlarına gidilmiştir.



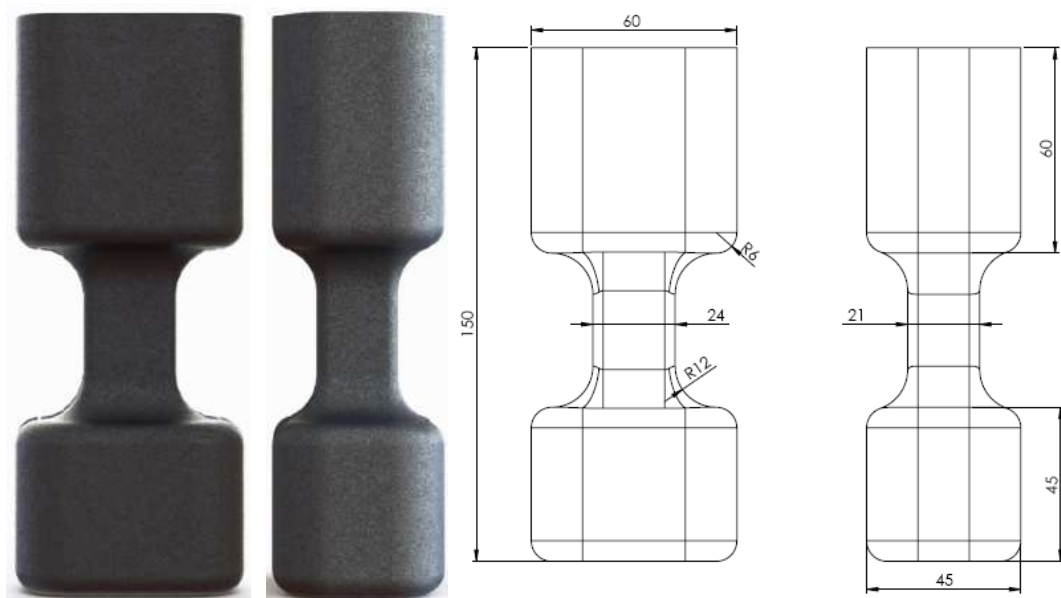
Şekil 3.1. Kritik katı oranı belirlenmesi amacıyla denenmiş model örnekleri [30, 141-142].

SolidCast simülasyon programı ile yapılan modellemelerin sonuçlarına göre uygun bulunan döküm geometrileri için ahşap model imalatı yaptırılmış ve bu modeller ile deneme dökümleri yapılmıştır. Deneme dökümleri sonuçlarına göre, değişen döküm şartlarında parça iç kısımlarında ölçülebilir nitelikte gözenekler çıkana kadar tasarım ve deneme çalışmalarına devam edilmiştir. Bu kapsamda, tasarımına uygun olarak kum kalıba deneme dökümü yapılan bazı model geometri ve boyutları Şekil 3.2’de verilmiştir.

Şekil 3.2’de görülen modellere uygun kum kalıba döküm çalışmalarından elde edilen döküm sonuçları incelendiğinde nispeten iyi döküm şartlarında parçanın iç kısımlarında ölçülebilir nitelikte hata oluşmadığı ve bazı dökümlerde de döküm parça yüzeylerinde çöküntüler olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple model tasarımında revizyona gidilmiştir. Nihai olarak farklı alaşımlarla modelleme ve deneme dökümleri yapılan ve uygun sonuçlar elde edilen ve Şekil 3.3’de detayları verilen modelin kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 3.2. Deneme dökümleri yapılan model tasarımı çalışmaları örnekleri.



Şekil 3.3. Döküm deneylerinde kullanılan nihai model tasarımı geometrisi ve ölçüleri.

3.1.2. Model tasarımında esas alınan kriterler

Yapılan deneme dökümleri yüzeyde istenmeyen çöküntülerin azaltılması için daha köşeli bir tasarımın, katılaşmanın başlayacağı daha geniş bir kalıp temas yüzeyine sahip olması açısından gerekli olduğunu göstermiştir. Bu sebeple modelin hata oluşması istenen alt kısmı dikdörtgen prizma şekline getirilmiştir. Üst kısım ise temel besleyici tasarım kriterlerinden olan hacim ve modül kriterlerine göre uygun olacak şekilde bir dizi hesaplamalar sonucu belirlenmiştir. Burada amaç üst kısmı besleyici olarak kullanmak, ancak parçanın besleyici yetersizliğinden değil de besleme yolunun gereken süreden daha erken katılaşmasından dolayı gözenek oluşumunun sağlanmasıdır. Şekil 3.4’de modelin yukarıda belirtilen fonksiyonları yerine getirmek üzere tasarlanmış bölümlerine ait görüntüleri verilmiştir.

Bütün Parça	Bölümler	Fonksiyonlar
	Besleyici 	Besleme boğazı açık olduğu sürece dökümü tamamen besleyebilecek kapasitede bir metal kütlesi içerecek şekilde tasarlanmıştır.
	Besleme Boğazı 	Dökümün tamamen beslenmesini engellemek için gereğinden daha kısa sürede KKO oranı eşğine gelerek beslemeyi kesmek üzere tasarlanmıştır.
	Döküm 	Her koşul altında tüm döküm yöntemlerinde yetersiz beslemeye dayalı olarak ölçülebilir oranda gözenek oluşturmak üzere tasarlanmıştır.

Şekil 3.4. Model tasarımı görüntü ve ölçüleri.

Modül kriterine göre gerekli besleyici hesaplamaları [79];

Döküm modülü = Döküm hacmi / Döküm yüzey alanı

$$M_D = V_D / A_D$$

$$M_D = (4,5 \times 4,5 \times 6) / [4 \times (4,5 \times 6) + 2 \times (4,5 \times 4,5)]$$

$$M_D = 121,5 / 148,5$$

$$M_D = 0,8181 \text{ cm}$$

Gerekli Besleyici Modülü = Döküm Modülü x 1,2

$$M_B = M_D \times 1,2 = 0,8181 \times 1,2$$

$$M_B = 0,9818 \text{ cm}$$

Modül kriterine göre tasarımın döküm kısmını beslemek için gerekli besleyici modülünün minimum 0,9818 cm olması gerektiği bulunmuştur. Buna uygun ebatlarda besleyici tasarımı için 6 cm kenar ölçüsüne sahip bir kübün besleyici olarak kullanılması tasarlanmıştır. Aşağıda tasarıma uygun besleyici modülüne ait hesaplama sonuçları verilmiştir.

$$M_B = V_B / A_B \quad (3.1)$$

$$M_B = (6 \times 6 \times 6) / [6 \times (6 \times 6)] \quad M_B = 216 / 216$$

$$M_B = 1 \text{ cm}$$

Modül kriterine göre yapılan hesaplamalarda ($M_B = 1 \text{ cm} > 0,9818 \text{ cm}$) olduğundan besleyici modülünün gerekli besleyici modülünü karşıladığı anlaşılmaktadır. Hacim kriterine göre gerekli besleyici hacmini hesaplamak için alaşımın çekinti miktarı, besleyici verimi gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Alaşım çeşidine göre çekinti miktarı değişeceğinden, hesaplamalarda bütün alaşımlardaki en fazla çekintiyi bile karşılayacak şekilde % 7 gibi toleranslı bir değer alınması uygun olacaktır.

$$\text{Gerekli Besleyici hacmi} = [\text{Alaşımın çekme oranı}(\%) \times \text{Döküm hacmi}] / [\text{Besleyici verimi} - \text{Alaşımın çekme oranı}(\%)] \quad [1] \quad (3.2)$$

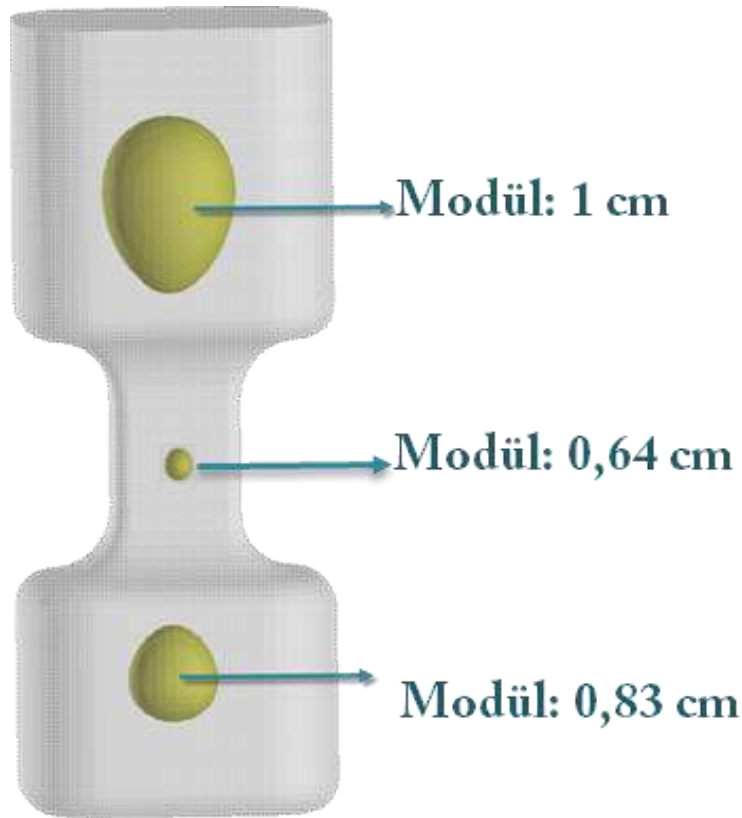
$$V_b = (\alpha V_d) / (\varepsilon - \alpha) \quad V_b = (0,07 \times 121,5) / (0,14 - 0,07) \quad V_b = 121,5 \text{ cm}^3$$

Buna göre gerekli besleyici hacminin en az **121,5 cm³** olması gerekmektedir. Modül kriterine göre hesaplanan besleyicinin hacmi, hacim kriterine göre gereken besleyici hacmini de rahatlıkla karşıladığı görülmektedir.

$$V_b = a^3 \quad V_b = 6^3 \quad V_b = 216 \text{ cm}^3 \quad (3.3)$$

Bu hesaplamalara göre yapılan bir model ile deneme dökümleri sonuçlarının bazı döküm şartlarında çok az ya da hiç hata oluşturmadığından uygun olmadığı görülmüştür. Modelleme programından alınan sonuçlara göre de döküm parça ve

besleyici için yapılan klasik hesaplamalarda parçanın besleme yolu ve birbirleriyle olan bağlantısı, ısı transferi ve buna bağlı modül değişimi göz ardı edilmektedir. Ayrıca besleyicinin döküm kısmına doğrudan üstten bağlı olmasından dolayı yer çekiminin de etkisiyle besleyici daha etkin görev yapmakta ve hesaplamalarda tespit edilen değerlerden daha küçük ebatlardaki besleyicilerde yeterli olabilmektedir. Bu sebeple SolidCast döküm simülasyon programıyla bu faktörlerde göz önünde bulundurularak tespit edilen modül ve hacim kriterlerine de uygun yeni bir tasarım daha yapılmıştır. Şekil 3.5’de bu yeni tasarım için modelleme programından elde edilen modül değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5. SolidCast döküm simülasyon programında yeni model tasarımı için elde edilen modül değerlerinin gösterilmesi.

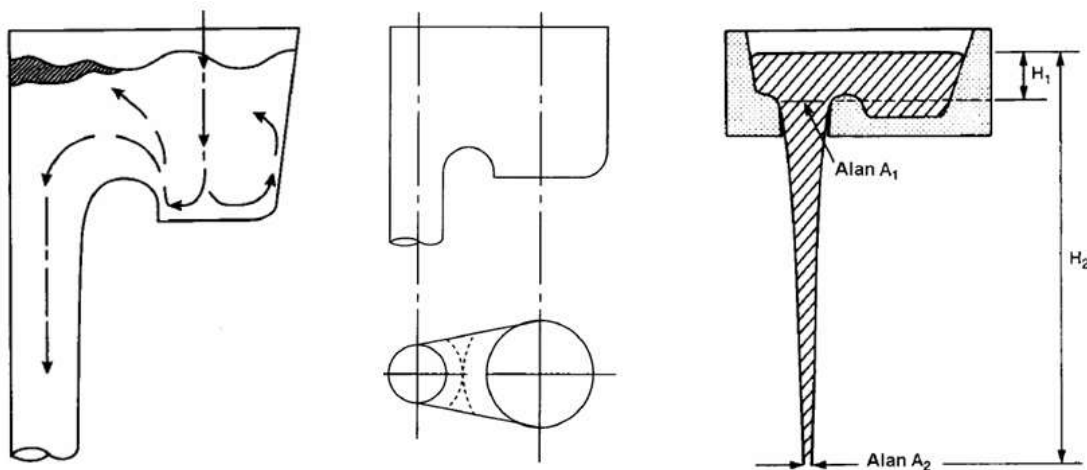
Şekil 3.5’de gösterilen model tasarımındaki besleyici hacmi aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$V_b = a \times b \times c \quad V_b = 6 \times 6 \times 4,5 \quad V_b = 162 \text{ cm}^3 \quad (3.4)$$

Tasarımda dökümün beslenebilmesi için gerekli besleyici hacminin en az **121,5 cm³** olması gerekiyordu. Hesaplamalarda da görüldüğü gibi bu tasarımımda kullanılan besleyici hacmi gerekli besleyici hacmini karşılamaktadır. Bu aşamalardan sonra Şekil 3.5’de verilen döküm geometrisi bu çalışmanın tamamında kullanılmak üzere nihai tasarım olarak belirlenmiştir.

3.1.3. Yolluk sistemi ve kalıp dolum tasarımları

Yolluk tasarımında kalıba sıvı metal dolumu esnasında türbilans oluşumunu minimize edecek şekilde, Şekil 3.6’da verilen esaslara uygun bir tasarım yapılmıştır. Sıvı metalin düşme yüksekliğinin bütün deneylerde aynı olması için, hazneli yolluk sistemi kullanılmış ve düşey gidicide metalin sürekliliğini sağlamak ve döküm esnasında yolluk sistemini dolu tutmak amacı ile konik gidici kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Döküm haznesi, düşey yolluk tasarımı esasları [1].

Deneylerde kullanılan yolluk sistemi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Dolum süreci SolidCast döküm simülasyon programının bir modülü olan ve hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) esaslarına göre akış ve dolum simülasyonu yapan FlowCast akış modelleme programında modellenerek değerlendirilmiştir. Döküm yöntemlerinin yarı katı bölge geçirgenliğine olan etkisini incelemek için kalıplama tasarımları kum ve kokil kalıp tasarımlarında aynı şekilde yapılmıştır. Kalıplama tasarımına ilave olarak mekanik testler, mikro yapı incelemeleri, kimyasal bileşim kontrollerinin döküm şartları ile birebir yapılabilmesi için Şekil 3.7’de görüldüğü gibi test

numunesi tasarlanmıştır. Ayrıca sıvı metalin kalıp içerisine dolumu esnasında süzme işlemini yapmak, yabancı maddeleri azaltmak, çalkalanmayı azaltarak sakın ve düzenli bir kalıp dolumu sağlamak için 40mm x 40mm x 15mm ebatlarında seramik köpük filtreler yatay yolluk üzerine yerleştirmiştir [151].

Alçak basınçlı döküm yönteminde ise model geometrisi tasarımı diğer döküm yöntemleriyle karşılaştırma yapılabilmesi açısından aynı tutulmuş, ancak kalıplama tasarımında yöntem gereği sıvı metalin dolumu için kalıp ters çevrilmiştir. Bu yöntemde sıvı, kalıba aşağı yönde açık olan besleyiciden doldurulmuştur.

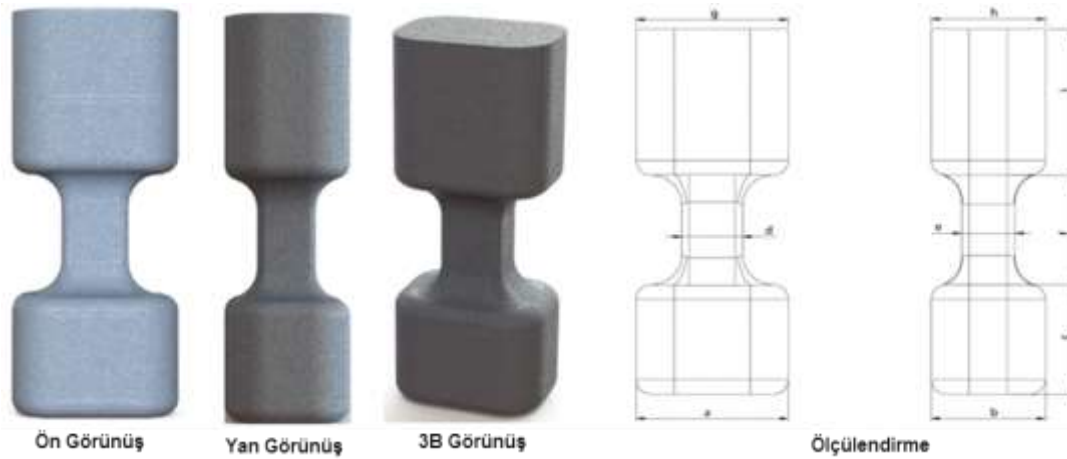


Şekil 3.7. Kalıplama tasarımı görüntüsü.

Model tasarımı aşamalarında tasarımın uygunluğu SolidCast döküm simülasyon yazılımı yardımıyla kontrol edilmiştir. Bu amaçla deneylerde kullanılması planlanan döküm alaşımları kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde değişik döküm şartlarında muhtemel minimum ve maksimum olduğu düşünülen farklı kritik katı oranı değerlerinde modellemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değişen büyüklüklerde gözenek oluşması beklenmiş ve buna bağlı olarak tasarımın uygunluğu test edilmiştir.

3.1.4. Model geometrisinin farklı ölçeklerde deneme dökümleri

Model geometrisi belirleme çalışmaları yapılırken döküm parça içerisinde oluşan gözenekleşmenin model boyutuna bağlı olarak değişimi ve yüzey çöküntü durumlarını incelemek için aynı geometride orantılı olarak büyütülmüş ve deneme dökümleri yapılmıştır. Aynı geometriye sahip döküm parçanın ebatları orantılı olarak büyütüldüğünde elde edilen sonuçlardaki değişimler ve besleyici boğazının ölçülerin büyümesi ile döküm sonuçlarının nasıl farklılık gösterdiği sonuçlar bölümünde değerlendirilerek döküm sonuçları ve modelleme sonuçlarının birbirleri ile uyumları karşılaştırılmıştır. Farklı boyutlarda tasarlanan model geometrisi görünüşleri ve ölçülendirilmesi Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Model tasarımı görüntü ve ölçüleri.

Tablo 3.1 Model ölçüleri.

Model No	Döküm			Boğaz			Besleyici		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	30	22	22	12	10	22	30	22	30
2	45	33	33	18	15	33	45	33	45
3	60	44	44	24	20	44	60	44	60
4	90	66	66	36	30	66	90	66	90
5	120	88	90	48	40	88	120	88	120

Çalışmada geometri olarak Şekil 3.8’de görülen model 5 farklı büyüklükte imal edilmiş, döküm ve modelleme çalışmaları her biri için ayrı ayrı yapılmıştır. Tablo 3.1’de modele ait ölçüler görülmektedir. Modeller imal edildikten sonra model plakasına yolluksuz olarak bağlanmış, dökümlerde parça üst besleyici kısmından

doğrudan CO₂ ile sertleşen kum kalıplara döküm yapılmıştır. Döküm deneylerinde alaşım olarak katılma aralığı 575-595 °C gibi diğer alaşımlara göre daha dar bir katılma aralığına sahip bir alaşım olan Etial 171 alaşımı kullanılmıştır.

3.2. Alaşımların Seçimi ve Karakterizasyonları

3.2.1. Döküm alaşımlarının seçimi ve temini

Deneylerde kullanılacak alaşım seçimi yapılırken kimyasal bileşim esas alınmıştır. Kimyasal bileşimlerdeki farklılıklar katılaşmayı doğrudan etkilediğinden çalışmalarda döküm sektöründe yaygın kullanılan tüm alüminyum döküm alaşımları hakkında bilgi sahibi olunabilmesi için gerekli ve yeterli alaşım seçimi yapılmaya çalışılmıştır. Böylelikle yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmesi planlanan model kriter ile sadece dökümü yapılan alaşımlar değil, bütün alaşımları temsil edecek sonuçlar alınması hedeflenmiştir. Alüminyum döküm alaşımlarındaki temel alaşım elementleri, alaşım elementlerinin ilave miktarları, alaşım elementinin ticari olarak kullanımı göz önüne alınarak Tablo 3.2’de verilen alaşımlar ile dökümlerin yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılması planlanan alaşımlara ait tipik özellikler Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deneylerde kullanılan alaşımların Etinorm standardına göre kimyasal bileşimleri (% Ağırlık) [14].

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sn
Etial 110	0,70	4,00 - 6,00	2,00 - 4,00	0,20 - 0,60	0,15	0,20	0,20	0,05
Etial 140	0,60	11,50 - 13,50	0,10	0,40	0,10	0,10	0,15	0,05
Etial 160	1,00	7,50 - 9,00	3,00 - 4,00	0,50	0,30	1,00	0,20	0,10
Etial 171	0,50	9,00 - 10,00	0,10	0,40 - 0,60	0,30 - 0,45	0,10	0,15	0,05
Etial 177	0,20	6,60 - 7,40	0,02	0,03	0,30 - 0,45	0,04	0,08 - 0,14	0,05
Etial 220	0,30	0,35	4,00 - 5,00	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05

Alaşımlar primer külçe olarak Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinde üretilmiş ve Tuncel Metal (İstanbul) bayisinden temin edilmiştir. Temin edilen külçelerden spektral analiz için numuneler alınarak alaşımın kimyasal bileşiminin uygunluğu Altun Döküm San. Tic. Ltd. Şti (Konya) firmasında Spectero marka, Spectromax

M1156235 model alüminyum ve alaşımlarının optik emisyon spektrometre cihazında analizi yapılmıştır. Ancak Etial 220 alaşımı kullanımının kısıtlı olması ve ancak üreticilerin yüklü miktardaki talep üzerine üretim yapıyor olmasından dolayı temin edilememiş, alaşımın kendi imkânlarımızla hazırlanması yoluna gidilmiştir.

Tablo 3.3 Deneylerde kullanılan alaşımlara ait tipik özellikler [14,152,153].

Alaşım	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Katılma Sıcaklık Aralığı (°C)		Isıl İletkenlik (watt/m °K)	Diğer Özellikler ve Kullanım Yerleri
Etial 110	2.76	525 - 625	100	121	İyi döküm, kaynaklanabilme karakteristiği, silindir başları, yanmalı motorların krank kapakları
Etial 140	2.66	575 - 585	10	142	İnce kesit ve karışık dökümler, motor kutular, ölçme kutuları, pompa parçaları, deniz atmosferi
Etial 160	2.76	540 - 595	55	96	İyi yüzey gerektiren basınçlı dökümlerde kullanılır
Etial 171	2.64	575 - 595	20	146	Mukavemet dökülebilme özelliği, korozyona dayanımı, basınçta sızdırmazlık
Etial 177	2.68	540 - 610	70	151	Otomotiv sanayinde basınçlı sızdırmazlık jant yapımında kullanılır
Etial 220	2.75	565 - 645	80	190	Kum ve kokil dökümlerde, dişli kutularında kullanılır

3.2.2. Etial 220 alaşımlandırma çalışmaları

Etial 220 alaşımının kimyasal analizi dikkate alındığında içerisinde alaşım elementi olarak %4-5 arasında Cu elementi olduğu gözlenmektedir. Bu sebeple alaşım hazırlanmasında %99,8 Al içeren ticari saflıktaki primer Etial 8E alaşımına %99,99 Cu içeren iletken saflığında bakır alaşımı ilavesi yapılmıştır. Alaşımlandırma işlemi Teknoloji Fakültesi Döküm Laboratuvarı bünyesinde bulunan indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. 8 kg Al ergitme kapasiteli indüksiyon ocağı içerisine katılacak Cu miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanarak ilave edilmiştir.

$$\text{İlave Edilecek Miktar} = [(\text{Hedef Değer} - \text{Mevcut değer}) / (\text{Tenör} - \text{Hedef Değer})] \times \text{Ocak ağırlığı} \quad [154] \quad (3.5)$$

İlave Edilecek Miktar: Etial 220 için ocak içerisine katılması gereken Cu miktarı.

Hedef Değer: Etial 220 alaşım standardında olması gereken %Cu değeri.

Mevcut değer: Etial 8 alaşımı içerisinde mevcut % Cu değeri.

Tenör: Cu alaşımlandırma işleminde ocağa katılan alaşım elementindeki Cu %değeri.

Ocak ağırlığı: Ocakta yapılmak istenen toplam alaşım ağırlığı.

$$\text{İlave Edilecek Cu} = [(\% 4,5 - \% 0,01) / (\% 99 - \% 4,5)] \times 7,5 \text{ kg}$$

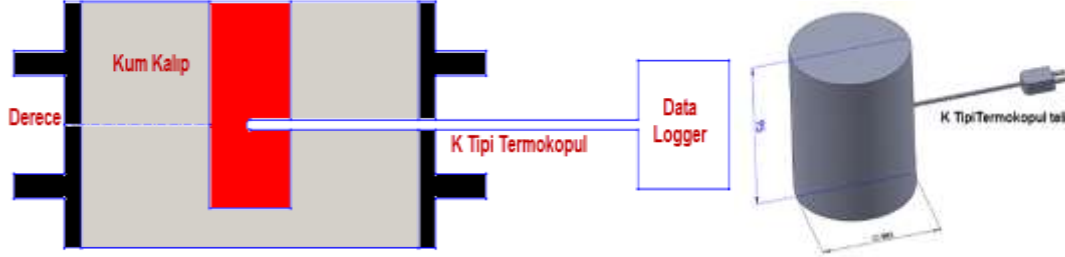
$$\text{İlave Edilecek Cu} = 0,356 \text{ kg}$$

Yapılan hesaplamalara göre Etial 220 alaşımı hazırlamak için; 8 kg kapasiteli indüksiyon ocağı içerisine 356 gr bakır tel ve 7500 gr Etial 8E alaşımı ilave edilmiştir. Ocak içerisine Etial 8E alaşımı yüklendikten sonra sıcaklık 700 °C sıcaklığa çıkılarak ergitme gerçekleştirilmiş ve bakır tel sıvı metalin içerisine daldırılmıştır. Bakır tel sıvı metal içerisinde tamamen ergitildikten sonra, sıvı metal gaz alma ve cüruf alma işlemlerine tabi tutularak grafit kalıp içerisine dökülmüştür. Hazırlanan alaşımın kimyasal bileşiminin Etial 220 standart değer aralık limitinde olup olmadığının kontrolü için kimyasal analiz için numuneler alınmış ve spektral analiz testleri yapılmıştır.

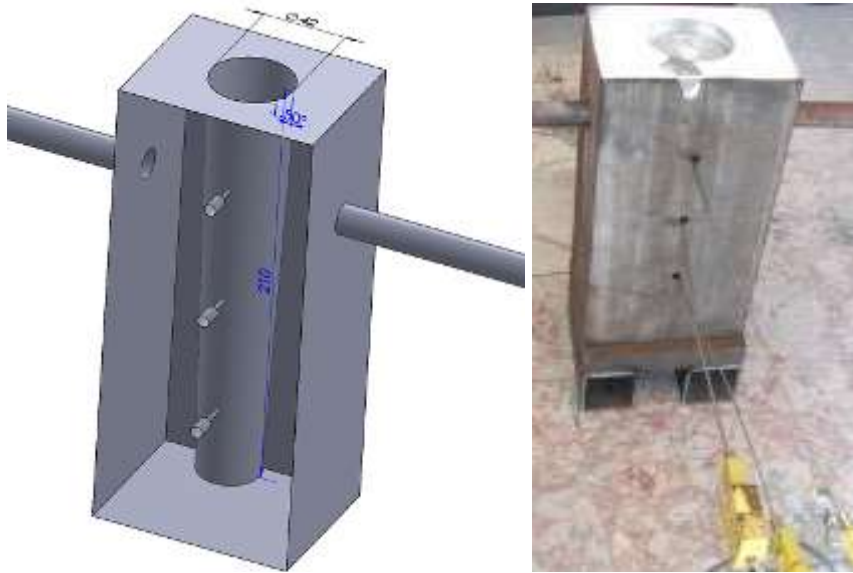
3.2.3. Soğuma eğrisi alma deneyleri

Alaşımlara ait Tablo 3.2’de verilen kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde, elementlerin %2’ye varan oranlarda tolerans aralığına sahip olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak deneylerde kullanılan alaşımların katılaşma sıcaklık aralıkları sabit olmayacağından her bir alaşımın katılaşma eğrisinin deneysel olarak ölçümü yapılmıştır. Döküm simülasyon programında da gerçek döküm şartlarının bilgisayara birebir aktarılması başarılı sonuçlar alınabilmesi için kritik bir öneme sahip olduğundan alaşımların her biri için alınan sıcaklık zaman grafikleri simülasyon programına bire bir girilmiştir. Alaşımların sıcaklık zaman grafiklerinin elde edilmesi amacıyla külçelerden alınan numuneler ergitilerek silindirik numune kalıbı şeklinde hazırlanmış kum kalıplara dökümleri yapılmıştır. Şekil 3.9’da kum kalıpta soğuma eğrisi alma işlemi şematik olarak verilmektedir. Kokil kalıpta soğumanın

modellenmesi için Şekil 3.10’da gösterilen düzenek kullanılarak her bir alaşım için kokil kalıpta soğuma eğrileri elde edilmiştir.



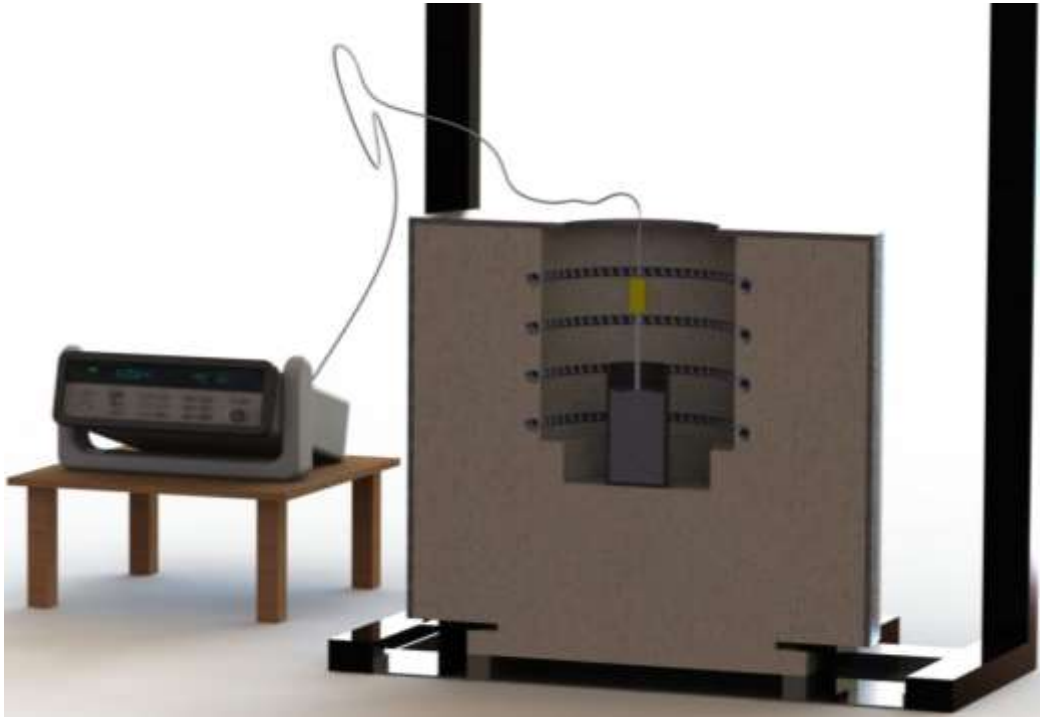
Şekil 3.9. Kum kalıpta soğuma eğrisi alım işleminin şematik görüntüsü.



Şekil 3.10. Kokil kalıpta soğuma eğrisi alım için kullanılan kalıp termokopul düzeneği.

Kum ve kokil kalıplardan sıcaklık zaman değişimi verileri kalıplara bağlanan K tipi termokopul telleri ile 1 sn aralıkla ve 0.1 °C hassasiyette veri kaydedici (Data logger) yardımıyla alınmıştır. Veri kaydediciden elde edilen veriler Mirosoft Excell programında işlenerek soğuma eğrileri oluşturulmuştur. Ancak alınan soğuma eğrilerinden kum ve kokil kalıptaki soğuma hızına bağlı olarak katılma aralıkları çok net belirlenememiş ve elde edilen sonuçlarda farklılıklar tespit edilmiştir. Bu sebeple alaşımlara ait ergime ve katılma sıcaklıklarının daha net belirlenebilmesi için fırın içerisinde yavaş soğuma şartlarında veri kaydedici ile sıcaklık zaman verileri alınmıştır. Bu işlem şematik olarak Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Ocak içerisinde bor nitrür ile kaplanmış çelik pota içerisine külçe alaşım yüklenmiş ve

alaşımın sıcaklığı 700 °C'ye gelince fırın kapatılarak soğumaya bırakılmıştır. Sıcaklık zaman verileri sıcaklık 400 – 450 °C'ye düşünceye kadar alınmıştır. Sıcaklık 400 °C'ye gelince tekrar ısıtma yapılarak bu kez ısıtma esnasındaki dönüşüm sıcaklıkları belirlenmek üzere veri alınmıştır. Böylece ısıtma ve soğutma esnasındaki dönüşüm sıcaklıkları ve aralarındaki farklar belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Fırın içinde soğuma eğrisi alımı için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi.

3.2.4. Termal analiz çalışmaları

Deneylerde kullanılacak alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının daha yüksek hassasiyetle belirlenebilmesi açısından termal analiz deneyleri yapılmıştır. İlk olarak Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarlarında yer alan termal analiz cihazında azot gazı atmosferinde 10 °C/dk hızda ısıtılarak 700 °C'ye kadar ısıtma şartlarında termal analiz deneyleri yapılmıştır. Ancak deney alaşımlarına ait termal analiz deneyleri ısıtma esnasında yapıldığından sonuçlar geçerli bulunmamıştır. Dökümde sıvı metalin katılaşması söz konusu olduğundan deneyler Bilecik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında, alaşımın 10 °C/dk soğutulması esnasında azot atmosferinde yapılmıştır. Termal analiz çalışmaları Set Aram Instrument LABSYS marka maksimum 1600 °C sıcaklığa çıkma kapasitesine

sahip termal analiz cihazında yapılmıştır. Deneylerde soğutma hızı modelin dökümü ile eşleştirebilmek adına parça katılma ve soğuma şartlarına göre belirlenmiştir.

3.3. Döküm Deneylerinin Tasarımı

Kritik katı oranını oluşumuna etki eden parametrelerin ve bu parametrelerin farklı faktörlerinin ayrı ayrı ve birlikte etkilerinin incelenmesi durumunda çok sayıda döküm deneyi yapılması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda bütün bu faktörlerin farklı seviyelerdeki etkisini belirlemek amacıyla döküm deneylerinin planlanmasında Taguchi metodundan faydalanılmıştır.

3.3.1. Taguchi Yöntemi ile kum kalıba döküm deney tasarımı

Döküm içerisindeki gaz kaynaklı gözenek oluşumuna etkisi olmasından dolayı sıvı metal temizliği bir parametre olarak kullanılmamış ve bütün döküm deneylerinde sıvı metal temizliği mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. Böylece döküm iç kesitlerinde oluşan gözeneklerin sadece besleme yetersizliğinden kaynaklanması planlanmıştır. Dökümhane uygulamalarında tane inceltici katılmaksızın modifiye edici ilavesinin kullanımı çok yaygın olmadığından deney şartları buna uygun olarak belirlenmiştir. Tablo 3.4’de yapılan dökümler 3’er adet yapılarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Tablo 3.4. Kum kalıba döküm yöntemi deney parametreleri.

Alaşım Çeşidi						Mastır Alaşımı İlavesi İşlemleri
Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220	İlave yok
						AlTiB ilaveli
						AlTiB ve AlSr ilaveli

Kum kalıba döküm deneyleri için Taguchi yöntemi $L18(1^6 \times 1^3)$ ortogonal serisi kullanılmıştır. Taguchi deney tasarımına uygun olarak kum kalıba yapılması gereken döküm deneyleri ve döküm şartları Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. L18 ($1^6 \times 1^3$) ortogonal dizinine göre yapılması gereken döküm deneyleri.

	Alaşım Çeşidi	Tane İnceltici İlavesi	Modifiye Edici İlavesi
1	Etial 110	İlave yok	İlave yok
2	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok
3	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (AlSr)
4	Etial 140	İlave yok	İlave yok
5	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok
6	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (AlSr)
7	Etial 160	İlave yok	İlave yok
8	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok
9	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (AlSr)
10	Etial 171	İlave yok	İlave yok
11	Etial 171	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok
12	Etial 171	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (AlSr)
13	Etial 177	İlave yok	İlave yok
14	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok
15	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (AlSr)
16	Etial 220	İlave yok	İlave yok
17	Etial 220	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok
18	Etial 220	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (AlSr)

3.3.2. Taguchi yöntemi ile kokil kalıba döküm deney tasarımı

Kokil kalıp deney tasarımı için kum kalıp dökümlerinden elde edilen bilgiler, dökümhane şartları ve endüstriyel uygulamalar değerlendirilerek döküm deney parametreleri Tablo 3.6’da verildiği gibi belirlenmiştir. Kokil kalıp döküm deneylerinde kum kalıp dökümlerinden farklı olarak kalıp ön ısıtma sıcaklığı bir parametre olarak alınmıştır. Böylece kalıp ön ısıtma sıcaklığının dökümlerin katılaşmasında yarı katı bölge geçirgenliğine ve dolayısıyla gözenek oluşumuna etkisi incelenecektir. Kalıp ön ısıtma sıcaklık değerleri endüstriyel kokil kalıp dökümlerinde kullanılan kalıp sıcaklıklarının alt ve üst değerlerini kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 3.6. Kokil kalıba döküm yöntemi deney parametreleri.

Alaşım Çeşidi						Mastır Alaşımı İlavesi İşlemleri	Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)
Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220	İlave yok	200
						AlTiB ilaveli	300
						AlTiB ve AlSr ilaveli	400

Deney parametrelerine uygun olarak kokil kalıba döküm deneyleri için Taguchi yöntemi $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal serisi kullanılacaktır. Taguchi deneysel tasarımına uygun olarak yapılması gereken döküm deneyleri ve şartları Tablo 3.7’de verilmiştir. Her dökümden 3’er adet yapılarak elde edilen sonuçların ortalaması değerlendirilmiştir.

Tablo 3.7. $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal dizinine göre kokil kalıba döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri.

	Alaşım Çeşidi	Tane İnceltici İlavesi	Modifiye Edici İlavesi	Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)
1	Etial 110	İlave yok	İlave yok	200
2	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	300
3	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	400
4	Etial 140	İlave yok	İlave yok	300
5	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	400
6	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	200
7	Etial 160	İlave yok	İlave yok	400
8	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	200
9	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	300
10	Etial 171	İlave yok	İlave yok	200
11	Etial 171	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	300
12	Etial 171	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	400
13	Etial 177	İlave yok	İlave yok	300
14	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	400
15	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	200
16	Etial 220	İlave yok	İlave yok	400
17	Etial 220	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	200
18	Etial 220	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	300

3.3.3. Taguchi yöntemi ile alçak basınçlı döküm deney tasarımı

Alçak basınçlı kokil döküm deney parametreleri Tablo 3.8’de verilmiştir. Kalıp sıcaklığının etkisi kokil kalıba döküm deneylerinde de inceleneceğinden alçak basınçlı kokil dökümlerinde sıcaklık bütün deneylerde 300 °C olarak sabit tutulmuştur. Ancak doldurma basıncının etkisini incelemek için parça büyüklüğüne bağlı olarak Tablo 3.8’de görüldüğü gibi üç farklı doldurma basınç değeri belirlenmiştir. Bu değerler bu parçanın büyüklüğü ve hacmi düşünüldüğünde düşük, orta ve yüksek basınç şeklinde de ifade edilebilir. Deney parametrelerine uygun olarak alçak basınçlı kokil kalıba döküm deneylerinde, kokil kalıp döküm deneylerinde olduğu gibi Taguchi yöntemi $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal serisi esas alınmıştır.

Taguchi deneysel tasarımına uygun olarak yapılması gereken döküm deneyleri ve şartları Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.8. L18($1^6 \times 2^3$) ortogonal dizinine göre alçak basınçlı kokil kalıba döküm yöntemi için yapılan deneyler.

Alaşım Çeşidi						Mastır Alaşımı İlavesi İşlemleri	Basınç Değeri (mbar)
Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220	İlave yok	250
						Al5Ti1B ilaveli	500
						Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli	1000

Tablo 3.9. Alçak Basınçlı Döküm yönteminde yapılan deneyler.

	Alaşım Çeşidi	Tane İnceltici İlavesi	Modifiye Edici İlavesi	Basınç Değeri (mbar)
1	Etial 110	İlave yok	İlave yok	250
2	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	500
3	Etial 110	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	1000
4	Etial 140	İlave yok	İlave yok	500
5	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	1000
6	Etial 140	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	250
7	Etial 160	İlave yok	İlave yok	1000
8	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	250
9	Etial 160	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	500
10	Etial 171	İlave yok	İlave yok	250
11	Etial 171	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	500
12	Etial 171	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	1000
13	Etial 177	İlave yok	İlave yok	500
14	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	1000
15	Etial 177	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	250
16	Etial 220	İlave yok	İlave yok	1000
17	Etial 220	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	İlave yok	250
18	Etial 220	% 0,2 Ti ilaveli (AlTiB)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)	500

3.4. Ergitme İşlemlerinin Yapılması

Ergitme işlemleri 10 kW gücünde, 8 kg. alüminyum ergitme kapasitesine sahip çan tipi bir elektrik direnç ocağı ve SiC pota kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12’de gösterilen elektrik direnç ocağı, K tip termokopul ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ocak astarı kalsiyum oksit türü yüksek termal izolasyon özelliğine sahip dökme astar malzemelerle yapılmıştır. Ocak üstünde azotla sıvı metal temizleme işlemlerinin yapılabilmesi için grafit lansenin gireceği genişlikte bir delik mevcuttur.



Şekil 3.12. Çan tip elektrik direnç ertitme ocağı.

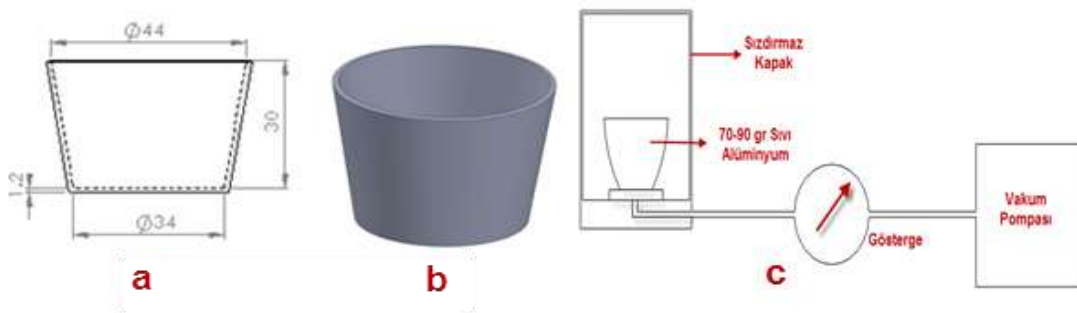
Deney parametrelerine uygun olarak pota içinde bulunan alaşımın sıcaklığı 750°C 'ye çıkartılarak ertitme gerçekleştirilmiştir. Gerekli şartlarda master alaşımlarının ilavesi ve sıvı metalin azot gazı ile temizlenmesi sonrası sıvı metal üzerine %0,4 oranında cüruf yapıcı örtü tozu ilave edilmiştir. Kullanılan örtü tozu inorganik alkali ve toprak alkali tuzların karışımı olup içeriğinde Na_2SiF_6 , Na_2CO_3 , CaF_2 ve mineral florür bulunmaktadır [155]. Bu flaksın alüminyuma ilave edilmesindeki amaç sıvı metal içersinde bulunması muhtemel bazı katışık maddelerin kolayca curuf haline getirilerek metal içerisinden uzaklaştırılmasıdır. Örtü tozunun ilavesinden sonra sıvı metal üzerinde biriken curuf ve oksitler bir temizleme laması ile sıyrılarak alınmış ve dökümler gerçekleştirilmiştir.

3.5. Sıvı Metal Kalitesinin Belirlenmesi Deneyleri

Döküm alaşımının sıvı metal temizliği döküm kalitesinde önemli etkiye sahip faktörlerden biridir. Dökümhanelerde sıvı metal içerisindeki gaz, kalıntı gibi

istenmeyen türden maddelerin temizlenmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin içerisinde gaz alma tableti kullanımı ve sıvı azot ile temizleme işlemi dökümhaneler arasında yaygınca kullanım bulmaktadır. Bu sebeple tez çalışmalarında sıvı metalin temizlenmesinde öncelikle kullanılacak temizleme yöntem ve biçiminin belirlenmesi için ön deneyler yapılmıştır. Sıvı metalin temizlenmesi sonucu, katılaştıran döküm içerisindeki oluşan gözeneklerin sadece çekinti kaynaklı oluşması ve gaza dayalı gözenek oluşumunun engellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla aynı şartlarda ergitilmiş hurda alüminyum alaşımı gaz alma tableti ve sıvı azotla yıkama işlemleri ile temizlenmiş ve temizleme işlemi sonrası RPT (Düşürülmüş Basınç Testi –Reduced Pressure Test) numuneleri alınarak Arşimet yoğunluk ölçümleri ve kesit incelemesi ile sıvı metal kalitesi ölçülmüştür.

RPT gaz ölçüm testi sıvı metal kalitesinin belirlenmesi için yaygınca kullanılan basit, kullanışlı bir yöntemdir. RPT testi prensip olarak yaklaşık 70 - 90 gram ağırlığında bir sıvı metalin metal bir kroze içinde 1 atmosferlik (yaklaşık -760 Hg/cm^2) basınç altında katılaştırılmasını ve sıvı metal içerisinde çözünmüş hidrojenin katılaşma sırasında gaz kabarcıkları haline geçmesini esas almaktadır. Döküme hazır hale gelen ergitilmiş sıvı metal Şekil 3.13’de ölçüleri verilen metal kalıp içerisine dökümü yapılarak, vakum altında katılaştırılır. Katılaşma sonrası RPT numunesi dikey olarak ortadan kesildi ve numune yüzeyinden sıvı metal kalitesi belirlendi. Test numunesinde çok gaz boşluğu çıkarsa sıvı alaşımda yüksek oranda hidrojen çözündüğü, buna karşılık numunede az sayıda gaz boşluğu var ise sıvı metalde o derece az çözünmüş hidrojen bulunduğu kabul edilmiştir. Şekil 3.13’de RPT test numunesi ölçüleri, numune kalıbı ve RPT cihazına ait görüntü verilmiştir.

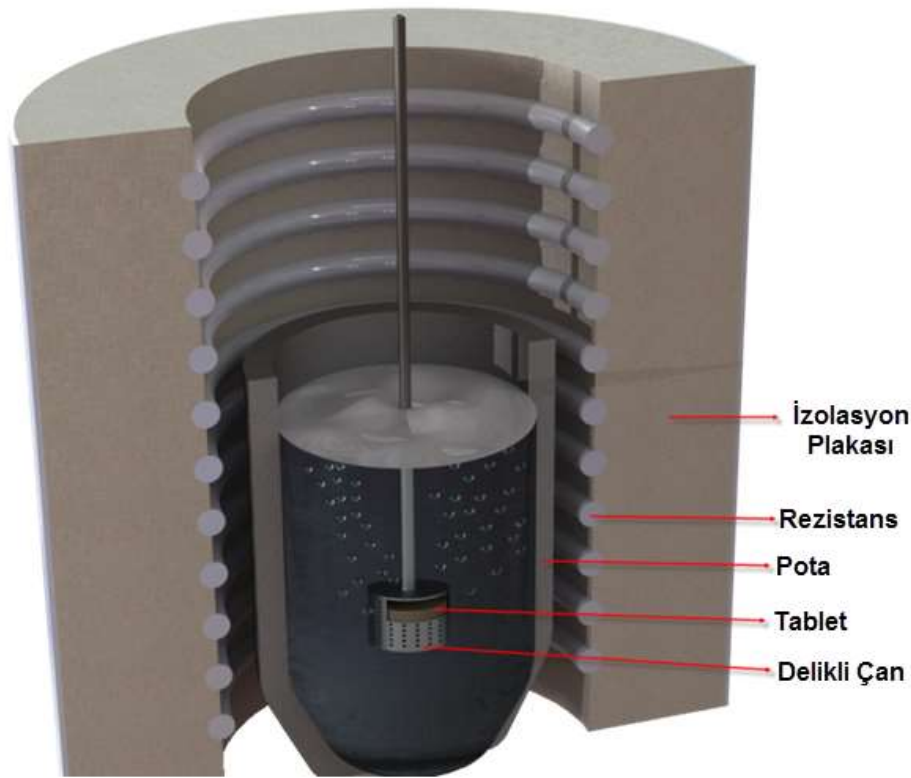


Şekil 3.13. a) RPT test numunesi ölçüleri, b) numune kalıbı, c) RPT cihazı şematik görüntüsü.

3.5.1. Tabletle sıvı metal temizleme işlemi

Piyasada ticari olarak satılan gaz alma tabletleri incelendiğinde genel olarak klor ve azot içeren kimyasal bileşiklerdir. Bunların içerisinde klor bazlı gaz alma tabletleri çevreye ve insan sağlığına olan zararlı etkilerinden dolayı her geçen gün kullanımı azalmaktadır. Ayrıca birçok Avrupa ülkesinde kullanımının yasaklandığı bilinmektedir. Bu sebeple deneylerde gaz alma tableti olarak %50 azot, %50 klor içeren ekolojik gaz alma tableti kullanılmıştır. Yoğunluğu $1,8 \text{ gr/cm}^3$ olan gri renkli bu tabletler nem çekici özelliğe de sahiptir. Al ve alaşımlarının dökümünden önce gazının giderilmesinde kullanılır [155]. Tablet veya blok halinde delikli bir çan vasıtasıyla sıvı metalin içerisine daldırılır ve reaksiyon bitene kadar metal içerisinde tutulur. Tabletle temizleme işleminde uygulama sıcaklığı $740-760^\circ\text{C}$ ve metal ağırlığının % 0,20-0,30 kadar miktarda kullanılmıştır. Reaksiyon sırasında çok miktarda gaz kabarcıkları oluşur ve oluşan bu gaz kabarcıklarına sıvı metal içerisinde bulunan elemental H difüze olarak yüzeye taşınır ve atmosfere salıverilir. Şekil 3.14’de delikli çan vasıtasıyla sıvı metale tabletle temizleme işlemi şematik olarak gösterilmiştir.

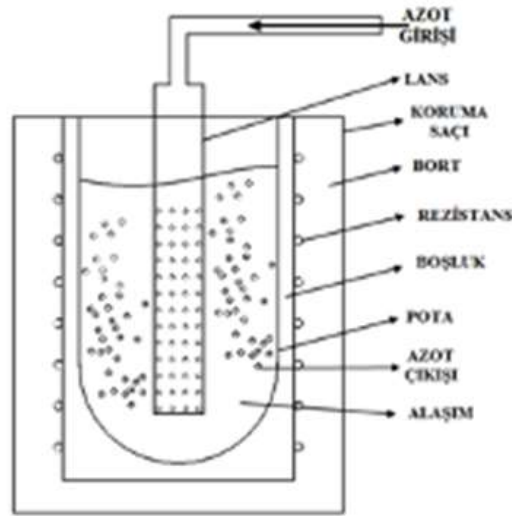
Tabletle sıvı metalin temizlenmesi deneylerinde sonuçların daha etkin bir şekilde belirlenebilmesi için hurdacılardan temin edilen alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Alüminyum alaşımı ergitildikten sonra sıvı metal miktarının %0,2-0,5’i seviyesinde (5 kg alüminyum için %0,4 olarak 20 gr eklenmiştir) cüruf alma tozu ile yüzeyindeki cüruf temizlenerek 750°C sıcaklıkta RPT numunesi alınmıştır. Daha sonra sıvı metalin temizlenmesi amacıyla %0,2-0,3 miktarında gaz alma tableti delikli bir çan vasıtasıyla ergiyik içerisine daldırılarak ve reaksiyon bitene kadar metal içerisinde tutulmuştur. Reaksiyon esnasında sıvı metal sıcaklığı $740 - 760^\circ\text{C}$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Gaz alma işlemi sonrası cüruf tozu ile sıvı metalin cürufu temizlenerek tekrar RPT numuneleri dökülmüştür. Böylece tabletle sıvı metal temizleme işleminin gaz giderme üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.14. Sıvı metalin tabletle temizleme işlemi şematik görüntüsü.

3.5.2. Azot gazı ile sıvı metal temizleme işlemi

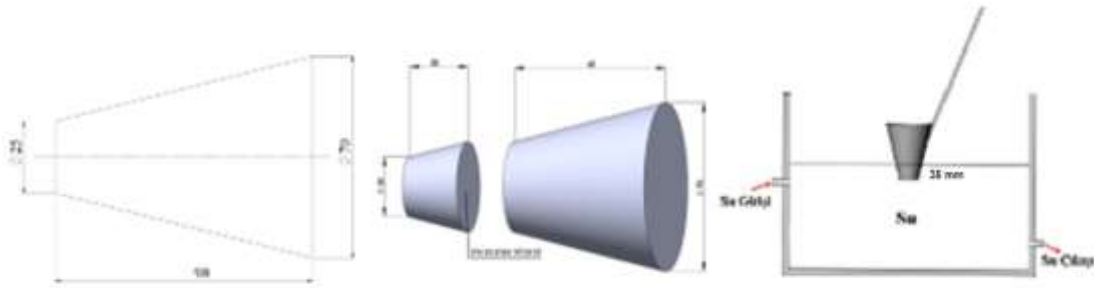
Azot gazı ile hidrojen giderme işlemi için benzer şekilde hurda alüminyum ergitilmiş ve ilk olarak cürufu temizlenen metalden RPT numuneleri alınmıştır. Bu aşamadan sonra sıvı metal içerisinde çözünmüş olan hidrojenin metal dışına alınabilmesi amacıyla azot gazı ile sıvı metali temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Azotla temizleme işlemi dış yüzeyleri bor nitrür (BN) ile kaplanmış sabit bir grafit lans yardımı ile yapılmıştır. Azot gazı kullanılarak sıvı metalde gaz giderme işlemi şematik olarak Şekil 3.15’de gösterilmiştir. Azot gazı sıvı alüminyum içerisine yaklaşık 720°C’de ince delikleri bulunan bir grafit lans ile 5 dk boyunca verilmektedir. Bu işlemde amaç çok sayıda küçük gaz baloncukunu sıvı içerisinden geçirmektir. Azot gazının sıvı içerisinden geçmesi esnasında metal içerisinde çözünmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisine yayılarak baloncuklarla beraber atmosfere atılması hedeflenmektedir. Son olarak cüruf temizlendikten sonra 3 adet RPT numuneleri alınmıştır.



Şekil 3.15. Sıvı metalin azot gazı ile temizleme işlemi şematik görüntüsü.

3.6. Tane İnceltme Testlerinin Yapılması

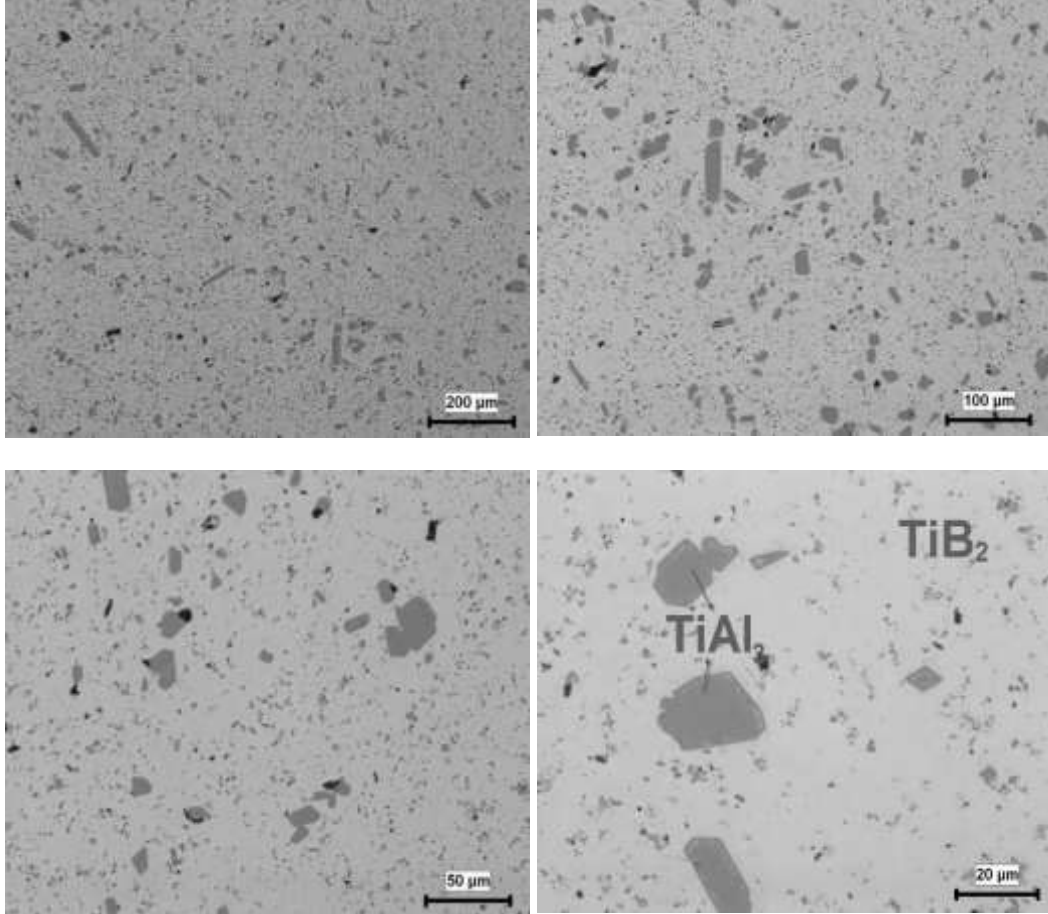
Dökümlerde tane inceltme işleminin kontrolü ve prosesin uygunluğunun tespit edilebilmesi için ALCAN [156] standart tane inceltme testleri yapılmıştır. Böylece kullanılan tane inceltici mastır alaşımı, ilave miktarı ve bekletme süresinin uygunluğu test edilmiştir. Bunun için ilk olarak gaz alma ve cüruf alma işlemleri sonrası sıvı metal içerisine tane inceltici ilavesiz alaşımda tane boyutunu belirlemek için Şekil 3.16.a'da ölçüleri verilen konik çelik pota içerisine 700 °C'de döküm yapılmıştır. Döküm yapılan kalıp Şekil 3.16.b'de şematik görünümü verilen sabit su yüksekliğinde soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde tane inceltici ilavesiz döküm numunesi elde edilmiştir.



Şekil 3.16. a) ALCAN tane inceltme test numunesi ölçüleri, b) İnceleme yüzeyi, c) Soğutma düzeneği [41].

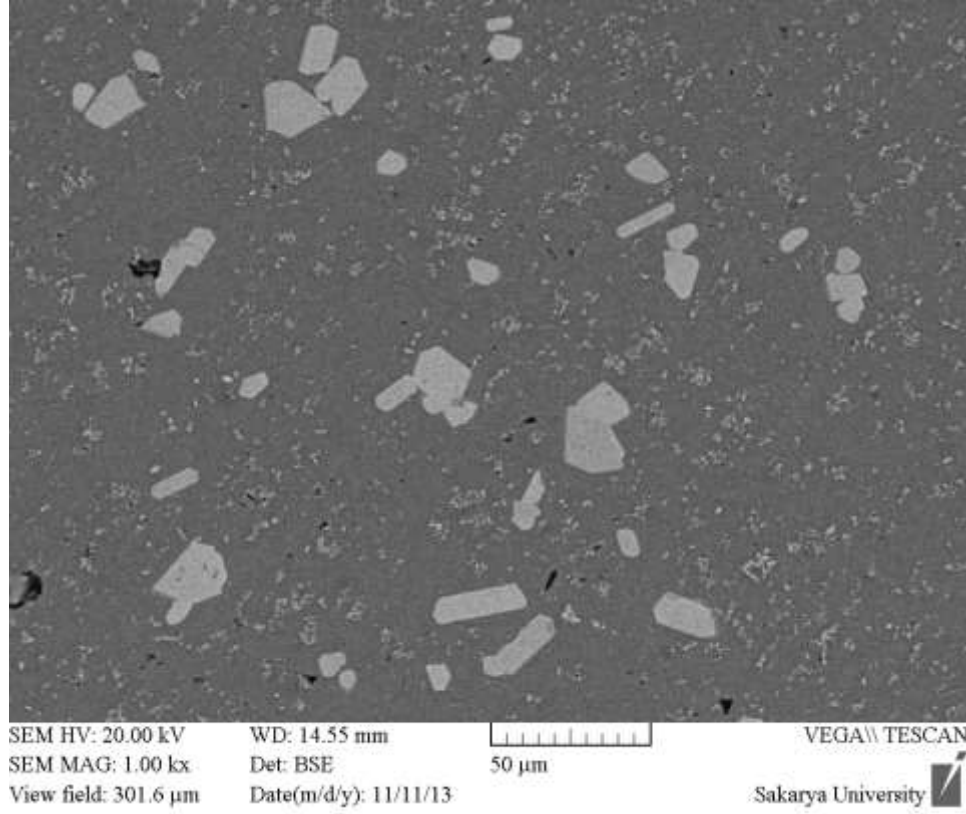
Tane inceltici olarak %5 Ti ve %1 B içeren Al5Ti1B mastır alaşımı kullanılmıştır. Tane inceltici olarak kullanılan Al5Ti1B mastır alaşımında Ti ve B esaslı

partikülleri içermekte ve bunların mikroyapıdaki boyut ve dağılımları tane inceltme etkisi açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple mastır alaşımının mikro yapısı incelenmiştir. Şekil 3.17’de 50X, 100X, 200X ve 500X büyütmelerde çekilen Al5Ti1B alaşımı mikro yapı resimleri verilmiştir.



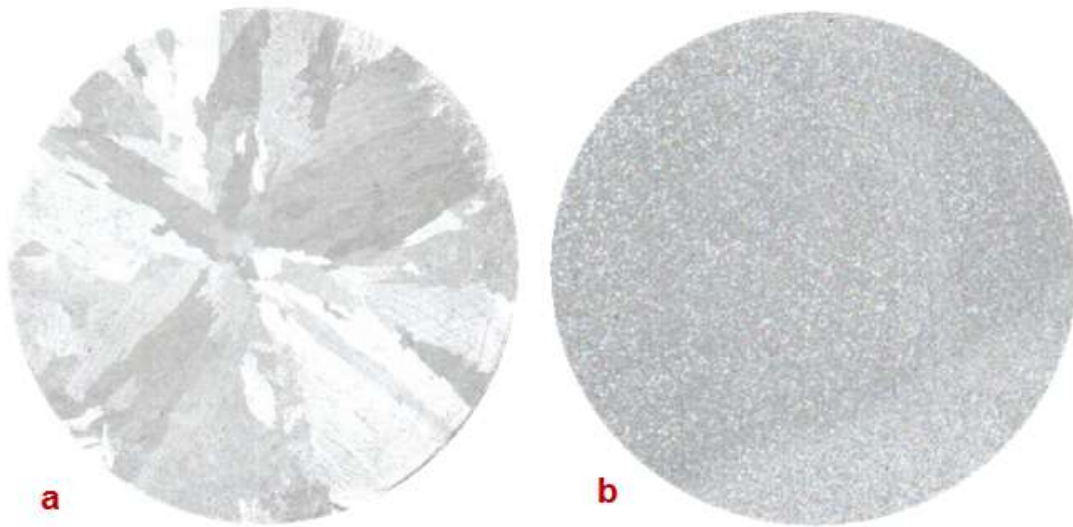
Şekil 3.17. Al5Ti1B mastır alaşımı mikro yapı resimleri.

Şekil 3.17’den de görüldüğü gibi yapı içerisinde TiB_2 ve $TiAl_3$ oldukları literatürde rapor edilen partiküller [35, 157] homojen bir şekilde dağılım sergilemektedir. TiB_2 partiküllerinin boyutu $1\ \mu m$ civarında iken, $TiAl_3$ partiküllerinin ortalama boyları $20\ \mu m$ seviyelerindedir. Bu partiküllerin yapı içerisinde kümeleşmeden homojen bir şekilde dağılım sergilemesi, boyutları etkili bir tane inceltme ve döküm yüzey kalitesini geliştirmek için önemlidir. Şekil 3.18’de alaşımın SEM görüntüsü verilmiştir. Mikroyapı ve SEM incelemeleri sonucu yapılan değerlendirmelere göre tane incelticinin etkili bir şekilde tane inceltme etkisi gösterdiğinden dolayı uygun olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.18. Al₅Ti₁B mastır alaşımı SEM görüntüsü.

Ergiyik alaşıma ağırlıkça %0,2 Ti etki edecek şekilde Al₅Ti₁B tane inceltici mastır alaşımı ilave edildi. İlave işlemi, sıcaklığı 720 °C olan sıvı metalin içerisine sıvı metal miktarına uygun tartılan Al₅Ti₁B mastır alaşımının daldırılması şeklinde yapıldı. Tane inceltici ilavesini takiben literatürde en etkili süre olduğu tespit edilen 15-25 dakika sonrasında koni kalıba döküm yapıldı [51]. Tane inceltme deney kalıbı Şekil 3.16.c’de görüldüğü gibi soğutularak numune elde edildi. Tane inceltme etkisinin belirlenebilmesi için döküm numuneler Şekil 3.16.b’de görüldüğü gibi kesilmiştir. İncelenmek üzere kesilen numuneler metalografik olarak zımparalama ve parlatma işlemleri sonrası dağlama yapılmıştır. Dağlama işlemi, numuneler önce 80°C sıcaklıkta suda bir süre bekletilerek ısıtıldıktan sonra Paulton çözeltisi (%60 HCl, %30 HNO₃, %5HF, %5H₂O) ile gerçekleştirilmiştir [30]. Mikroyapı ve tane boyutu ölçümlerine hazır hale gelen numunelerin makro yapı görüntüleri NIKON SMZ 800 stereoskopa bağlı Clemex dijital kamera yardımıyla alınarak tane boyut ölçümü ve ortalama tane boyutu hesaplaması yapılmıştır. Şekil 3.19’da tane inceltici ilavesiz ve tane inceltici ilavesinden 20 dakika sonra dökülen Etial 220 alüminyum alaşımı makro yapı görüntüleri mevcuttur.

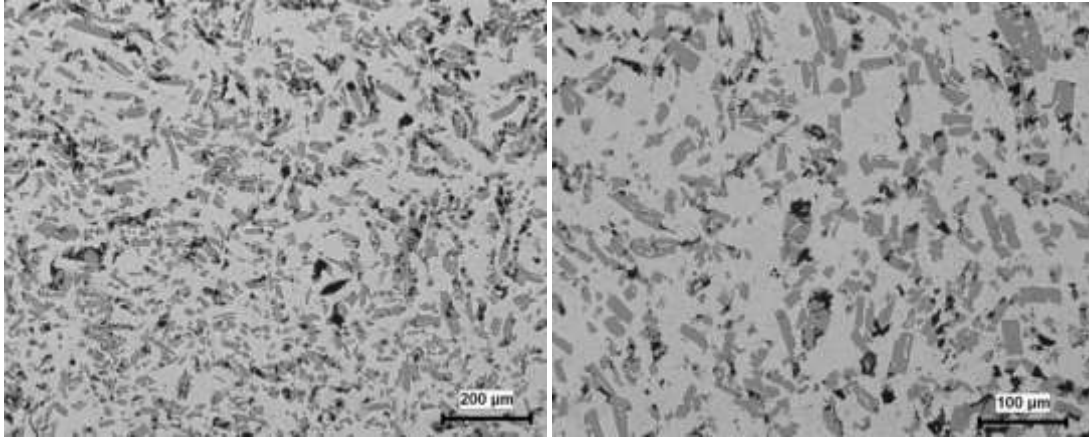


Şekil 3.19. a) Tane inceltici ilave edilmemiş, b) Al5Ti1B mastır alaşımı ilave edilmiş Etial 220 alüminyum alaşımının Alcan testi ile elde edilen makro yapıları.

Şekil 3.19’da görüldüğü gibi tane inceltici ilave etmeden yapılan koni dökümünde oluşan taneler iri ve uzunlamasına büyüme gösterirken, tane inceltici ilavesi ile yapılan dökümlerde Al5Ti1B alaşımı etkisini göstererek tane boyutlarının küçüldüğü ve tanelerin eş eksenli biçimde ortaya çıktığı gözlenmektedir. Tane inceltme deneylerinde yeterli bir tane inceltme görülmesi bu çalışmada kullanılan mastır alaşımının etkili olduğunu göstermiştir.

3.7. Al-Si Alaşımlarında Ötektik Silisyumun Modifikasyonu

Al-Si alaşımlarında Sr, Na ve Sb elementleri ilavesi ile yapı içerisindeki ötektik silisyum lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüşmektedir. Döküm deneylerinde modifiye işleminin uygunluğunun tespit edilebilmesi için test dökümleri yapılmıştır. Modifiye edici olarak ağırlıkça %10 Sr içeren Al10Sr mastır alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan alaşımın içyapısı ve yapı içerisindeki partiküllerin boyutları proses kontrolü açısından önemli olduğundan, alınan numune üzerinden incelemeler yapılmıştır. Şekil 3.20’de Al10Sr master alaşımının mikroyapı resimleri verilmiştir. Al10Sr mikroyapısı içerisindeki partiküllerin kümelenme olmadan homojen bir şekilde dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır.

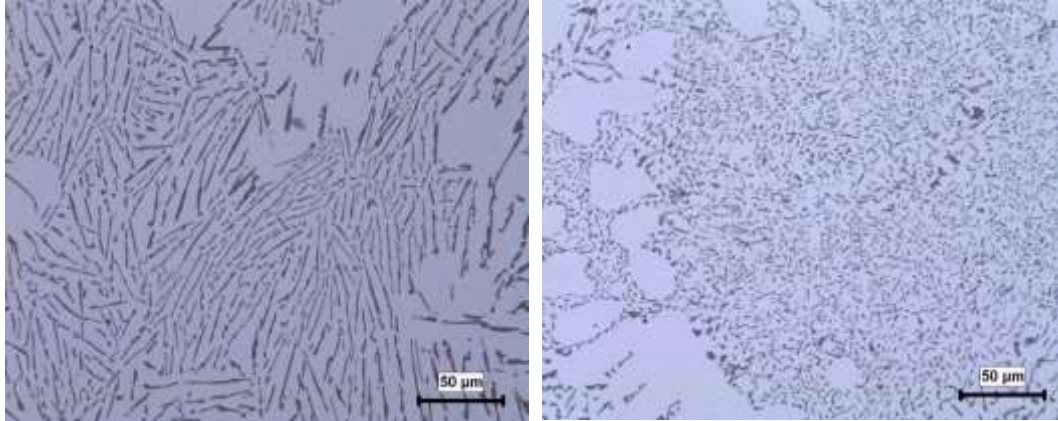


Şekil 3.20. Al10Sr master alaşıımı mikroyapı resmi.

Modifiye işleminin etkinliğinin kontrolü için ilk olarak gaz alma ve cüruf alma işlemleri sonrası modifiye edici ilavesiz olarak döküm yapılmıştır. Daha sonra sıvı metalin sıcaklığı 720 °C iken ocaktaki metal miktarına bağlı olarak %0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr master alaşıımı ilave edilmiştir. İlaveden sonra alaşımanın tam olarak ergimesi için yaklaşık 10 dakika beklendikten sonra dökümler yapılmıştır.

İlavesiz ve Al10Sr ilaveli olarak yapılan dökümlerden elde edilen numuneler metalografik olarak hazırlanarak mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Dağlama işlemi için Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile yapılmıştır [158].

Mikro yapı incelemeleri Nikon marka Eclipse L150A model düz tip mikroskoba bağlı çalışan kamera ile alınarak Clemex Vision Lite imaj analiz yazılımı ile yapılmıştır. Şekil 3.21’de modifiye edici ilavesiz ve Al10Sr ilaveli ötektik Etial 140 alaşıımı dökümlerinden elde edilen numunelerin mikro yapısı görülmektedir. Modifiye işlemi öncesi yapı içerisindeki ötektik silisyum kristallerinin Sr etkisiyle lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüştükleri tespit edilmiştir. Modifiye deneylerinde Şekil 3.21’de de görüldüğü ötektik Si kristallerinin lamelli yapıdan fiberimsi yapıya geçtiğinden deneylerde kullanılan master alaşıımının etkin bir modifikasyon sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.21. a) Modifiye edici ilave edilmemiş, b) Al10Sr ilave edilmiş Etial 140 alaşımı mikroyapı resimleri.

3.8. Deneme Dökümlerinin Yapılması

Model tasarımının uygunluğunun belirlenmesi için deney alaşımları ile kum kalıplara deneme dökümleri yapılmıştır. Kalıp hazırlanmasında kullanılacak olan modeller çift taraflı model plakası şeklinde hazırlanmıştır. Kum kalıpların hazırlanmasında CO₂ gazı ile sertleşen sodyum silikat reçineli kum kullanılmıştır. Dökümler, hazırlanan sıvı metallerin gaz giderme ve cüruf temizleme işlemi yapılarak Tablo 3.10'da verilen şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.10. Deneme dökümler ve döküm şartları.

Döküm Alaşımı	Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220
Külçe Durumu	Primer	Hurda	Primer	Hurda	Primer	Primer
Tane İnceltici İlavesi (Al5Ti1B)	Var	Yok	Var	Var	Var	Var
Modifiye Edici İlavesi (Al10Sr)	Var	Yok	Var	Var	Var	Yok
Seramik Köpük Filtre Kullanımı	20 ppi filtre	Filtre yok	20 ppi filtre	10 ppi filtre	Filtre yok	Filtre yok

Ergimiş sıvı metale tane boyutunu küçültmek amacıyla tane inceltici olarak % 0,2 Ti içerecek şekilde Al5Ti1B tane inceltici ve yapıda oluşan keskin köşeli ötektik Si kristallerini modifiye etmek için % 0,2 Sr içerecek şekilde Al10Sr modifiye edici alaşım ilave edilmiştir. İlave işleminden 15 dakika sonra sıvı metalin temizlenmesi amacıyla kuru azot gazı ile yıkama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonrasında sıvı

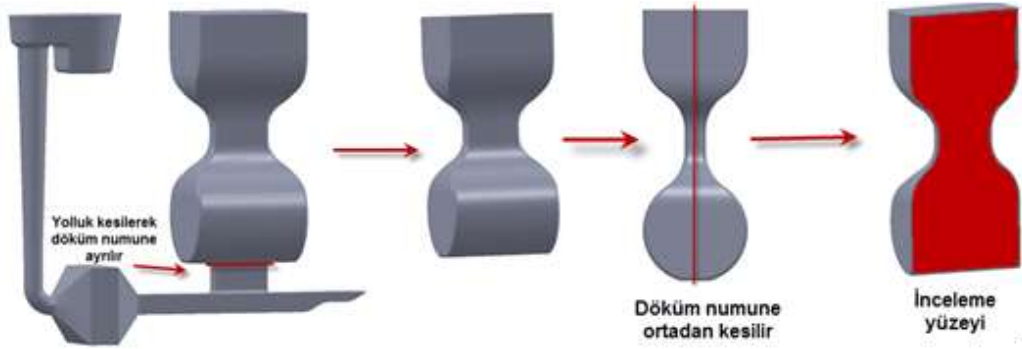
metal yüzeyindeki cüruf temizlenerek döküme hazır hale gelen sıvı metal, kum kalıplara türbilans oluşturmıyacak şekilde dökülmüştür.

Deneme döküm parametreleri belirlenirken amaç, farklı döküm şartlarında farklı kritik katı oranı oluşturmıması muhtemel döküm sonuçlarını incelemek ve model tasarımı uygunluğuna karar vermektir. Modelleme sonuçlarına göre, alaşımların termal özellikleri de dikkate alınarak bazı alaşımların dökümünde ince taneli nispeten iyi döküm özellikleri sağlayarak muhtemel en yüksek kritik katı oranı değerlerine sahip dökümler oluşturmıması hedeflenirken bazı alaşımların dökümünde en düşük kritik katı oranı oluşturmıacağı tahmin edilen şartlarda deneme dökümleri yapılmıştır. Döküm kesitlerindeki tüm boşlukların çekinti kaynaklı olduğundan emin olmak için sıvı metal döküm öncesi azotla yıkanarak temizleme işlemi yapılmıştır. Deneme dökümleri öncesi sıvı metal temizliğinin kontrolü için RPT numuneleri alınmıştır.

Model tasarımının uygunluğunun belirlenmesi ve döküm sonuçlarının modelleme programında çıkan sonuçlarla karşılaştırılarak kritik katı oranı değerlerinin belirlenmesi için döküm numuneler çeşitli yöntemlerle incelenmıştir. Döküm numunelerde ilk olarak yüzeylerde bir çöküntü olup olmadığı kontrol edilmiştir. Dökümlerin yüzeyinde çöküntü olması halinde iç kısımda çıkması muhtemel boşluklar azalır ve iç kısmında oluşacak boşlukların tespiti ve ölçülebilmesi zorlaşır. Döküm numuneler en son katılaşmanın gerçekleştiği döküm ve besleme boğazı bağlantı yüzey bölgeleri makro olarak incelenmıştir. Deneme dökümü sonucu bir numunenin yüzeyinde çöküntü olması durumunda model tasarımın yeterince uygun olmadığı var sayılmıştır.

Numunelerin döküm ve boğaz bağlantısı içerecek şekilde yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Her bir numunenin önce havada daha sonra su içerisinde ağırlıkları tartılmıştır. Belirlenen ağırlıklardan deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır. Deneysel yoğunluk hesaplandıktan sonra alaşıma ait teorik yoğunluk oranından döküme ait boşluk gözenek değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.22’de gösterildiği gibi döküm numuneler önce şerit testere yardımı ile düşey eksen boyunca kesilmiş ve daha sonra freze yardımı ile yüzeyleri temizlenmıştir. Frezelenmiş

yüzeyin daha iyi gözükmesi amacıyla zımparalanmış ve kesit yüzeyde oluşan gözeneklerin biçiminin incelenmesi stereoskopta yapılmıştır. Yüzey görüntüsü tarayıcı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 3.22. Dökümlerin incelenmek üzere kesilmesinin şematik görünüşü.

Döküm numunelerin iç kesitlerinde çekinti boşluklarının olduğu bölgenin tespiti için ön görünüş ve yan görünüşlerinden 2 yönlü radyografi filmleri çekilmiştir. Radyografi çekimleri ticari olarak döküm radyografi muayeneleri yapan bir firmada gerçekleştirilmiştir. Çekilen radyografi filmleri özel bir ışık düzeneği ile aydınlatılarak fotoğraf çekimi ile görüntü elde edilmiştir.

3.9. Model İmalatı

Deneme dökümleri ve modelleme çalışmaları sonucu uygun görülen tasarım için model imalatına geçilmiştir. Model imalatı yapılırken kum, kokil ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde yapılacak deneylerden elde edilen tüm sonuçların birbiriyle karşılaştırılabilmesi açısından model geometrisi sabit tutulmuştur.

3.9.1. Kum kalıba döküm yöntemi için model plakası oluşturulması

Kum kalıba döküm yönteminde kalıp hazırlanması için model plakası imal edilmiştir. Model plakası çift taraflı olarak açma derece içerisinde kalıplanabilecek şekilde derece içerisinde hazırlanmıştır. Şekil 3.23’de model plakası görüntüsü verilmiştir. Kalıplama tasarımına bir adet silindirik test çubuğu eklenmiştir. Bu test çubuğundan mekanik testler için numuneler, spektrometre numuneleri, mikro yapı numuneleri alınarak incelemeler yapılması sağlanacaktır.

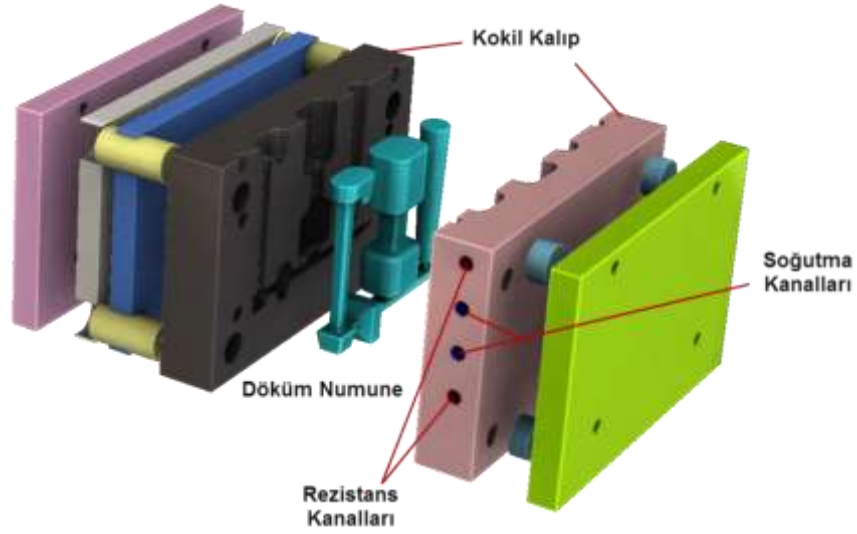


Şekil 3.23. Model plakası görüntüsü.

3.9.2. Kokil kalıp tasarımı ve imalatı

Öncelikle kum kalıp için yapılan döküm geometrisinin kokil kalıba da uygun olup olmadığının denenmesi açısından SolidCast döküm simülasyon programı ile kokil kalıp için değişen döküm şartlarında modellemeler yapılmış ve tasarımın uygunluğu değerlendirilmiştir. Kum kalıp tasarımında yaşanan yüzey çöküntü probleminden dolayı tasarım uygunsuzluğu kalıp malzemesinin ısı transfer katsayısının daha fazla olması ve sıvı metalin kalıba dökümünde çok daha çabuk kabuk yapabilecek olmasından dolayı ve kum kalıp dökümlerinde uygun olan tasarımın kokil kalıpta da kullanılabileceği düşünülmüştür.

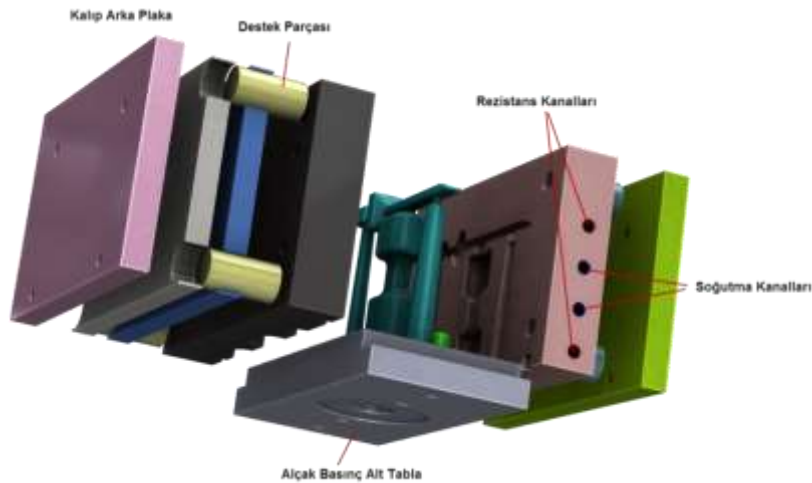
Kokil kalıp tasarımında kalıpların farklı ön ısıtma sıcaklıklarına sahip olabilmeleri için kalıp içerisine açılan ısıtıcı ekipman kanallarına rezistans bağlanarak bir kontrol ünitesi yapılmıştır. Böylece kalıp ön ısıtma sıcaklığı kontrol altına alınabilmektedir. Kalıplama tasarımına, kum kalıp tasarımında da olduğu gibi silindirik test çubuğu eklenmiştir. Kokil kalıpların imalatı Altun Döküm Sanayi A.Ş. (Konya) firmasında imal edilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen kalıp hidrolik preslere bağlanmış ve kalıp açma kapama ilgili makinede gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.24’de kokil kalıba döküm yöntemlerinde kullanılacak olan kalıp tasarımı görülmektedir.



Şekil 3.24. Kokil kalıp görüntüsü.

3.9.3. Alçak basınçlı döküm kalıp tasarımı ve imalatı

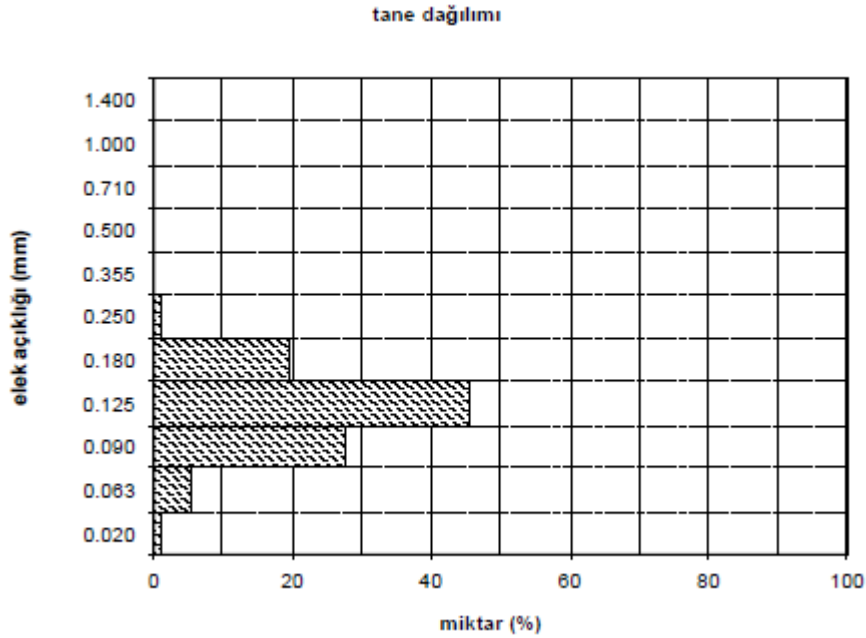
Kalıp tasarımı diğer döküm yöntemleri ile aradaki farkın karşılaştırılabilmesi açısından model geometrisi aynı kalacak şekilde alçak basınçlı döküm yöntemine uygun olarak yapılmıştır. Kalıpların imalatı ve dökümleri Altun Döküm Sanayi A.Ş. firmasında gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen kalıp bir hidrolik açma kapama presine bağlanmış ve sıvı metalin belirlenen basınç altında kalıbı doldurması ve katılaşma sonrası kalıpların açılması bu sistem yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.25’de alçak basınçlı döküm yönteminde kullanılacak olan kalıp tasarımı görülmektedir.



Şekil 3.25. Alçak basınçlı döküm kalıp görüntüsü.

3.10. Kum Kalıba Döküm Deneyleri

Bu bölümde deneme dökümleri sonucu tasarımı uygun bulunan model ile yapılan kum kalıpların hazırlanması ve döküm çalışmaları verilecektir. Kum kalıpların hazırlanmasında çift taraflı model plakası kullanılmıştır. Kalıp kumu; 90-110 AFS tane boyutuna sahip kuru silis kumu içerisine %2,5 oranında sodyum silikat reçine eklenip kum mikserinde karıştırılarak elde edilmiştir. Siltaş Silis Kumları San ve Tic. A. Ş. firmasından temin edilen 90-110 AFS tane boyutuna sahip silis kumuna ait tane boyutu ve dağılımı grafiği Şekil 3.26’da verilmiştir [159].



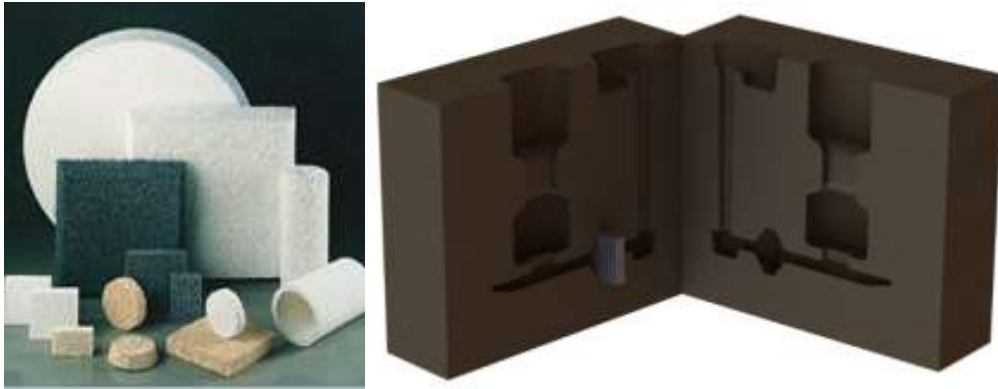
Şekil 3.26. Deneylerde kullanılan 90-110 AFS silis kumuna ait tane boyut dağılımı [159].

Kalıp hazırlanması için öncelikle kalıp kumunun modele yapışmasını önlemek için kalıp ayırıcı madde olarak grafit serpilmiştir. Sonrasında hazırlanmış kalıp kumu kademeli olarak derece içerisine doldurulmuş ve elle dövülerek sıkıştırılmıştır. Kalıba uygulanan gazın her tarafa ulaşmasını sağlayarak kalıbı daha iyi sertleştirebilmesi ve döküm esnasında gaz çıkışını sağlamak için şiş yardımı ile kanallar açılmıştır. Son olarak 3 dk. süre ile kalıba CO₂ gazı verilerek kalıp hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Derece ve modellere verilen koniklik sayesinde kalıplama işlemi sonrası hazırlanan kalıp rahatça modelden ayrılabilir. Şekil 3.27’de kalıp hazırlama işlem basamaklarından örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.27. Kum kalıplama işlemlerinde örnek görüntüler.

Hazırlanan kalıplara dolum esnasında sıvı metal türbilanslarını azaltmak, içerisindeki inklüzyonları temizlemek, döküm parçanın mekanik özelliklerinin artırılması ve yüzey kalitesini artırmak amacıyla 20 ppi gözenek boyutunda seramik filtreler eklenmiştir. Şekil 3.28’de seramik döküm filtre ve filtre yerleştirilmiş kalıp görüntüsü verilmiştir [155].



Şekil 3.28. Dökümlerde kullanılan seramik filtre örnekleri [150], b) Filtre yerleştirilmiş bir kum kalıp CAD çizim görüntüsü.

Filtre yerleştirilen kalıplar merkezleme maçalarına göre kapatıldıktan sonra döküm esnasında sıvı metal basıncına karşı kalıpların açılmasını önlemek için ve kalıpları bir arada tutabilmek için plakalar arasına konulup işkence ile sıkıştırılarak döküme hazır hale gelmiştir. Kum kalıba döküm deneyleri kapsamında Tablo 3.5’de verilen deney şartlarına uygun olarak dökümler yapılmıştır. Dökümlerde her bir alaşım için kimyasal bileşime uygun primer külçe kullanılmış ve her bir döküm deneyinden 3’er adet kum kalıba döküm yapılmıştır. Şekil 3.29’da döküme hazır kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.29. Döküme hazır kalıp görüntüsü.

Tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz dökümlerde ocak içerisindeki metal ergidikten sonra sıvı metalin çözünmüş hidrojen gazından arındırılması amacı ile yaklaşık 720°C ' de potaya daldırılan grafit sabit lans yardımı ile 5 dk boyunca azot ile yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Azotla temizleme sonrası RPT numunesi alınarak azotla temizleme işleminin uygunluğu kontrol edilmiştir. Sonrasında pota ocak dışına alınıp sıvı metal üzerindeki cüruf sıyrıklarıyla temizlenmiş ve dökümlere geçilmiştir. Tane inceltici olarak % 0,2 Ti içerecek şekilde Al5Ti1B tane inceltici ve yapıda oluşan keskin köşeli ötektik Si kristallerini modifiye etmek için % 0,2 Sr içerecek şekilde Al10Sr modifiye edici alaşım ilave edilmiştir. Tane inceltici ve modifiye edici ilavesi gereken dökümlerde ocak içerisindeki sıvı metal sıcaklığı 700°C iken master alaşımı ilaveleri yapılmıştır. İlaveden 10 dk sonra 5 dakika boyunca azotla temizleme işlemi yapılmıştır. Temizleme sonrası RPT numunesi alınıp cüruf temizlendikten sonra dökümlere geçilmiştir. Dökümler ilaveden 15-20 dakika sonrasında yapılmıştır. Kum kalıpların dökümü tamamlandıktan sonra kalan sıvı metal silindirik bir kokil kalıba dökülerek buradan alaşımın teorik yoğunluk ölçümleri ve mikro yapı numuneleri çıkarılmıştır. Şekil 3.30'da döküm sonrası kalıp görüntüsü ve kalıptan çıkarılmış döküm numune görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.30. Döküm sonrası kalıp görüntüsü.

3.11. Kokil Kalıba Döküm Deneyleri

Kokil kalıp döküm deneyleri Konya’da yer alan ve ticari olarak faaliyet gösteren Altun Döküm A.Ş. firmasında gerçekleştirilmiştir. Döküm deney parametreleri kum kalıp dökümlerinden elde edilen bilgiler, dökümhane şartları ve piyasa uygulamaları da değerlendirilerek Tablo 3.6’da verildiği gibi belirlenmiş ve Tablo 3.7’de verilen şartlara uygun olarak dökümler yapılmıştır. Kokil kalıplar döküme hazırlanırken yüzeyleri kuru buzla temizlenmiştir. Kuru buz normal basınç şartları altında sıvı halde bulunmayan karbondioksitin $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de dondurularak katı hale getirilmesi ile elde edilen buzdur [160].

Yüzeylerin temizlenmesinin ardından kalıplar yarı izolasyonlu kokil kalıpların kaplanmasında kullanılan yüksek yapışkanlık kabiliyetli ve sedimentasyonu çok az olan CILLOLIN AL 2812 G kokil kalıp boyası ile boyanmıştır. Kalıp boyama sonrası deney parametre şartlarına uygun ön ısıtma sıcaklığına getirilen kalıp 20 ppi (pore per inch) seramik köpük filtre konularak kapatılmış ve döküme hazır hale getirilmiştir. Kalıp açma süresi 5 dakika olarak belirlenmiş ve dökümden 5 dakika sonra açılan kalıp yüzeyi temizlendikten sonra diğer döküme geçilmiştir. Dökümlerde her bir alaşım için kimyasal bileşime uygun primer külçe kullanılarak döküm yapılmıştır. Şekil 3.31’de dökülmüş bir kokil kalıp görüntüsü verilmiştir.

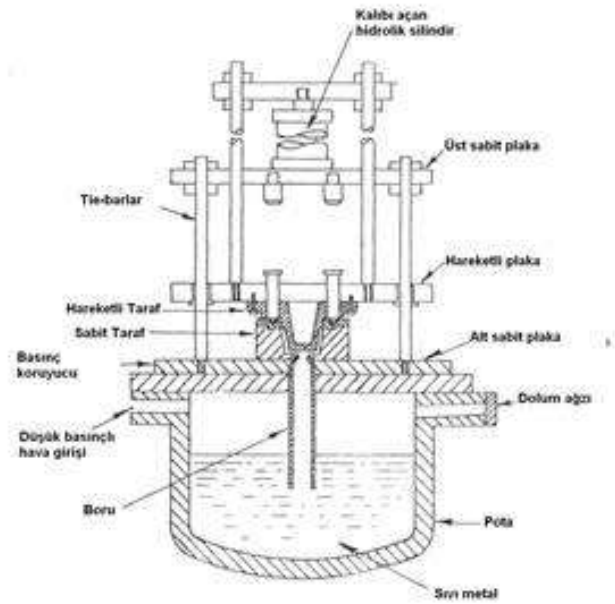


Şekil 3.31. Kokil kalıba döküm sonrası kalıp görüntüsü.

Kokil kalıba dökümlerde metal temizleme, tane inceltici ve modifiye edici ilavesi işlemleri kum döküme benzer şekilde yapılmıştır. Döküm sonrası kalıp açma ve dökümlerin çıkarılması ve 3 dökümün tamamlanması esnasında geçen zamanlarda sıvı metal durumunun kontrolü açısından döküm sonunda potada kalan metalden bir RPT numunesi daha alınmıştır. Bazı dökümlerde sıvı metalin beklemesinden dolayı bir miktar gaz (H) aldığı tespit edilmiş, gaz durumuna göre kabul edilebilir seviyelerde ise döküm deneylerine devam edilmiş gaz seviyesi fazla olduğunda sıvı metal tekrar temizlenerek gazlı olarak yapılan dökümler tekrar edilmiştir. Şekil 3.31’de döküm sonrası kokil kalıp ve döküm numune görüntüsü verilmiştir.

3.12. Alçak Basıncılı Döküm Deneyleri

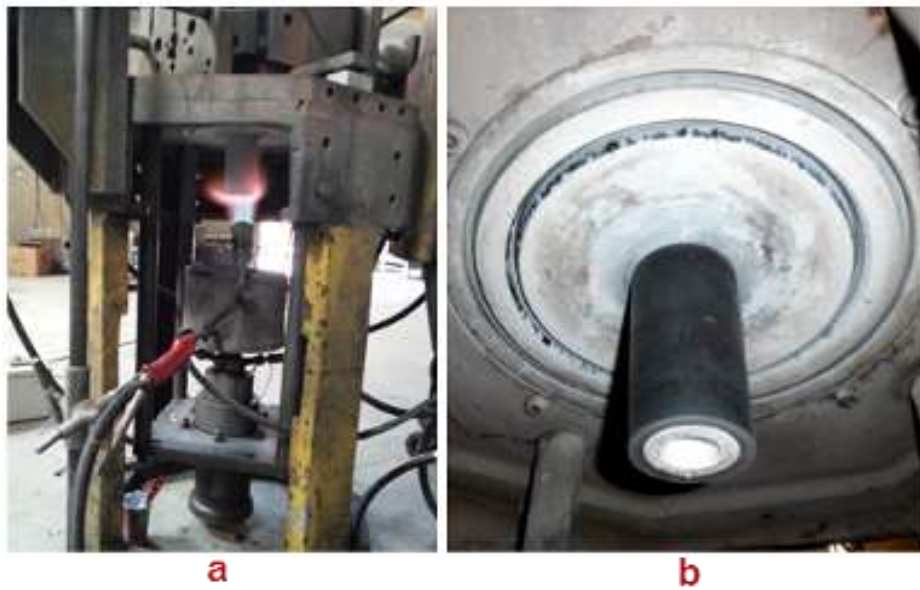
Alçak basınçlı döküm yönteminde, gravite dökümden farklı olarak enjeksiyon ve katılaşma sırasında kalıp içerisindeki metale pota üzerinden pozitif bir basınç uygulanır. Potada sıvı metalin yüzeyi altına daldırılmış ve aşağılara kadar inen bir besleme borusuyla monte edilen kalıbın altında hava geçirmeyen bir sistem kullanılır. Atmosfer basıncının biraz üstünde uygulanan bir basınç ile hava veya asal gaz potaya gönderilir ve bu potadaki sıvı metal seviyesine baskı yapar ve sıvı metalin kalıbı doldurmak için yukarı çıkmasını sağlar. Alçak basınçlı döküm yöntemi şematik olarak Şekil 3.31’de görülmektedir [1].



Şekil 3.32. Alçak basınçlı döküm yöntemi şematik görüntüsü [1].

Kalıp tasarımı diğer döküm yöntemleri ile sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından aynı geometride yapılmıştır. Kalıpların imalatı ve dökümleri kokil kalıp dökümlerinde olduğu gibi Altun Döküm A.Ş. firmasında gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen kalıp hidrolik preslere bağlanmış ve sıvı metalin belirlenen basınç altında kalıbı doldurması ve katılaşma sonrası kalıpların açılması ilgili makinede gerçekleştirilmiştir.

Alçak basınçlı döküm deney parametreleri belirlenirken piyasa şartları değerlendirilerek dökümlerin katılaşmasındaki kritik katı oranı ve dolayısıyla gözenek oluşumuna etkileri en fazla olan şartlar göz önüne alınmıştır. Kalıp sıcaklığının etkisi kokil kalıba döküm deneylerinde de inceleneceğinden sıcaklık bütün döküm deneylerinde 300 °C olarak sabit alınmıştır. Basıncı etkisini incelemek için parça büyüklüğüne bağlı olarak 3 farklı basınç değerleri belirlenmiştir. Bu değerler bu parçanın büyüklüğü ve hacmi düşünüldüğünde düşük, orta ve yüksek basınç şeklinde de değerlendirilebilir. Tablo 3.10'da verilen deney şartlarına uygun olarak 3'er adet döküm yapılmıştır. Kalıpların yüzeyleri döküm öncesinde kuru buzla temizlenmiş ve kalıp boyası ile boyanmıştır. Alçak basınçlı döküm kalıbı yolluk haznesine seramik yolluk eklenmiş ve döküm öncesi sıvı metalin yollukta katılaşmasını engellemek için şalama ile ısıtılmıştır. Şekil 3.33'de alçak basınçlı döküm öncesi seramik yolluk ısıtılması görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.33. a) Döküm öncesi yolluğun ısıtılması, b) Seramik yolluk görüntüsü.

Her bir alaşım için primer külçe kullanarak deney parametrelerine uygun hazırlanan sıvı metal azotla temizleme, cüruf alma sonrası ocaktan alınarak el potaları yardımıyla kalıp haznesine dökülmüştür. Haznenin içerisindeki sıvı metal uygulanan basınçla kalıba dolarak döküm gerçekleştirilmiştir. 5 dk. boyunca basınç uygulanan kalıp dökümün katılaşmasının ardından açılarak numuneler itici pimler yardımıyla alınmıştır. Tane inceltici ve modifiye edici ilavesi gereken deneylerde kum ve kokil kalıpta uygulanan prosedüre uygun olarak yapılmıştır.

3.13. Statik Sıvı Metal Basıncı Deneyleri

Statik sıvı metal basıncı değişiminin, döküm içyapısında gözenek oluşumuna ve kritik katı oranı üzerindeki etkisi incelemek üzere, farklı basınç oluşturacak şekilde model ve kalıp tasarımı yapılmıştır. Bu tasarıma uygun olarak yaptırılan model plakası ile kum kalıba dökümler yapılmıştır.

3.13.1. Statik sıvı basıncı model tasarımı ve imalatı

Kalıplama tasarımı yapılırken döküm deneylerindeki model tasarımı esas alınmış ve bu modelle karşılaştırma yapılacak şekilde tasarım yapılmıştır. Döküm deneylerinde kullanılan model geometrisi ve ölçüleri belirlenirken üzerinde farklı kesit kalınlıkları ve katılaşma sonrası iç kısımlarda değişen döküm şartlarında ölçülebilir nitelikte hata oluşması hedeflenmiştir. Ayrıca ölçüler, modül ve hacim kriterlerine bağlı olarak döküm içerisinde oluşan hatanın besleyici olarak tasarlanan üst kısımda oluşacak şekilde tasarlanmış böylece döküm içerisindeki hata, sadece katılaşma sırasında besleme yolunun kesildiği kritik katı oranı ile ilişkilendirilmiştir. Statik sıvı basıncı deneyleri için yapılan tasarımda Şekil 3.4’de görülen modelin parçalarından sadece üst kısımda kalan besleyici kısmının ölçüleri değiştirilmiştir. Bu kısımda ilk model tasarımında olan besleyici ile aynı modül ve hacimde olacak şekilde hesaplanmıştır.

Döküm deneylerinde kullanılan modelin besleyici modül hesaplamaları şu şekilde yapılmıştır.

$$M_B = V_B / A_B \quad (3.6)$$

$$M_B = (4,5 \times 6 \times 6) / [4 \times (4,5 \times 6) + 2 \times (6 \times 6)]$$

$$M_D = 162 / 180 \quad M_D = 0,9 \text{ cm}$$

Statik Sıvı Basıncı İçin Tasarlanan Modelin Besleyici Modül Hesaplamaları

$$M_B = V_B / A_B \quad M_B = (4,5 \times 4,5 \times 9) / [4 \times (4,5 \times 9) + 2 \times (4,5 \times 4,5)]$$

$$M_D = 182,25 / 202,5 \quad M_D = 0,9 \text{ cm}$$

Modül kriterine göre yapılan hesaplamalarda her iki tasarımda da besleyici modülünün eşit olacağı şekilde ölçüler belirlenmiştir. Hacim kriterine göre gerekli besleyici hacmini hesaplamak için alaşımın çekinti miktarı, besleyici verimi gibi bilgilere ihtiyacımız vardır. Alaşım çeşidine göre çekinti miktarı değişeceğinden, hesaplamalarda bütün alaşımlarda uygulanacak % 7 gibi toleranslı bir değer alınması uygun bulunmuştur.

Besleyici hacmi = Alaşımın çekintisi (%) x Döküm hacmi) / (Besleyici verimi – Alaşımın çekinti (%)

$$V_b = (\alpha V_d) / (\epsilon - \alpha) \quad V_b = (0,07 \times 121,5) / (0,14 - 0,07) \quad \mathbf{V_b = 121,5 \text{ cm}^3}$$

Yapılan hesaplamalarda gerekli besleyici hacminin en az 121,5 cm³ hacminde olması gerektiği belirlenmiştir. Modül kriterine göre hesaplanan ve uygun görülen (6cmx6cmx4,5cm) ebatlardaki besleyicinin hacim kriterine uygunluğunu aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

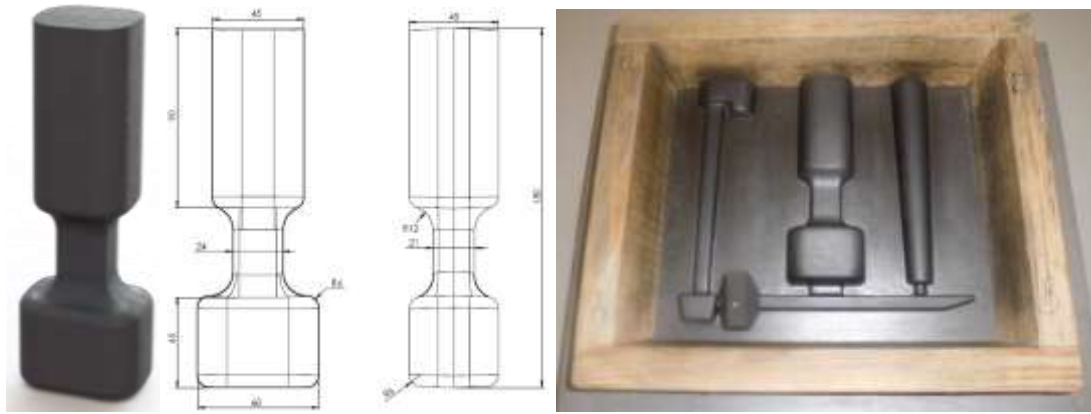
$$V_b = 6 \times 6 \times 4,5 \quad \mathbf{V_b = 162 \text{ cm}^3}$$

Aynı şekilde statik basıncı deneyleri için tasarlanan modele ait besleyicinin hacminin uygunluğunu da aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$V_b = 4,5 \times 4,5 \times 9 \quad \mathbf{V_b = 182,5 \text{ cm}^3}$$

Yapılan hesaplamalara göre statik sıvı basıncı deneyleri için besleyici değiştirilerek model imalatına geçilmiştir. Model plakası çift taraflı olarak sandık tipi derece

içerisinde hazırlanmıştır. Kalıplama tasarımına diğer döküm yöntemlerindeki kalıplama tasarımlarında olduğu gibi döküm şartlarına uygun ve daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi açısından silindirik test çubuğu eklenmiştir. Plak modelde kum kalıp hazırlanırken 40mm x 40mm x 15mm ebatlarında seramik filtre konulabilmesi için yatay yolluk üzerinde portatif filtre modeli de yapılmıştır. Model geometrisi ve ölçüleri ile plak model görüntüsü Şekil 3.34’de verilmiştir.



Şekil 3.34. Statik sıvı basıncı deney model geometri ölçüleri ve model plakası görüntüsü.

3.13.2. Kalıpların hazırlanması ve döküm işlemleri

Statik sıvı metal basıncı deneyleri için kum kalıplara dökümler yapılmıştır. Kum kalıpların hazırlanmasında CO₂ gazı ile sertleşen sodyum silikat reçineli kum kullanılmıştır. Hazırlanan kalıplar birbirine merkezleme maçaları ile yerleştirilip kapatıldıktan sonra plakalar arasında işkence ile sıkıştırılarak döküme hazır hale gelmektedir. Dökümlerde hazırlanan sıvı metaller gaz giderme ve cüruf temizleme işlemi yapılarak Tablo 3.11’de verilen şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.11. Kum kalıba döküm yönteminde yapılan döküm deneyleri.

Alaşım	Külçe	Filtre Kullanımı	Tane İnceltici İlavesi	Modifiye Edici İlavesi
Etial 160	Primer	20 ppi seramik	İlave yok	İlave yok
Etial 160	Primer	20 ppi seramik	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	İlave yok
Etial 160	Primer	20 ppi seramik	% 0,2 Ti ilaveli (Al5Ti1B)	% 0,2 Sr ilaveli (Al10Sr)

Ergimiş sıvı metale tane boyutunu küçültmek amacıyla tane inceltici olarak % 0,2 Ti içerecek şekilde Al5Ti1B tane inceltici ve modifiye edici olarak % 0,2 Sr içerecek şekilde Al10Sr modifiye edici alaşım ilave edilmiştir. İlave işleminden 15 dakika sonra sıvı metalin temizlenmesi amacıyla sıvı azotla yıkama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonrasında sıvı metal yüzeyindeki cüruf temizlenerek döküme hazır gelen sıvı metal kum kalıplara türbilans oluşturmayaacak şekilde dökülmüştür. Dökümlerin gaz kaynaklı çekintilerinin sonuçlara etkisini ortadan kaldırmak için sıvı metal döküm öncesi azotla yıkanarak temizleme işlemi yapılmıştır. Döküm öncesi RPT numuneleri alınarak sıvı metal temizliği kontrol edilmiştir.

Döküm sonuçlarının modelleme programında çıkan sonuçlarla karşılaştırılması ile kritik katı oranı değerlerinin belirlenmesi ve statik sıvı basıncının gözenek oluşumuna etkisini incelemek için döküm numuneler çeşitli yöntemlerle değerlendirilmiştir. Döküm numunelere uygulanan inceleme yöntemleri dökümlerin incelenmesi kısmında detaylı olarak açıklanacaktır.

3.14. Dökümlerin İnceleme Yöntemleri

3.14.1. Sıvı metal temizliği testleri

Sıvı metal temizleme işleminin ardından gazlılık durumunu belirlemek amacıyla RPT (Düşürülmüş Basınç Testi – Reduced Pressure Test) gaz ölçüm testi uygulanmıştır. Şekil 3.35’de bu çalışmada kullanılan RPT cihazının ve örnek bir RPT numunesinin fotoğraf görüntüsü verilmiştir. Test numunesinde yüksek oranda gaz boşluğu çıkarsa sıvı alaşımda yüksek oranda hidrojen çözündüğü, buna karşılık numunede az sayıda gaz boşluğu var ise sıvı metalde o derece az çözünmüş hidrojen bulunduğu kabul edilmektedir.

Deneylerde sıvı metal temizleme işleminden sonra RPT numunesi alınarak dökümlere geçilmiştir. Özellikle kokil ve alçak basınçlı döküm deneylerinde kalıp açma ve dökümlerin çıkarılması ve bütün dökümlerin tamamlanması esnasında geçen zamanlarda sıvı metal durumunun kontrolü açısından döküm sonunda potada kalan metalden bir RPT numunesi daha alınmıştır. Çalışma kapsamında yapılan

dökümlerde gazlılık oranının yüksek çıktığı durumlarda sıvı metal temizleme işlemi tekrarlanarak gaz seviyesinin kabul edilebilir seviyelere kadar düşmesi sağlanmıştır. Elde edilen RPT numuneleri dikey olarak ortadan kesilmiş ve yüzey sırasıyla 180, 400, 800, 1000 gritlik SiC zımparalarla metalografik olarak hazırlanarak incelemelere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.35. a) RPT cihazı görüntüsü, b) RPT numunesi.

3.14.2. Döküm numunelerde yüzey çöküntüsü kontrolü

Katılaşma sonrası kalıptan çıkarılan döküm numunelere ait kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemleri için örnek görüntüler Şekil 3.36’da verilmiştir.



Şekil 3.36. a) Kum kalıp, b) Kokil kalıp, c) Alçak basınçlı döküm numune örnekleri.

Kalıptan çıkarılan döküm parçalar, numunelerin incelenebilmesi açısından ilk olarak yolluklarından kesilerek ayrılmıştır. Döküm numunelerin makro olarak (gözle kontrol) yüzey çöküntü kontrolleri yapılmıştır. Dökümlerin yüzeyinde çöküntü olmaması iç kısımda çıkması muhtemel hataların tespiti ve ölçülebilmesi açısından

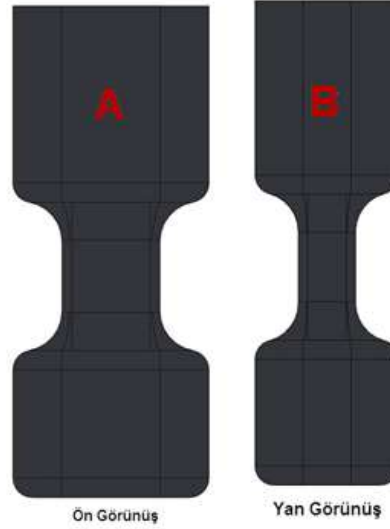
önemlidir. Bazı dökümlerde kalıp ve döküm sıcaklığının çok fazla olması, kalıbın erken açılması gibi sebeplerden dolayı özellikle numunenin alt kısmı ile besleyici boğazının birleştiği yerlerde çöküntüler ve sıcak yırtılma sonucu hatalı dökümler tespit edilmiştir. Hatalı döküm numuneler uygun parametrelere göre tekrar edilerek yeniden dökülmüştür.

3.14.3. Radyografi incelemeleri

Döküm parça iç kesitlerinde oluşan hataların yeri değişkenlik gösterdiğinden döküm içerisindeki hataların radyografi incelemeleri sonucu belirlenmesi gerekli görülmüştür. Bu sayede değişen döküm şartlarına göre farklı yöntemlerle belirlenen gözenek değerlerinin karşılaştırması ve doğrulaması yapılabilmektedir. Aynı döküm parçalar farklı firmalara gönderilerek radyografik sonuçlar için optimum şartların belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan test çekimleri sonucu döküm numunelerin radyografi incelemeleri ticari olarak faaliyet gösteren Dekat Test Kontrol ve Mühendislik firmasında yapılması uygun bulunmuştur. Radyografi çekimleri için Se75 enerjisi kullanılarak Gama-Ray cihazında 1-3 dakika arası süre uygulanmıştır. 10AL EN ve 6Al EN penetremetre değerleri kullanılmıştır. Çekimler tek yönde tek görüntü olacak şekilde pozisyonlandırılmış ve film başına 10 dakika banyo sonucu radyografi filmleri elde edilmiştir.

Radyografi çekimlerinde numuneler Şekil 3.37’de görüldüğü gibi ön yüzeyi A ve yan yüzeyi B olarak kodlanarak iki yönlü olarak incelenmiştir. Çekilen filmlerin bilgisayar ortamına aktarılması için karanlık oda şartlarında ışık kaynağına konulan filmlerin fotoğrafları çekilmiştir. Bütün firmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde döküm içerisindeki 200µm geçen büyüklükteki boşlukların bu yöntemle rahatlıkla görüntülenebildiği anlaşılmıştır. Ancak bu değer altında kalan boşlukların çok net bir şekilde belirlenemediği anlaşılmıştır. Başlı başına bir yöntem ile değerlendirmeler hatalı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Radyografi sonuçları ile yaklaşık 200 µm altındaki boşluklar tespit edilemediğinden değerlendirmede yetersizlik olabilmektedir. Bu sebeple bir dökümde gözenek miktarının belirlenmesinde ve dökümler arasında daha net karşılaştırmalar yapılabilmesi için

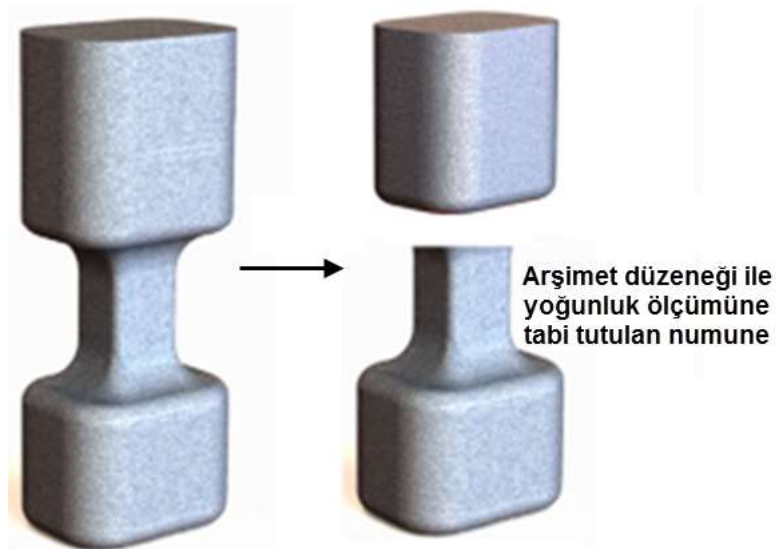
Arşimet yöntemi ile yoğunluk ölçümleri gibi ilave yöntemlerle de değerlendirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.37. Radyografi incelemesi çekim yönlerini ve kodlanmasının gösterilişi.

3.14.4. Yoğunluk ölçümleri

Döküm numunelerin ve RPT numunelerinin boşluk gözenek oranlarının sayısal olarak belirlenebilmesi ve değerlendirilebilmesi açısından yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Numuneler Şekil 3.38’de görüldüğü gibi döküm ve boğaz bağlantısı içerecek şekilde yoğunluk ölçümlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.38. Döküm numunesinin yoğunluk ölçümleri için kesilen bölgesi.

Arşimet prensibine göre her bir numunenin önce havada daha sonra su içerisinde ağırlıkları tartılmıştır. Belirlenen ağırlıklardan numunenin havadaki ağırlığı (m_h), sudaki ağırlığı (m_s), oda sıcaklığında suyun yoğunluğu (d_s) ise döküm numunenin yoğunluğu (d_n) olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır. Hesaplamalarda su sıcaklığı 20 °C’de tartılmış ve özgül ağırlığı 0,99821 gr/cm³ olarak alınmıştır.

$$d_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times d_s \quad [161] \quad (3.7)$$

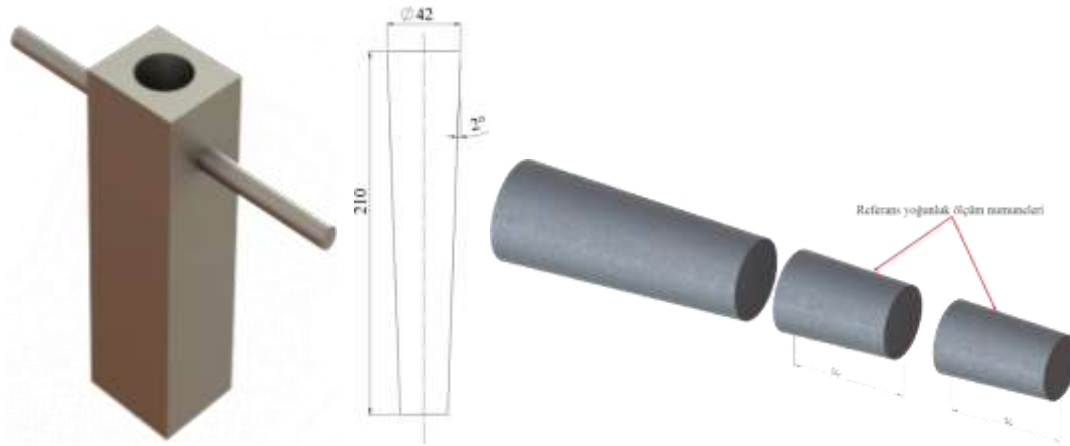
Numunelerin yoğunluk ölçümleri Dikomsan marka HT-SH 1500 model 0,02 gr hassasiyetli elektronik teraziye bağlanan bir Arşimet kiti vasıtasıyla ASTM B595-11 standardına uygun olarak yapılmıştır. Hassas terazi ve yoğunluk ölçümü düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 3.39’da verilmiştir.



Şekil 3.39. Yoğunluk ölçüm düzeneği şematik görünüşü (Terazinin yerleştiği masada ipin serbestçe hareketi için bir delik bulunmaktadır.)

Dökümlerin % boşluk-gözenek değerlerinin bulunması için numunelerin yoğunluklarının alaşıma ait olması gereken tam dolu malzemenin yoğunluk değerine orantılanması gerekmektedir. Tam dolu malzeme için alaşıma ait standart değerler kullanıldığında değerlerin geniş bir aralığa sahip kimyasal bileşim farklılıklarından

dolayı değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Belirlenen kimyasal bileşime göre yapılan teorik yoğunluk hesaplamaları da malzeme içerisindeki süreksizliklerden dolayı gözenek değeri olması gerekenden farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca alaşımlara deney parametresi olarak katılan alaşım elementi ilavesi (Al5Ti1B ve Al10Sr) de yoğunluk değerlerini değiştirecektir. Bu sebeple alaşıma ait tam dolu malzeme yoğunluğunun belirlenmesi için döküm deneyleri esnasında aynı alaşıma sahip malzemedan kokil kalıba dökümler yapılmış ve kokil kalıba dökülen silindirik numuneden referans yoğunluk değeri belirlenmiştir. Numunelerin boşluk kontrolü mikroyapı incelemeleri ile teyit edilmiştir. Şekil 3.40'da referans yoğunluk için dökümü yapılan numunenin kalıp ve döküm görüntüsü ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.40. Referans yoğunluk numunesi için döküm yapılan kokil kalıp görüntüsü ve ölçüleri.

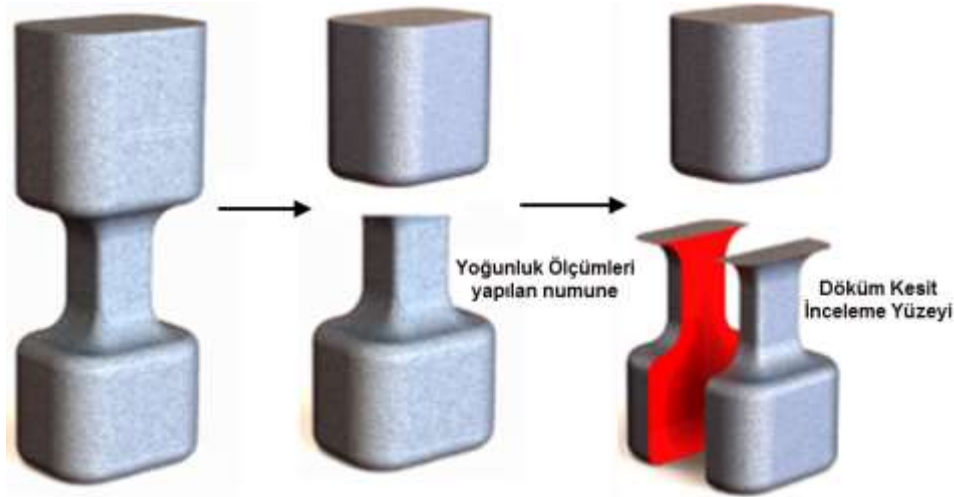
Elde edilen numunenin alt kısımlarından alınan numunelere ait yoğunluk ölçümleri yapılmış, alaşım ve döküm şartlarına ait referans yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Yüzde gözenek hesaplamalarında her bir alaşım ve döküm şartlarına göre belirlenen bu yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Döküm numuneye ait gözenek değerleri aşağıda verilen formülle tespit edilmiştir [121].

$$\% \text{ Gözenek} = [(\text{Teorik yoğ.} - \text{DeneySEL yoğ.}) / \text{Teorik yoğ.}] * 100 \quad (3.8)$$

3.14.5. Döküm kesit yüzey incelemeleri

Döküm numunelerin kesit yüzeylerindeki gözenek durumunu incelenmek üzere, yollukları kesilen numuneler Şekil 3.41'de görüldüğü gibi döküm ve besleme

boğazını içerecek şekilde dikey olarak ortadan kesilmiştir. Kesilen numune yüzeyleri titreşimli zımpara makinesi ile 80, 180, 400, 800 gritlik SiC aşındırıcı ile zımparalanmıştır. Zımparalanmış yüzey görüntüsü bir evrak tarayıcıda taranarak görüntüler bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 3.41. Döküm kesit inceleme yüzeyinin gösterilmesi.

Döküm kesit yüzeyleri, oluşan gözeneklerin biçiminin çekinti ya da gaz kaynaklı olma durumunu incelenmesi için 30X büyütme yeteneğine sahip Nikon SMZ 800 model stereoskoba bağlı Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımıyla incelenmiştir. Ayrıca stereoskopta yapılan incelemeler sonucu makro olarak görülemeyen numune yüzeyindeki boşlukların büyütme sonucu çekinti yada gaz kaynaklı olma durumu tespit edilmiştir.

Döküm kesit yüzey incelemelerinde aynı numunenin iki yüzeyinin bile farklılıklar gösterdiği gözlenmiştir. Aynı döküm parçasının bir kesitinde hatalar bariz belli olurken diğer tarafı sağlam döküm gibi yanıltıcı sonuç verebilmektedir. Bunun nedeni, farklı döküm şartlarında hatanın yeri ve büyüklüğünün değişiklik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple numunelerin her iki yüzeyi ayrı ayrı hazırlanarak incelenmiştir. Bu durum dökümlerin incelenmesi için kesit yüzey değerlendirilmesinin tek başına uygun bir yöntem olmadığını göstermektedir. Bu sebeple döküm içerisindeki hataların sonuçlarının incelenmesinde alternatif olarak döküm parçasının içindeki bütün hataları gösteren radyografi incelemeleri yapılmasının isabetli ve gerekli olduğunu göstermiştir.

3.14.6. Döküm numunelerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi

Deneylerde kullanılan alaşımların kimyasal bileşiminin standart aralık içinde olup olmadığının ve ilave edilen master alaşım seviyelerinin planlanan seviyede (%0,2) olup olmadığının kontrolü açısından döküm parçalardan kalıplama tasarımına eklenen test çubuğundan numuneler alınmıştır. Şekil 3.42’de kimyasal bileşim için numune alınan bölgeler şematik olarak gösterilmiştir. Numuneler Altun Döküm San. Tic. Ltd. Şti firmasında Spectro marka, Spectromax M1156235 model alüminyum ve alaşımlarının optik emisyon spektrometre cihazında kimyasal analizlere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.42. Test numunesinin incelemek üzere kesilmesinin şematik gösterimi.

3.14.7. Mikro yapı incelemeleri

Deneylerde kullanılan alaşım farklarının, döküm yöntemlerinin, alaşım ilavelerinin dökümlerin içyapı üzerinde etkilerinin incelenmesi için Şekil 3.42’de görülen test çubuklarından numuneler alınmıştır. Numuneler Presi Mecatome T260 hassas kesme cihazında SiC diskler kullanılarak elde edilmiştir. Mikro yapı inceleme numuneleri sıcak preste bakalit toz kullanılarak kalıplanmıştır. Bakalite alma sıcaklığı 170 °C ve bakalite alma süresi 5 dakika olarak uygulanmıştır. Bakalite alınan numuneler 180-400-800-1200-2500 gritlik zımpara ile kaba ve ince zımparalamanın ardından sırasıyla 3µm, 1µm alümina süspansiyonu ile parlatılmış ve nihai olarak 0,05 µmlik collodial silika ile parlatılmıştır. Parlatma sonrası numuneler Keller çözeltisi[18] (95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile dağlanarak mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Dağlama sonrası numuneler optik mikroskop

incelemelerinde kullanılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan yüzeylerin optik mikroskop incelemeleri, 1000 kez büyütme yeteneğine sahip, 22 mm geniş görüş alanı, ince odaklamada, 0,1 mm ile 1 μ m hassasiyet özelliklerine sahip Nikon Eclipse L 150 A tip mikroskobunda yapılmıştır. Fotoğraf çekimleri bu mikroskoba bağlı çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntüler üzerinden Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.15. Modelleme Çalışmaları

Döküm geometrilerinin modellemesi için SolidCast döküm simülasyon yazılımı kullanılmıştır. SolidCast yazılımı sonlu fark (Finite Difference) metodu ile ısı transferi, faz dönüşümü ve bunlara bağlı hacimsel değişim hesaplamalarını 3 boyutlu döküm ve kalıp kesitlerinde yaparak bir döküm parçanın katılaşmasını modelleyebilmektedir. Bu çalışmada simülasyon kullanımının en temel amacı fiziksel olarak gerçek döküm şartlarında ortaya çıkan sonuçların simülasyon ortamında sayısal olarak birebir elde edilmesi ve böylece KKO sınır şartının herbir döküm için tespit edilebilmesidir. Böylece gerçek dökümlerde ortaya çıkan yetersiz beslemeye bağlı gözenek kusurlarının simülasyon programında CFS olarak tanımlanan (kritik katı oranı) yarı katı bölge geçirgenlik değerini değiştirmek suretiyle simülasyon programında bu değer gerçek karşılığı bulunabilecektir. Bu amaçla deneylerde kullanılması planlanan döküm alaşımları kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde değişik döküm şartlarında muhtemel minimum ve maksimum olduğu düşünülen farklı kritik katı oranı değerlerinde modellemeler yapılmıştır. Ayrıca kokil kalıpta ön ısıtma sıcaklığı etkisi, alçak basınçlı döküm yönteminde de basınç değişiminin etkisini görmek üzere döküm deneylerindeki şartlara göre modellemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değişen büyüklüklerde gözenek görüntülenmesi beklenmiştir.

3.15.1. Kalıp geometrisi ve malzeme özelliklerinin programa girilmesi

Kalıp ve döküm geometrisi SolidWorks programında katı model olarak oluşturulduktan sonra STL formatına çevrilerek döküm simülasyon programına aktarılmıştır. Bu aşamadan sonra döküm alaşımı, kalıp malzemesinin türü ve termo

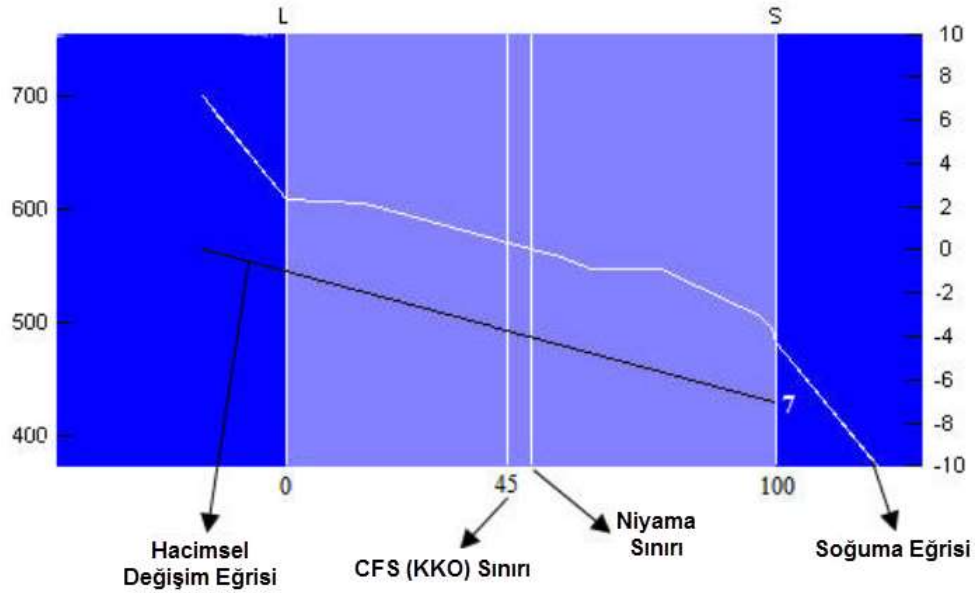
fiziksel özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Döküm alaşımı ve kalıp malzeme özelliklerinin seçimi için yazılımın veri tabanında birçok standart alaşıma ait termo fiziksel özellikleri mevcut olduğu gibi ayrıca bu değerler isteğe bağlı manuel olarak değiştirilebilmektedir. Alaşımlara ait kimyasal bileşim aralıklarının çok geniş olması ve daha net sonuçlar elde edilebilmesi açısından alaşımlara ait termo fiziksel değerlerinin belirlenmesi için JMATPRO yazılımından faydalanılmıştır. JMATPRO; metalik malzemelerin ve alaşımlarının, kararlı-yarı kararlı faz denge diyagramları, katılaşma davranışları ve özellikleri, mekanik, termo-fiziksel ve fiziksel özellikleri, faz diyagramları, kimyasal özelliklerini, yazılım ortamında hesaplayabilen Sente Software firmasının geliştirdiği bir yazılımdır [162]. Deneylerde kullanılacak alaşımlara ait spektrometre ile belirlenen kimyasal bileşim değerlerinin Jmatpro yazılımına girilmesi ile alaşıma ait termo fiziksel özellikler belirlenmiş ve bu değerlere göre modelleme çalışmaları yapılmıştır. Tablo 3.12’de deneylerde kullanılan alaşımlara ait termofiziksel özellikler verilmiştir.

Tablo 3.12. Jmatpro yazılımı ile belirlenen deney alaşımlarına ait termofiziksel özellikleri.

Alaşım (Etial)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/gK)	Döküm Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Hacimsel Çekme (%)	Ergime Gizli Isısı (J/g)
110	133,03	4,528	700	494	124	2,614	7,57	433,365
140	144,07	10,488	690	526	52	2,565	5,49	498,010
160	129,08	4,807	700	467	123	2,639	6,89	465,234
171	122,13	7,370	700	528	75	2,533	6,20	476,499
177	127,31	6,548	700	533	82	2,523	6,67	450,990
220	168,01	3,801	720	501	147	2,637	8,47	400,859

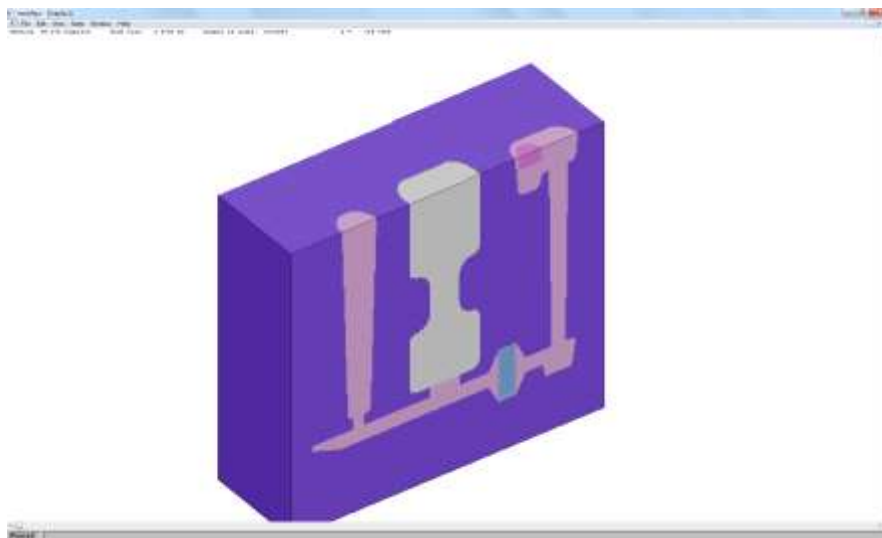
Simülasyon programına girilmesi gereken diğer sınır şartlarından bazıları alaşımın soğuma eğrisi, alaşımın KKO değeri ve alaşımın yüzde hacimsel çekme oranıdır. Bunlardan soğuma eğrisi döküm alaşımları için Bölüm 3.2. Alaşım Seçimi ve Karakterizasyon çalışmaları bölümünde de detaylı olarak açıklandığı gibi yapılan deneysel çalışmalar sonucu belirlenmiş ve programa girilmiştir. Şekil 3.43’de diğer bir sınır şartı olan KKO değeri program içerisinde malzeme ve özelliklerinin tanıtılması menüsünde görülmektedir. Modellemeler farklı KKO değerlerinde girilerek değişen şartların gözenek oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Sıvı alaşımın soğuma ve katılaşma sırasında hacimsel çekme oranını belirleyen çekme eğrisi de şekil üzerinde görülmekte ve katılaşmanın tamamlandığı çekme oranı bu alaşım için

% 7 olarak belirtilmektedir. Modelleme çalışmalarında gerçek dökümlerden belirlenen dolum süreleri esas alınmıştır.



Şekil 3.43. SolidCast döküm simülasyon yazılımında malzeme ve özelliklerinin örnek olarak gösterilmesi.

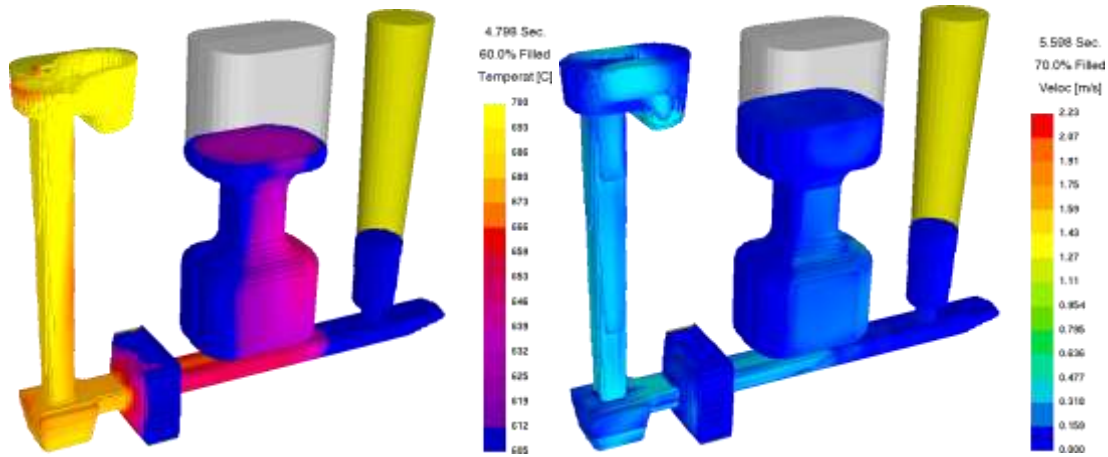
Malzeme özellikleri tanımlanarak programa aktarılan katı modelin, tanelere ayırma işlemi (meş etme) girilen sınır şartlarının her bir meş elemanı için simülasyon programında çözülmesi sağlanmıştır. Şekil 3.44’de döküm katı modelinin meş edilmiş hali gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi daha az bilgisayar hafızasını kullanmak ve daha hızlı çözüme ulaşmak için döküm modelinin simetri düzleminde kesilmiş bir yarısı ile modelleme yapılmıştır.



Şekil 3.44. Simetri düzleminde kesilmiş döküm ve kalıp geometrisinin meş edilmiş hali.

3.15.2. Kalıp dolumunun Flowcast yazılımı ile modellenmesi

SolidCast döküm simülasyon yazılımında kalıp doldurma işlemi programının bir modülü olan FlowCast akış modelleme programında modellenmiştir. FlowCast, CFD (Computational Fluid Dynamics) esaslı ve sonlu fark yöntemi ile SolidCast yazılımı ile birlikte çalışan bir kalıp doldurma ve akış modelleme yazılımıdır. FlowCast ile kalıp doldurma sırasında akışkan hareketlerini, akışkan sıcaklığını, akışkan basıncı, yolluk sisteminde türbülans, vorteks ve kalıp içerisinde yüzey türbülanslarını inceleyerek yolluk sistemlerinden kaynaklanan hataların minimize edilmesini sağlar. Şekil 3.5’de simülasyon programında kalıbın doldurulmasını gösteren bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.45. FlowCast ile kalıp dolumunda a)sıcaklık dağılımı, b) akış hızı dağılımı görüntüsü.

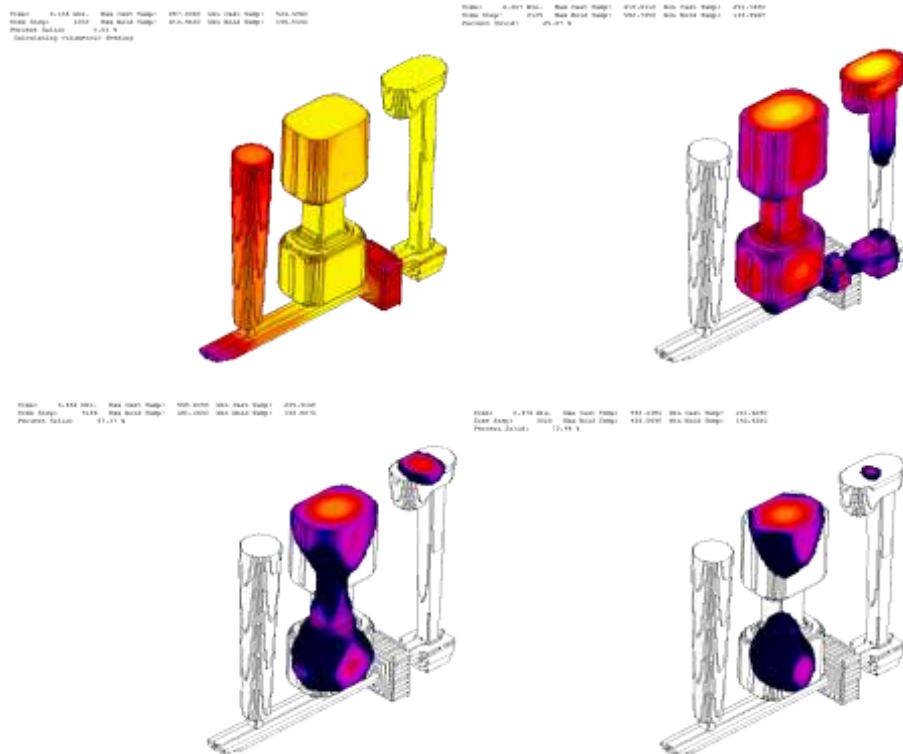
3.15.3. Dökümlerin soğuma ve katılaşmasının Solidcast yazılımıyla modellemesi

Kalıp dolum simülasyonu FlowCast modülü ile tamamlandıktan sonra döküm geometrisi yolluk ve besleyicisi ile birlikte katılaşma modellemesi için otomatik olarak SolidCast programında çalışmaya geçer ve tüm döküm kesitleri katılaşmaya kadar katılaşma ve soğutma işlemine devam eder. Gerçek döküm deneylerinde yapılan deney şartlarındaki kritik katı oranı değerlerinin modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılabilmesi açısından kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde muhtemel minimum ve maksimum olduğu düşünülen farklı kritik katı oranı değerlerinde modellemeler yapılmıştır. Tablo 3.13’de yapılan modelleme çalışmaları görülmektedir.

Tablo 3.13. Model geometrisi tasarımı için yapılan modelleme çalışmaları.

Alaşım Çeşidi	Kum Kalıba Döküm	Kokil Kalıba Döküm			Alçak Basıncılı Döküm		
		200 °C	300 °C	400 °C	250mbar	500mbar	1000mbar
KKO (Kritik Katı Oranı) %							
Etial 110	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60
Etial 140	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60
Etial 160	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60
Etial 171	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60
Etial 177	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60
Etial 220	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60	30, 40, 50, 60

Yazılımda katılaşma modellenmesi manuel olarak istediğimiz zaman, katılaşmanın tamamlanmasının ardından, belirlenen zaman sonunda ve belirlenen bir sıcaklığa ulaşılmasıyla sonlanabilmektedir. Modelleme çalışmalarında tüm döküm kesitlerinin katılaşmasının ardından modelleme sonlandırılacak şekilde ayarlanmış ve simülasyon sonrası analizlere geçilmiştir. Simülasyon devam ederken minimum-maksimum döküm ve kalıp sıcaklıkları, % katı oranı değerleri kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.46’da katılaşma modellemesi devam ederken farklı % katı oranı seviyelerinde alınan görüntüler örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.46. SolidCast programından farklı sürelerde alınan katılaşma görüntüleri.

Tablo 3.14’de kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde modelleme sınır değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3.14. Modelleme sınır şartları.

Döküm Yöntemi	Döküm süresi	Kalıp malzemesi	Kalıp ön ısıtma sıcaklığı	Filtre Kullanımı	KKO Değişimi
Kum Kalıba Döküm	8 Sn	Silis Kumu	20 °C	20 ppi seramik filtre	30-35-40 45-50-55-60
Kokil Kalıba Döküm	8 Sn	Dökme Demir	200-300-400°C	20 ppi seramik filtre	30-35-40 45-50-55-60
Alçak Basınçlı Döküm	8 Sn	Dökme Demir	200-300-400°C	20 ppi seramik filtre	30-35-40 45-50-55-60

Tablo 3.15.de kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm modellemelerinde kullanılan ısı transfer katsayıları verilmiştir.

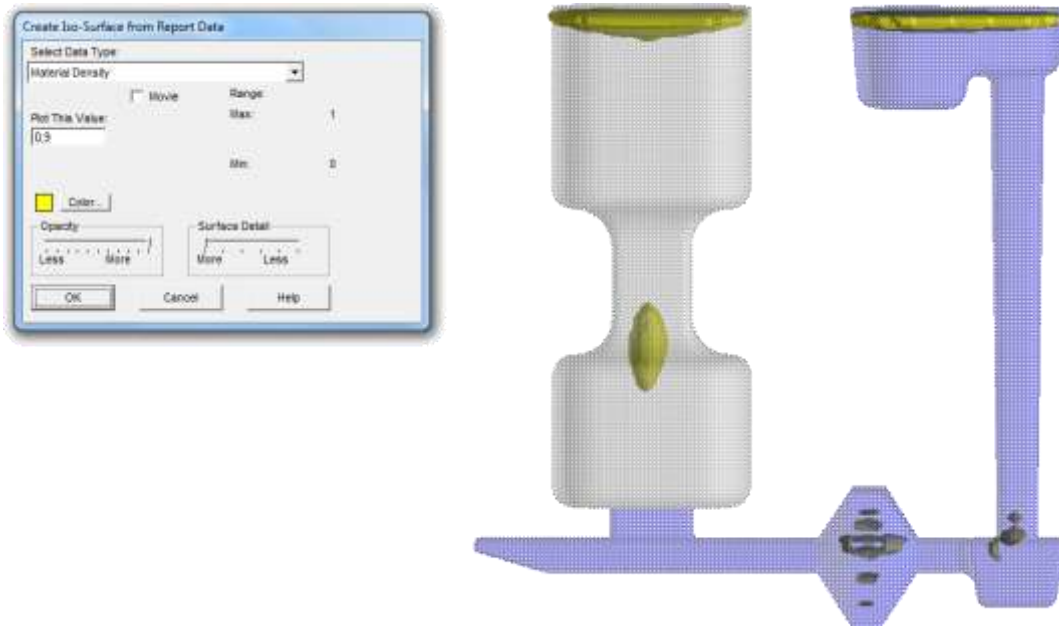
Tablo 3.15. Kokil ve alçak basınçlı döküm modellemelerinde kullanılan ısı transfer katsayıları.

Etkileşim		Isı Transfer Katsayısı ((W/mK)
Döküm	Kalıp Malzemesi	1500
Döküm	Besleyici	100000
Döküm	Atmosfer	40
Kalıp malzemesi	Besleyici	1500
Kalıp Malzemesi	Atmosfer	40
Besleyici	Atmosfer	40

3.15.4. Çekinti oranının modellenmesi

Solidcast, dökümü yapılmak istenen parçanın bir CAD programında katı model haline getirilip bu programa aktarılması ve döküm alaşımının termofiziksel özelliklerinin programa tanıtılmasıyla sonlu fark metodunu esas alarak çalışan ticari bir bilgisayar destekli mühendislik programıdır. Bu programda, dolum ve katılaşma esnasında oluşabilecek eksik yürüme, soğuk birleşme, türbülans, çekinti – gözenek

boşlukları vb. gibi döküm hatalarını önceden tespit edebilmek mümkündür. Solidcast döküm simülasyon programı, çekinti boşluklarını o bölgenin dolu veya boş olmasına bağlı olarak, “0-1” arası bir değer ile tanımlar. “0” tamamen boş olan yerleri, “1” değeri ise tamamen dolu olan yerleri göstermektedir. Örneğin simüle edilmiş bir parçada, yazılım ekranında Material Density sekmesine 0,9 yazarken karşımıza Şekil 3.47’deki gibi bir görüntü çıkacaktır.

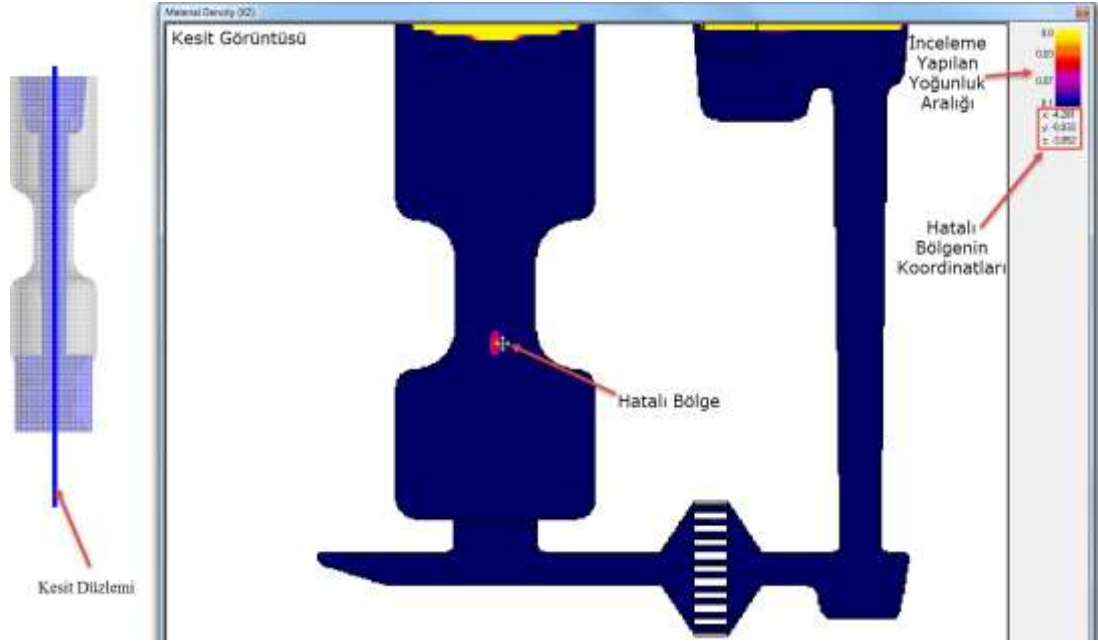


Şekil 3.47. Solidcast döküm simülasyon programında çekinti boşluklarının tespiti.

Bu şekilde sarı renk ile hacmen 0,9 ve altında yoğunluğu olan bölgeleri diğer bir deyişle, hacmen %10 boş olan bölgeleri temsil etmektedir.

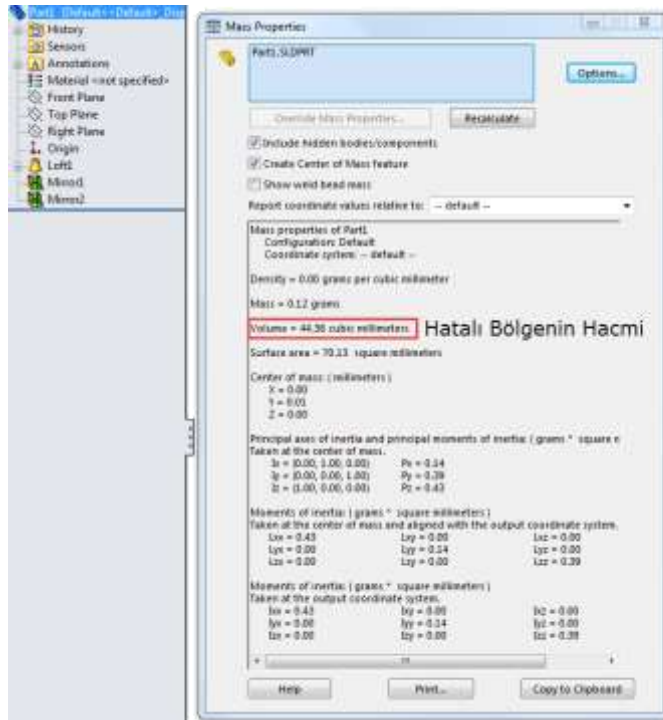
3.15.5. Çekinti Oranı Modellenmesindeki İşlem Adımları

İlk etapta çekinti oluşan bölgede kesit incelemesi yapılmıştır. Bu incelemede ön ve yan düzlemlerden kesit alınarak hatalı bölgeler tek tek tespit edilmiştir. Daha sonra 0 – 0,1 arası yoğunluktaki hatalı bölgeler tespit edilerek koordinatları alınmıştır. Koordinatların tespiti ile ilgili örnek resim Şekil 3.48’de gösterilmiştir.



Şekil 3.48. Hatalı bölgenin koordinatlarının tespiti.

Ön ve yan düzlemden elde edilen hatalı bölgenin koordinatları Solidworks CAD programında çizilerek, hatalı bölge katı hale getirilmiştir. Daha sonra bu çizilen katı bölgenin hacmi yine Solidworks programı vasıtasıyla hesaplanarak hatalı bölgenin hacmi elde edilmiştir (Şekil 3.49).

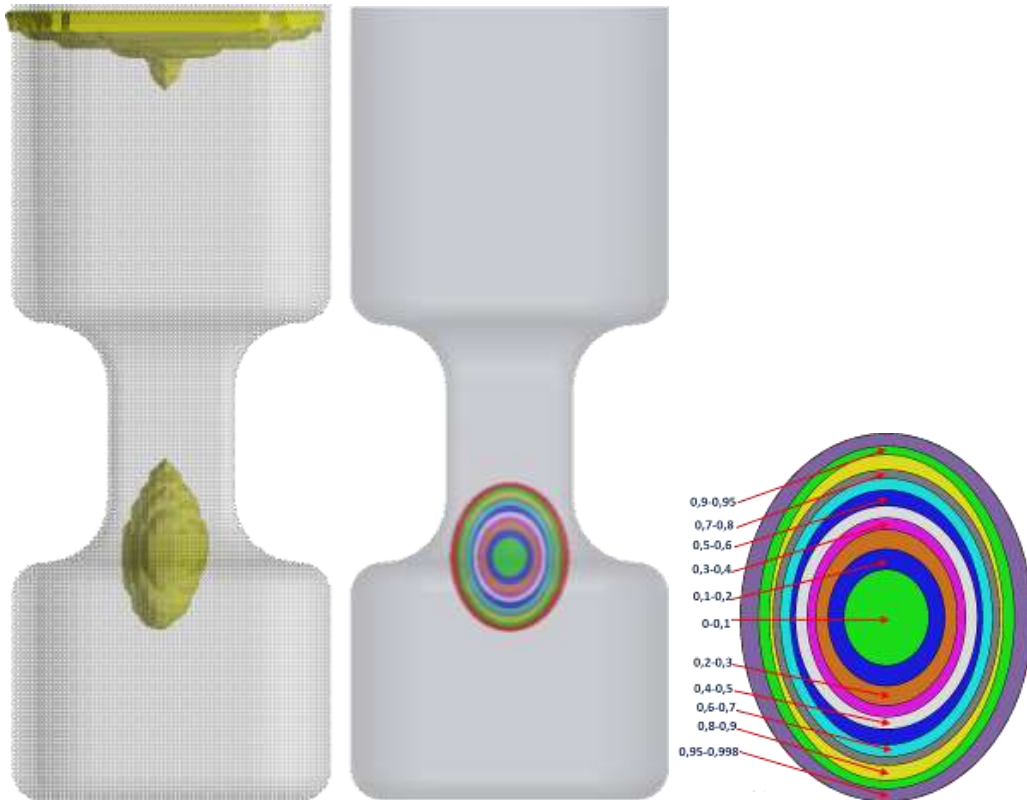


Şekil 3.49. Solidworks vasıtasıyla hatalı bölgenin katı modelinin oluşturulması ve hacminin hesaplanması.

Solidworks programından elde edilen hacim değeri hatalı bölgenin tam dolu hacmini vermektedir. Oysa Solidcast döküm simülasyon programında 0 - 0,1 doluluk oranına ait çekinti sonuçları verilmiştir. Solidworks'ten elde ettiğimiz hacim değerini doğru hesaplamak için doluluk oranlarının ortalamasını alarak bulduğumuz sonucu tam dolu hacimle çarpmamız gerekmektedir. Şekil 3.49 ve 3.50'deki örneğe göre hatalı bölgenin çekintili olarak hesaplanan hacmi;

$$[(0+0,1)/2] \times 44,36 = 2,21 \text{ mm}^3 \text{ şeklinde olacaktır.}$$

Bu aşamadan sonra doluluk oranlarını 0,1 puan arttırarak tam dolu hacme kadar hatalı bölge koordinatları alınmış ve o bölgeye ait çekintili hacmin hesaplaması yapılmıştır. Bu hesaplamayla alakalı olarak Solidcast programından alınan hatalı bölge koordinatlarına göre çekintili bölgenin Solidworks programında çiziminin kıyaslanması Şekil 3.50'de gösterilmiştir.



Şekil 3.50. Solidcast programından alınan hatalı bölge koordinatlarına göre çekintili bölgenin Solidworks programında çizimi.

Yapılan bir örnek çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 3.16'da verilmiştir.

Tablo 3.16. Modelleme programından alınan çekinti boşluğu hacminin hesaplanmasına ait örnek bir uygulama.

Hesaplama Aralığı (%)	Tam Dolu Hacim (mm ³)	Çekintili Hacim (mm ³)
0 – 0,1	243,15	$[(0 + 0,1)/2] \times 243,15 = 12,157$
0,1 – 0,2	324,51	$[(0,1 + 0,2)/2] \times 324,51 = 48,676$
0,2 – 0,3	266,25	$[(0,2 + 0,3)/2] \times 266,25 = 66,562$
0,3 – 0,4	343,53	$[(0,3 + 0,4)/2] \times 343,53 = 120,235$
0,4 – 0,5	364,94	$[(0,4 + 0,5)/2] \times 364,94 = 164,223$
0,5 – 0,6	692,56	$[(0,5 + 0,6)/2] \times 692,56 = 380,908$
0,6 – 0,7	793,68	$[(0,6 + 0,7)/2] \times 793,68 = 515,892$
0,7 – 0,8	901,72	$[(0,7 + 0,8)/2] \times 901,72 = 676,29$
0,8 – 0,9	1520,81	$[(0,8 + 0,9)/2] \times 1520,81 = 1292,688$
0,9 - 1	3659,77	$[(0,9 + 1)/2] \times 3659,77 = 3476,781$
TOPLAM:	9110,92	6705,738

İnceleme yaptığımız döküm numunesinin tam dolu olması durumunda hesaplanan döküm hacmi 134584 mm³'tür. Numunenin çekintili hacmi;

$$134584 - 9110,92 + 6705,738 = 132178,819 \text{ mm}^3 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Buradan numunedeki % çekinti oranı;

$$[(\text{Tam dolu Hacim} - \text{Çekintili Hacim}) / \text{Tam Dolum Hacim}] \times 100 \quad (3.9)$$

şeklinde yani;

$$[(134584 - 132178,819) / 134584] \times 100 = \% 1,787 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Bu şekilde modelleme programında farklı döküm şartları ve CFS değerlerine göre yapılan modellemelerin her biri için gözenek değerleri tespit edilerek gerçek döküm sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır.

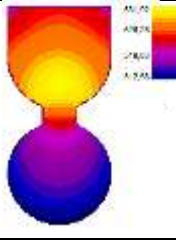
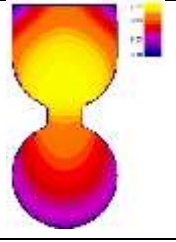
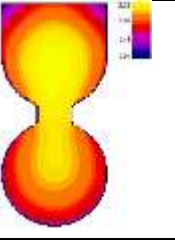
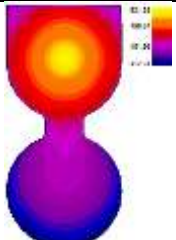
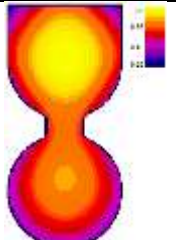
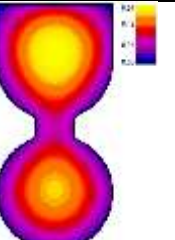
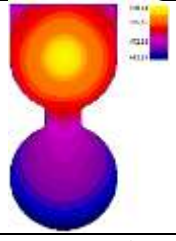
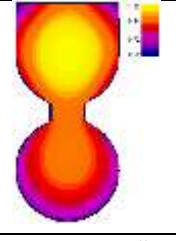
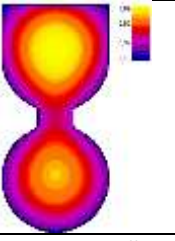
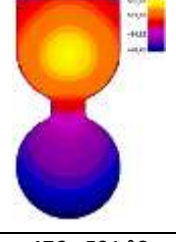
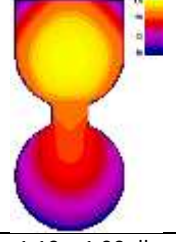
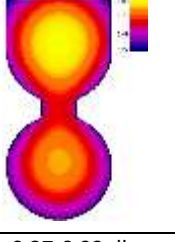
BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışma ve modelleme sonuçları verilecektir. İlk olarak, döküm deneylerinde kullanılacak olan döküm geometrisinin belirlenmesi için modelleme ve tasarım süreçlerinden elde edilen sonuçlar verilecektir. Sonrasında deneylerde kullanılacak alaşım ve malzemelerin seçimi ve alaşımlara uygulanan karakterizasyon çalışmaları ile ilgili sonuçlar verilecektir. Döküm öncesi sıvı metal temizliği uygulamaları için yapılan testlere ait sonuçlar ve hangi yöntemle temizleme işlemine devam edildiği açıklanacaktır. Model geometrisinin uygunluğunun deneme dökümleri kontrolüne ilişkin sonuçların ardından kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yönteminde elde edilen döküm numunelere ait sonuçlar ve farklı yöntemlerle bu sonuçların karşılaştırılması sunulacaktır. Kum kalıba döküm deneylerinde sıvı metal basıncı etkisinin incelenmesi için tasarlanan model ile yapılan döküm sonuçları verilerek normal model ile karşılaştırılması değerlendirilecektir. Tane inceltici, modifiye edici ilavesi, döküm yöntemi ve bileşim farklılığının döküm içyapı üzerinde etkisinin belirlenebilmesi için mikroyapı sonuçları verilecektir. Son olarak döküm simülasyon programı ile yapılan modelleme sonuçları verilerek bu sonuçlarla gerçek dökümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp değişen döküm şartları ve geometrilerde kritik katı oranının belirlenmesine dair sonuçlar verilecektir.

4.1. Döküm Modeli Tasarımına Yönelik Modelleme Çalışmaları Sonuçları

Döküm deneylerinde kullanılan model geometrisi tasarımı çalışmalarına Deneysel Çalışmalar bölümünde belirtildiği gibi, literatürde [30,141-142] daha önceden kritik katı oranı değerinin belirlenmesi için kullanılan model geometrileri ile başlanmıştır. Model geometrileri kum ve farklı ön ısıtma sıcaklığına sahip kokil kalıplarda yolluk ve besleyici olmadan SolidCast döküm simülasyon yazılımıyla katılaşma modellemesi yapılmıştır. Şekil 4.1'de Etial 160 alaşımının kokil kalıba döküm

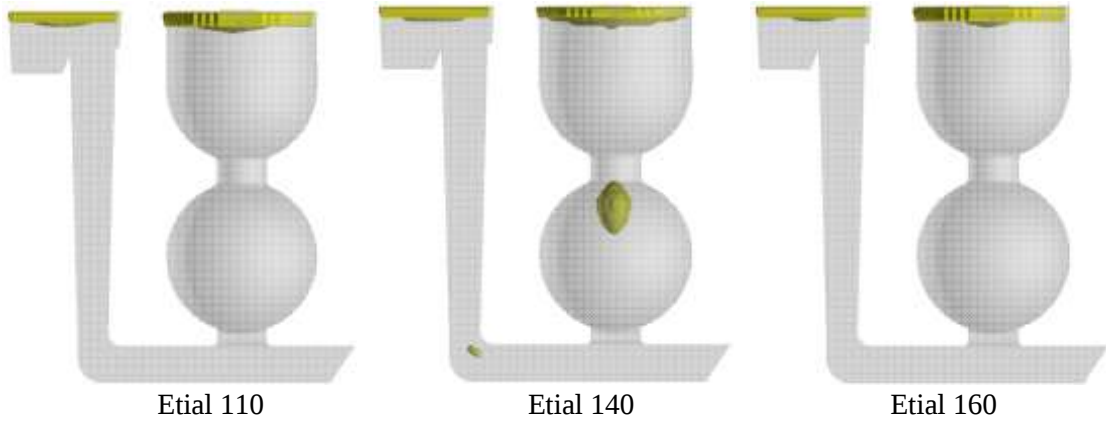
yönteminde kritik katı oranı değerinin belirlenmesi için kullanılan geometriye ait modül değeri, sıcaklık dağılımı, katılaşma zamanı ve kritik katı oranı değerleri için SolidCast döküm simülasyon yazılımından alınan görüntüler ve modelleme programından elde edilen değer aralıkları verilmiştir.

	Modül (cm)	Sıcaklık Dağılımı (°C)	Katılaşma Analizi (°C)	KKO Zamanı (dk)
Kum Kalıba Döküm				
	Modül 0,88 cm	512 - 531 °C	6,18 – 7,24 dk	1,038-2,216 dk
200 °C ön ısıtmalı Kokil kalıba Döküm				
	Modül 0,34 cm	412 - 531 °C	0,27 – 0,80 dk.	0,08-0,57 dk.
300 °C ön ısıtmalı Kokil kalıba Döküm				
	Modül 0,39 cm	443 - 530 °C	0,52 – 1,12 dk	0,131-0,685 dk.
400 °C ön ısıtmalı Kokil kalıba Döküm				
	Modül 0,51 cm	476 - 531 °C	1,19 – 1,90 dk	0,27-0,93 dk.

Şekil 4.1. Kokil kalıba döküm çalışmaları yapılan geometri için modelleme sonuçları.

Şekil 4.1'deki modelleme sonuçlarından da görüldüğü gibi, geometri kokil kalıba döküm yönteminde birbirinden bağımsız iki sıcak nokta oluşumuna müsaade ederken kum kalıba döküm yöntemi için besleme yolunun açık kaldığı ve geometrinin döküm içerisinde ölçülebilir nitelikte hata oluşumuna müsait olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 4.2'de görülen kalıplama tasarımının KKO50 değerine göre farklı

alaşımlarla yapılan modelleme sonuçları incelendiğinde döküm parça üzerinde hata oluşma riski görülmemektedir. Bu sebeple bu geometrinin kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir.



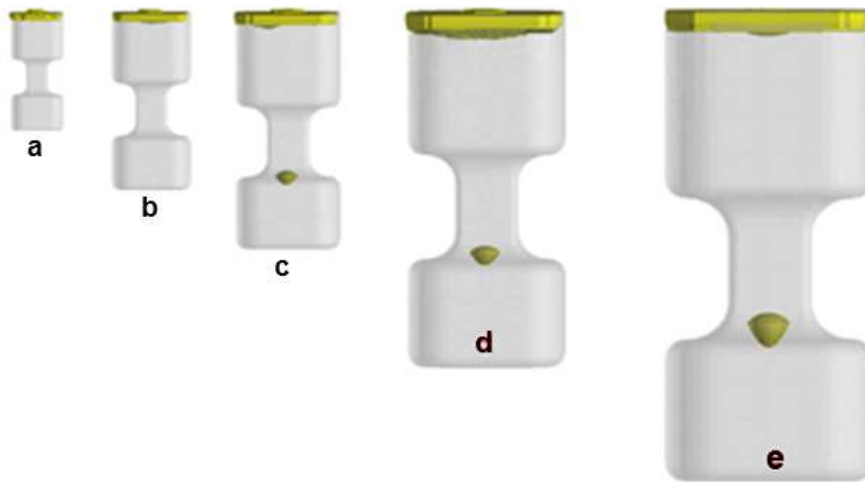
Şekil 4.2. Kokil kalıp kritik katı oranı çalışmaları yapılan model kalıplama tasarımı farklı alaşımlarla kum kalıba döküm %99,8 değerine göre yoğunluk sonuçları görüntüsü.

Model geometri tasarımında aynı modelin hem kum kalıp hem de kokil kalıpta kullanılabilmesi ve bu şekilde döküm yöntemi (kalıp malzemesi) farkının alüminyum alaşımlarının katılaşmasındaki yarı katı bölge geçirgenliği üzerindeki etkisinin daha doğru bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla aynı model farklı ön ısıtma sıcaklıklarındaki kokil kalıp kullanılarak, farklı KKO değerlerinde modellenmiştir. Yapılan model tasarımlarında modelleme sonuçları incelendiğinde bütün alaşımlarda özellikle %50 üzeri KKO değerlerinde belirgin çekinti boşluğu riski oluşmadığından tasarım revize çalışmalarına devam edilmiştir. Bir dizi modelleme çalışması yapılarak modelleme sonuçlarına göre, geometri tasarımının uygun olduğu görülen bir geometrinin dökümleri için model imalatına geçilmiştir.

Kum kalıba döküm yöntemiyle geometriye uygun yapılan modelle farklı şartlarda deneme dökümleri yapılmıştır. Deneme dökümü sonuçlarında dış yüzeyde çöküntü ve bazı dökümlerde çok az porozite çıkması durumu söz konusu olduğundan, uygun sonuçlar alınamamıştır. Bu sebeple model geometri tasarımı çalışmalarına tekrar devam edilmiştir. Deneme dökümleri ile ilgili çalışmalar ve sonuçlar detaylı bir şekilde Bölüm 4.3. Deneme döküm çalışmaları kısmına verilecektir.

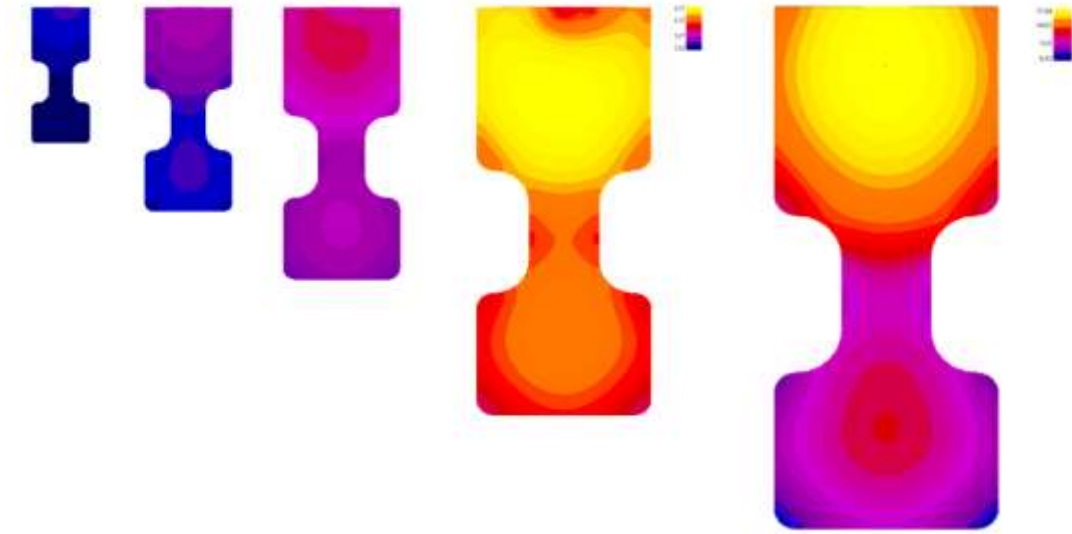
4.1.1. Döküm geometrisinin farklı ölçeklendirmeler ile modelleme sonuçları

Döküm geometrisi belirleme çalışmaları yapılırken parça içerisindeki gözenek oluşumunun model boyutuna bağlı olarak değişimi ve yüzey çöküntü durumlarını incelemek için aynı geometride orantılı olarak büyütülmüş geometrinin modellenmesi ve deneme dökümleri yapılmıştır. Döküm deneylerinde alaşım olarak Etial 171 standardı malzeme kullanılmıştır. Gerçek döküm şartlarına uygun olarak yapılan modelleme sonuçları değerlendirilmiş ve dökümde porozite riski içeren bölgeler Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekilde dökümün katılaşma sonrası parça üzerinde % 99 dan daha az yoğun bölgeler görülmektedir. Görüntüler o bölgenin tam olarak boş olduğunu değil sadece riskli bölge olduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.3. Makroporozite(Çekinti) riski analizi(%99,9 yoğunluk değerine göre).

Döküm parça makroporozite riski modelleme sonuçları incelendiğinde en küçük ebatlı Şekil 4.3.a ve b’de verilen modellerin gözenek riski içermediği ve besleyicisinin döküm kısmını besleyebildiği anlaşılmaktadır. Diğer modellerde ise parçanın % 1’in üzerinde gözenek riski içerdiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.4’de döküm simülasyon yazılımından alınan katılaşma zamanı görüntüsü verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi küçük ebatlı parçalar çok kısa sürede katılaşmasını tamamlarken parça ebatlarının büyümesine bağlı olarak katılaşma zamanı artmıştır. Ayrıca katılaşma zamanının artması ile birlikte besleme yolunun da uzun olmasından dolayı besleyici tam olarak görevini yapamamış ve döküm parçaların alt kısımlarında porozite riski oluşmuştur.

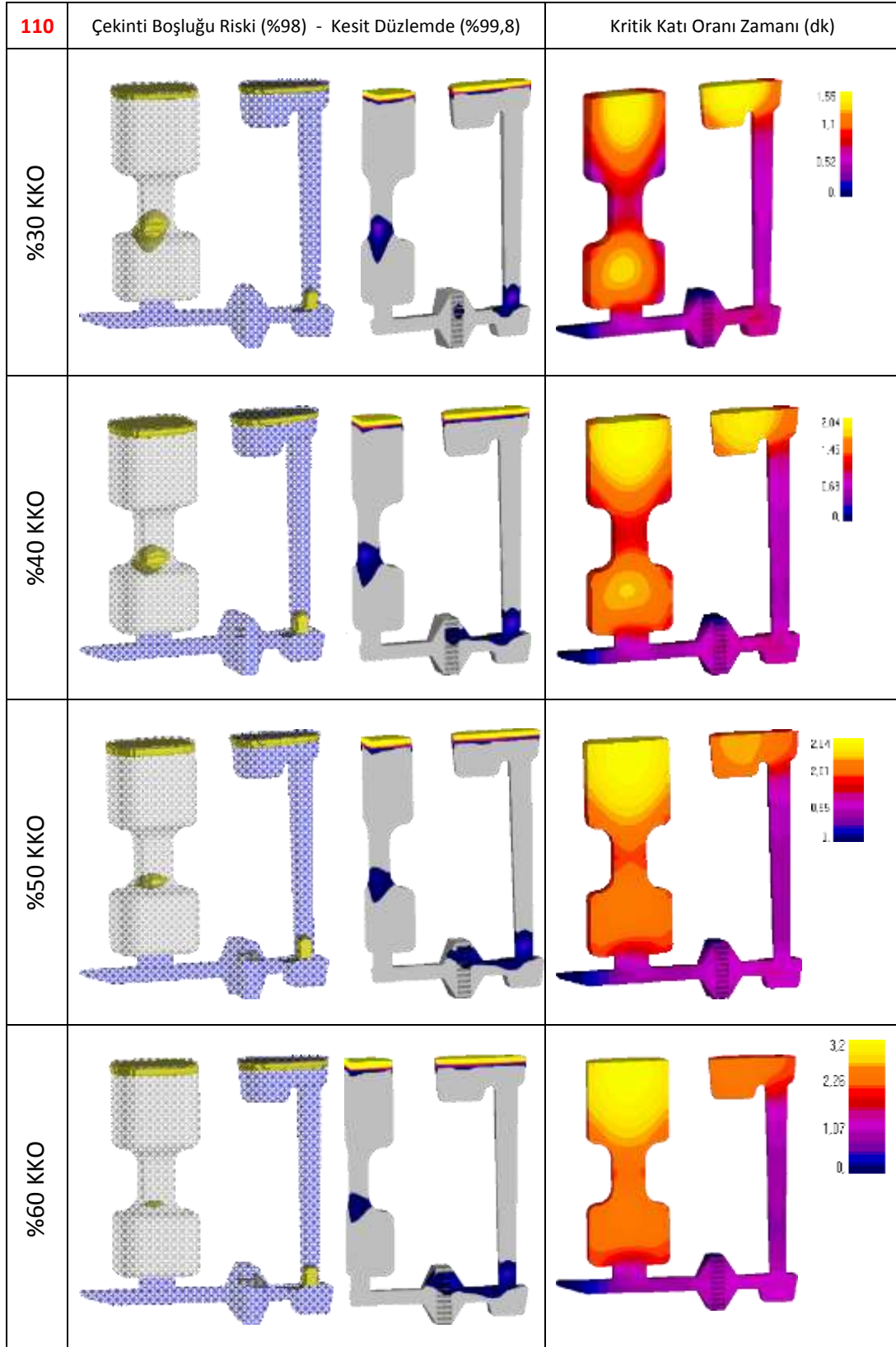


Şekil 4.4. Katılaşma zamanı analizi kesit görüntüsü.

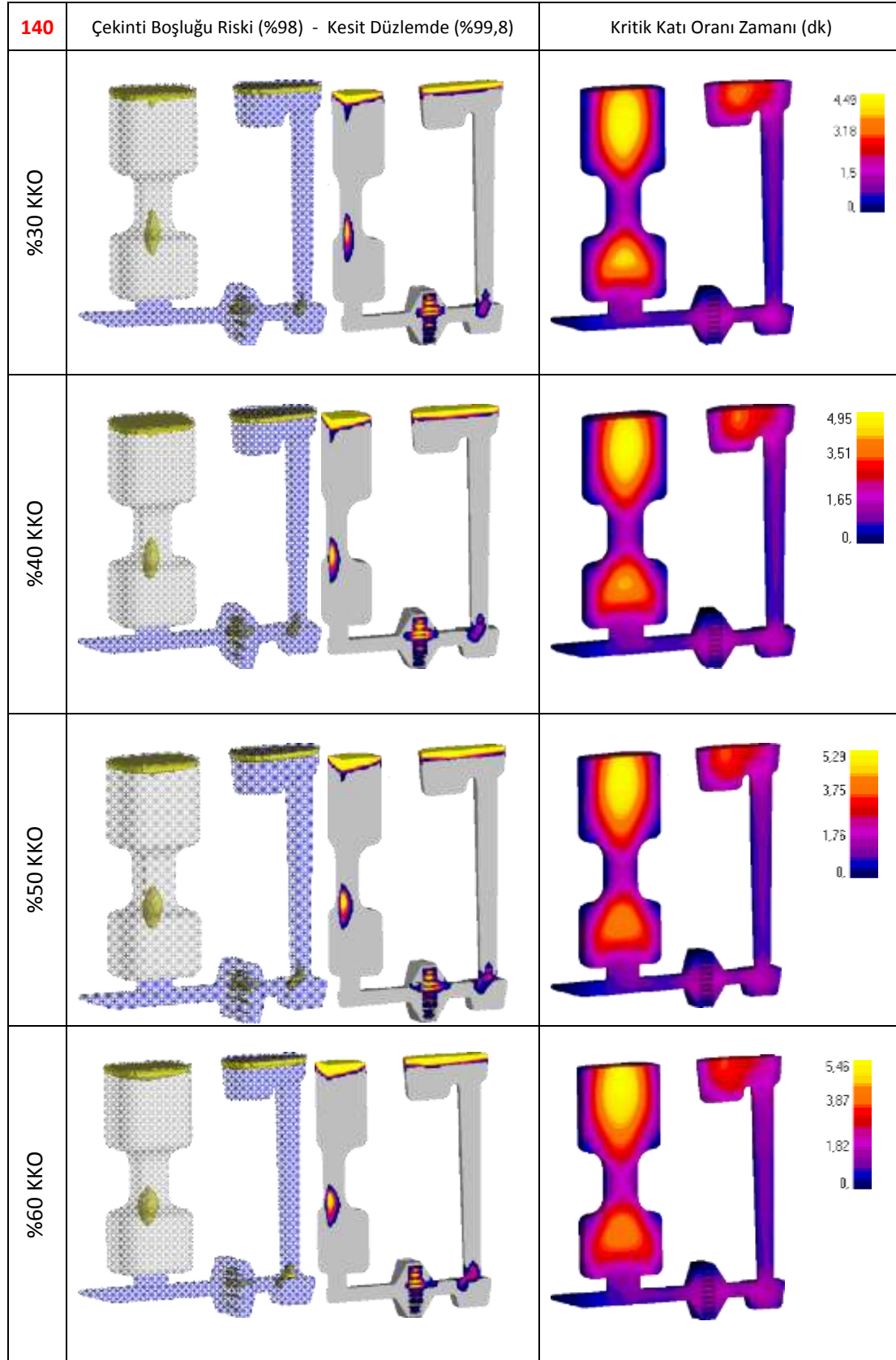
Tez kapsamında yapılan çalışmalarda değişen döküm şartlarında döküm parça iç kesitlerinde ölçülebilir nitelikte gözenek oluşumu hedeflendiğinden ve deneylerde parametrelerin çok fazla olmasından ve yüzey çöküntüsü içermemesinden dolayı Şekil 4.3.c’de verilen ebatlardaki parçanın döküm deneylerinde kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

4.1.2. Nihai döküm tasarım modelleme sonuçları

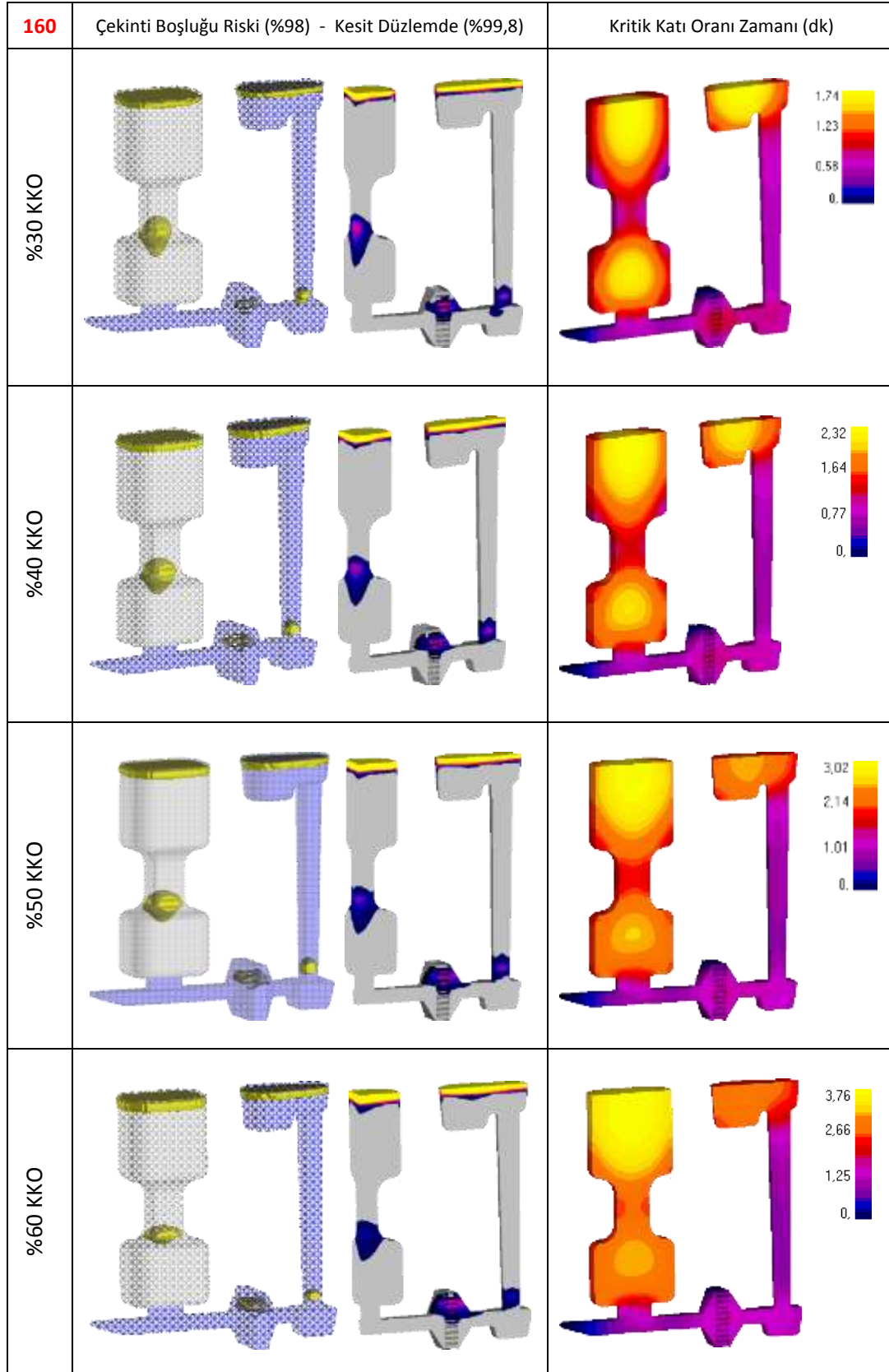
Döküm geometri tasarımı ile ilgili yapılan deneme modellemeleri, ölçekli model ve deneme dökümleri sonunda Şekil 3.3’de görülen model tasarımı uygun bulunmuştur. Model tasarımı için ilk olarak Etial 110 ve Etial 140 alaşımları ile farklı kritik katı oranı değerlerinde modellemeler yapıldıktan sonra, sonuçların uygun görülmesine bağlı olarak diğer alaşımlar için de farklı kritik katı oranı değerlerinde de modellemeler yapılmıştır. Tasarım SolidCast döküm simülasyon programının bir modülü olan FlowCast akış modelleme programı ile dolum modellemesi yapılmış ve dolumdan kaynaklanabilecek hataların minimize edildiği tespit edilmiştir. Kalıplama tasarımları kum ve kokil için aynı şekilde yapılmıştır. Ayrıca sıvı metalin kalıp içerisine dolumu esnasında inklüzyon girişini ve türbilansı azaltarak sakın ve düzeni bir kalıp dolumu sağlamak için 40mm x 40mm x 15mm ebatlarında köpük filtreler yatay yolluk üzerine döküme en yakın yere konulmuştur. Şekil 4.5’den Şekil 4.10’a kadar farklı alaşımlara ait farklı KKO değerlerinde modelleme sonuçları verilmiştir.



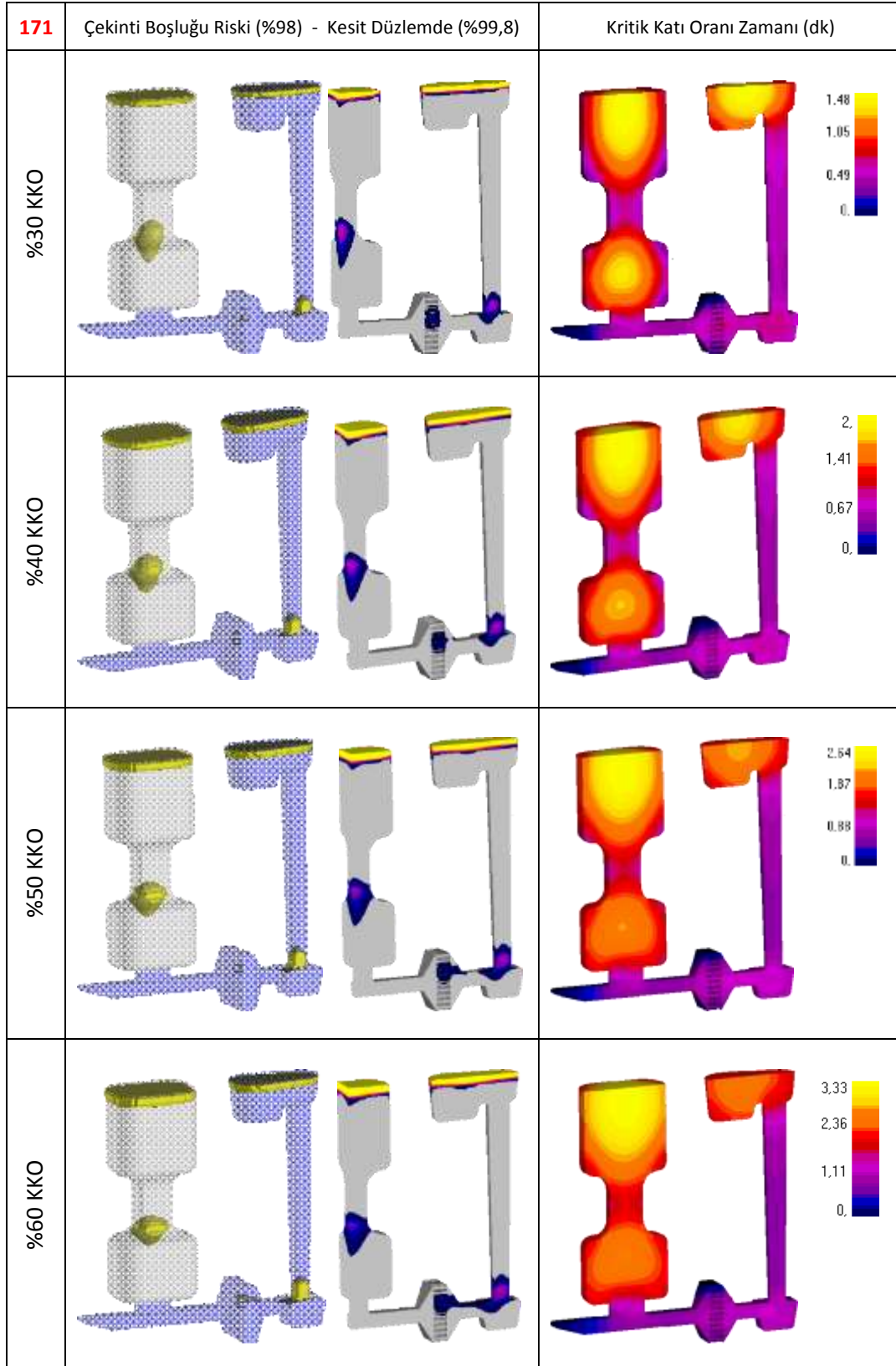
Şekil 4.5. Nihai tasarım için Etial 110 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.



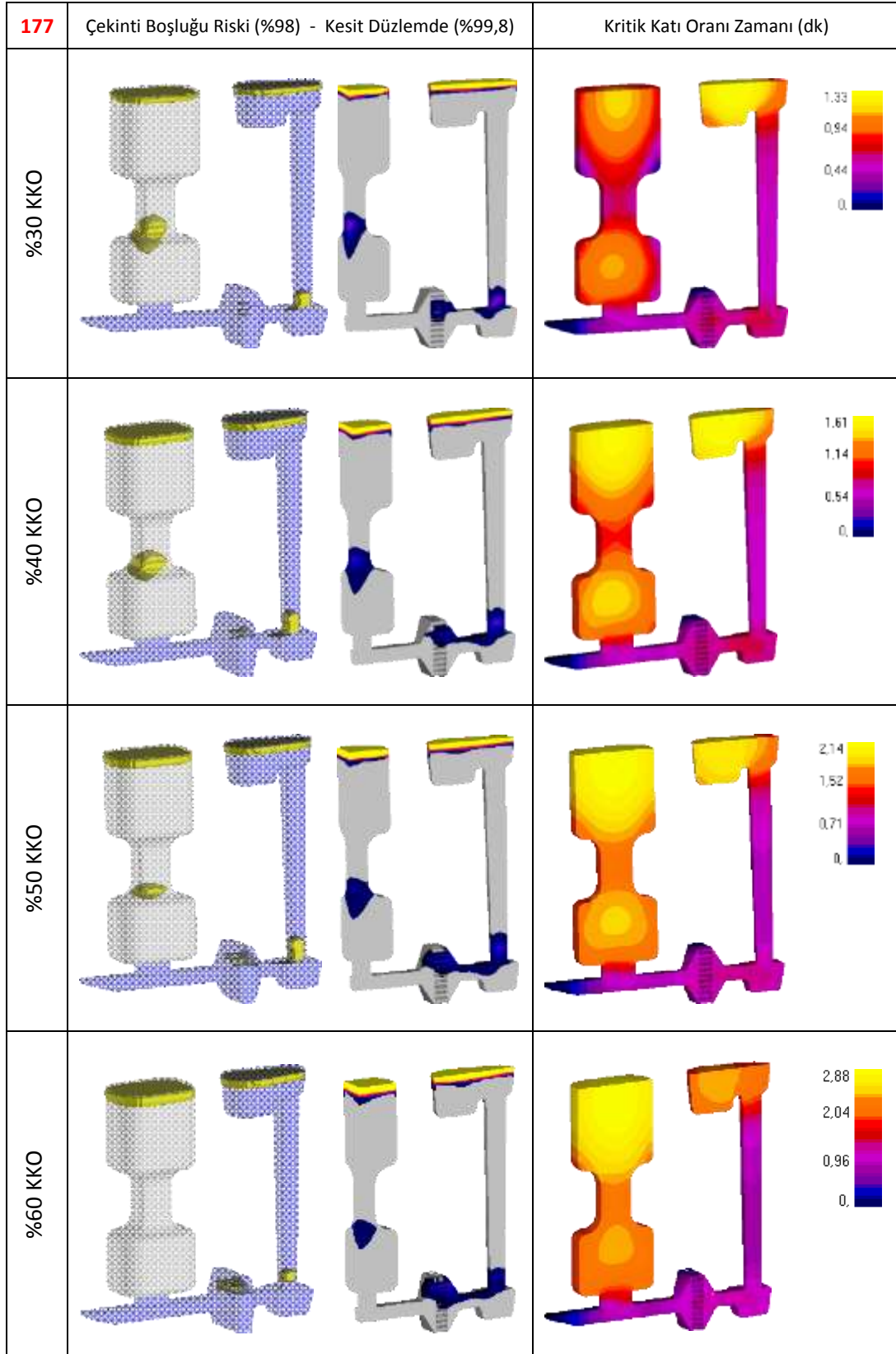
Şekil 4.6. Nihai tasarım için Etial 140 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.



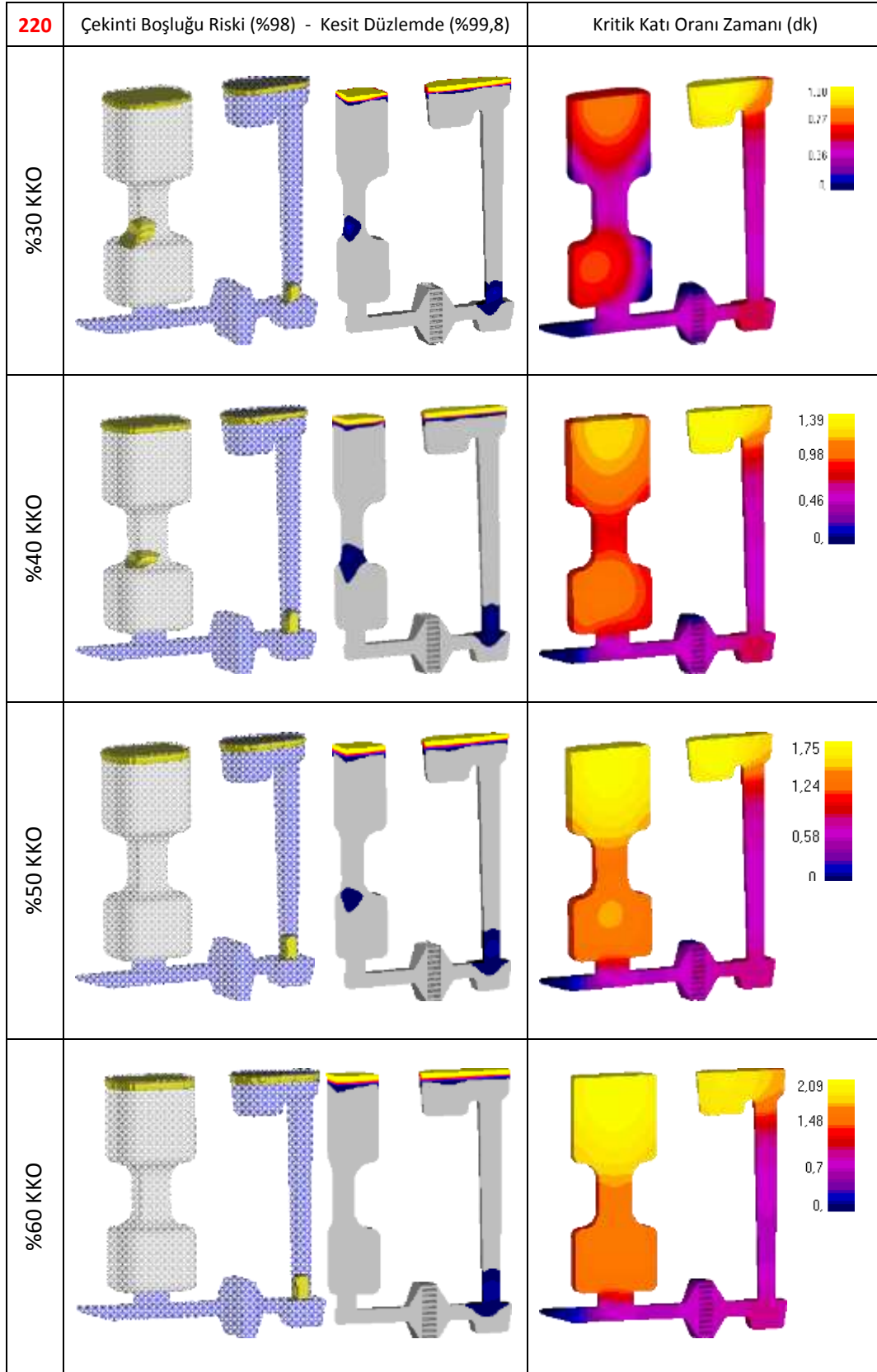
Şekil 4.7. Nihai tasarım için Etial 160 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.



Şekil 4.8. Nihai tasarım için Etial 171 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.



Şekil 4.9. Nihai tasarım için Etial 177 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.



Şekil 4.10. Nihai tasarım için Etial 220 alaşımı ile kum kalıba döküm modelleme sonuçları.

Sonuçlar incelendiğinde seçilen nihai döküm geometrisinin uygun olduğu anlaşılmaktadır. Farklı KKO değerlerinde deney numunesinin alt döküm kısmında belirgin oranda gözenek olduğu ve oluşan gözenekleşmenin büyüklüğünün farklı kritik katı oranı şartlarında değiştiği gözlenmiştir. Döküm deneylerinde kullanılacak bütün alaşımlar için yapılan modelleme sonuçları gözenekleşme büyüklükleri farklılık göstermesine rağmen, karakteristik olarak benzer sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda farklı alaşımlarla modelleme ve deneme dökümleri yapılan ve uygun sonuçlar elde edilen ve Şekil 3.3’de verilen modelin nihai döküm modeli olarak kullanılması uygun görülmüştür.

4.2. Alaşım Seçimi ve Karakterizasyonu

4.2.1. Deneylerde kullanılacak alaşımların kimyasal bileşimi analizleri

Alaşımlara ait standart kimyasal bileşim aralıkları ve külçelerden alınan numunelerden elde edilen analiz sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Alaşımlara ait Etinorm standardı[14] ve külçelerden alınan numunelerden ölçülen kimyasal bileşimleri (% Ağı.)

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti
Etial 110*	0,70	4,00 - 6,00	2,00 - 4,00	0,20 - 0,60	0,15	0,20	0,30	0,20
Etial 110	0,35	4,99	3,32	0,43	0,01	0,03	0,02	0,04
Etial 140*	0,60	11,50 - 13,50	0,10	0,40	0,10	0,10	0,10	0,15
Etial 140	0,26	12,21	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03
Etial 160*	1,00	7,50 - 9,00	3,00 - 4,00	0,50	0,30	1,00	0,20	0,20
Etial 160	0,81	8,73	3,52	0,07	0,03	0,35	0,05	0,05
Etial 171*	0,50	9,00 - 10,00	0,10	0,40 - 0,60	0,30 - 0,45	0,10	0,10	0,15
Etial 171	0,27	9,62	0,02	0,46	0,44	0,02	0,01	0,03
Etial 177*	0,20	6,60 - 7,40	0,02	0,03	0,30 - 0,45	0,04	0,02	0,08 - 0,14
Etial 177	0,13	7,28	0,01	0,01	0,37	0,01	0,01	0,09
Etial 220*	0,30	0,35	4,00 - 5,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05
Etial 220	0,28	0,13	4,45	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02

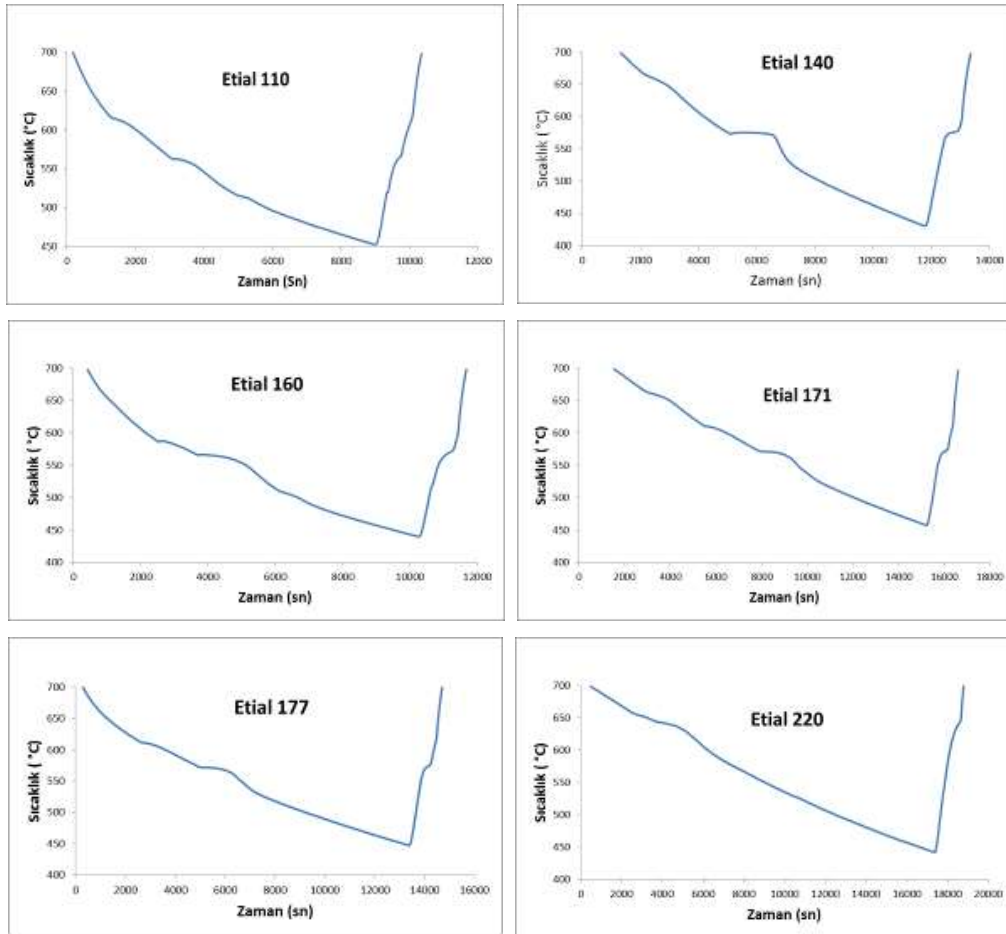
* Değerler Etinorm standardına göre kimyasal bileşim aralıklarını vermektedir. Aralık belirtmeden verilen değerler üst limitlerdir.

Tablo 4.1’de verilen sonuçlar incelendiğinde deneylerde kullanılmak üzere temin edilen külçelerin kimyasal bileşim aralıklarının Etial normlarına uygun olduğu

görülmektedir. Ayrıca kendi imkanlarımızla laboratuvarında hazırladığımız Etial 220 alaşımının da standart değer aralıkları içerisinde olduğu, alaşımda ana element olan Cu miktarının hedeflenen değerlerde çıktığı görülmektedir.

4.2.2. Döküm alaşımlarından alınan sıcaklık-zaman değişimi verileri

Deney şartlarının ve kullanılan alaşımlara ait termofiziksel değerlerin döküm simülasyon programına birebir girilmesi modelleme sonuçlarının doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple alaşımların soğuma eğrileri ve dönüşüm sıcaklıklarının deneysel olarak ölçülmesi için kum ve kokil kalıplar içerisine yapılan dökümlere bağlanan ısı çiftleriyle (termokopul) sıcaklık-zaman verileri alınmıştır. Döküm deneylerinde kullanılan primer külçelerden ve laboratuvarında üretilen Etial 220 alaşımından fırın ortamında yavaş soğutma ve ısıtma çevrimlerinde alınan sıcaklık-zaman eğrileri Şekil 4.11’de verilmiştir.

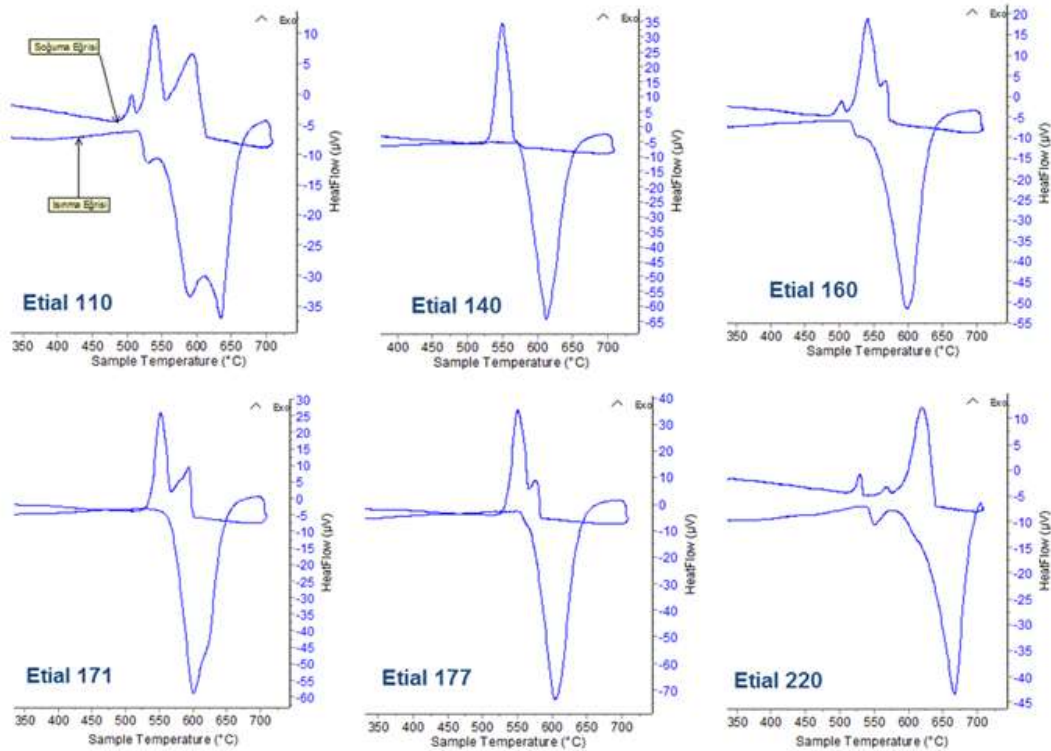


Şekil 4.11. Döküm deneylerinde kullanılan alaşımlara ait soğutma ve ısıtma sıcaklık zaman eğrileri.

Şekil 4.11’de verilen soğuma ve ısınma eğrileri incelendiğinde, ocak ısı yalıtımının çok iyi olması ve çok kısa sürelerde sıvı metal sıcaklığını yükseltebilme kapasitesinden dolayı sıvı metal sıcaklığının ısınma grafiklerinde çok daha kısa sürede 700 °C’ye ulaştığı görülmektedir. Bu soğutma ve ısınma sıcaklık zaman hız farklarından dolayı dönüşüm sıcaklıkları arasında 1 – 2 °C fark gözlenmektedir. Döküm prosesinde sıvı metalin kalıp içerisinde katılaşması durumu söz konusu olduğundan, modellemelerde soğuma eğrilerinden elde edilen veriler esas alınmıştır. Soğuma eğrilerinden elde edilen veriler sayesinde alaşımların ergime ve katılaşma sıcaklıklarının belirlenmesi, modelleme programında soğuma eğrilerinin eşleştirilmesinde kullanılması açısından önem taşımaktadır.

4.2.3. Döküm alaşımlarının termal analiz sonuçları

Deneylerde kullanılan alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarının belirlenebilmesi ve soğuma eğrilerinden elde edilen verilerin desteklemesi açısından ayrıca termal analiz deneyleri yapılmıştır. Termal analiz sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Alaşımların ısıtma ve soğutma esnasında alınan termal analiz deneyi sıcaklık ısı akışı grafikleri.

Şekil 4.12'deki termal analiz eğrileri incelendiği alaşımların kimyasal bileşimindeki elementlere bağlı olarak farklı sıcaklık ve biçimlerde pikler verdiği görülmektedir. Ötektik bileşime sahip Etial 140 alaşımı sadece Si içerdiğinden 560 °C civarında güçlü bir pik vermiştir. Bu alaşımda tek bir dönüşüm noktası gözlenmektedir. Etial 160 alaşımı bileşimindeki Fe, Si ve Cu elementlerinden dolayı üç farklı pik vermiştir. Kimyasal bileşimleri Si miktarı dışında birbirine yakın olan Etial 171 ve Etial 177 alaşımlarının grafiklerinde yakın değerlerde iki pik olduğu gözlenmiştir. Etial 220 alaşımında ise Cu içeriğine bağlı olarak yaklaşık 635 °C civarında bir dönüşüm başlamış ve alaşım bileşiminde bulunan Fe ve diğer elementlerden dolayı zayıf piklerde vererek dönüşüm 530 °C seviyelerine kadar düşmüştür. Soğuma ve ısınma grafiklerinde dönüşüm sıcaklıkları arasında sıcaklık değişiminin yönüne bağlı olarak açığa çıkan ısının endotermik ya da ekzotermik olmasına göre farklılıklar gözlenmiştir. Modelleme çalışmalarında soğuma esnasında alınan dönüşüm sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

4.2.4. Alaşımların katılaşma aralıklarının belirlenmesi

Termal analiz deneyleri ve sıcaklık zaman verilerinden elde edilen grafiklerden alaşımlara ait faz dönüşüm sıcaklıkları ve katılaşma aralıkları değerleri belirlenmiş ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablodaki değerler alaşımların soğutması esnasında alınan değerlerinden elde edilmiştir.

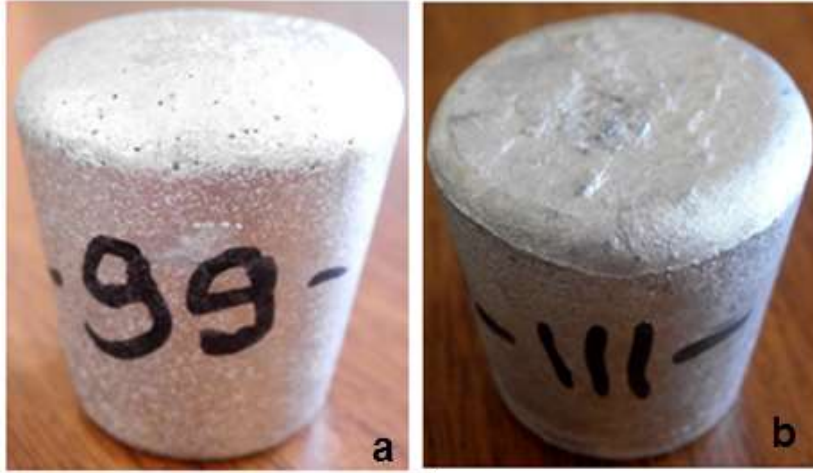
Tablo 4.2. Alaşımlara ait katılaşma aralık farklarının karşılaştırılması.

Alaşım	Katılaşma Aralıkları (°C)		
	Termal Analiz Deneyi	Fırında Alınan Sıcaklık Zaman Verileri	Standart Değerler[7,14]
Etial 110	510-612	513-619	525-625
Etial 140	555-563	570-575	575-585
Etial 160	506-571	512-588	540-595
Etial 171	555-598	565-604	575-595
Etial 177	545-592	542-605	540-610
Etial 220	531-635	538-640	565-645

Literatürde [152,153] verilen katılaşma aralıkları ile deney sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırıldığında katılaşma aralıklarının genelde uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bunun dışında gözlenen ufak değişikliklerin ise deney şartları, soğuma hızı ve alaşım içerisindeki minör elementlerin içerik farklılıklarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Örnek olarak alaşımın standart kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde herhangi bir element için bileşim aralığı verilmekte ve bu değer duruma göre % 2 civarında bile farklılık gösterebilmektedir. Literatürdeki değerler ortalama değerlere göre belirlenmiştir. Ancak deneylerde belirlenen değerler doğrudan deneylerde kullanılacak alaşıma ait değerler olduğundan modelleme programında bu değerlerin kullanılması daha uygun olacaktır. Ayrıca termal analiz değerleri ile soğuma eğrisi deney sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu, aradaki farkın ise cihazların hata payı ve deney şartlarındaki değişikliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

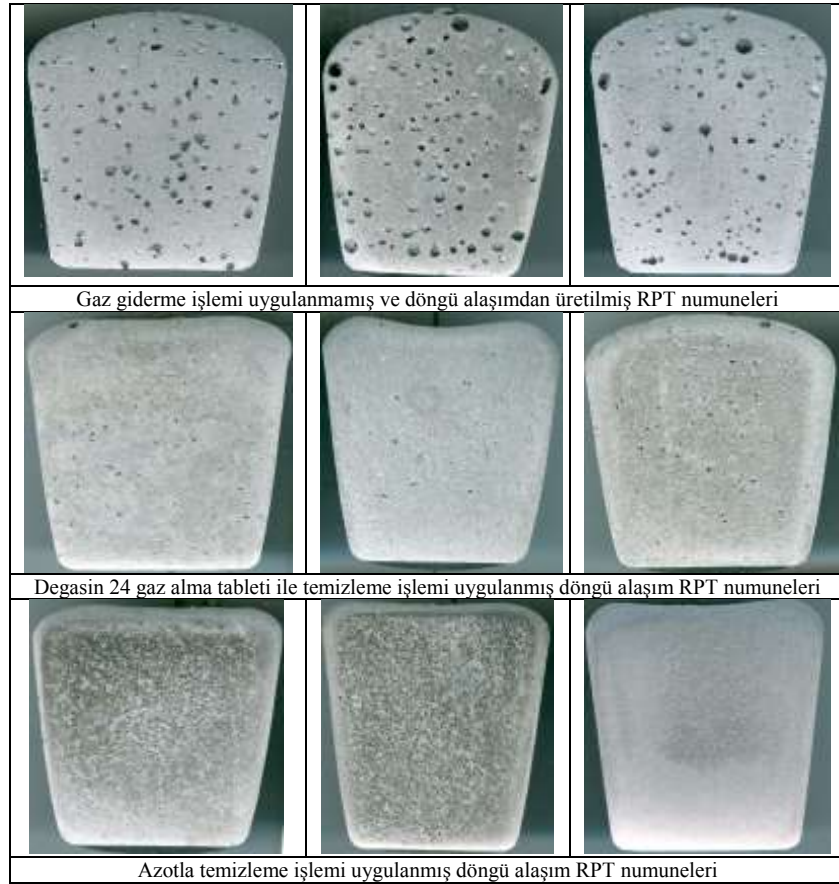
4.3. Sıvı Metal Temizleme Yönteminin Belirlenmesi Çalışması Sonuçları

Çalışmalarda değişen döküm şartlarında döküm kesitlerinde oluşan gözeneklerin sadece çekinti kaynaklı oluşması ve gaza dayalı porozite oluşumunun minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple sıvı metalin temizlenmesinde kullanılacak yöntemin belirlenmesi için ön deneyler yapılmıştır. Dökümhanelerde sıvı metal temizlenmesi için gaz giderme tableti kullanımı ve kuru azot gazı ile temizleme işlemi yaygınca kullanım bulmaktadır. Bu amaçla aynı şartlarda ergitilmiş hurda alüminyum alaşımı her iki yöntemle de temizlenmiş ve temizleme işlemi sonrası RPT (Düşürülmüş Basınç Testi) numuneleri alınarak sıvı metal temizliğinin uygunluğu kontrol edilmiştir. RPT deneyine ait detaylı bilgiler Bölüm 3.5’de verilmiştir. Şekil 4.13’de katılaşma sonrası RPT numunelerine ait görüntüler verilmiştir. RPT döküm numuneleri birkaç farklı yöntem ile değerlendirilebilir. Şekil 4.13.a’da gaz giderme işlemi uygulanmamış bir sıvı metalden alınan RPT numunesi örnek görüntüsü mevcuttur. Örnek numune görüntüsünde kesit incelemesine gerek kalmadan üst kısmının vakum altında katılaşan numunenin gaz gözenekleri nedeni ile hacimsel genişmesi açıkça görülmektedir. Şekil 4.13.b’deki görüntü ise gaz giderme işlemi uygulanmış temiz RPT numunesi örnek görüntüsüdür.



Şekil 4.13. RPT test numunesi görüntüleri.

Vakum altında katılaşma sonucu numune üstünde çöküntü olduğundan sıvı metalin temiz ya da az miktarda gaz içerdiği anlaşılmaktadır. Ancak RPT numuneleri üzerinden sıvı metalin içerdiği gaz oranı, numunelerin dikey olarak ortadan kesilmesi ve kesit yüzeylerinin incelenmesi ile daha net bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Şekil 4.14’de farklı RPT numunelerine ait kesit görüntüleri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.14. RPT test numunesi kesit görüntüsü sonuçları.

Şekil 4.14’de verilen RPT numune kesitlerinden, gaz giderme işlemi uygulanmadan dökülen alaşımın gaza dayalı gözenek oluşturma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple gaz giderme yapmaksızın döküm yapmak numune içerisindeki yetersiz beslemeden kaynaklanan gözenek miktarının yanlış olarak belirlenmesine sebep olacaktır. Ancak gerek tablet kullanarak, gerekse azot gazı ile temizleme işlemi sonucu sıvı metalin gaz içeriğinin minimize edildiği tespit edilmiştir.

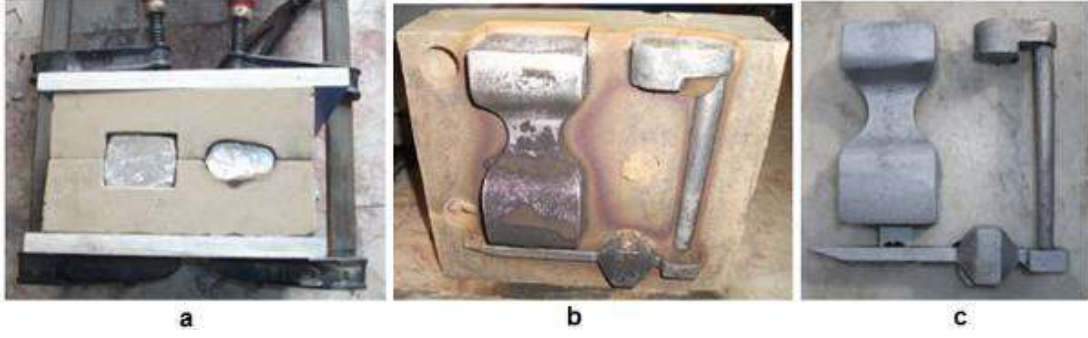
Tablet ve azot gazı ile temizleme işlemlerini birbirleriyle kıyasladığında her iki yöntemde de sıvı metal içerisindeki çözünmüş hidrojenin önemli ölçüde temizlendiğini, ancak azot gazı ile temizleme işleminin tablet ile temizleme işlemine göre daha etkili sonuç verdiği görülmüştür. Kuru azot gazı ile gaz gidermenin, tablet kullanımı ile gaz gidermeye göre daha etkili olması, tabletlerin özellikle nem alma hassasiyetinin yüksek olması ile açıklanabilir. Bu sonuçlar ışığında yapılacak her bir döküm deneyi öncesinde sıvı metal temizleme yöntemi olarak, ısıtmak suretiyle nemden arındırılmış grafit lans ile 5 dakika boyunca azotla temizleme işlemi yapılması esas alınmıştır.

4.4. Deneme Dökümü Çalışması Sonuçları

Model ve kalıp tasarımları tamamlandıktan sonra, tasarımın uygunluğunun kontrolü için deneme dökümleri yapılmıştır. Deneysel çalışma için nihai döküm geometrisini belirlemek üzere, 3 farklı tasarımda model imalatı ve deneme döküm çalışmaları yapılmıştır. Bu kısımda deneme döküm çalışmalarından elde edilen sonuçlar sırasıyla açıklanacaktır. Model tasarımları Model-1 tasarımı, Model-2 tasarımı ve Model-3 tasarımı olarak kodlanıp açıklamalar bu şekilde yapılacaktır.

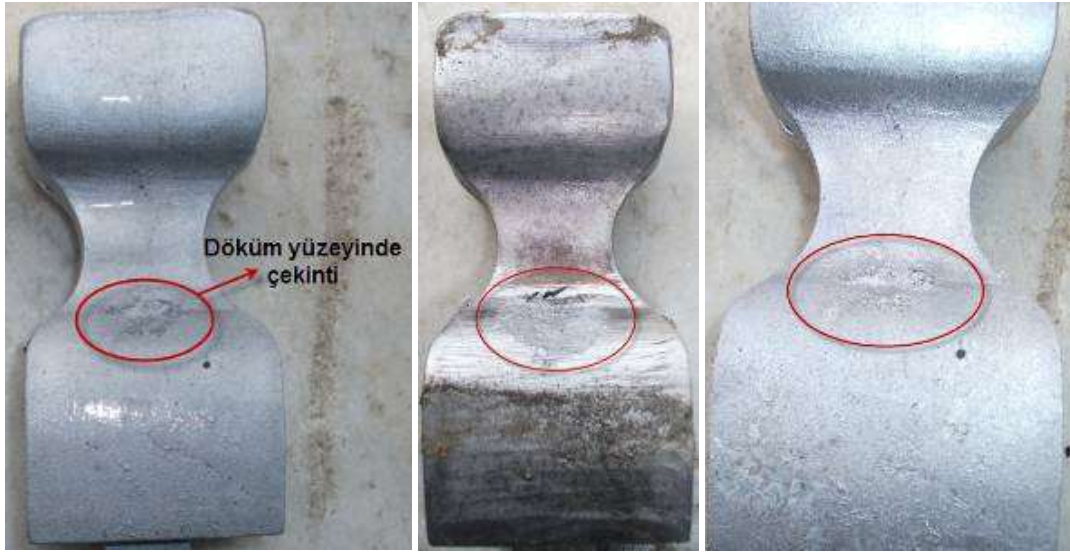
4.4.1. Model-1 tasarımı ile yapılan deneme döküm sonuçları

Model 1 ile hazırlanan kalıpların dökümleri Deneysel Çalışmalar bölümü Tablo 3.1’de belirtilen şartlara uygun olarak hazırlanan alaşımlarla 3’er adet yapılmıştır. Şekil 4.15’de döküm sonrası kalıp görüntüsü, kalıbın açılması ve dökülmüş bir parçaya ait fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 4.15. a) Dökülmüş bir kalıp, b) döküm sonrası kalıbın açılmış hali, c) kalıptan çıkarılmış döküm resmi.

Yollukları kesilen döküm numunelere öncelikle göz ile yüzey çöküntü kontrolü yapılmıştır. Yapılan incelemelerde Etial 110, Etial 140 ve Etial 220 alaşımlarının yüzeylerinde çöküntü olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.16’da döküm numunelerin yüzey çöküntü örneklerine ait görüntüler verilmiştir.

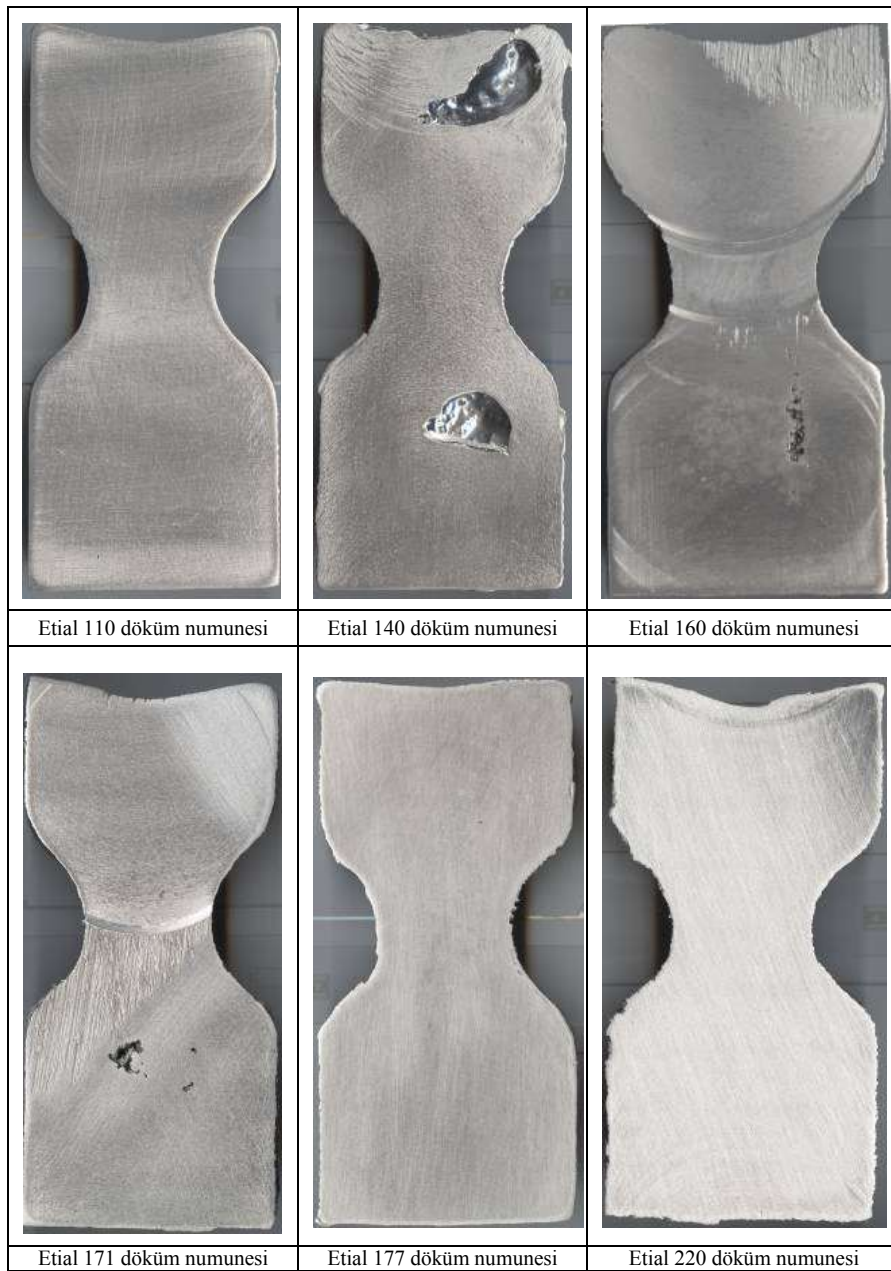


Şekil 4.16.a) Etial 110, b) Etial 140, c) Etial 220 alaşımlarından Model-1 tasarımıyla alınan döküm numunelerde oluşan yüzey çökmelerine ait tipik görüntüleri.

Döküm kesit yüzeylerinin incelenmesi için numuneler Bölüm 3.8, Şekil 3.22’de görüldüğü gibi kesilip yüzeyleri frezeleme ve zımparalama sonrası incelenmiştir. Hazırlanan kesit yüzey görüntüleri tarayıcı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Şekil 4.17’de döküm numunelere ait kesit yüzey görüntüleri verilmiştir.

Dökümlerin kesit yüzeyleri incelendiğinde modelleme programında olduğu kadar bariz bir şekilde çekinti gözenekleşmesine rastlanmamıştır. Bu uyumsuzluğun nedeni

çekinti oluşumunun bazı numunelerin iç kısımlarında değilde döküm yüzeyinde olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeydeki hatalar küçük ölçekli olduğundan, her döküm alaşımında hata çıkmadığından ve çıkan hataların karşılaştırma amaçlı ölçülebilir nitelikte olmamasından dolayı model ve kalıplama tasarımının revizyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Döküm sonuçları ile modelleme sonuçları incelendiğinde bu durum uyumsuzluk gibi görünsede aslında makroporozitenin dış yüzeylerde oluşması ve ilgili bölgenin riskli bölge olduğunun tespit edilmesi modellemenin doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 4.17. Model 1 tasarımı ile üretilen dökümlere ait kesit yüzey görüntüleri.

4.4.2. Model-2 tasarımı ile yapılan deneme döküm sonuçları

Şekil 3.2’de verilen Model-2 tasarımı ile kalıplar hazırlanmıştır. Deneme dökümleri için geniş katılma aralığına sahip alaşım olarak Etial 110 ve dar katılma alaşımı için Etial 140 alaşımları kullanılmıştır. Deneme döküm şartları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Model-2 tasarımı ile yapılan deneme döküm şartları.

Döküm Şartları	1. Döküm	2. Döküm
<i>Döküm Alaşımı</i>	Etial 110 primer külçe	Etial 140 döngü alaşım
<i>Tane İnceltici İlavesi (Al5Ti1B)</i>	Ağırlıkça % 0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B tane inceltici ilavesi yapılmıştır.	İlave edilmemiştir, ancak hurda içerisinde eser miktarda titanyum içermektedir.
<i>Modifiye Edici İlavesi (Al10Sr)</i>	Ağırlıkça %0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr ilavesi yapılmıştır.	Modifiye edici ilavesi yapılmamıştır.
<i>Filtre Kullanımı (20 ppi seramik köpük filtre)</i>	Var	Yok
<i>Sıvı metal temizleme işlemi</i>	Azotla temizleme yapılmıştır.	Temizleme yapılmamıştır.

Model tasarımının uygunluğunun tespit edilmesi amacıyla Tablo 4.3’de verilen deney şartlarına uygun olarak Etial 110 primer ve Etial 140 döngü alaşımlarından 3’er adet kum kalıba döküm yapılmıştır. Döküme hazır sıvı metal kum kalıplara turbülans oluşturmayacak şekilde dökülmüştür. Burada amaç ince taneli nispeten iyi döküm özellikleri sağlayarak muhtemel en yüksek kritik katı oranı değerlerine sahip dökümler ile nispeten kötü döküm şartlarında model geometrisinin yüzeyde çöküntü oluşturup oluşturmadığının kontrol edilmesidir. Çünkü model tasarımı yapılırken parça yüzeyinde değil de parçanın içerisinde bilinçli olarak ölçülebilir nitelikte çekinti oluşturulması hedeflenmektedir. Kalıptan çıkarılan döküm numuneler kumları temizlendikten sonra göz ile yüzey çöküntü kontrolü yapılmıştır. Şekil 4.18’de dökülmüş numunelere ait tipik örnekler verilmiştir.

Şekil 4.18.a’da Etial 110 alaşımından dökülen numune yüzeylerinde herhangi bir çöküntü gözlenmezken Şekil 4.18.b’de Etial 140 alaşımından dökülen numune yüzeyinde çöküntü görülmektedir. Bu nedenle Model-2 tasarımında da bir revizyona gidilerek tüm çekinti boşluklarının iç kesitte oluşması sağlanmıştır.



Şekil 4.18.a) Etial 110, b) Etial 140 alaşımı döküm numune görüntüleri.

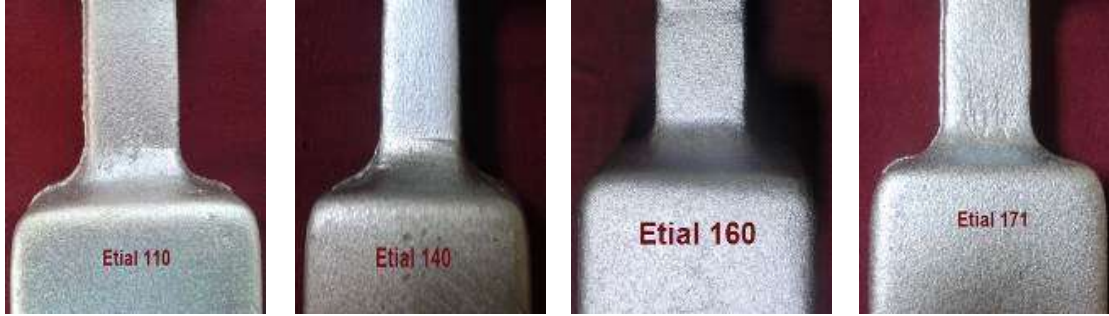
4.4.3. Model-3 tasarımı ile yapılan deneme döküm sonuçları

Model-3 kalıplama tasarımının uygunluğunun kontrolü için Tablo 4.4’de verilen deneme dökümleri şartları ve açıklamalara uygun olarak kum kalıba üçer adet döküm yapılmıştır. Model 1 – 2 – 3 ile yapılan deneme dökümlerinden elde edilen veriler ışığında içerisinde hata çıkması durumuna göre farklı kritik katı oranı değerlerine sahip olduğu düşünülen alaşımlarla deneme yapılması uygun görülmüştür. Etial 110 alaşımları kullanılan tüm alaşımlar içerisinde en geniş katılaşma aralığına sahip döküm alaşımıdır. Deney alaşımları arasında en dar katılaşma aralığına sahip alaşım ise Etial 140 alaşımıdır.

Tablo 4.4. Deneme döküm şartları.

Döküm Şartları	1. Döküm	2. Döküm	3. Döküm	4. Döküm
Döküm Alaşımı	Etial 110 primer külçe	Etial 140 döngü alaşım	Etial 160 primer külçe	Etial 171 döngü alaşım
Tane İnceltici İlavesi (Al5Ti1B)	% 0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B	İlave yok	% 0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B	% 0,2 Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B
Modifiye Edici İlavesi (Al10Sr)	%0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr	Modifiye edici ilavesi yapılmamıştır.	%0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr	%0,2 Sr etki edecek şekilde Al10Sr
Seramik Köpük Filtre Kullanımı	20 ppi filtre var	Filtre kullanılmamıştır.	20 ppi filtre var	20 ppi filtre var
Sıvı metal temizleme işlemi	Azotla temizleme	Temizleme yapılmadı	Azotla temizleme	Azotla temizleme

Kalıptan çıkarılan döküm numuneler kumları temizlendikten sonra yüzey çöküntü kontrolü yapılmıştır. Şekil 4.19’da görüldüğü gibi yüzeylerinde çöküntüye rastlanmamıştır. Dökümlerin yüzeyinde çöküntü olmaması iç kısımda çıkması muhtemel çekinti boşluklarının tespiti ve ölçülebilmesi açısından önemlidir. Bu sonuçlar yüzey çöküntüsü açısından döküm geometrisi tasarımının uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.19. Deneme dökümü numuneleri yüzey görüntüleri.

Döküm numuneler, yoğunluk ölçümü için döküm ve besleme boğazını içerecek şekilde kesilmiştir. Tablo 4.5’de döküm numunelerden elde edilen yoğunluk ölçüm ve hesaplama sonuçları verilmiştir.

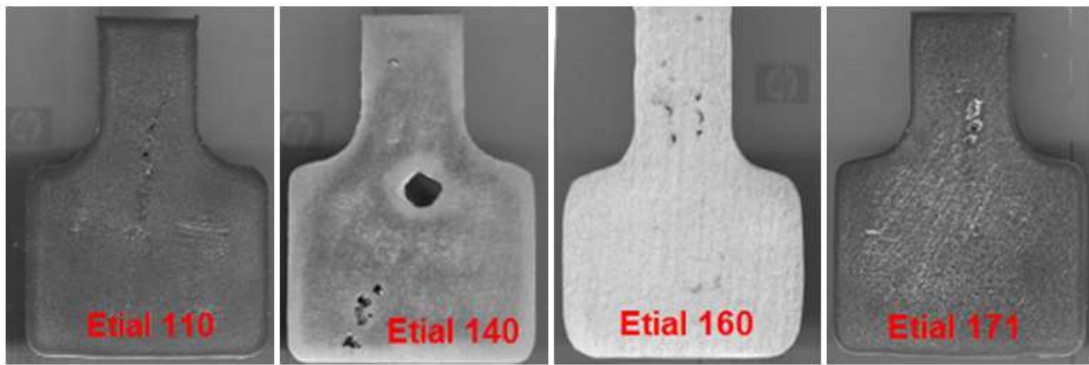
Tablo 4.5. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü sonuçları.

Numune Adı	Havada Ağırlık (Gram)	Suda Ağırlık (Gram)	DeneySEL Yoğunluk (gr / cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr / cm ³)	Porozite %
Etial 110	343,24	217,84	2,7291	2,76	1,12
Etial 140	341,74	207,86	2,5451	2,66	4,32
Etial 160	346,54	218,10	2,6901	2,75	2,51
Etial 171	342,34	209,78	2,5749	2,64	2,47

Tablo 4.5’deki sonuçlar incelendiğinde döküm şartları ve alaşım farkına göre yoğunluk değerleri ve buna bağlı porozite değerlerinin değiştiği gözlenmiştir. Etial 110 alaşımı katılaşma aralığının geniş olması ve döküm şartlarının nispeten iyi olmasından dolayı porozite değerleri düşük çıkmıştır. Diğer alaşımlarda porozite değerleri nispeten daha yüksek çıkmıştır. Aynı döküm şartlarında alaşım değişimi ile porozite değerlerinin değişiklik göstermesi ilk olarak katılaşma aralığı farklılıklarını getirmektedir. Etial 140 alaşımının porozite değerleri incelendiğinde döküm

içerisinde oldukça fazla boşluk olduğu anlaşılmaktadır. Bu dökümde döngü metal kullanılması ve sıvı azotla temizleme işleminin yapılmamış olması gaz kaynaklı porozite oluşumuna da yol açarak porozite değerini artırdığı düşünülmektedir. Yapılan incelemelerde porozite hesaplamalarında kullanılan teorik yoğunluk değerinin ortalama bir değer olarak verilmesinden dolayı dökülen alaşımı kimyasal bileşim içeriğine göre farklılık gösterebileceği anlaşılmış bu sebeple yoğunluk hesaplamalarında kullanılmak üzere bundan sonraki dökümlerde tam dolu olarak kabul edilecek kokil kalıba döküm numunelerden referans yoğunluk değerleri tespit edilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Ayrıca döküm içerisindeki porozite sonuçlarının incelenmesinde yoğunluk ölçümlerinin yanı sıra elde edilen sonuçları desteklemesi açısından X-ray gibi ilave ölçüm ve test yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

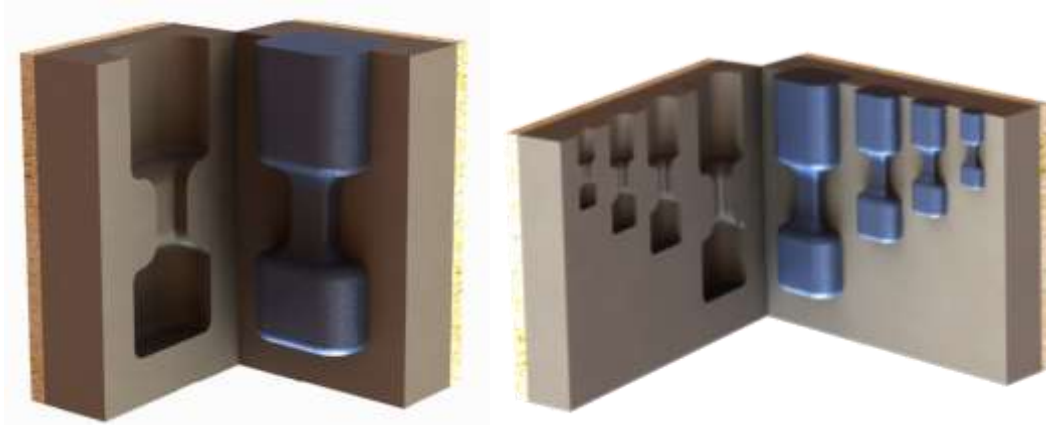
Döküm numunelerin içinde kesit yüzeylerindeki porozite durumunu incelenmek üzere yolluklarından ayrılan numuneler dikey olarak ortadan kesilerek yüzeyleri zımparalama işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama sonrası yüzeylerin taranması sonucu elde edilen görüntüler Şekil 4.20’de verilmiştir. Döküm kesit yüzeyleri incelendiğinde yoğunluk sonuçları değerleri ile kesit yüzey sonuçlarının paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak özellikle Etial 140 alaşımının döküm kesit yüzeyinde oluşan çekintilerin gaz kaynaklı da olduğu gözlenmektedir. Bu sebeple deneylerde sadece çekinti kaynaklı porozite ölçümlerinin yapılabilmesi açısından bundan sonraki deneylerin tamamında gaz kaynaklı çekintileri önlemek açısından sıvı metale azot gazı ile temizleme işlemi yapılması uygun görülmüştür.



Şekil 4.20. Model 3 ile yapılan döküm numunelerin kesit yüzey görüntüleri.

4.4.4. Model geometrisinin farklı ölçeklerde boyutlandırılmış döküm sonuçları

Farklı ölçeklerde boyutlandırılmış model ile deneme döküm çalışmalarında alaşım olarak sadece Etial 171 kullanılmıştır. Ergitilmiş sıvı metal azotla temizleme ve cüruf alma işlemleri sonrası döküm gerçekleştirilmiştir. Döküm öncesi sıvı metal kalitesinin uygunluğunun kontrolü amacıyla RPT numuneleri alınmış ve sıvı metalin gazlılık seviyesi döküm için uygun olduğuna karar verilmiştir. Kalıptan çıkarılan döküm numuneler kumları temizlendikten sonra yüzey çöküntü kontrolü yapılmıştır. Şekil 4.21’de hazırlanmış kalıp CAD görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.22’de farklı ölçeklerde dökülen numune yüzeylerinde herhangi bir yüzey çöküntüsü olmadığı görülmektedir.

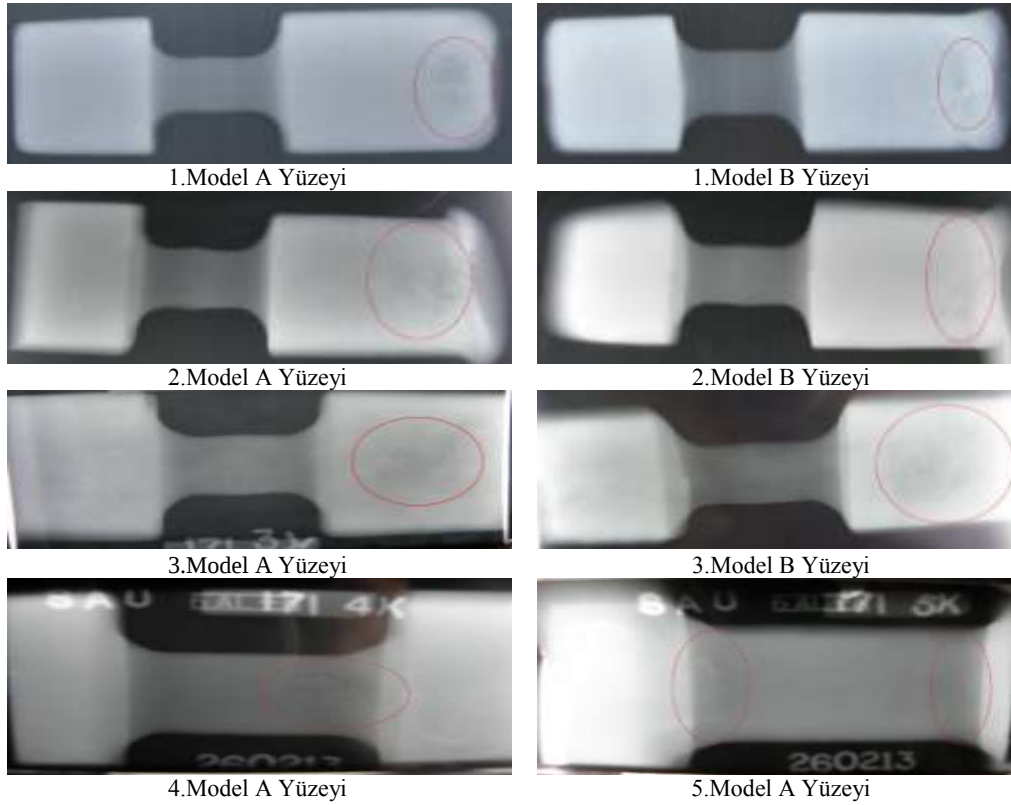


Şekil 4.21. Kum kalıp döküm görüntüsü.



Şekil 4.22. Döküm numune görüntüleri.

Döküm numunelerin iç kesitlerinde porozite durumunun tespiti için ön görünüş A ve yan görünüş B yüzeyi olacak şekilde radyografi filmleri 2 yönlü çekilmiştir. Çekilen radyografi filmleri ışık kaynağı üzerine konularak incelenmiş ve çekilen fotoğraftan elde edilen görüntü sonuçları Şekil 4.23’de verilmiştir. Boyutların büyük olmasından dolayı 4 ve 5. Modeller ile yapılan dökümlerden B görüntüleri alınamamıştır.



Şekil 4.23. Döküm numune radyografi film sonuçları.

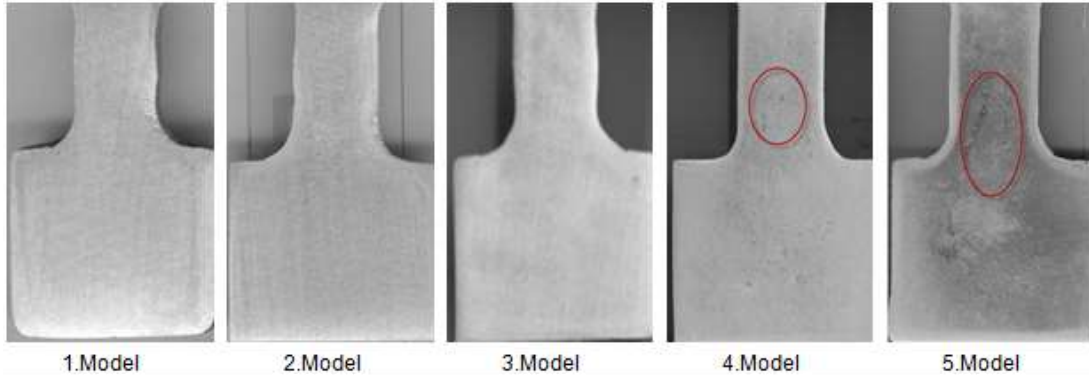
Radyografi filmlerden elde edilen sonuçlara göre 1, 2 ve 3. numuneler küçük ölçekli olmalarından dolayı sadece besleyicilerde çekinti boşluğu riski oluşturmuştur. Ancak aynı geometrideki 4 ve 5. numaralı dökümlerde çekinti boşlukları daha bariz ve besleyiciden döküm kısımlarına doğru kaymıştır. 4. Modele ait dökümde besleyiciden döküm boğazının yarısına kadar gözenekler tespit edilirken, 5. model dökümünde alt döküm boğazından döküm içine kadar boşluk oluşumu gözlenmiştir. Radyografi incelemelerinden sonra numunelerin besleyicileri kesilerek parça ve boğaz bağlantısı içerecek şekilde yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Deneysel yoğunluk hesaplandıktan sonra alaşıma ait tam dolu referans yoğunluk oranından numuneye ait porozite sonuçları bulunmuştur. Tablo 4.6’da döküm numunelerden elde edilen ortalama yoğunluk ölçümleri ve gözenek hesaplama sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.6. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü sonuçları.

Numune	Havada Ağırlık (gr)	Suda Ağırlık (gr)	DeneySEL Yoğunluk (gr / cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr / cm ³)	Porozite %
1.Model	45,62	28,70	2,6914	2,6951	0,14
2.Model	131,52	82,62	2,6848	2,6951	0,38
3.Model	342,28	214,34	2,6705	2,6951	0,91
4.Model	1113,20	690,76	2,6305	2,6951	2,40
5.Model	2918,00	1804,50	2,6159	2,6951	2,94

Tablo 4.6’da görüldüğü gibi yoğunluk değerleri döküm model ebatlarının değişimi ile farklılık göstermiştir. Model ebatlarının büyümesine paralel olarak döküm ve döküm boğazında çıkan porozite yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. Bunun bir nedeninin, farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm numunenin farklı sürelerde katılaşması olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu durum döküm numunelere uygulanan radyografi sonuçları ile uyum göstermektedir.

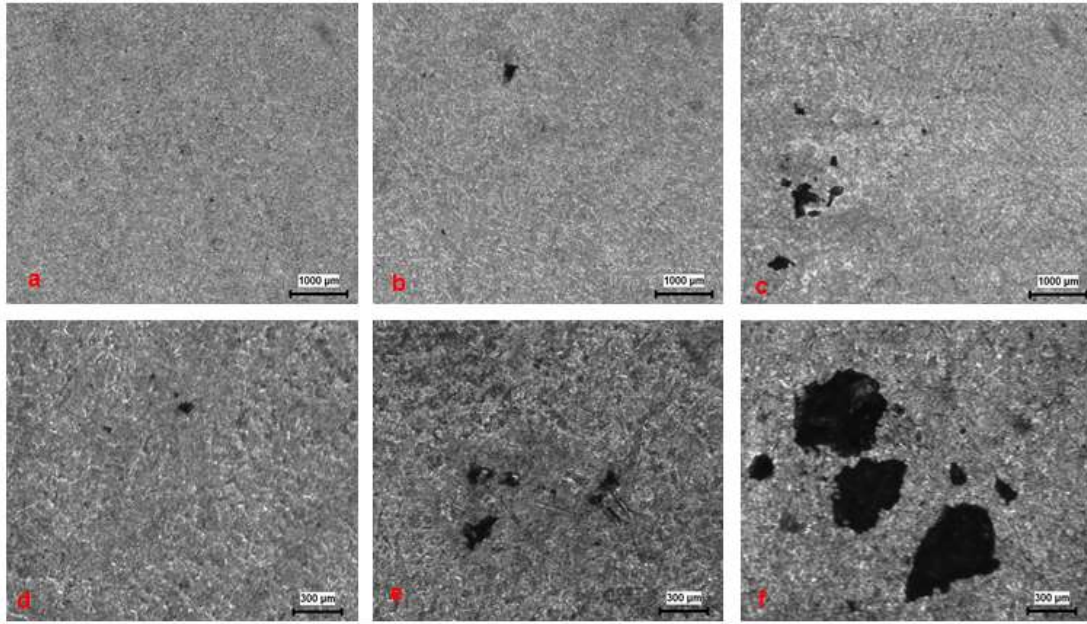
Dökümler radyografi ve yoğunluk incelemelerinden sonra döküm ve boğaz bağlantısı içerecek şekilde dikine kesilmiş ve kesit yüzeylerinde makro porozite dağılımı incelenmiştir. Kesilen döküm numunelerin yüzeyleri zımparalanmış ve tarayıcıda taranarak Şekil 4.24’deki görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 4.24. Döküm numuneleri kesit yüzey görüntüleri.

Kesit yüzey tarama sonuçları incelendiğinde ilk 3 numunede çok bariz çekinti boşluklarına rastlanmamaktadır. 4. ve 5. modelde şekilde işaretlenmiş yerlerde boşluklara rastlanmıştır. Bu boşlukların çekinti ya da gaz kaynaklı olup olmadığının kontrolü için ilgili bölgelerden 10X ve 25X büyütmede stereoskopik mikroskopta görüntüler alınmış ve bu görüntüler Şekil 4.25’de verilmiştir. Şekil 4.25’deki görüntülerden anlaşıldığı üzere boşlukların çekinti kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Bu durum; besleyici boğazının çok uzun olması ve besleme yolunun kapanması ve besleyicinin tam anlamıyla görevini tam olarak yapamaması ile açıklanabilir. 1., 2. ve 3. modellerde boyutlar göreceli olarak küçük olduğundan, bu tür boşluklar görülmemektedir. Yoğunluk ölçümlerinde belirlenen porozite yüzdesinin de çok küçük ebatlı ve yapıda dağılmış halde bulunan mikro poroziteden ya da gaz kaynaklı poroziteden olabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.25’de 3.modelden alınmış görüntü bu düşüncüyü doğrular niteliktedir.



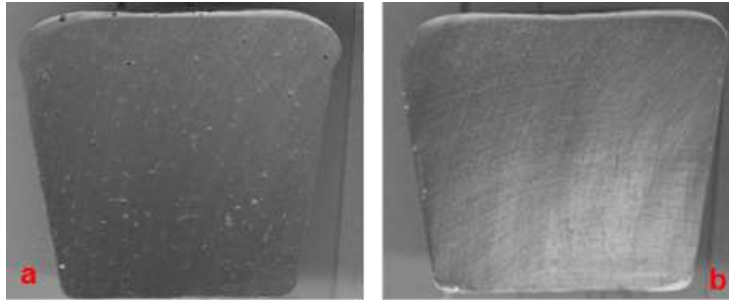
Şekil 4.25. Döküm numunelerin kesit yüzeylerinden stereokop ile alınmış 10X ve 25X görüntüleri, a) 3.Model 10X, b) 4.Model 10X, c) 5.Model 10X, d) 3.Model 25X, e) 4.Model 25X, f) 5.Model 25X büyütme.

4.5. Döküm Sonuçları

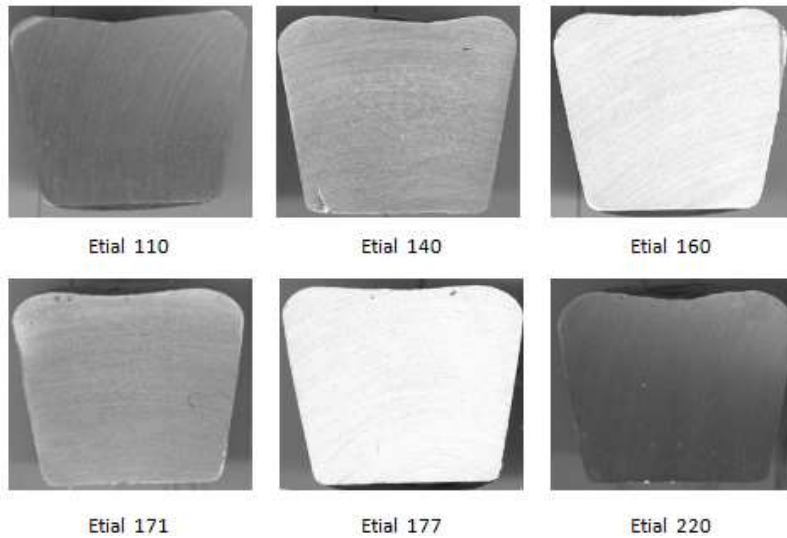
Taguchi istatistiksel deneysel tasarım yöntemi ile belirlenen ve Bölüm 3.3’te belirlenen deney şartlarına uygun olarak yapılan kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm deney sonuçları bu bölümde verilmiştir. Dökümlerden elde edilen numuneler tamamı için deneme dökümlerinden elde edilen tecrübeler doğrultusunda, sıvı metal gaz durumu kontrolü, kimyasal bileşim uygunluğunun kontrolü, dökümlerin yüzey çöküntü incelemesi, döküm kesit yüzey taraması, yoğunluk ölçümleri ve radyografi incelemeleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.5.1. Sıvı metalde gaz ölçüm testleri (RPT sonuçları)

Dökümlerin içerisinde oluşması muhtemel gözenekleşmenin sadece yetersiz besleme kaynaklı olması gerektiğinden gaz kaynaklı gözenekleşmenin minimize edilmesi açısından, sıvı metale azotla temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu sebeple dökümlerde azotla temizleme öncesi ve sonrası sıvı metal temizliğinin kontrolü amacıyla tüm dökümlerden önce RPT test numuneleri alınmıştır. Şekil 4.26.a'da primer külçeden ergitilmiş bir alaşımın azotla temizleme öncesi RPT numunesi kesit görüntüsü verilmiştir. Şekildende görüldüğü gibi dökümlerde primer külçe alaşım kullanılmasından ve sıcaklığın çok fazla yükseltilmemesinden dolayı çok küçük ve dağılmış gözenek yapısı oluşmuştur. Ancak azotla temizleme sonrası Şekil 4.26.b'de bu gözeneklerin tamamen kaybolduğu görülmektedir. Şekil 4.27'de kum kalıba döküm deneylerinde her bir alaşım için azotla temizleme sonrası alınan RPT numunesi kesit yüzey sonuçları verilmiştir.

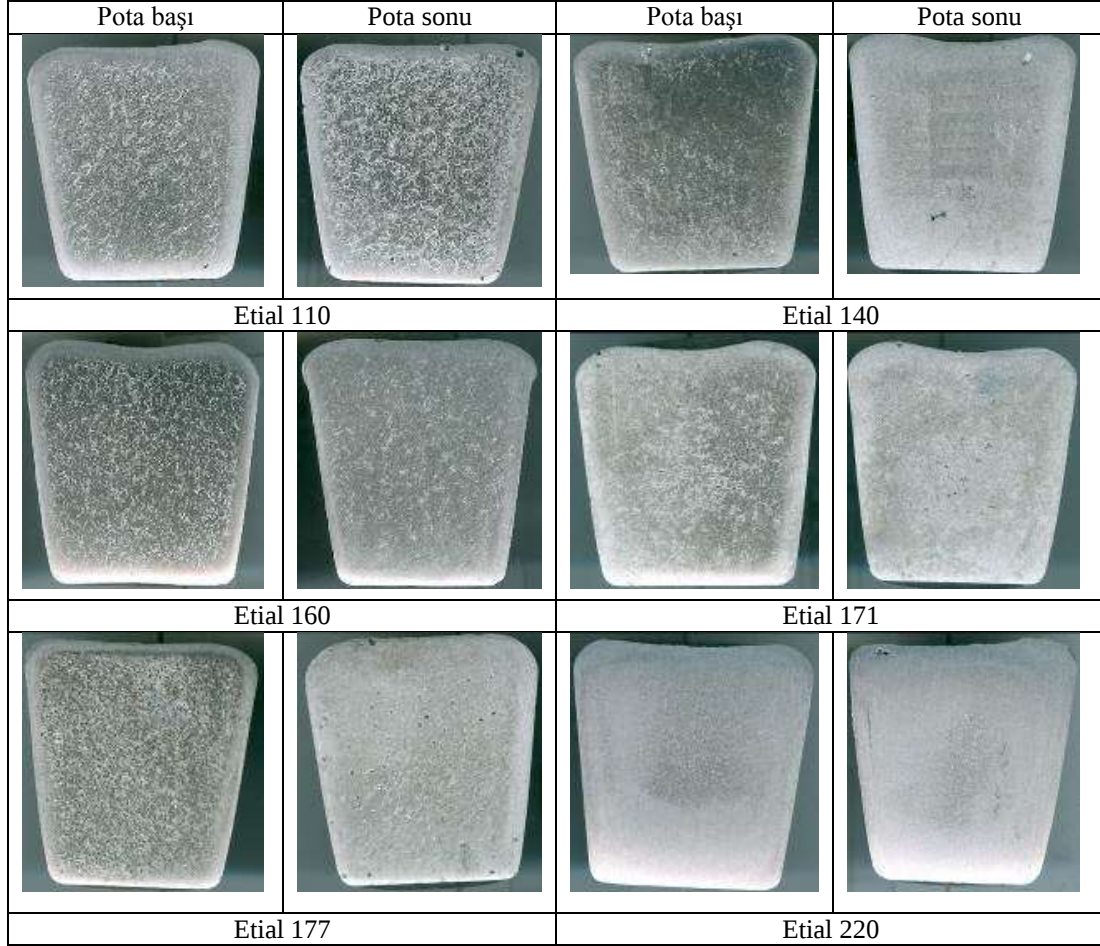


Şekil 4.26. a) Azotla temizleme öncesi, b) temizleme sonrası Etial110 alaşımı RPT numunesi kesit görüntüleri.



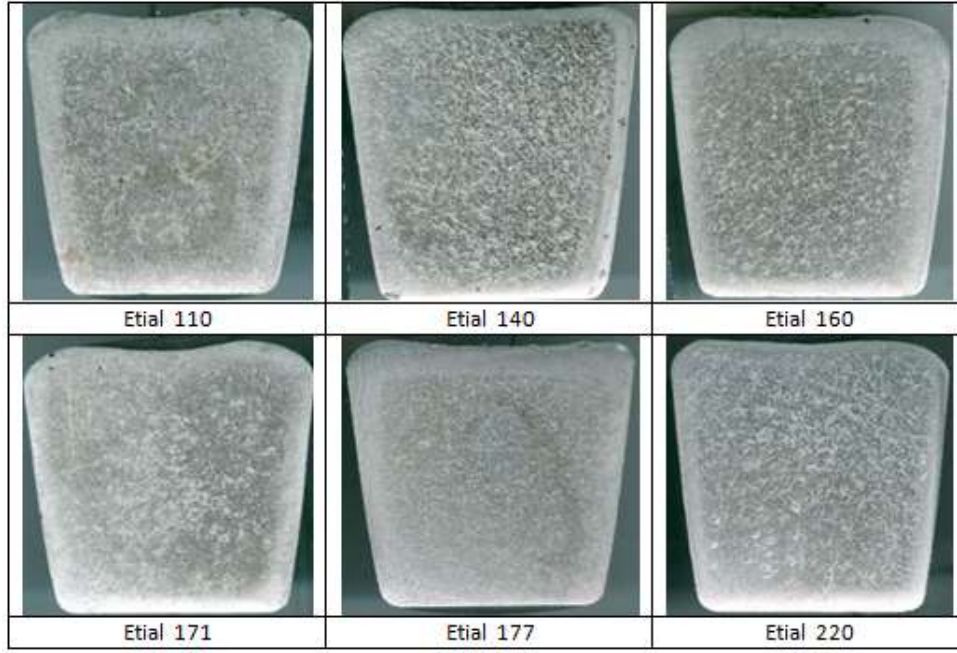
Şekil 4.27. Azotla temizlemeye tabi tutulan kum kalıba döküm öncesi farklı alaşımlardan alınan RPT kesitleri.

Kokil kalıba dökümlerde sıvı metal azotla temizlendikten sonra döküm öncesi RPT numunesi alınarak dökümlere geçilmiştir. Her bir pota içerisindeki sıvı metal ile 3 adet kokil kalıp dökümü yapılmıştır. Şekil 4.28’de kokil kalıba döküm başlangıcında ve döküm sonunda alınan RPT numunesi görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.28. Kokil kalıba döküm deneyleri öncesinde ocaktan alınan RPT numunelerine ait kesit görüntüleri.

Şekil 4.29’da alçak basınçlı döküm deneylerinde örnek olarak her bir alaşımdan alınan RPT test numunesinin kesit yüzey sonuçları görülmektedir. Döküm RPT numunelerine ait kesit inceleme sonuçları azotla temizleme sonrası mevcut gözeneklerin de kaybolduğunu göstermektedir. Bütün dökümlerde alınan RPT sonuçları incelendiğinde döküm içerisinde gaz kaynaklı gözenek oluşumunu engellemek adına sıvı metal temizleme işleminin yeterli oranda sağlandığı anlaşılmaktadır. Böylece dökümlerde oluşması muhtemel porozitelerin gaz kaynaklı olmayacağı ve olması halinde yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözenekleşmesi nedeni ile oluşacağı kabul edilmiştir.



Şekil 4.29. Alçak Basıncılı Döküm deneylerinden önce alınan RPT numunelerine ait kesit görüntüleri.

Döküm RPT sonuçlarına göre azotla temizleme sonrası mevcut gözeneklerin de kaybolduğu anlaşılmaktadır. Bütün dökümlerde alınan RPT sonuçları incelendiğinde döküm içerisinde gaz kaynaklı porozite oluşumuna engellemek adına sıvı metal temizleme işleminin optimum şartlarda sağlandığı anlaşılmaktadır. Böylece dökümlerde oluşması muhtemel porozitelerin gaz kaynaklı olmayacağı düşünülmektedir.

4.5.2. Dökümlerin kimyasal bileşiminin kontrolü

Döküm deneylerinde kullanılan alaşımlar ve katılan ilave mastır alaşım seviyelerinin uygunluğunun kontrolü için dökümlerden numuneler alınmıştır. Numunelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir. Tablo 4.7’deki kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde alaşımların standart bileşim aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli deneylerde Ti ve Sr hedef oranlarının külçe alaşımdaki değerlere göre yükseldiği ve uygun olduğu görülmüştür. Tane inceltme amacıyla Ti ilavesinin %0,15 oranında katılması hedeflenmişti, sonuçlar incelendiğinde 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17 ve 18 numaralı dökümlerde Ti miktarı hedeflenen değere çok yakın çıkmıştır. Ti ilavesinde kritik eşik değeri %0,15 Ti miktarı olduğundan bu oranın bütün deneylerde sağlanmış olduğu tespit

edilmiştir. Benzer şekilde ötektik silisyumun modifiye edilmesi amacıyla ilave edilen Al10Sr alaşımı ile alaşımlarda minimum %0,1 Sr hedeflenmişti. Sr ilavesi gereken 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 numaralı deneylerde Sr miktarının beklenen değere yakın çıktığı gözlenmiştir.

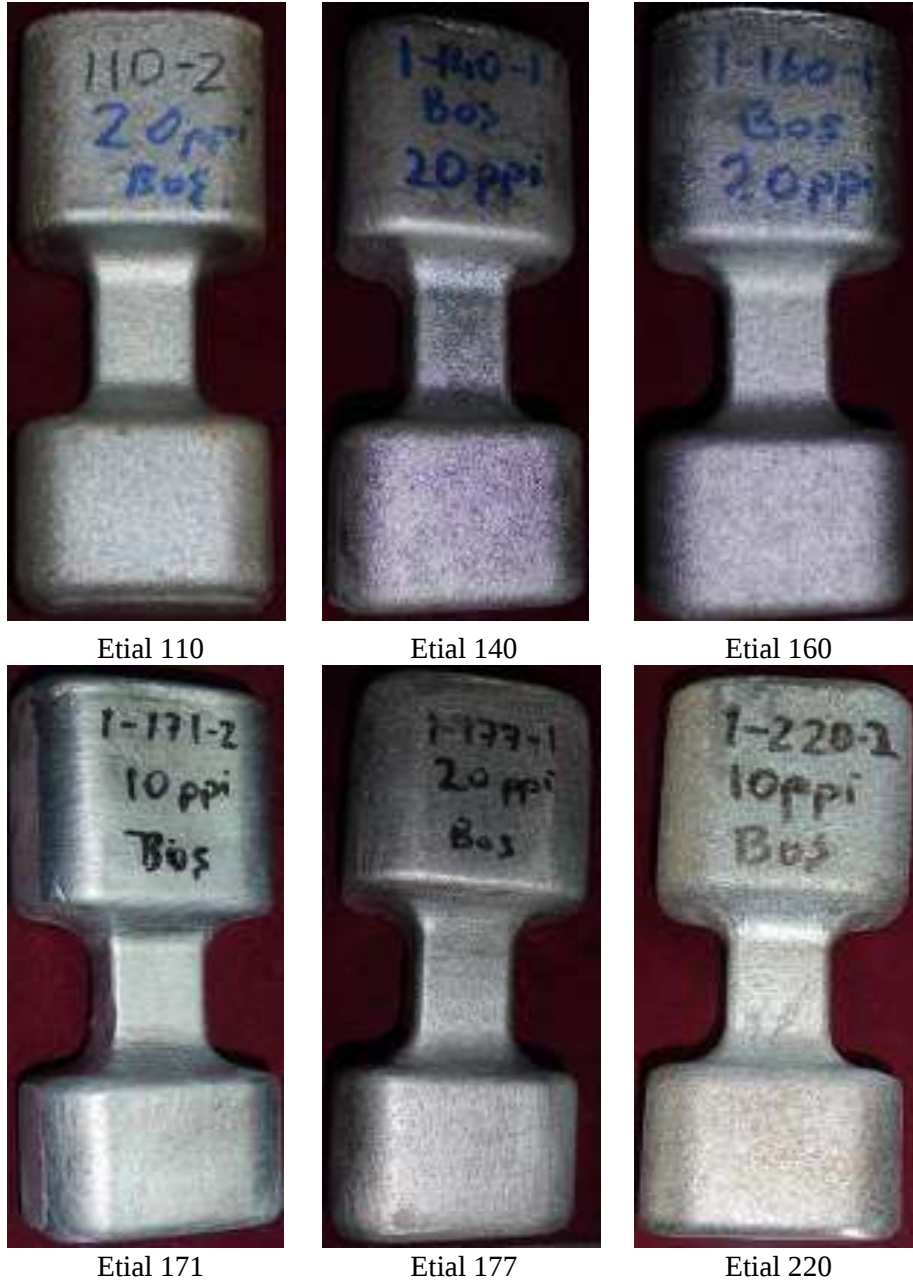
Tablo 4.7. Kum kalıba döküm deneyleri kimyasal bileşim sonuçları (% Ağı.).

D.No	Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	B	Sr	Al
1	E110	5,030	0,363	2,790	0,374	0,012	0,014	0,009	0,001	0,001	Kalan
2	E110-TiB	4,980	0,328	2,710	0,346	0,009	0,015	0,178	0,007	0,001	Kalan
3	E110-TiB+Sr	4,820	0,309	2,640	0,339	0,009	0,015	0,179	0,008	0,181	Kalan
4	E140	11,859	0,371	0,024	0,002	0,004	0,009	0,008	0,001	0,002	Kalan
5	E140-TiB	12,362	0,415	0,009	0,001	0,003	0,009	0,182	0,006	0,001	Kalan
6	E140-TiB+Sr	11,944	0,461	0,008	0,002	0,004	0,011	0,194	0,005	0,166	Kalan
7	E160	8,480	0,248	3,370	0,112	0,198	0,013	0,011	0,001	0,004	Kalan
8	E160-TiB	8,600	0,221	3,130	0,105	0,188	0,015	0,194	0,009	0,003	Kalan
9	E160-TiB+Sr	8,370	0,249	3,460	0,113	0,206	0,016	0,175	0,002	0,192	Kalan
10	E171	9,401	0,402	0,020	0,520	0,364	0,017	0,014	0,002	0,005	Kalan
11	E171-TiB	9,150	0,298	0,094	0,432	0,311	0,012	0,203	0,002	0,004	Kalan
12	E171-TiB+Sr	9,630	0,306	0,056	0,500	0,383	0,013	0,197	0,019	0,179	Kalan
13	E177	7,020	0,171	0,004	0,003	0,377	0,014	0,010	0,002	0,003	Kalan
14	E177-TiB	6,730	0,172	0,003	0,003	0,370	0,016	0,182	0,010	0,004	Kalan
15	E177-TiB+Sr	6,840	0,160	0,004	0,003	0,360	0,016	0,208	0,009	0,205	Kalan
16	E220	0,329	0,244	4,170	0,214	0,156	0,048	0,012	0,001	0,007	Kalan
17	E220-TiB	0,350	0,376	4,240	0,630	0,357	0,068	0,168	0,016	0,111	Kalan
18	E220-TiB+Sr	0,383	0,297	4,430	0,386	0,185	0,055	0,177	0,012	0,186	Kalan

4.5.3. Döküm numunelerin yüzey kontrolü sonuçları

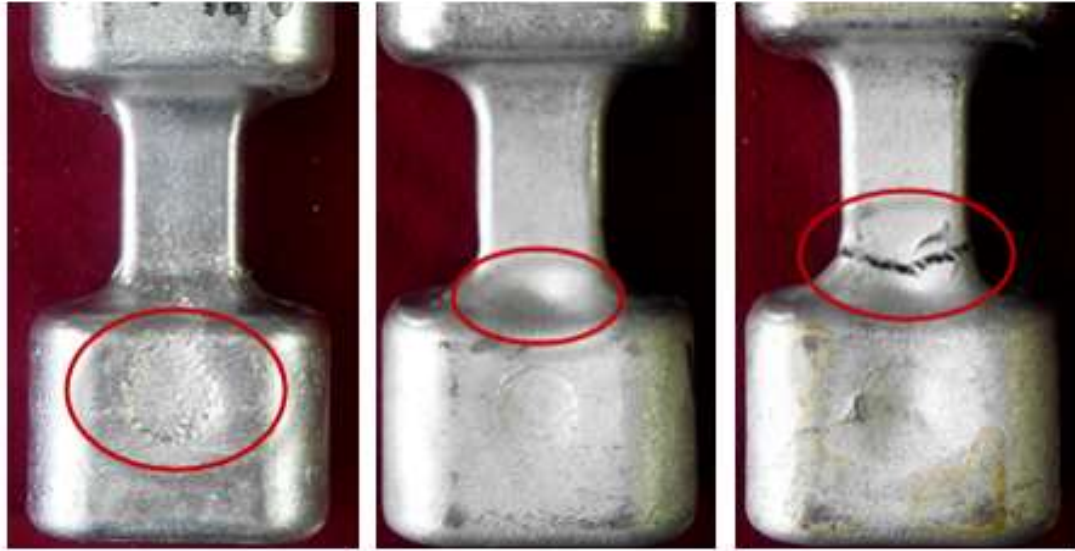
Kalıptan çıkarılan döküm numunelerde ilk olarak yüzey çöküntü kontrolü yapılmıştır. Döküm yüzeyinde oluşan çöküntü döküm iç kesitlerindeki gözenekleşmenin ölçülmesine ve yanlış değerlendirilmesine sebep olabilmektedir. Şekil 4.30’da, tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz olarak yapılan kum kalıba döküm numunelere ait örnek görüntüler verilmiştir. Kum kalıba döküm yüzeyleri incelendiğinde Etial 140, Etial 160, Etial 171 ve Etial 177 alaşımlarının hiçbir dökümünde dış yüzey çökmesine rastlanmamıştır. Ancak Etial 110 ve Etial 220 alaşımları değerlendirildiğinde ilavesiz ve sadece tane inceltici ilaveli dökümlerde yüzey çöküntüsü gözlenmezken tane inceltici ve modifiye edicinin birlikte katıldığı

dökümlerde alt döküm ile besleyici boğazının birleştiği yerlerde çok az bir çöküntü tespit edilmiştir. Bu durum TiB ve Sr ilaveli dökümlerde beslemenin daha uzun sürmesi ve dış kabuğun ilavesiz alaşımlara nazaran daha geç oluşması ile açıklanabilir. Ayrıca çöküntünün sadece Etial 110 ve Etial 220 alaşımlarında olması diğer alaşımlarda böyle bir durumla karşılaşılması bu alaşımların katılma aralıklarının diğer alaşımlara nazaran daha geniş olmasından kaynaklanmış olabileceği ihtimalini güçlendirmektedir.



Şekil 4.30. Kum kalıba tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz dökülen numune yüzey görüntüleri.

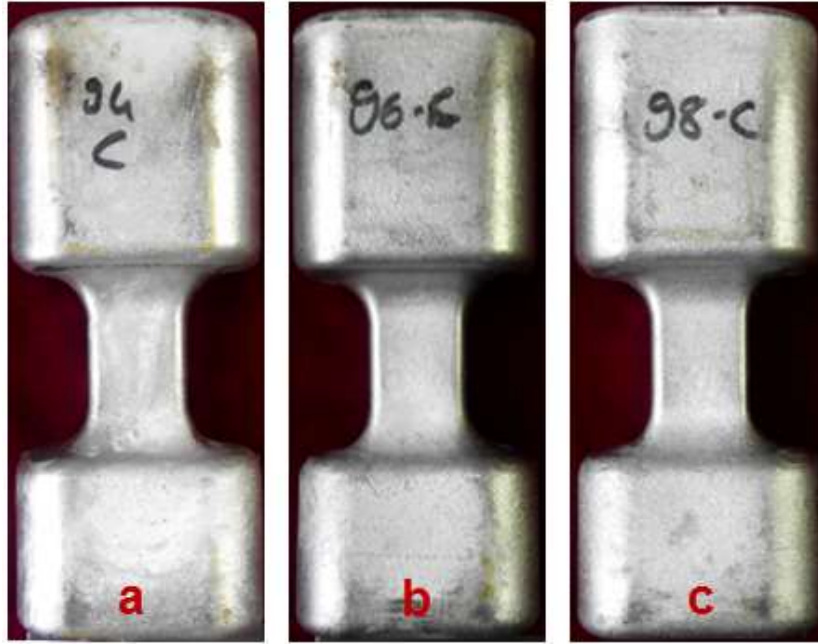
Kokil kalıba döküm numuneleri genel olarak incelendiğinde yüzeylerde çöküntüye rastlanmamıştır. Ancak, çok az da olsa bazı döküm yüzeylerinde küçük oranda çöküntü oluşmuştur. Bu durum daha çok kalıp sıcaklığı 400 °C olan dökümlerde kalıp sıcaklığının ve döküm sıcaklığının kontrol dışı olarak aşırı olduğu durumlardaki dökümlerde gözlenmiştir. İlgili dökümler uygun parametrelere göre tekrar edildiğinde yapılan deneylerde yüzey çöküntü hatası ortadan kalkmıştır. Çöküntüler kum kalıba döküm deneylerinde olduğu gibi parçanın alt döküm kısmı ile besleyici boğazının birleştiği yerlerde gözlenmiştir. Şekil 4.31’de çöküntü gözlenen döküm numune örnek resmi verilmiştir.



Şekil 4.31. Kokil kalıba döküm numune resimleri.

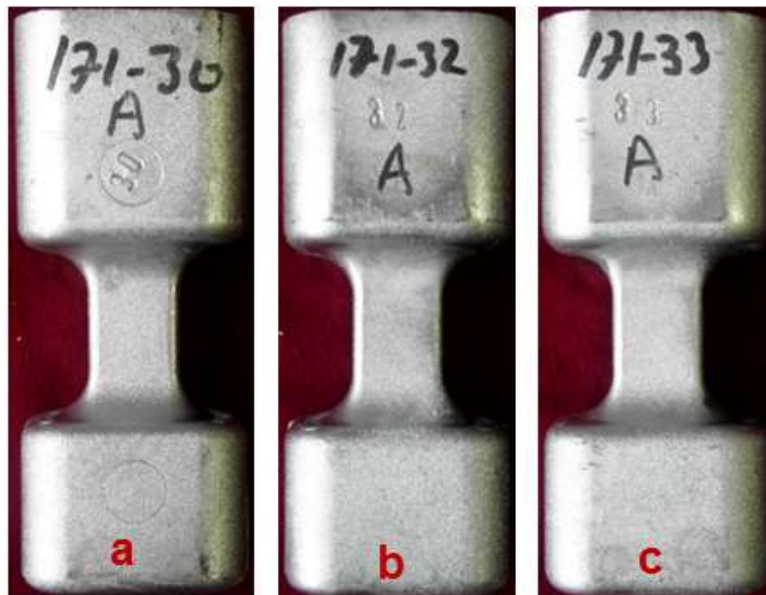
Ayrıca özellikle katılaşma aralığı çok geniş olan Etial 220 alaşımının bazı dökümlerinde şekilde de görüldüğü gibi çatlak görülmüştür. Bu çatlaklar dumbbell tip geometriden kaynaklanan ve Al-Cu alaşımlarında çok sık rastlanan tipik bir sıcak yırtılma hatasıdır. Ancak bazı dökümlerde parçanın kokil kalıptan sıyrılması sırasında operatörün aşırı güç uygulamasından kaynaklanan çatlaklarda oluşmuştur.

Kokil kalıba döküm için Taguchi deney tasarım yöntemi ile belirlenen şartlara uygun yapılan dökümlerin tamamı yüzey çöküntü kontrolü yapılmıştır. Şekil 4.32’de Etial 110 alaşımına ait döküm numune yüzey görüntüleri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.32. Etial 110 alaşımı a) Tane inceltici ve mastır alaşımı ilavesiz, 200°C kalıp sıcaklığı, b) Al5Ti1B ilaveli 300°C kalıp sıcaklığı, c) Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli 400°C kalıp sıcaklığında kokil kalıba döküm.

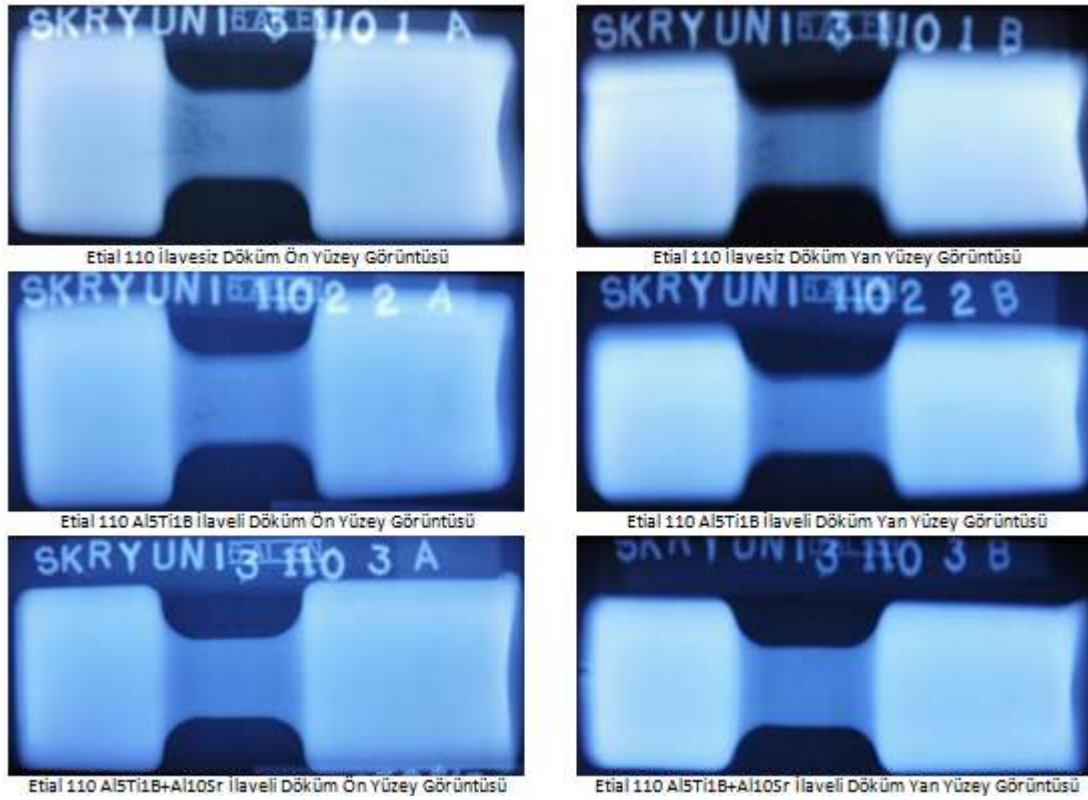
Şekil 4.33’de alçak basınçlı döküm yöntemi için Taguchi deney tasarım yöntemi ile belirlenen şartlara uygun olarak yapılan Etial 171 alaşımına ait döküm numunelere ait görüntüler örnek olarak verilmiştir. Alçak basınçlı döküm deney numunelerinin yüzeyleri incelendiğinde, kontrollü olarak deney şartlarına uygun yapılan dökümlerde çöküntüye rastlanılmadığı tespit edilmiştir.



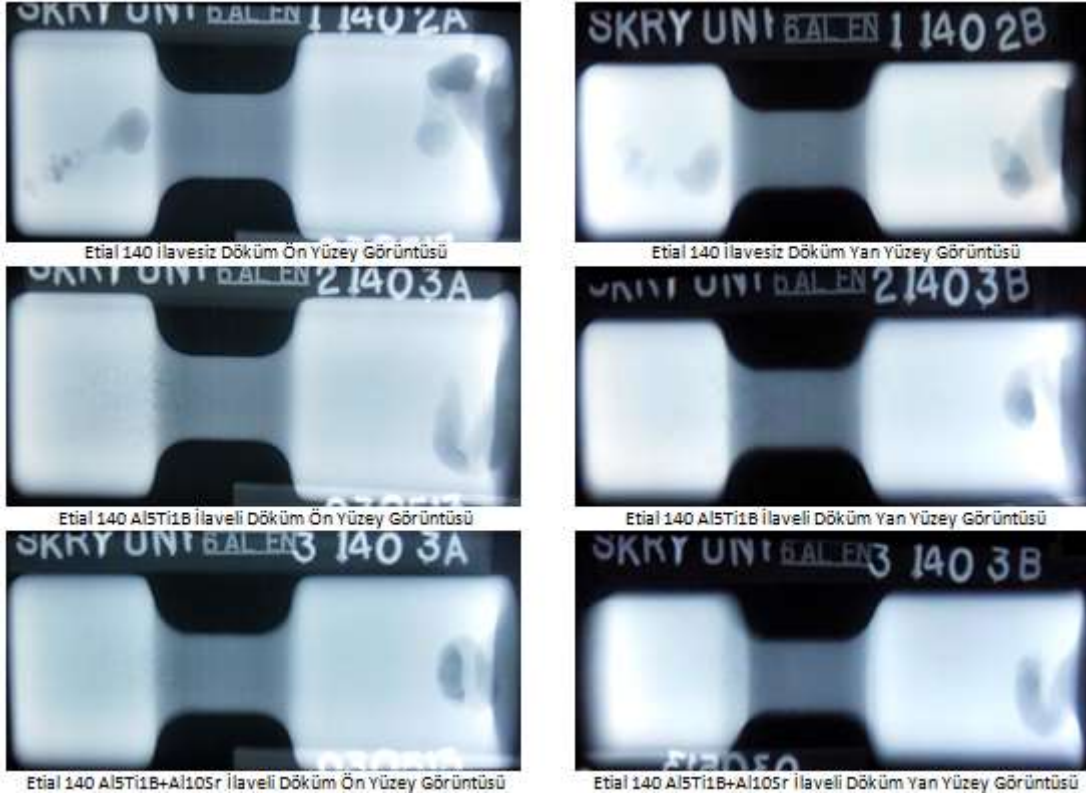
Şekil 4.33. Etial 171 alaşımı ile 300 °C kalıp sıcaklığında a) Mastır alaşımı ilavesiz, 0,25bar basınçlı, b) Al5Ti1B ilaveli, 0,5bar basınçla, c) Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli 1bar basınçla dökülen alçak basınçlı dökümler.

4.5.4. Radyografi incelemeleri

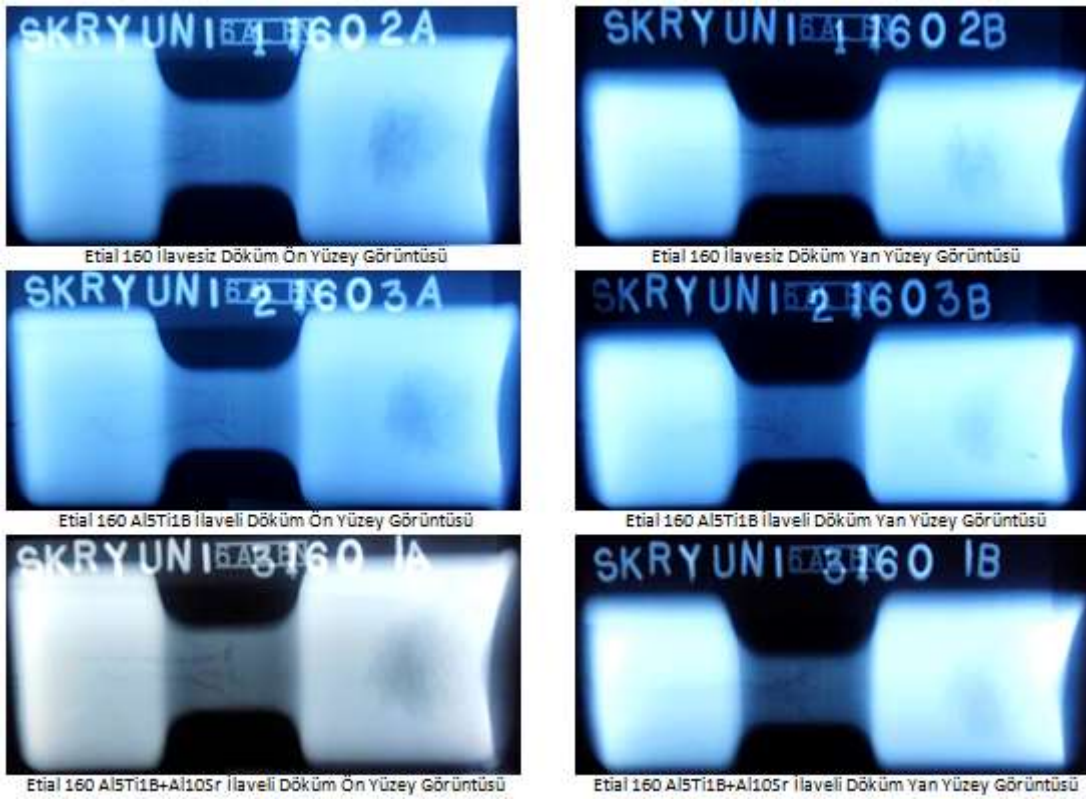
Radyografi yönteminin kullanılması döküm numunelerin iç kesitlerinde bulunan çekinti ve gözeneklerin yeri ve büyüklüğü hakkında net bilgi vermektedir. Bu yöntemle değişen döküm şartlarına göre farklı yöntemlerle belirlenen gözenek değerlerinin karşılaştırmasının ve doğrulamasının daha kapsamlı bir şekilde yapılması sağlanabilir. Radyografi film çekimleri ön ve yan görünüşten iki yönlü olarak yapılmıştır. Çekilen filmlerin bilgisayar ortamına aktarılması için karanlık oda şartlarında ışık kaynağına konulan filmlerin fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 4.34'den 4.39'a kadar kum kalıba dökülen numunelere ait radyografi sonuçları verilmiştir.



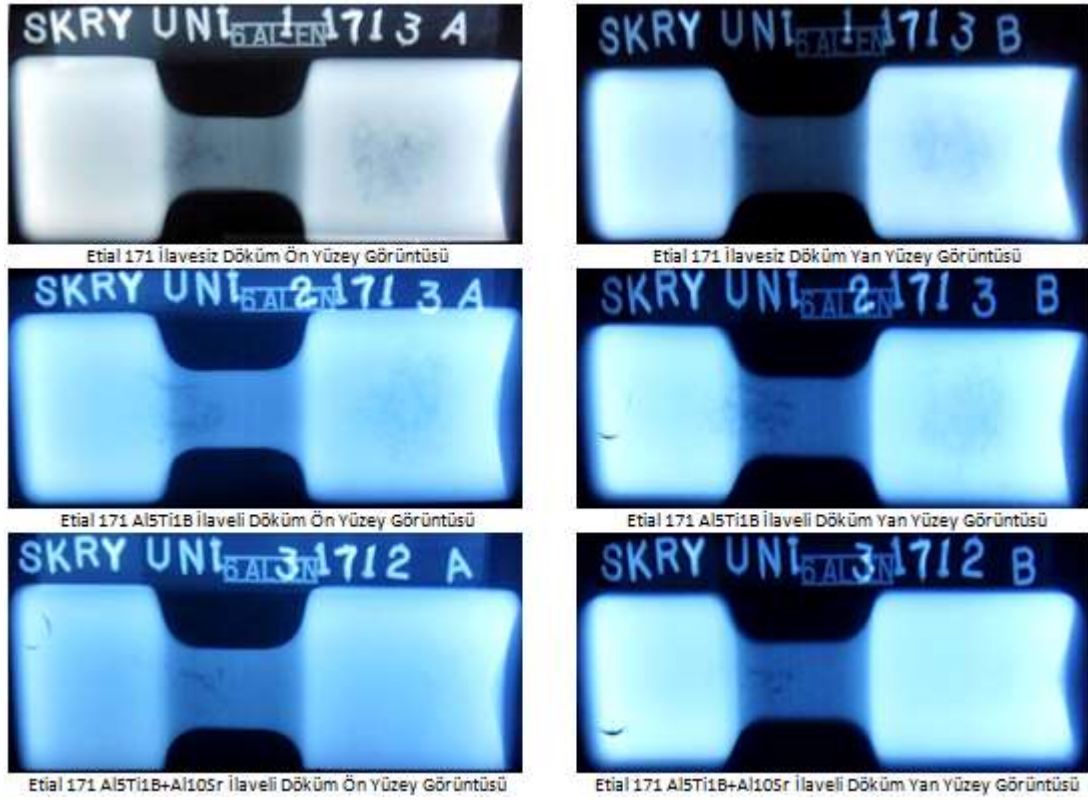
Şekil 4.34. Etial 110 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



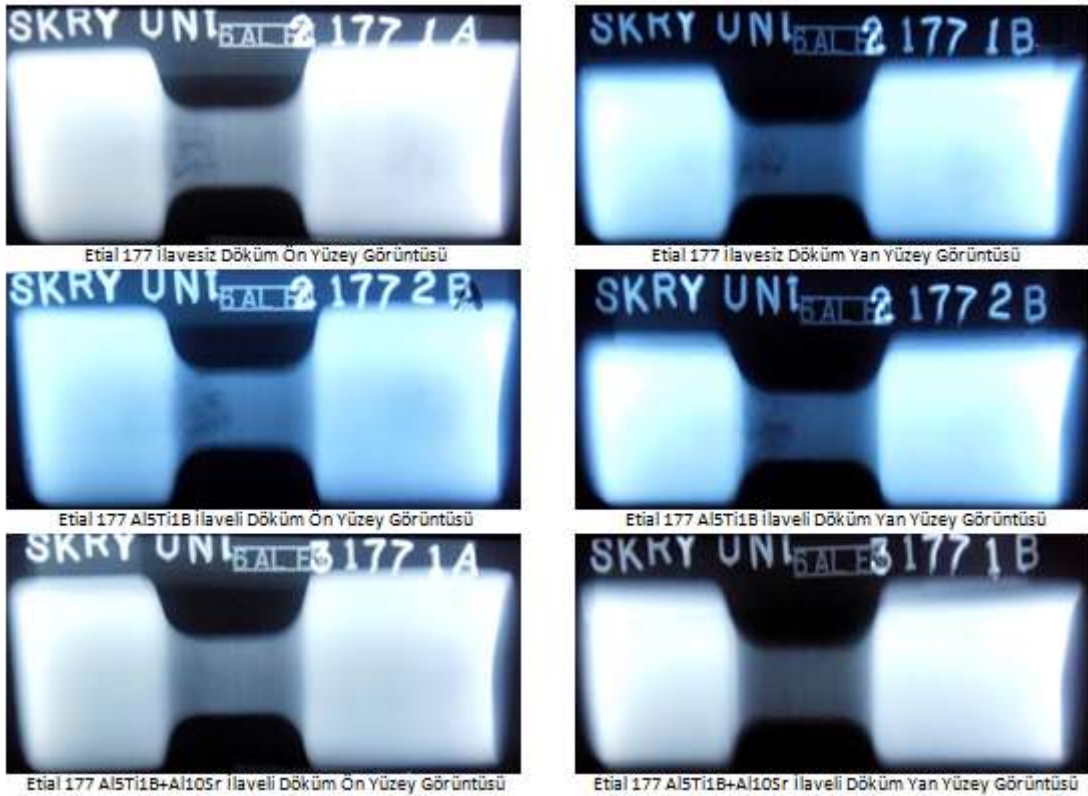
Şekil 4.35. Etial 140 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



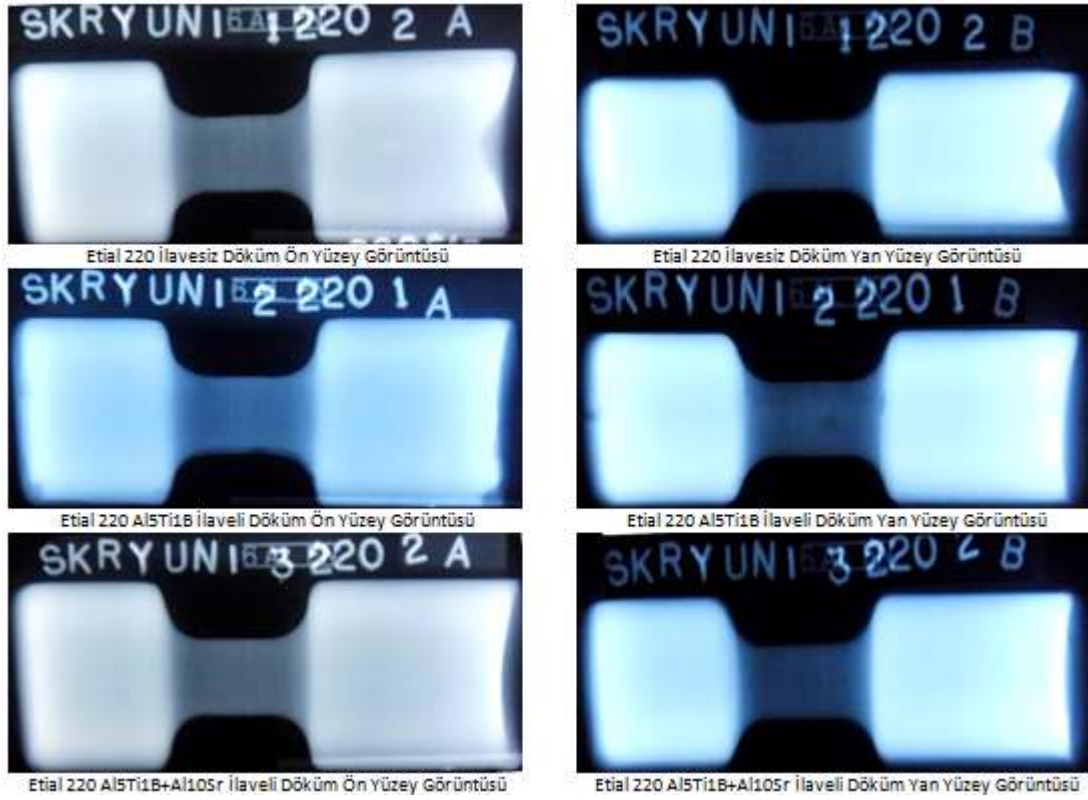
Şekil 4.36. Etial 160 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



Şekil 4.37. Etial 171 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

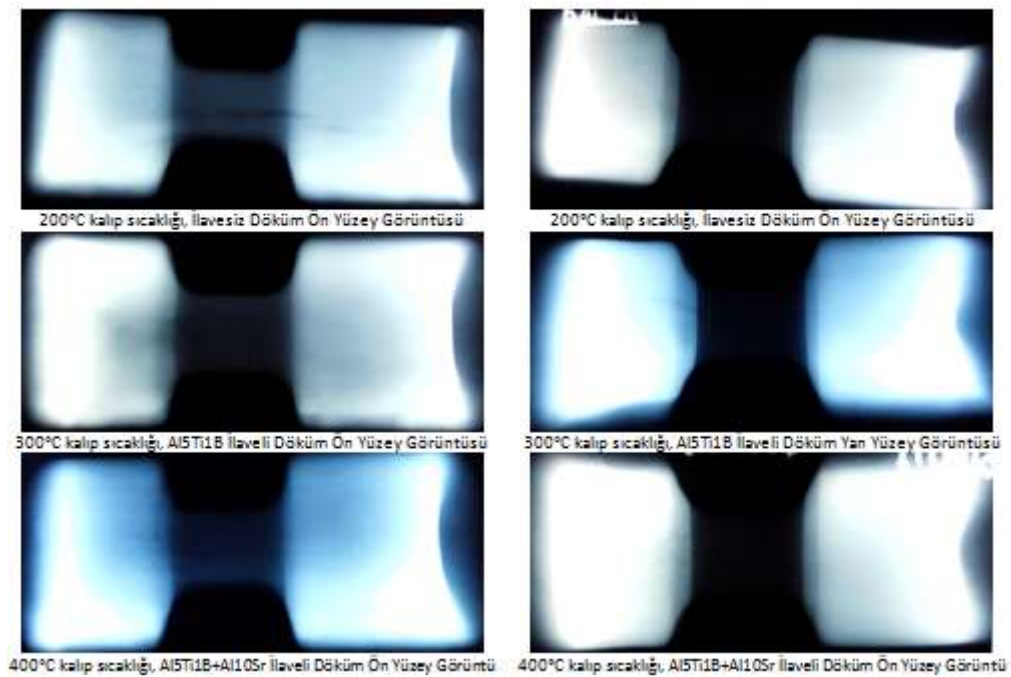


Şekil 4.38. Etial 177 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

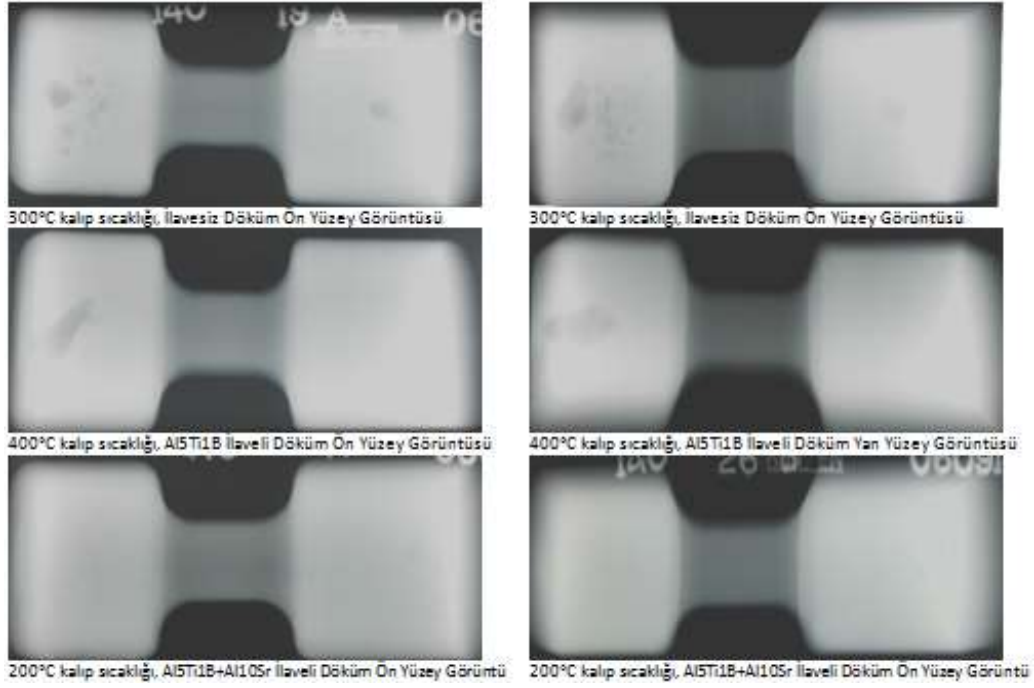


Şekil 4.39. Etial 220 alaşımı ile kum kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

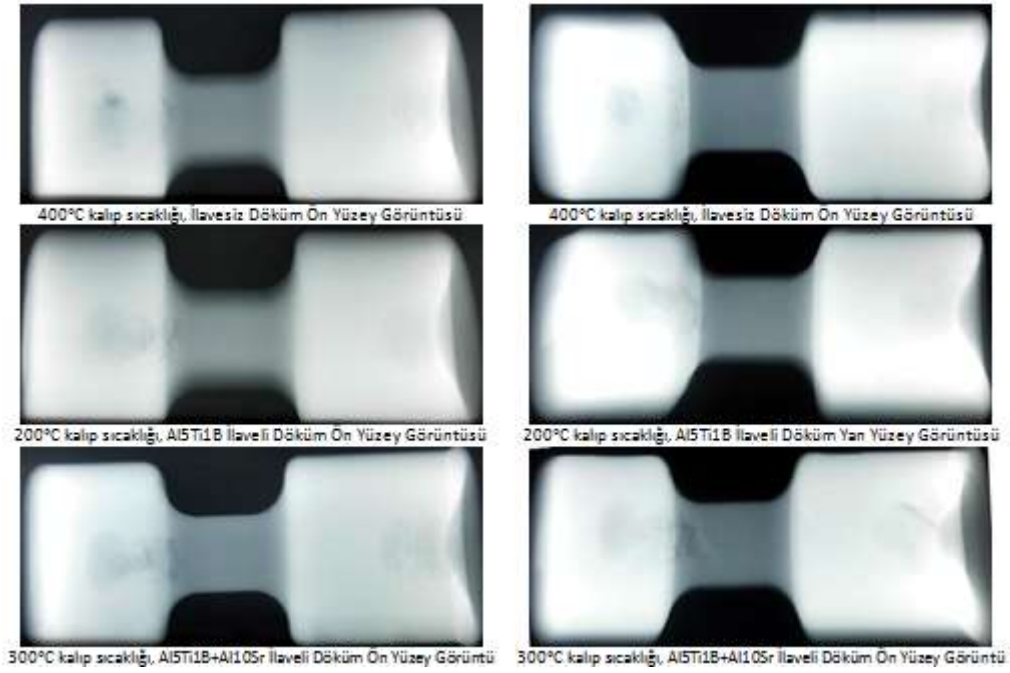
Şekil 4.40'dan 4.45'e kadar kokil kalıba döküm deneyi için alaşımların her biri ile yapılan döküm numunelere ait radyografi sonuçları verilmiştir.



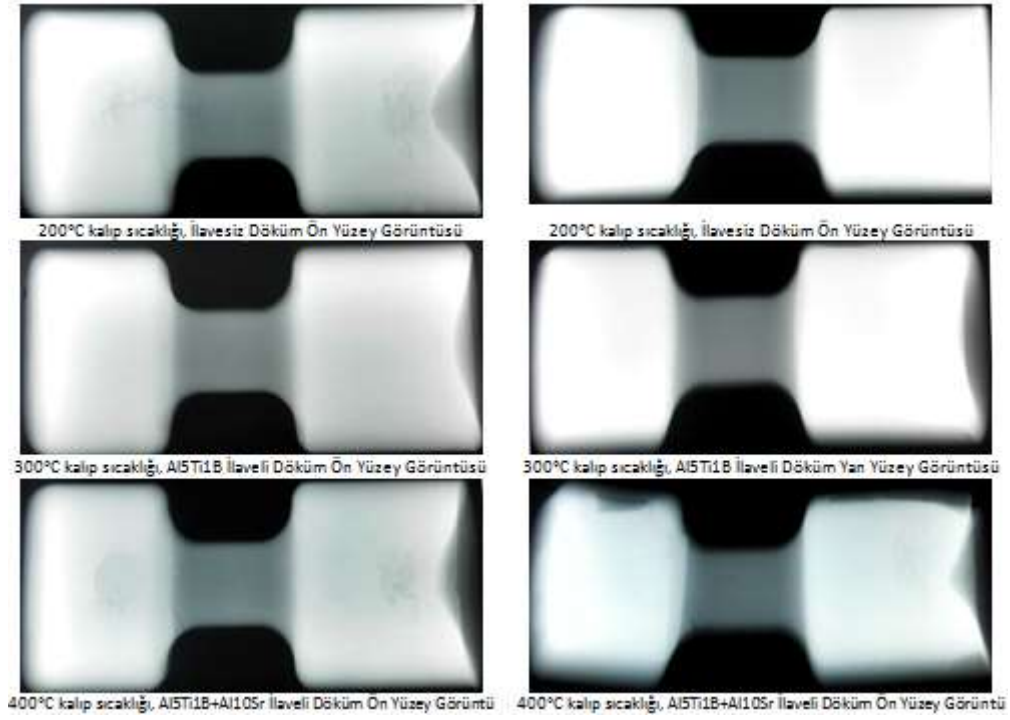
Şekil 4.40. Etial 110 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



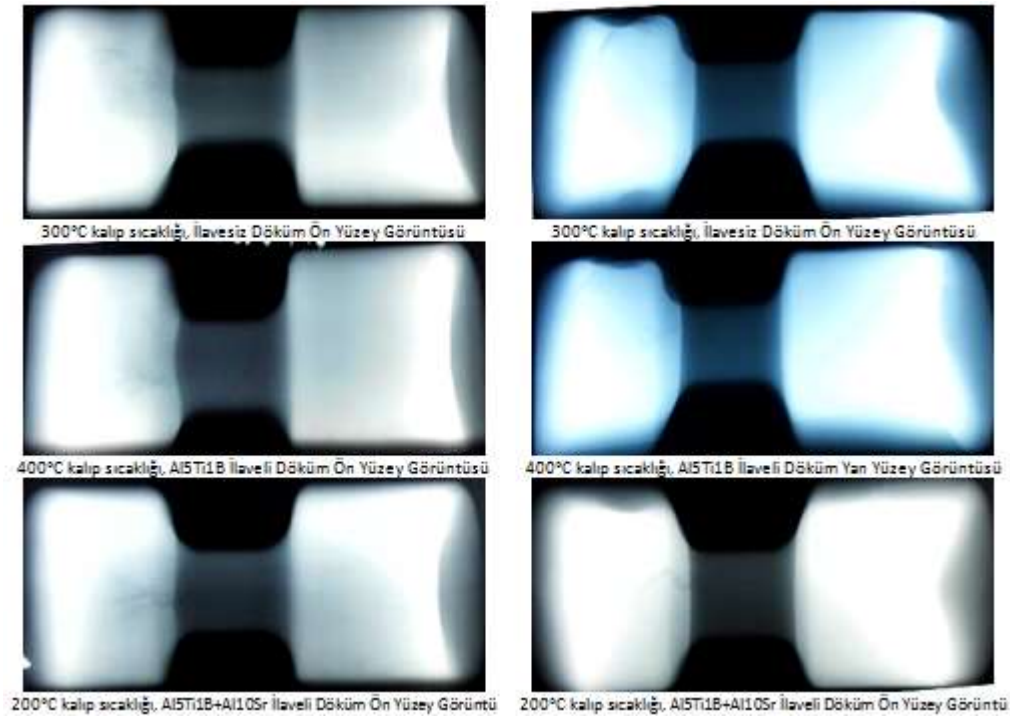
Şekil 4.41. Etial 140 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



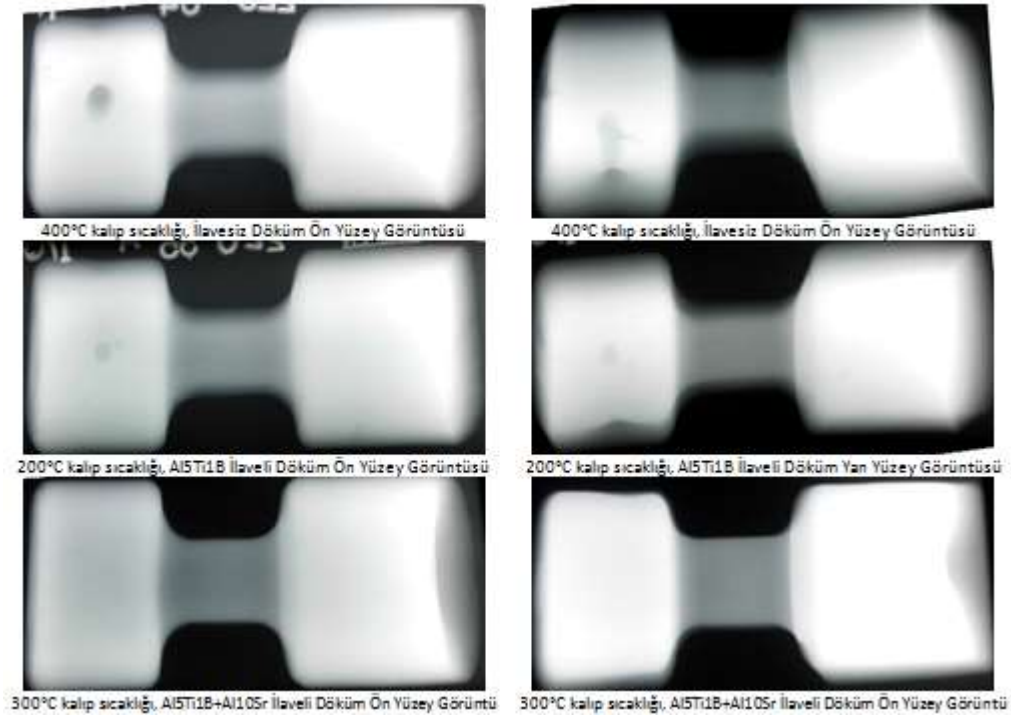
Şekil 4.42. Etial 160 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



Şekil 4.43. Etial 171 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

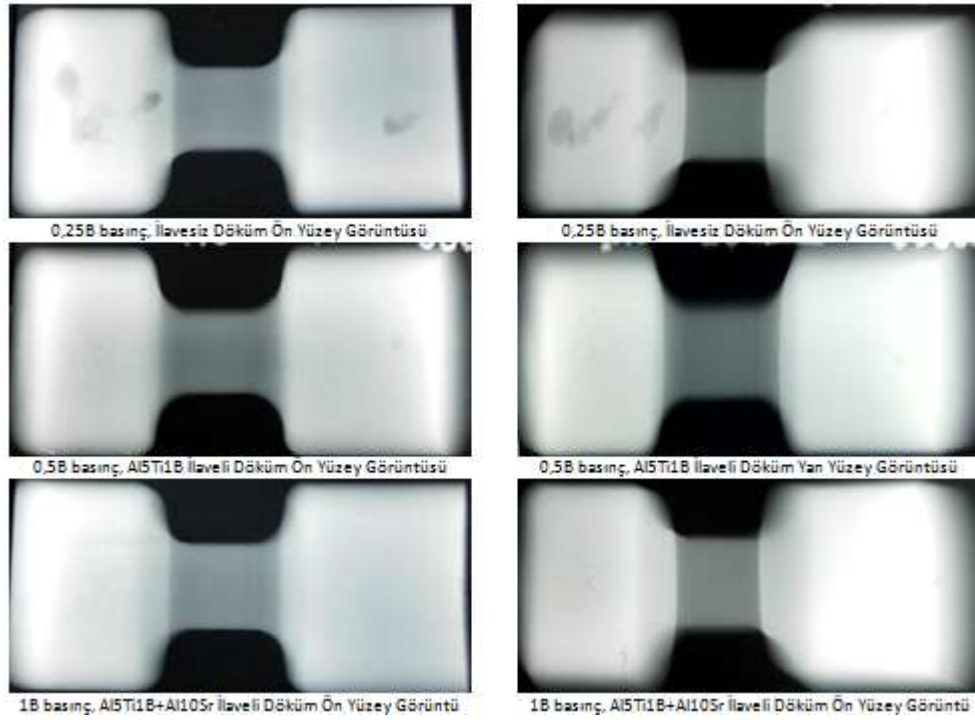


Şekil 4.44. Etial 177 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

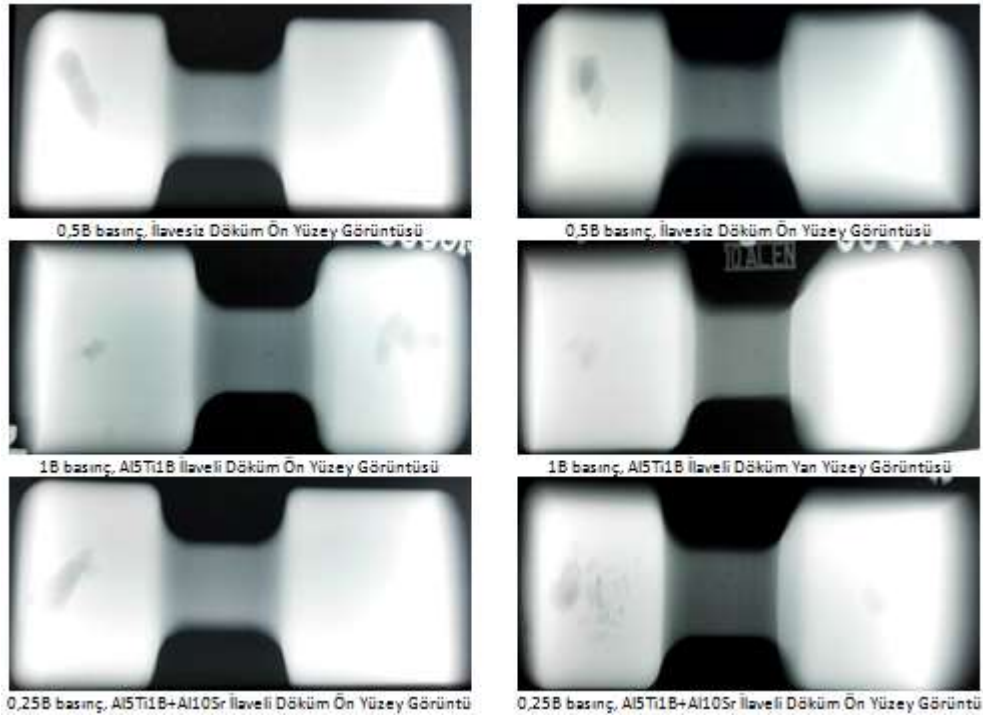


Şekil 4.45. Etial 220 alaşımı ile kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

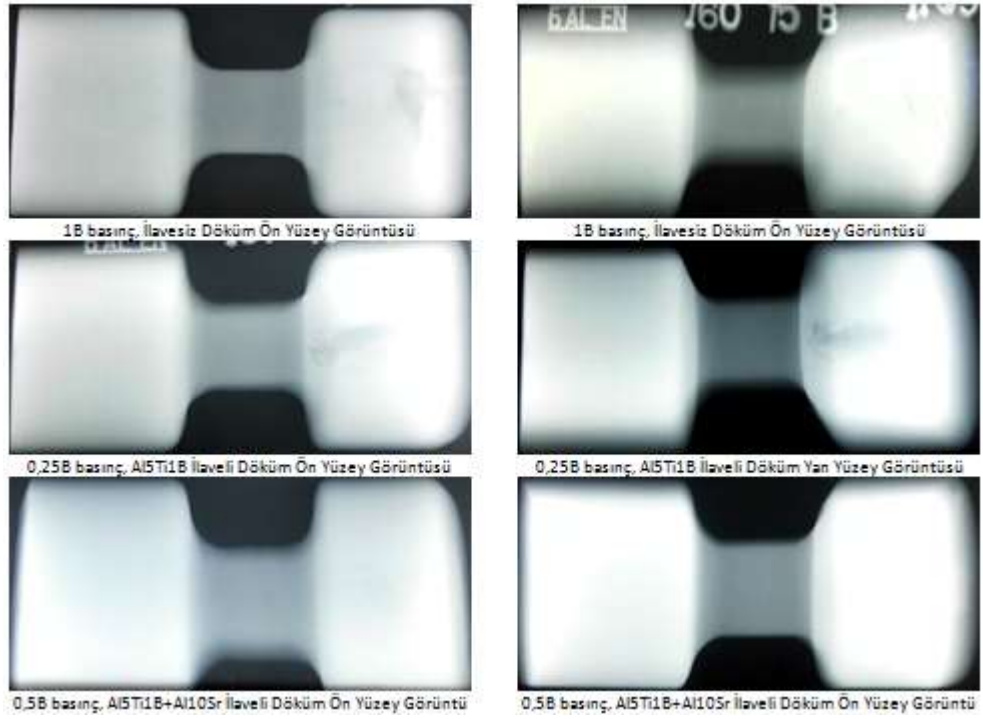
Alçak basınçlı döküm deneyleri için Şekil 4.46'dan 4.51'e kadar alaşımların her biri ile yapılan döküm numunelere ait radyografi sonuçları verilmiştir.



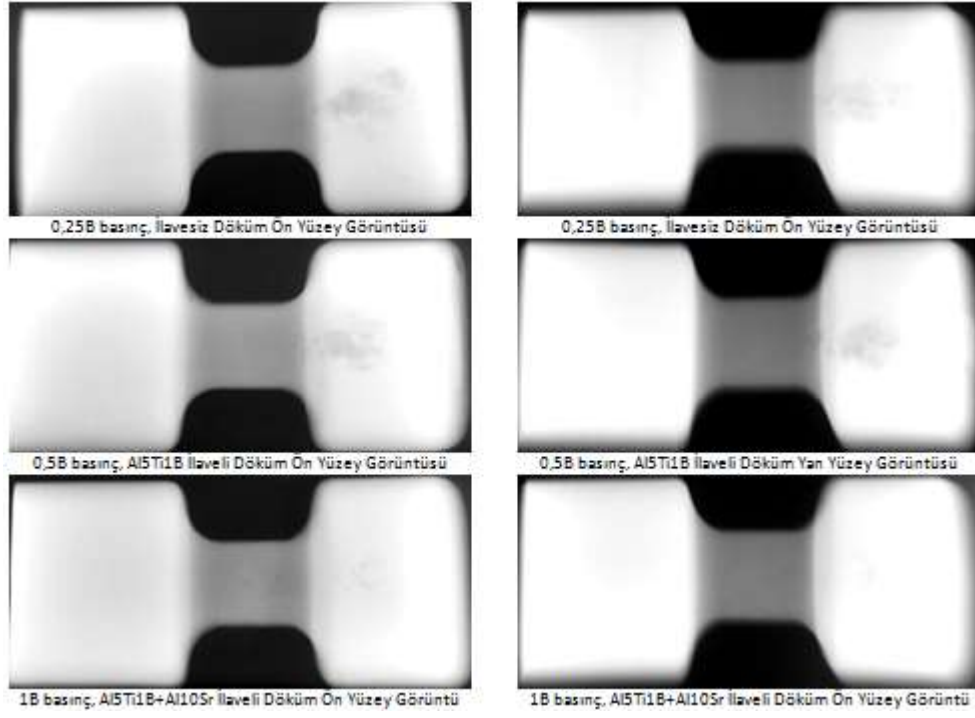
Şekil 4.46. Etial 110 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



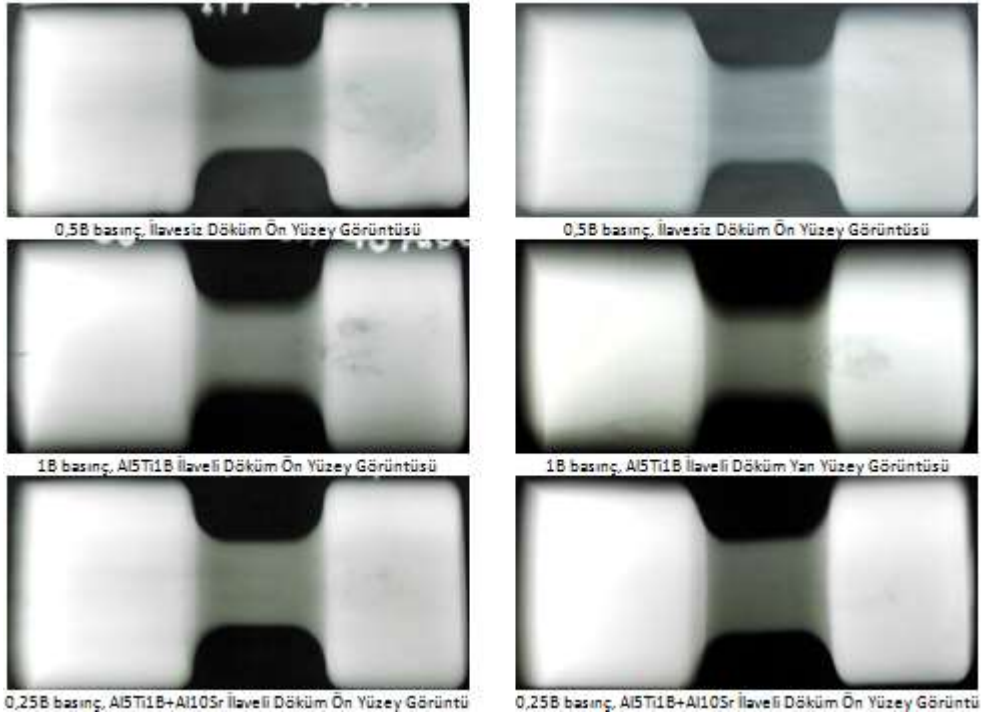
Şekil 4.47. Etial 140 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



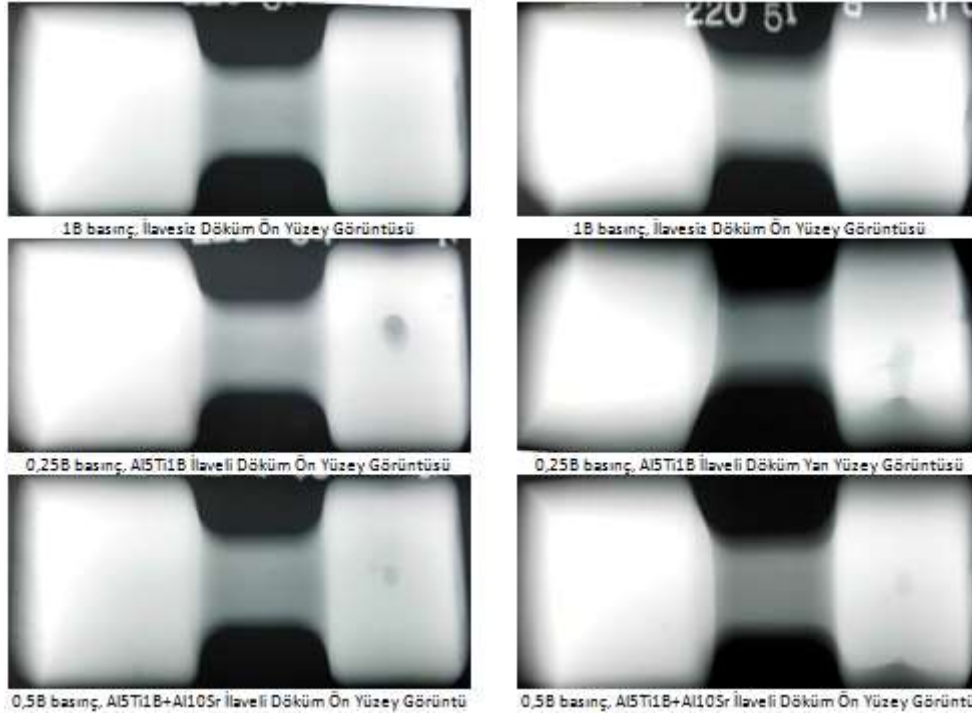
Şekil 4.48. Etial 160 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



Şekil 4.49. Etial 171 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



Şekil 4.50. Etial 177 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.



Şekil 4.51. Etil 220 alaşımı alçak basınçlı kokil kalıba döküm numunelerin radyografi film görüntüleri.

Radyografi testlerinden elde edilen sonuçlara göre kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı kokil döküm yöntemleri için, her bir alaşımda gözenek ve yerleri görüntülenmiştir. Ancak bazı dökümlerde radyografi sonuçlarına göre parçanın herhangi bir yerinde gözenekleşme oluşmadığı ve tamamen boşluksuz görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum, bu yöntemde döküm içerisindeki 200µm altındaki boşlukların net olarak belirlenemiyor olmasından kaynaklanabileceği bilinmektedir. Bu sebeple, döküm kesit yüzey sonuçları, radyografi incelemeleri ve yoğunluk ölçümlerinin birlikte değerlendirilmesiyle dökümler hakkında yorumlar yapılabilmektedir. Başlı başına bir yöntem ile değerlendirmeler hatalı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

Radyografi filmlerinden de tane inceltici ve modifiye edici alaşım ilavesinin döküm içerisindeki porozite miktarını azalttığı bilgisi teyit edilmektedir. Ayrıca kokil kalıba döküm yönteminde kalıp ön ısıtma sıcaklığının artmasının döküm içyapısındaki porozite miktarını azalttığı tespit edilmiştir. Alçak basınçlı kokil dökümlerde uygulanan basınç şiddetinin artması gözenekleşmenin azalmasına olumlu yöne etki etmektedir.

4.5.5. Yoğunluk ölçüm ve gözenek değerleri

Yoğunluk ölçümleri Bölüm 3.14.4’de anlatıldığı gibi Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Kum kalıba döküm ile elde edilen numunelerin hesaplanan yoğunluk ve gözenek sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. Döküm numunelerin yoğunluk ölçümü ve gözenek değerleri.

Numune Adı	Havada Ağırlık (Gram)	Suda Ağırlık (Gram)	DeneySEL Yoğunluk (gr / cm ³)	Referans Yoğunluk (gr / cm ³)	Hesaplanan Gözenek %
E110	354,94	223,28	2,6911	2,7471	2,04
E110 +Al5Ti1B	351,54	222,06	2,7102	2,7561	1,67
E110+Al5Ti1B+Al10Sr	352,26	222,94	2,7191	2,7528	1,23
E140	339,34	206,42	2,5484	2,6298	3,10
E140 +Al5Ti1B	337,94	207,16	2,5794	2,6306	1,95
E140+Al5Ti1B+Al10Sr	338,36	208,68	2,6045	2,6331	1,09
E160	347,26	216,66	2,6542	2,7366	3,01
E160 +Al5Ti1B	346,66	217,82	2,6858	2,7416	2,04
E160+Al5Ti1B+Al10Sr	348,48	219,82	2,7037	2,7402	1,33
E171	335,90	206,70	2,5952	2,6617	2,50
E171 +Al5Ti1B	339,18	210,32	2,6274	2,6710	1,63
E171+Al5Ti1B+Al10Sr	341,70	212,64	2,6429	2,6754	1,22
E177	337,84	207,78	2,6009	2,6618	2,59
E177 +Al5Ti1B	335,38	207,94	2,6315	2,6646	1,41
E177+Al5Ti1B+Al10Sr	338,82	210,90	2,6535	2,6711	1,02
E220	350,38	221,30	2,7096	2,7726	2,27
E220 +Al5Ti1B	352,74	224,32	2,7419	2,7791	1,34
E220+Al5Ti1B+Al10Sr	357,42	227,28	2,7457	2,7782	1,32

Kum kalıba döküm numunelerin Tablo 4.8’de verilen porozite değerleri incelendiğinde ilk dikkat çeken sonuç tane inceltici ve modifiye edici mastır alaşımı ilaveleri sonrası porozite değerlerinin azalmış olmasıdır. Ayrıca dikkat çeken bir diğer hususta porozite oranı değişimlerinin katılma aralığı ile ilgili olduğudur. Çünkü katılma aralığı geniş olan alaşımlarda porozite miktarları, katılma aralığı

dar olan alaşımlara nazaran daha az çıkmıştır. Porozite oranları mastır alaşım ilavesiz dökümlerde %3 civarında iken tane inceltici ilavesi ile % 2 civarına tane incelticiye ek olarak modifiye edici ilavesi ile % 1 seviyelerine kadar düşmüştür. En fazla porozite, katılaşma aralığı en dar olan ötektik Etial 140 alaşımında görülmüştür. Yoğunluk sonuçlarından elde edilen sonuçlar radyografi sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. Ancak porozite oranı %1 in altında olan döküm numunelerinde radyografi film sonuçlarında numunelerdeki porozite görüntülenememektedir.

Etial 220 alaşımında Si bulunmadığından modifiye edici etki etmemiştir. Bu sebeple AlSr ilavesinin porozite oranı azaltmaya yönelik bir etkisi olmamış ve sadece tane inceltici ilavesi porozite azalmasına sebep olmuştur. Bunun sebebi olarak Etial 220 alaşımında Si içeriği çok az miktarda bulunduğu yapıda ötektik Si bulunmamakta ve modifiye edicinin yapı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir.

Tablo 4.9’da kokil kalıba döküm numunelere ait yoğunluk ve porozite değerleri verilmiştir. Yoğunluk ölçümlerinden elde edilen sonuçlar radyografik ve kesit inceleme yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Ayrıca bu ölçüm yönteminde porozite oranları doğrudan sayısal değer olarak ifade edilebilmektedir. Sonuçları incelediğimizde kum kalıba döküm numunelerinde de olduğu gibi, alaşım çeşidine bağlı olarak porozite miktarı değişiklik gösterse bile tane inceltici ilavesi bütün alaşımlarda porozitenin azalmasına sebep olmaktadır.

Modifiye edici ilavesi de porozite miktarının azalmasına tane inceltici kadar olmasa da etki etmektedir. En yüksek porozite oranı katılaşma aralığı en dar olan Etial 140 alaşımında gözlenirken modifiye edici alaşım elementi ilavesi diğer alaşımlara nazaran çok daha etkili olmuştur. Kum kalıba döküm deneylerinden farklı olarak kokil kalıba döküm deney numunelerinde aynı geometri ve döküm şartlarındaki numunelerde daha az porozite ölçülmüştür. Bu durumun kokil kalıpta dökümde daha ince taneli yapı olması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.9. Kokil kalıba döküm numunelerin yoğunluk ölçümü ve gözenek değerleri.

Alaşım	İşlem	Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	Havada Ağırlık (Gram)	Suda Ağırlık (Gram)	Deneysel Yoğunluk (gr / cm ³)	Referans Yoğunluk (gr / cm ³)	Porozite %
E110	İlavesiz	200	354,24	223,12	2,6968	2,7471	1,83
E110	Al5Ti1B	300	352,48	223,36	2,7250	2,7561	1,13
E110	Al5Ti1B ve Al10 Sr	400	352,14	223,32	2,7287	2,7528	0,88
E140	İlavesiz	300	342,46	209,20	2,5653	2,6298	2,45
E140	Al5Ti1B	400	341,58	209,58	2,5831	2,6306	1,81
E140	Al5Ti1B ve Al10 Sr	200	341,96	210,14	2,5895	2,6331	1,66
E160	İlavesiz	400	348,26	218,76	2,6845	2,7366	1,91
E160	Al5Ti1B	200	347,44	218,46	2,6889	2,7416	1,92
E160	Al5Ti1B ve Al10 Sr	300	348,28	219,42	2,6979	2,7402	1,54
E171	İlavesiz	200	339,24	208,82	2,5965	2,6617	2,45
E171	Al5Ti1B	300	339,18	210,28	2,6266	2,6710	1,66
E171	Al5Ti1B ve Al10 Sr	400	341,16	212,18	2,6403	2,6754	1,31
E177	İlavesiz	300	338,24	208,48	2,6020	2,6618	2,25
E177	Al5Ti1B	400	337,28	209,18	2,6282	2,6646	1,36
E177	Al5Ti1B ve Al10 Sr	200	337,82	209,14	2,6206	2,6711	1,89
E220	İlavesiz	400	351,38	222,74	2,7266	2,7726	1,66
E220	Al5Ti1B	200	351,74	223,46	2,7371	2,7791	1,51
E220	Al5Ti1B ve Al10 Sr	300	352,42	223,92	2,7377	2,7782	1,46

Kokil kalıp ön ısıtma sıcaklığının artması porozite miktarının azalmasına sebep olmuştur. Bu durum kalıp sıcaklığına bağlı olarak besleme yolunun daha uzun süre açık kalmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca dikkat çeken bir diğer hususta porozite oranı değişimlerinin katılaşma aralığı ile ilgili olduğudur. Çünkü katılaşma aralığı geniş olan alaşımlarda porozite miktarları, katılaşma aralığı dar olan alaşımlara nazaran daha az çıkmıştır. Porozite oranları alaşım ilavesiz dökümlerde %2,5 civarında iken tane inceltici ilavesi ile % 1 seviyeleri civarına tane incelticiye ilaveten modifiye edici ilavesi ile % 1 seviyelerinin altına düştüğü gözlenmektedir. En fazla porozite, katılaşma aralığı en dar olan ötektik Etial 140 alaşımında görülmüştür.

Alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilen numunelere ait yoğunluk ve porozite değerleri Tablo 4.10'da verilmiştir.

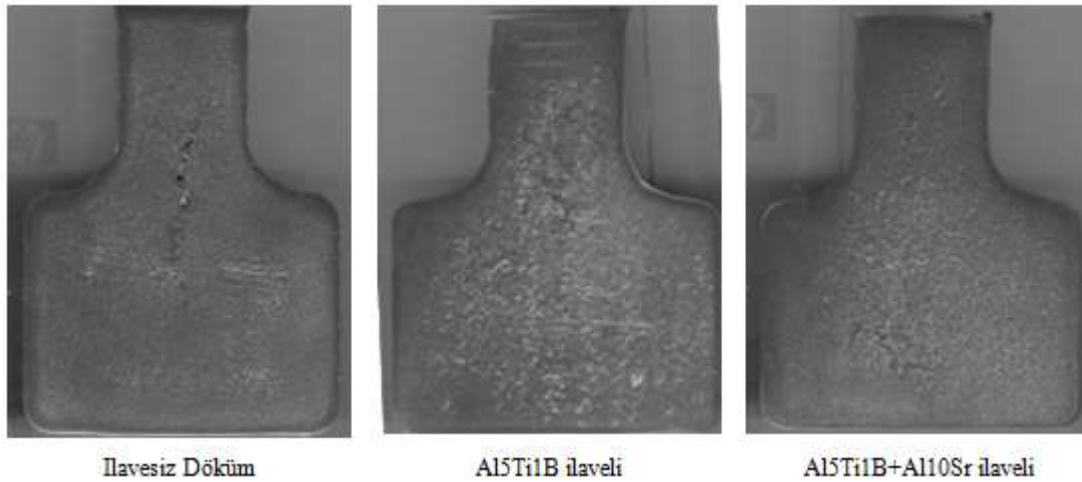
Tablo 4.10. Döküm numuneler yoğunluk ölçümü sonuçları.

Alaşım	İşlem	Kalıp Doldurma Basıncı (Bar)	Havada Ağırlık (Gram)	Suda Ağırlık (Gram)	Deneysel Yoğunluk (gr / cm ³)	Referans Yoğunluk (gr / cm ³)	Porozite %
E110	İlavesiz	0,25	354,12	223,58	2,7079	2,7471	1,43
E110	Al5Ti1B	0,5	354,82	224,96	2,7274	2,7561	1,04
E110	Al5Ti1B ve Al10 Sr	1	355,56	225,48	2,7285	2,7528	0,88
E140	İlavesiz	0,5	342,66	209,92	2,5768	2,6298	2,01
E140	Al5Ti1B	1	342,96	211,18	2,5979	2,6306	1,24
E140	Al5Ti1B ve Al10 Sr	0,25	341,84	210,56	2,5992	2,6331	1,29
E160	İlavesiz	1	347,14	218,30	2,6895	2,7366	1,72
E160	Al5Ti1B	0,25	348,32	219,52	2,6995	2,7416	1,54
E160	Al5Ti1B ve Al10 Sr	0,5	347,96	219,84	2,7110	2,7402	1,06
E171	İlavesiz	0,25	340,12	210,30	2,6152	2,6617	1,75
E171	Al5Ti1B	0,5	341,24	211,82	2,6320	2,6710	1,46
E171	Al5Ti1B ve Al10 Sr	1	341,72	212,92	2,6484	2,6754	1,01
E177	İlavesiz	0,5	339,12	209,26	2,6068	2,6618	2,07
E177	Al5Ti1B	1	338,86	210,06	2,6262	2,6646	1,44
E177	Al5Ti1B ve Al10 Sr	0,25	339,04	210,58	2,6345	2,6711	1,37
E220	İlavesiz	1	353,02	224,54	2,7427	2,7726	1,08
E220	Al5Ti1B	0,25	352,84	224,62	2,7469	2,7791	1,16
E220	Al5Ti1B ve Al10 Sr	0,5	352,36	224,42	2,7492	2,7782	1,04

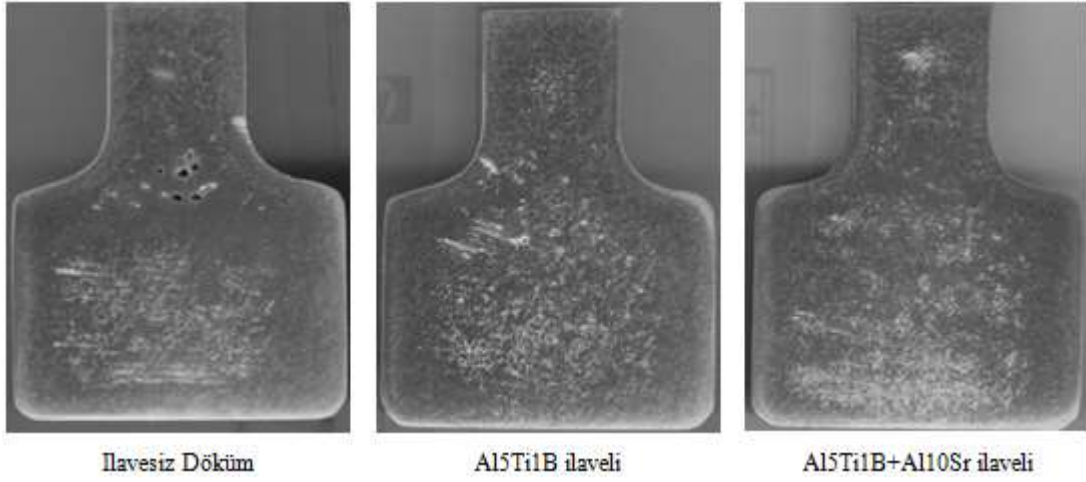
Tablo 4.10’da verilen sonuçları incelediğimizde kum kalıba döküm ve kokil kalıba döküm yöntemlerinde de olduğu gibi alaşım çeşidine bağlı olarak porozite miktarı değişiklik göstermekte, tane inceltici ve modifiye edici ilavesi bütün alaşımlarda porozitenin azalmasına sebep olmaktadır. Elde edilen porozite sonuçları diğer döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında alçak basınçla üretim yönteminde daha az porozite sonuçları ile karşılaşılmıştır. Bu üretim yönteminde sıvı metalin kalıba dolumu ve uygulanan basınç besleyici tarafından yapıldığından besleyicide çekinti boşlukları gözlenmemiştir. Ancak yapılan incelemeler döküm ve besleme boğazına göre yapılmıştır. Uygulanan basıncın porozite üzerine etkisi incelendiğinde, kalıp dolum basıncının artmasına bağlı olarak porozitenin azaldığını göstermektedir. Bu durum, basıncın artması ile sıvı metalin kalıp içerisinde çok daha ince kesitli yerlere daha kısa zamanda ulaşabileceğinden katılaşmanın daha çabuk olması ile açıklanabilir.

4.5.6. Dökümlerin kesit yüzeylerinin incelenmesi

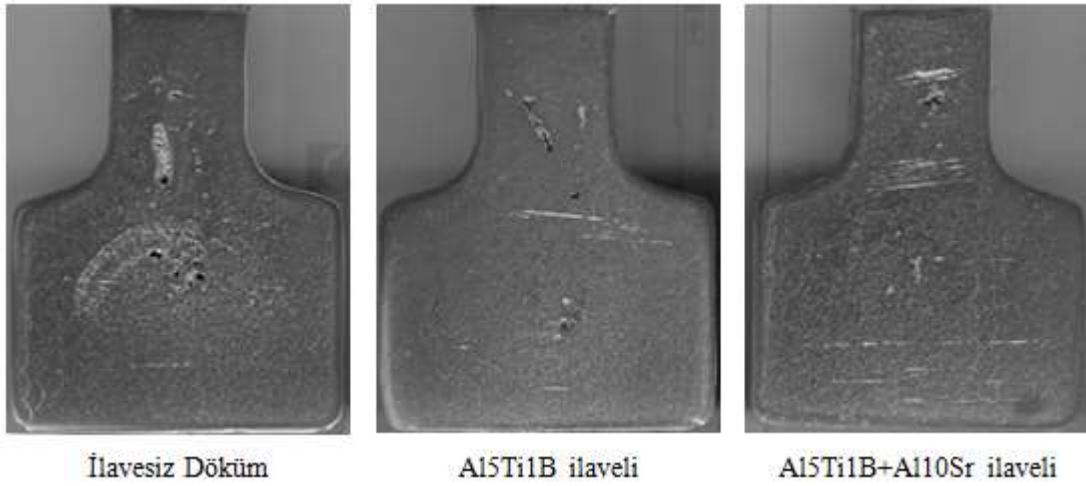
Döküm numunelerin içinde kesit yüzeylerindeki gözenek durumunu incelenmek üzere yolluk ve besleyicileri ayrılan numuneler dikey olarak ortadan kesilmiş ve yüzeyleri zımparalandıktan sonra taranmış görüntüleri her bir alaşım için ayrı ayrı Şekil 4.52 ile Şekil 4.57 arasında verilmiştir. Kesit yüzeylerinin incelenmesi ile elde edilen sonuçlarda benzer şekilde tane inceltici ve modifiye edici ilavesi ile gözenek miktarının azaldığını göstermektedir. Ayrıca döküm dış yüzey görüntülerindeki sonuçlara paralel olarak katılaşma aralığı çok geniş olan Etial 110 ve Etial 220 alaşımlarında çekinti boşluğu diğer alaşımlara nazaran daha az olması dikkat çekicidir. Ancak dökümlerin incelenmesi için kesit yüzey değerlendirilmesinin tek başına uygun bir yöntem olmadığı aynı numuneye ait kesilen iki parçanın zımparalanması sonucu anlaşılmaktadır. Aynı döküm parçanın bir kesitinde hatalar bariz belli olurken diğer tarafı sağlam döküm gibi yanıltıcı sonuç verebilmektedir. Çünkü döküm içlerindeki hatanın yeri değişiklik gösterebilmektedir.



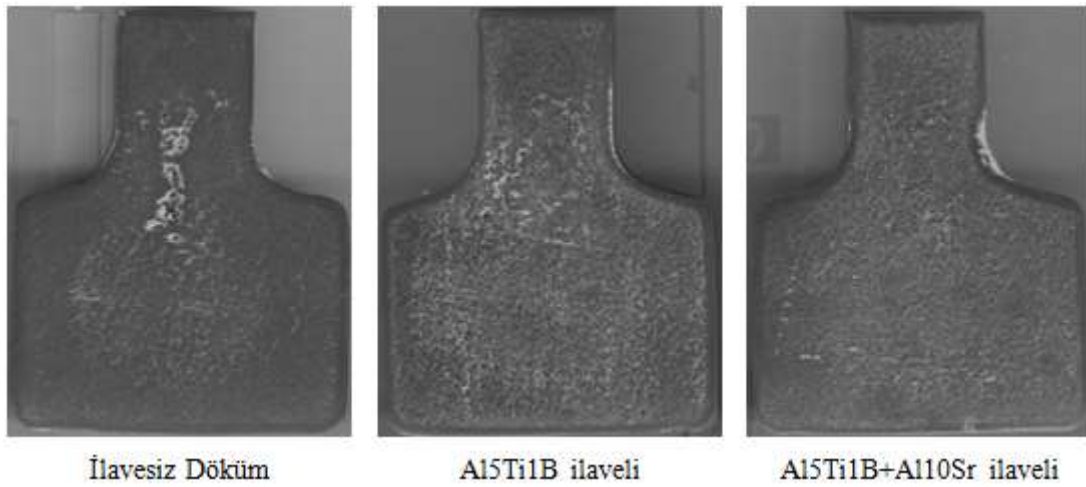
Şekil 4.52. Etial 110 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.



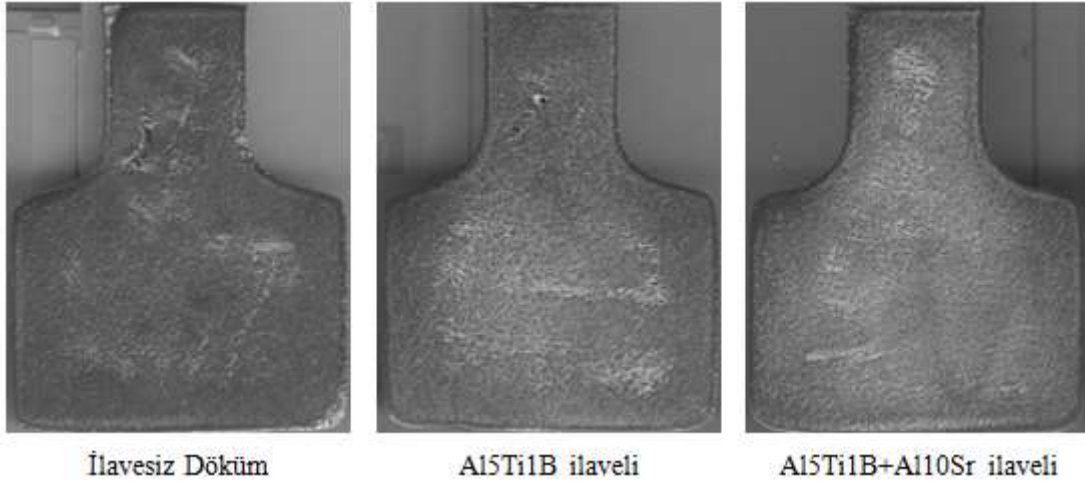
Şekil 4.53. Etial 140 alaşımdan kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.



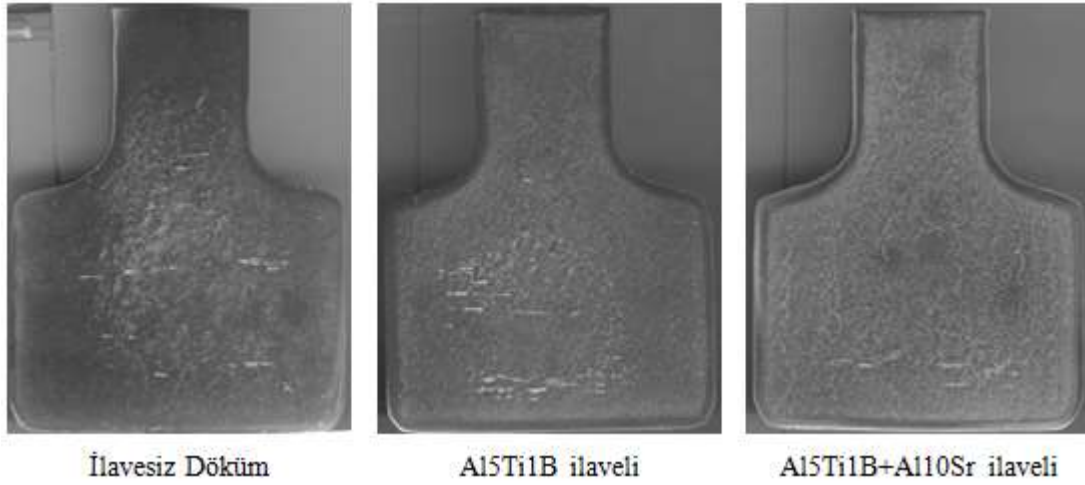
Şekil 4.54. Etial 160 alaşımdan kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.



Şekil 4.55. Etial 171 alaşımdan kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.

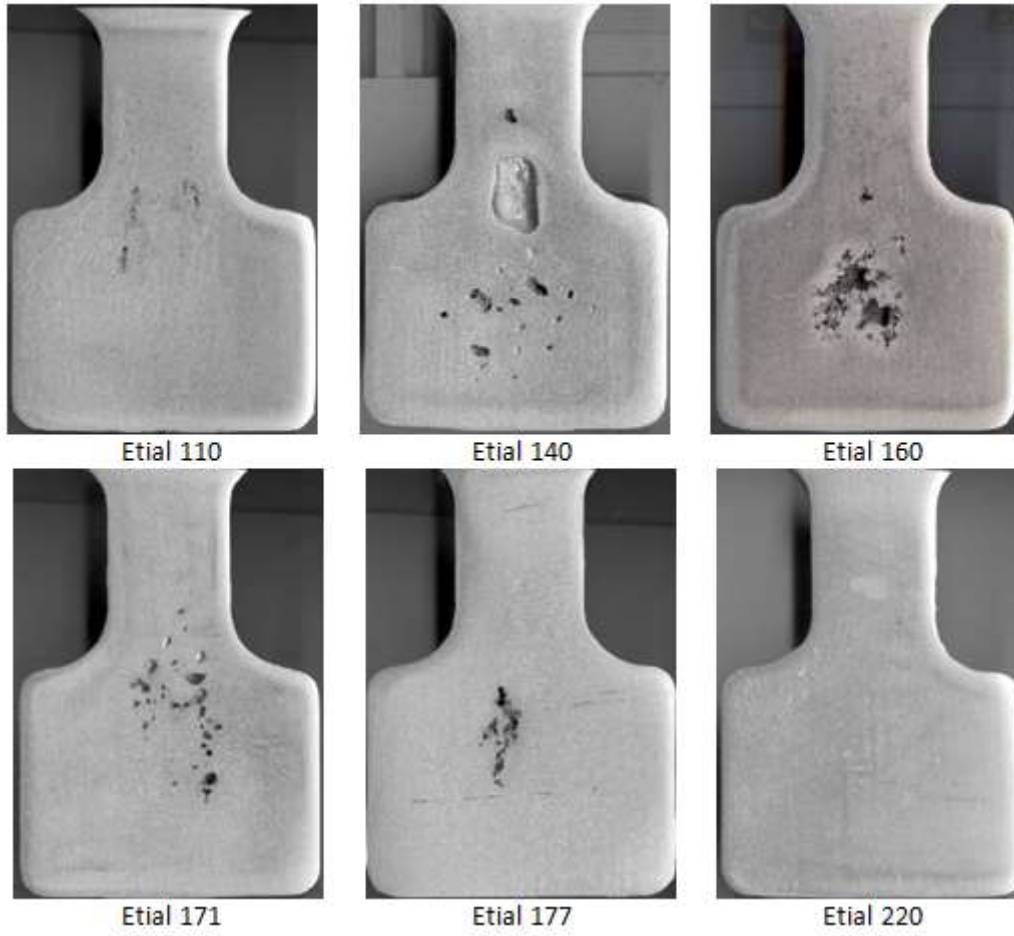


Şekil 4.56. Etial 177 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.



Şekil 4.57. Etial 220 alaşımından kum kalıba dökülmüş numunelerin kesit yüzey görüntüleri.

Şekil 4.58’de kokil kalıba dökümü yapılan farklı alaşımlara ait döküm sonuçları verilmiştir. Alaşım farklılığına bağlı olarak aynı geometriye sahip kalıp içerisine yapılan dökümler sonucu kesit yüzeylerinden elde edilen porozite görüntüleri farklılık göstermektedir. Alaşımların çekinti farklılıklarının en önemli sebebi olarak katılaşma aralıkları olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.58. Alaşım farklılığının kokil kalıba döküm porozite oluşumu üzerine etkisinin kesit yüzeyde incelenmesi.

Kesit yüzeydeki porozite dağılımları incelendiğinde katılaşma aralığı en geniş olan Etial 110 ve 220 alaşımları yüzeylerin de çekinti miktarı gözle görülmesi oldukça güç şekilde ve çok az miktardadır. Ancak yüzeyler stereoskopta incelendiğinde çekinti gözenekleri görülebilmektedir.

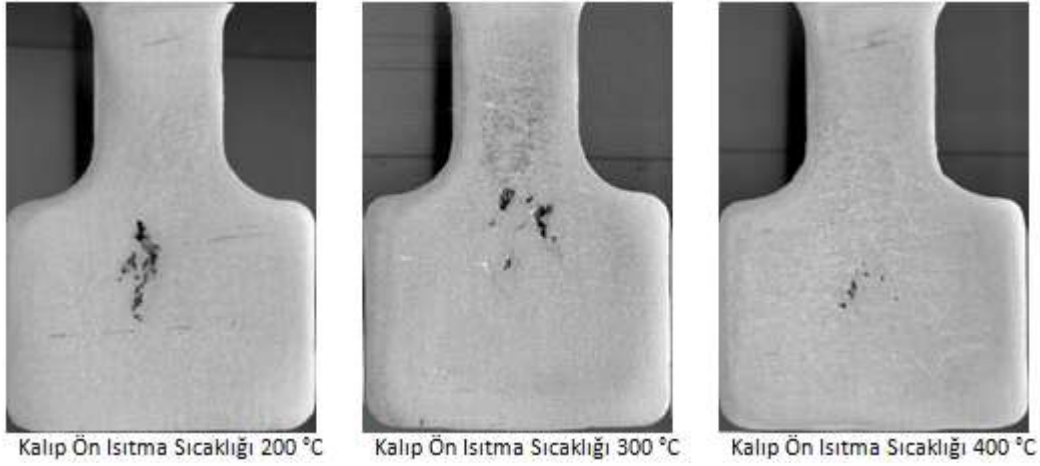
%12 Si içeren ötektik Al-Si alaşımı olan en dar katılaşma aralığına sahip Etial 140 alaşımı ise bariz bir şekilde porozite sergilemektedir. Bu alaşım bütün alaşımlar içerisinde en çok porozite gösteren alaşım olmaktadır. Etial 160, Etial 171 ve Etial 177 alaşımları incelendiğinde kimyasal bileşimleri farklı olsa bile katılaşma aralıklarının birbirine yakın olmasından dolayı kesit yüzeylerinde gözlenen porozite miktarları birbirine yakın seviyelerde çıktığı anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre alaşımların dökümünde parça içerisine alaşım farklılığının etkisinin katılaşma aralıklarına bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir.

Tane inceltici ve modifiye edici ilavesinin, alaşımların porozite oluşumuna tipik etkisini göstermek üzere örnek olarak Etial 160 alaşımından dökülen numunelere ait kesit yüzeyleri Şekil 4.59’da verilmiştir. Şekildende görüldüğü gibi tane inceltici ilavesi ile döküm içerisindeki çekinti boşluğu azalmakta ve modifiye edici alaşım ilavesi de bu etkiyi olumlu yönde geliştirmektedir. Bunun döküm içerisindeki tane boyutunun incilmesi ile sıvı metalin besleme yolunun daha uzun süre açık kalması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Tane inceltici ilavesinin dökümlerde beslenebilirliği artırdığı bilinmektedir. Modifiye edici Al10Sr ilavesi de ötektik Si kristallerinin lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüştürmektedir. Ayrıca Sr elementinin ilavesinin; döküm içerisindeki gözeneklerin daha küçük ve yuvarlak biçimli ve dentritler arası bölgelerde oluşumunu etkilediği düşünülmektedir. Bu sebeple modifiye edici element ilavesi ile de döküm kesitinde görülen gözenek miktarı azalmaktadır.



Şekil 4.59. Al5Ti1B ve Al10Sr ilavesinin Etial 160 alaşımında gözenekleşmeye etkisinin kesit yüzey incelemesi.

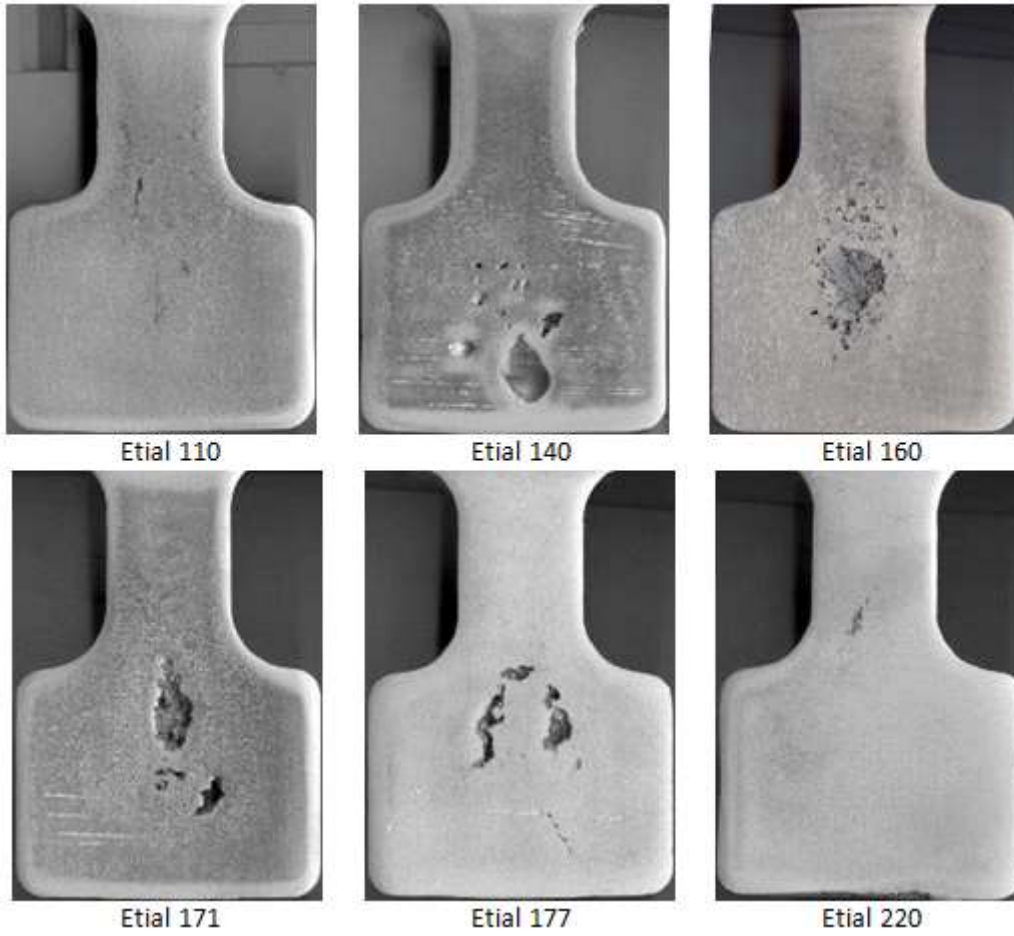
Kokil kalıp döküm deney parametrelerinden biri olan ön ısıtma sıcaklığının dökümlerde porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi için yapılan çalışmalardan alınan sonuçlara tipik bir örnek olarak Etial 177 alaşımı döküm kesit yüzey görüntüleri Şekil 4.60’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kalıp ön ısıtma sıcaklığının sırasıyla 200 °C - 300 °C ve 400 °C’ye artırılmasıyla kesit yüzeylerinde görülen porozite miktarı azalmaktadır. Bu durum kalıp sıcaklığının artması ile besleme yolunun daha uzun süre açık kaldığını ve metalin alt döküm kısmını daha uzun süre besleyebildiğini göstermektedir.



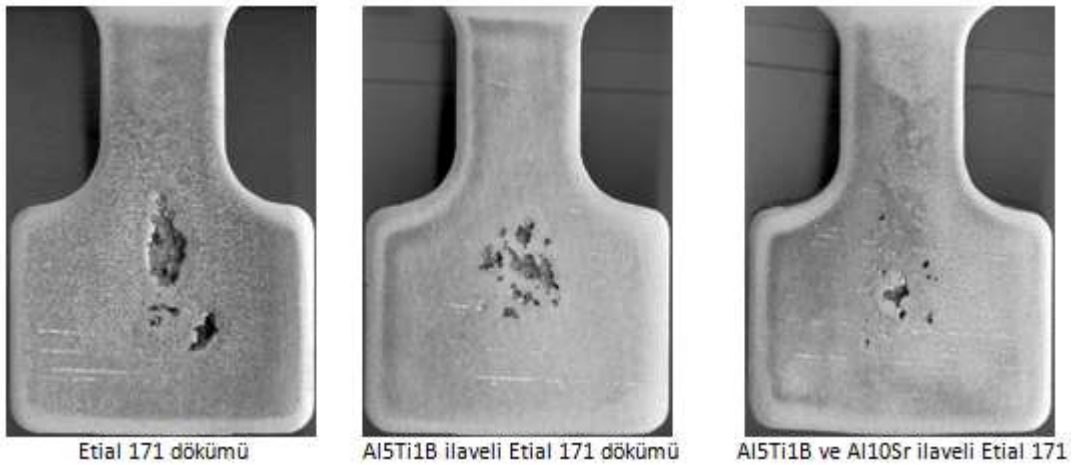
Şekil 4.60. Kokil kalıp ön ısıtma sıcaklığının Etial 177 dökümünde porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi.

Şekil 4.61’de alçak basınçlı döküm yöntemi ile aynı geometriye sahip döküm parça üretiminde alaşım farklılığının porozite oluşumuna etkisini gösteren tipik kesit yüzey görüntüleri verilmiştir. Kum ve kokil kalıba döküm yöntemlerinde olduğu gibi döküm alaşımının kendisinin bu döküm yönteminde porozite oluşumunda etkin bir rol oynadığı görülmektedir. Çekinti farklılıklarının en önemli sebebi olarak katılaşma aralıkları olduğu düşünülmektedir.

Kesit yüzeydeki porozite dağılımları incelendiğinde, katılaşma aralığı en geniş olan Etial 110 ve 220 alaşımlarının yüzeylerinde çekinti miktarının diğer alaşımlara nazaran daha az olduğu tespit edilmiştir. Diğer alaşımlardaki porozite miktarı kum ve kokil döküm yöntemine göre daha bariz olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kimyasal bileşim farklılıklarına rağmen kritik katı oranı üzerinde en etkin faktörün alaşımlara ait katılaşma aralıklarının genişliği olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.62’de tane inceltici ve modifiye edici ilavesinin alaşımların porozite oluşumuna etkisini incelemek üzere örnek olarak Etial 171 alaşımından dökülen numune kesit yüzeyleri verilmiştir. Tane inceltici ve modifiye edici alaşım ilavesi diğer döküm yöntemlerinde de olduğu gibi porozitenin azalmasına katkı sağlamıştır.



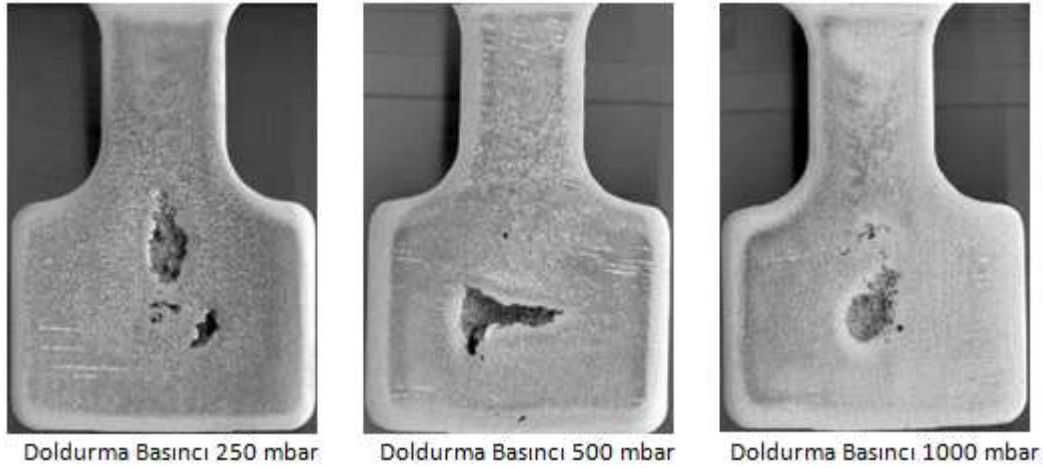
Şekil 4.61. Alaşım farklılığının döküm porozite oluşumu üzerine etkisinin kesit yüzeyde incelenmesi.



Şekil 4.62. Alçak basınçlı döküm yönteminde Al5Ti1B ve Al10Sr ilavesinin Etial 171 dökümü porozite oluşumu üzerine etkisi kesit yüzeyde incelenmesi.

Alçak basınçlı döküm deneyinde sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurma basıncının kesit yüzeydeki porozite üzerine etkisi Etial 171 ilavesiz döküm numuneleri için örnek olarak Şekil 4.63’de görülmektedir. Kesit yüzeylerinden oluşan porozite

miktarında yüzey incelemelerinden doğrusal bir artma veya azalma gözlenmemiştir. Ancak porozite yerlerinde değişiklikler tespit edilmiştir. Bu sebeple dökümlerin incelenmesi için kesit yüzey değerlendirilmesinin tek başına uygun bir yöntem olmadığı ve yoğunluk ölçümü ve radyografi ölçümleri ile elde edilen sonuçların karşılaştırma ve doğrulama yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

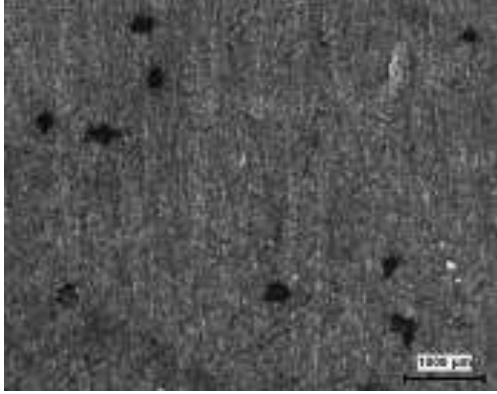


Şekil 4.63. İlavesiz Etial 171 alaşımının alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretiminde sıvı metalin kalıp doldurma basınç değişiminin porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi

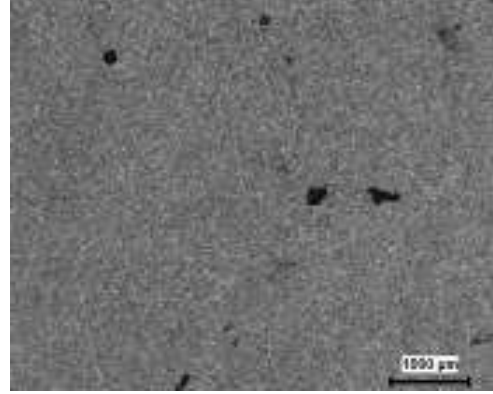
Döküm kesit yüzeylerinde oluşan porozitenin biçiminin çekinti yada gaz kaynaklı olma durumu stereoskopik mikroskop altında incelenmiştir. Şekil 4.64’de örnek olarak verilen Etial 110 alaşımı döküm numune kesit yüzeyi görüntülerinde anlaşılabileceği gibi oluşan porozitelerin büyük bir çoğunluğu besleme yetersizliğinden kaynaklanan çekinti boşlukları olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum sıvı metalin gaz içeriği açısından uygunluğunun bir başka yönden görülmesini sağlamıştır. Ayrıca Şekil 4.64’de örnek numune yüzey tarama görüntüsü sonuçlarında çok temiz gibi gözükse bile stereoskop altında incelemelerde parça içinde çekintiler olduğu anlaşılmaktadır.

Dökümlerin incelenmesi için kesit yüzey değerlendirilmesinin tek başına uygun bir yöntem olmadığı aynı numuneye ait kesilen iki parçanın zımparalanması sonucu anlaşılmaktadır.(Şekil 4.65) Aynı döküm parçanın bir kesitinde hatalar bariz belli olurken diğer tarafı tamamen çekintiden arındırılmış görülmekte ve yanıltıcı sonuç verebilmektedir. Çünkü döküm içinde oluşan çekinti boşlukları bazen tam orta ekseninde, bazen de ekseninden farklı yerlerde oluşabilmektedir. Bu sebeple döküm

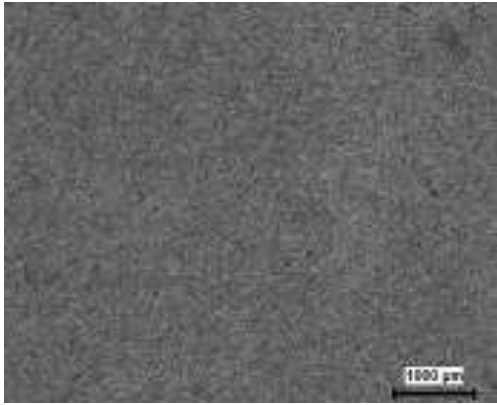
içerisinde çekinti sonuçlarının incelenmesinde alternatif olarak döküm parçanın içindeki bütün hataları gösteren radyografi incelemeleri yapılması gerekli görülmüştür.



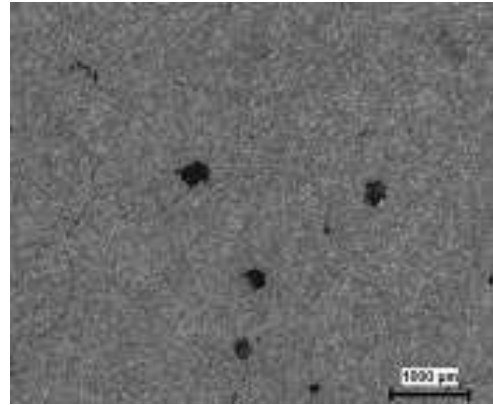
1.Bölge



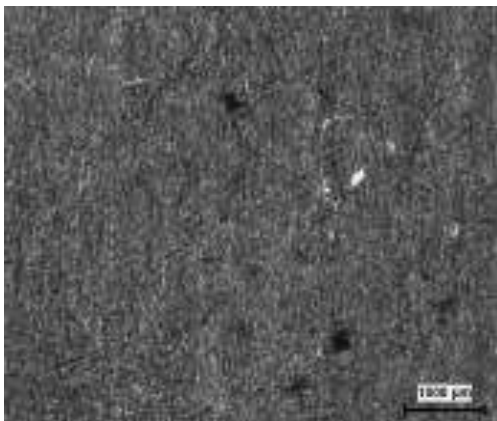
2.Bölge



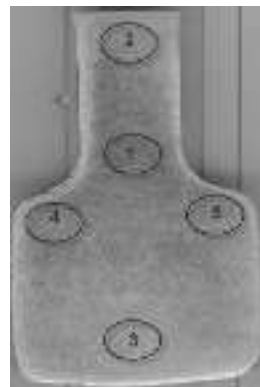
3.Bölge



4.Bölge



5.Bölge



Fotoğraf çekilen bölgeler

Şekil 4.64.Dökümlerin çekinti türünün belirlenmesi için stereoskopik mikroskop ile çekilen görüntüleri.



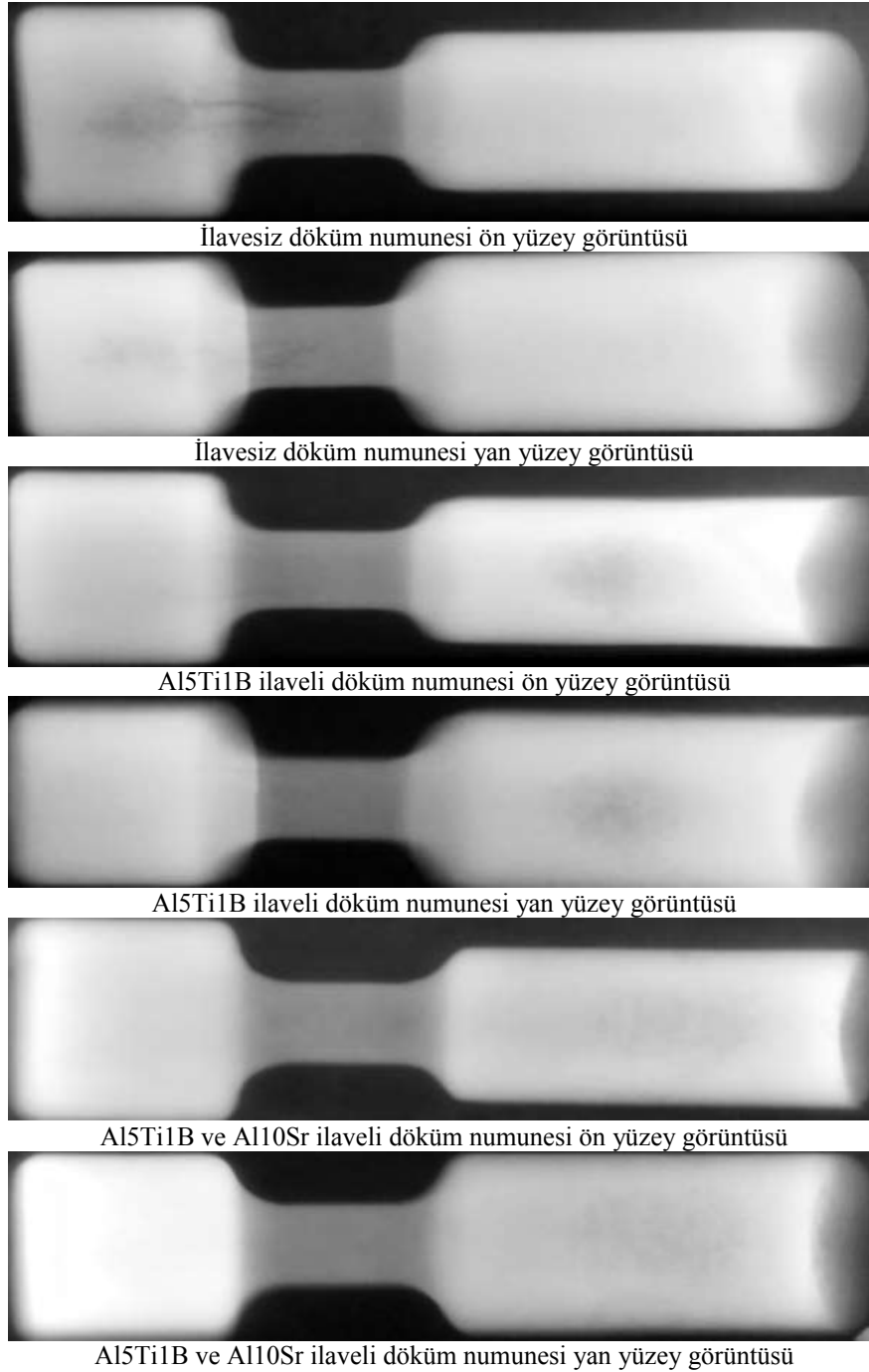
Şekil 4.65. Kesit yüzey incelemelerinde incelenen kesit farklılığından kaynaklanan hataların gösterilmesi.

4.6. Statik Sıvı Metal Basıncı Deney Sonuçları

Bu bölümde statik sıvı basıncının döküm içyapısında porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar verilecektir. Kalıp tasarımı yapılırken döküm deneylerindeki model tasarımı esas alınmış ve bu modelle karşılaştırma yapılacak şekilde tasarım yapılmıştır. Tablo 3.2’de verilen deney şartlarına uygun olarak kum kalıba dökümler yapılmıştır. Döküm sonuçları; sıvı metal gaz durumu kontrolü, dökümlerin yüzey çöküntü incelemesi, yoğunluk ölçümleri, radyografi incelemeleri ve döküm kesit yüzey görüntüsü sonuçları ile karşılaştırılması değerlendirilmiştir.

4.6.1. Statik sıvı metal basıncı deney radyografi incelemeleri

Döküm numunelere ait radyografi muayenesi için numuneler ön ve yan olmak üzere iki yönlü incelenmiştir. Çekilen filmlerin bilgisayar ortamına aktarılması için karanlık oda şartlarında ışık kaynağına konulan filmlerin fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 4.66’da Etial 160 alaşımı ile kum kalıba dökülen statik sıvı basıncı deneyi numunelerine ait radyografi sonuçları verilmiştir. Statik sıvı basıncının etkisini ölçmek üzere yapılan dökümlerden alınan radyografi filmlerinin incelenmesi ile normal modelle yapılan döküm sonuçlarında olduğu gibi tane inceltici ilavesi ve modifiye edici ilavesi ile porozitenin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.66. Etial 160 alaşımı kum kalıba döküm statik sıvı basıncı deneyi numuneleri radyografi film görüntüleri.

Etial 160 alaşımı ile aynı deney şartlarında standart model ile yapılan döküm numune sonuçları ile karşılaştırıldığında statik sıvı basıncı modelinde daha fazla porozite ortaya çıktığı dikkat çekmektedir. Bu durum besleyicinin daha uzun olması ve besleyici sıcak noktanın döküm parça sıcak noktasından diğer döküm modeline göre daha uzak mesafede olmasından, yani besleme yolunun uzamasından dolayı ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli döküm deneyinde

radıyografi sonucunda porozite görülmemektedir. İleriki bölümlerde radyografi sonuçları ile döküm kesit yüzey sonuçları, yoğunluk ölçümleri sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle dökümler hakkında yorumlar daha kapsamlı bir şekilde yapılmıştır.

4.6.2. Yoğunluk ölçüm sonuçları

Statik sıvı basıncı deneylerinden elde edilen numunelerin döküm ve boğaz bağlantısı içerecek şekilde yoğunluk ölçüm sonuçları, referans yoğunluk değerleri ve % porozite değerleri Tablo 4.11.de verilmiştir. Tablo da ayrıca Etial 160 alaşımı için döküm modeli sonuçları da karşılaştırma amaçlı verilmiştir.

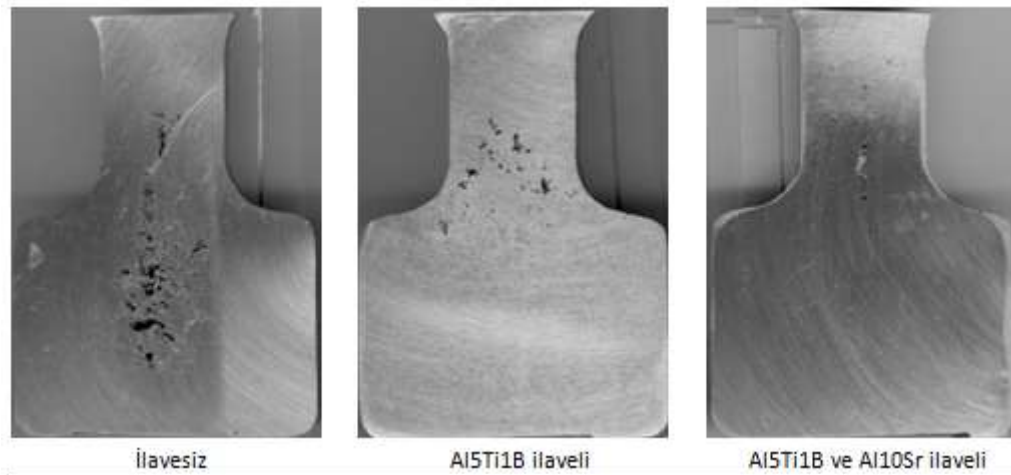
Tablo 4.11. Statik sıvı basıncı deneyi için kum kalıba döküm numuneleri yoğunluk ölçümü sonuçları.

Numune Adı	Havada Ağırlık (Gram)	Suda Ağırlık (Gram)	Deneysel Yoğunluk (gr / cm ³)	Referans Yoğunluk (gr / cm ³)	Porozite %
Kum Kalıba Döküm Deneylerinde Kullanılan Model Sonuçları					
E160	347,26	216,66	2,6542	2,7366	3,01
E160 +Al5Ti1B	346,66	217,82	2,6858	2,7416	2,04
E160+Al5Ti1B+Al10Sr	348,48	219,82	2,7037	2,7402	1,33
Statik Sıvı Basıncı Etkisinin Görülmesi için Kullanılan Model Sonuçları					
E160	354,98	220,74	2,6365	2,7366	3,37
E160 +Al5Ti1B	354,52	222,04	2,6761	2,7416	2,39
E160+Al5Ti1B+Al10Sr	351,66	221,12	2,6938	2,7402	1,69

Tablo 4.11’de verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi kum kalıba döküm deneyi numunelerinde de olduğu gibi Etial 160 alaşımının dökümünde tane inceltici ve modifiye edici ilavesinin etkisiyle döküm içerisinde oluşan porozite miktarı azalmıştır. Bunun katılaşma esnasında tane boyutunun küçülmesi ile besleme yolunun daha uzun süre beslemeye izin vermesi neticesinde olduğu düşünülmektedir. Statik sıvı basıncı için aynı hacim ve modül değerine sahip olacak şekilde tasarlanan besleyicili model dökümlerinde porozite miktarı artış göstermiştir. Kum kalıba döküm yönteminde olduğu gibi mastır alaşımları ilavesiyle porozite miktarı azalmasına rağmen aynı şartlardaki döküm numuneler karşılaştırıldığında statik sıvı basıncı modeli numunesinde daha fazla porozite çıkmıştır.

4.6.3. Döküm kesit yüzey incelemeleri

Döküm numunelerin kesit yüzeylerindeki porozite durumunu incelenmek üzere döküm ve besleme boğazını içeren kısım dikey olarak ortadan kesildikten sonra zımparalanarak taranmış ve yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.67’de statik sıvı basıncı deneyi döküm numune kesit yüzey görüntüleri verilmiştir.



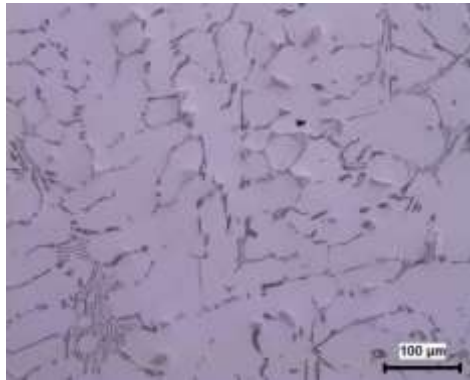
Şekil 4.67. Etial 160 alaşımı ile dökülen statik sıvı basıncı deneyi döküm numuneler kesit yüzey görüntüsü.

Şekil 4.67’deki görüntüler incelendiğinde, tane inceltici ve modifiye edici ilavesi ile ortaya çıkan porozite miktarının azaldığı kesit yüzey görüntülerinden de tespit edilmiştir. Radyografi incelemelerinde tane inceltici ve modifiye edici ilaveli döküm numunelere ait filmlerde gözenekleşme tespit edilememiştir. Ancak yoğunluk sonuçları ve kesit yüzey görüntüleri ile gözenekleşme varlığı ve büyüklüğü tespit edilebilmiştir. Ayrıca porozitelerin biçiminden çekintinin besleme yetersizliğinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

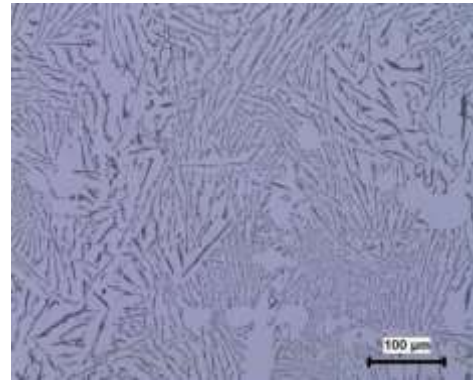
4.7. Mikroyapı İncelemeleri Sonuçları

Döküm numunelerden, değişen döküm şartları ve alaşım çeşitlerinde oluşan içyapını incelenmesi için Şekil 3.42’de görülen test çubuklarından numuneler alınmıştır. Numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 4.68’de alaşım farkına bağlı mikro yapı değişimlerinin görülmesi amacıyla kum kalıba mastır alaşımı ilavesiz olarak yapılan dökümlerden alınan

numunelerin mikro yapı resimleri verilmiştir. Mikroyapı resimleri 100 X büyütmede çekilmiştir. Şekil 4.68’de görüldüğü gibi farklı alaşımlara ait döküm numunelerin iç yapıları kimyasal bileşime bağlı olarak çeşitli şekilde katılaşma sergilemiştir. Bileşiminde Si içeren alaşımlar ötektik öncesi α ve ötektik $\alpha + \text{Si}$ yapısı içermektedir. %12 Si içeriğine sahip olan Etial 140 alaşımında ise ötektik yapı $\alpha + \text{Si}$ şeklindedir. Bileşiminde sadece %4 Cu içeren Etial 220 alaşımında AlCu bileşikleri mevcuttur.



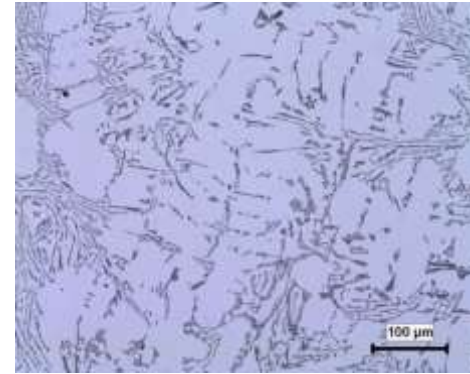
Etial 110



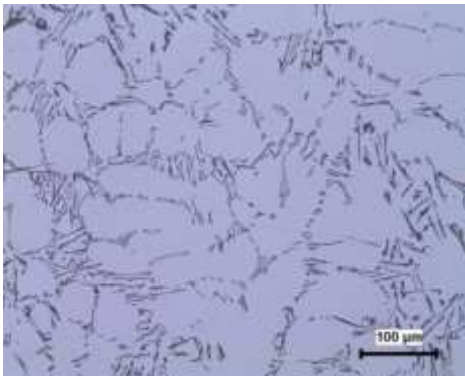
Etial 140



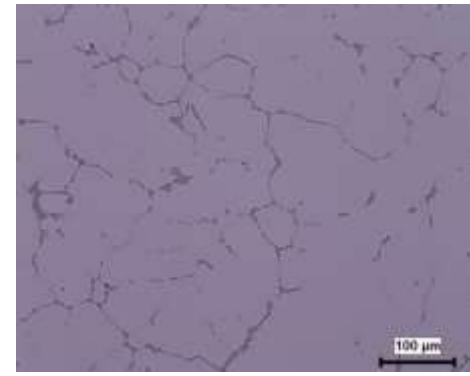
Etial 160



Etial 171



Etial 177



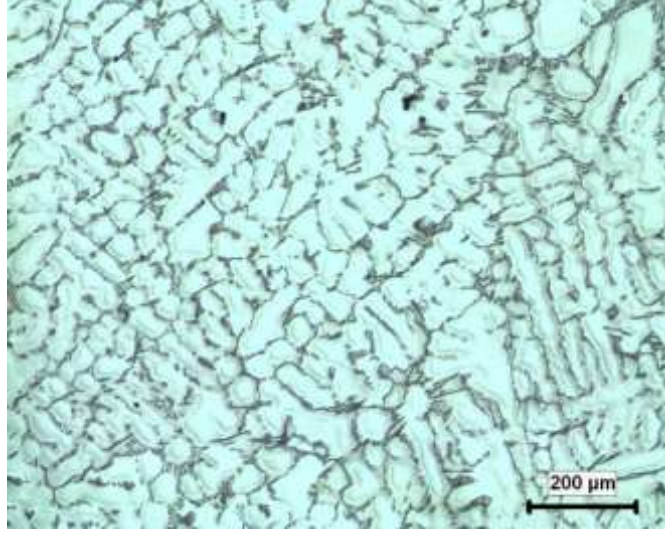
Etial 220

Şekil 4.68. Mastır alaşımı ilavesiz olarak kum kalıba dökülen farklı alaşımlara ait mikroyapı görüntüleri.

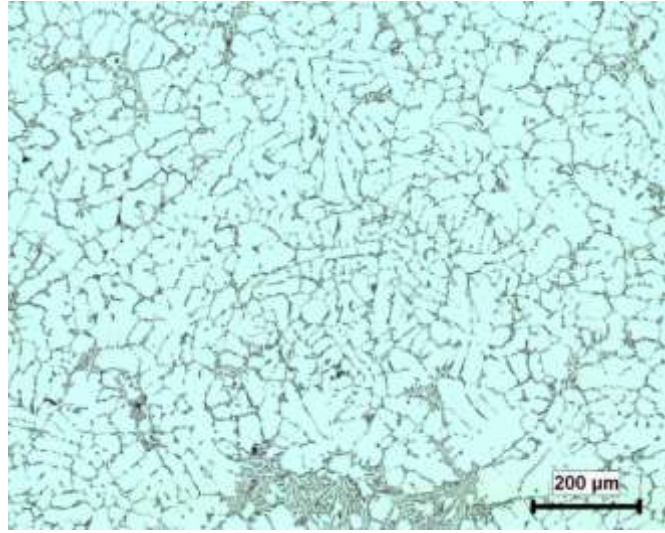
Döküm deneylerinde alaşımlara ilave edilen tane inceltici ve modifiye edici elementlerin mikro yapı değişimlerinin görülmesi amacıyla kum kalıba yapılan dökümlerden numuneler alınmıştır. Şekil 4.69'da Etial 110 alaşımının kum kalıba dökümünde tane inceltici ve modifiye edici ilavesinin etkisine ait 50X büyütmede çekilen mikro yapı resimleri verilmiştir. Etial 140, Etial 160, Etial 171, Etial 177 ve Etial 220 alaşımı için mikroyapı resimleri sırasıyla Şekil 4.70'den 4.74'e kadar verilmiştir.

Şekil 4.69'dan 4.74'e kadar farklı alaşımlara ait ilavesiz, tane inceltici ve modifiye edici ilaveli döküm numune mikroyapı resimleri görülmektedir. Mikro yapı resimlerinden de görüldüğü gibi tane inceltici ilavesi ile döküm yapısında ortaya çıkan dentritik ve kaba yapı kısmen incelmıştır. Numune alındığı yer bakımından katılaşma zamanı çok kısa olduğundan ve yapı arasındaki fark çok bariz bir şekilde ortaya çıkmamıştır. Tane boyunun küçülmesi Şekil 4.74'de verilen Etial 220 alaşımının mikro yapı resimlerinde daha net bir şekilde belli olmaktadır.

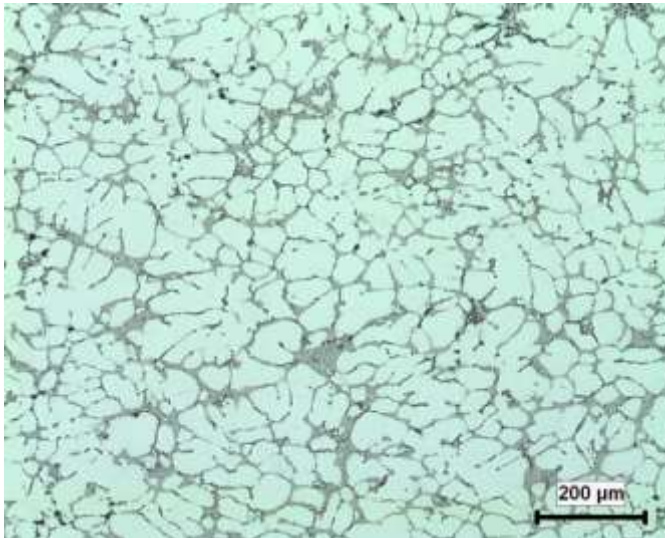
Ayrıca modifiye edici ilavesi ise döküm içyapısında oluşan Si kristallerinin biçim ve boyutlarında değişikliğe sebep olmuştur. Bu durum Özellikle Şekil 4.71'de verilen ötektik Etial 140 alaşımının mikro yapı resminde bariz bir şekilde belli olmaktadır. Uzun ve keskin köşeli Si kristalleri Al10Sr alaşım elementi ilavesi ile modifiye olmuş ve yapıda ince ve homojen bir şekilde dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum Si içeriği ötektik bileşime yakın olan Etial 171 ve Etial 177 alaşımlarında da fark edilmektedir. Ancak Şekil 4.74'de görüldüğü gibi kimyasal bileşiminde Si içermeyen Etial 220 alaşımının mikro yapısı üzerine Al10Sr alaşımının bir etkisi gözlenmemiştir.



İlavesiz



Al5Ti1B tane inceltici ilaveli

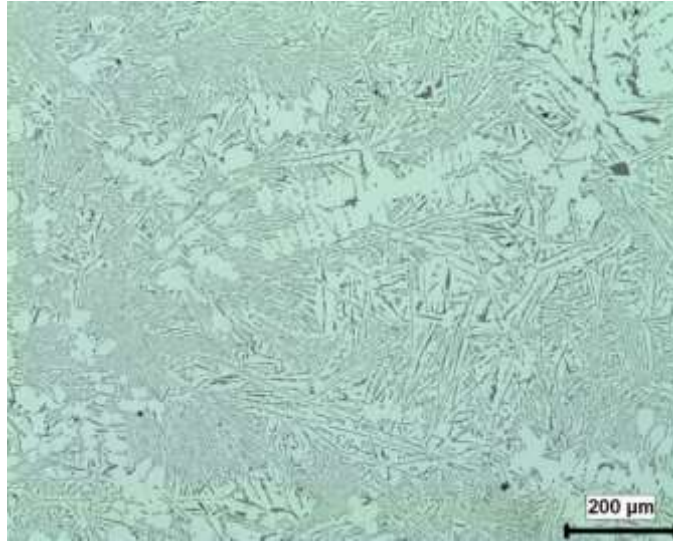


Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli

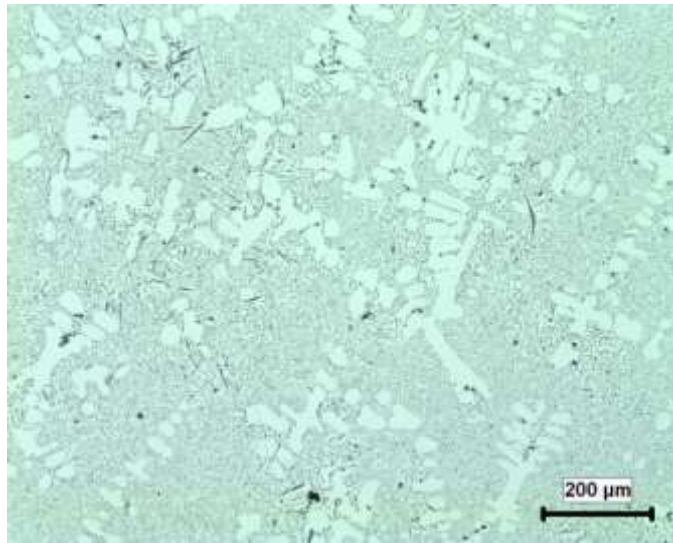
Şekil 4.69. Etial 110 alaşıımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.



İlavesiz

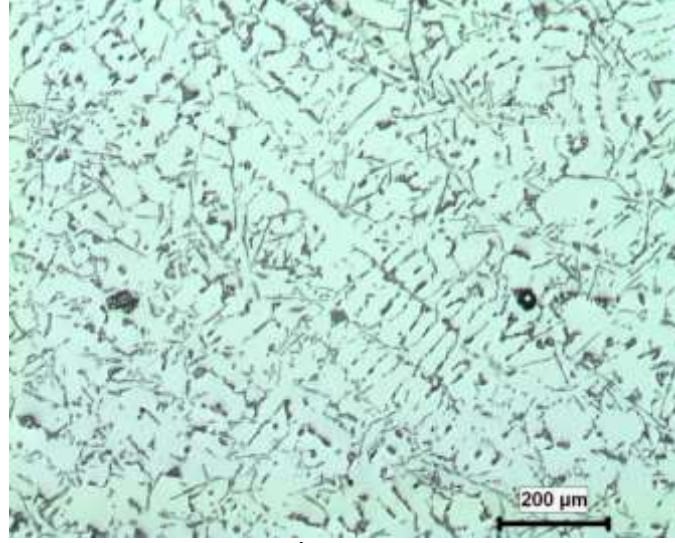


Al5Ti1B tane inceltici ilaveli

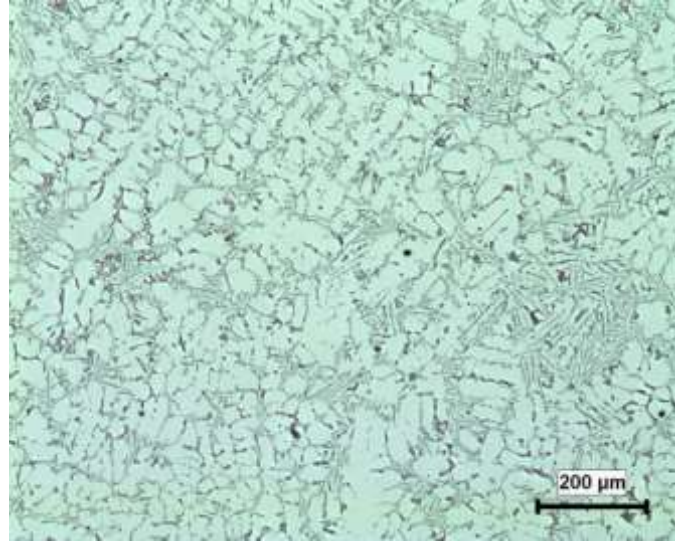


Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli

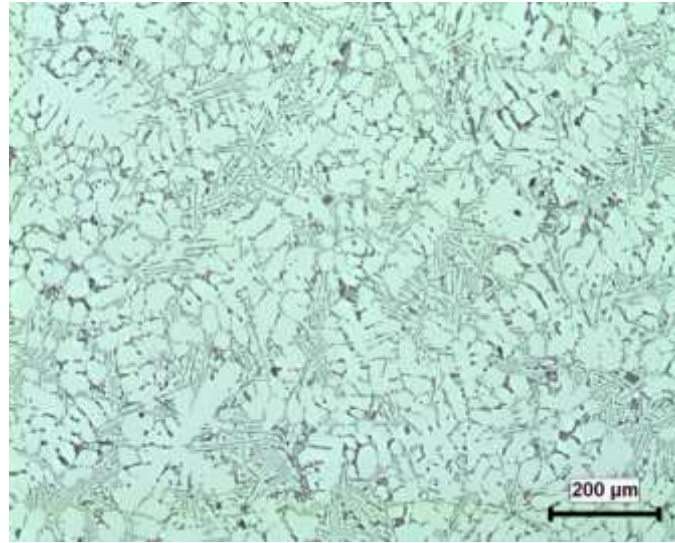
Şekil 4.70. Etial 140 alaşımlarının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.



İlavesiz

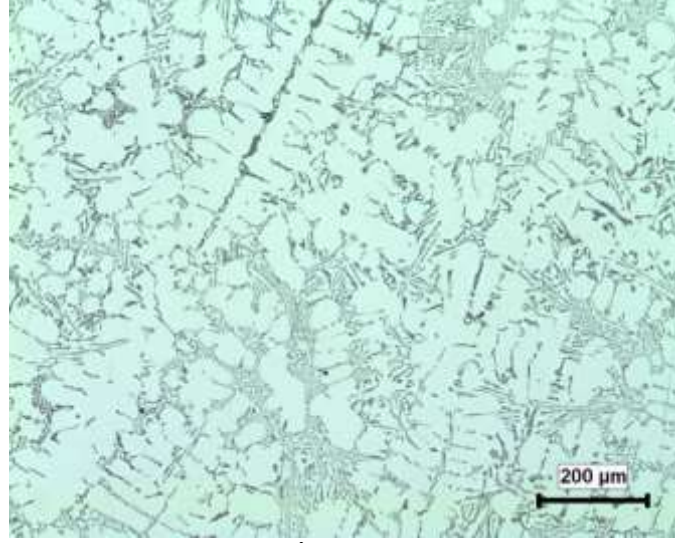


Al5Ti1B tane inceltici ilaveli

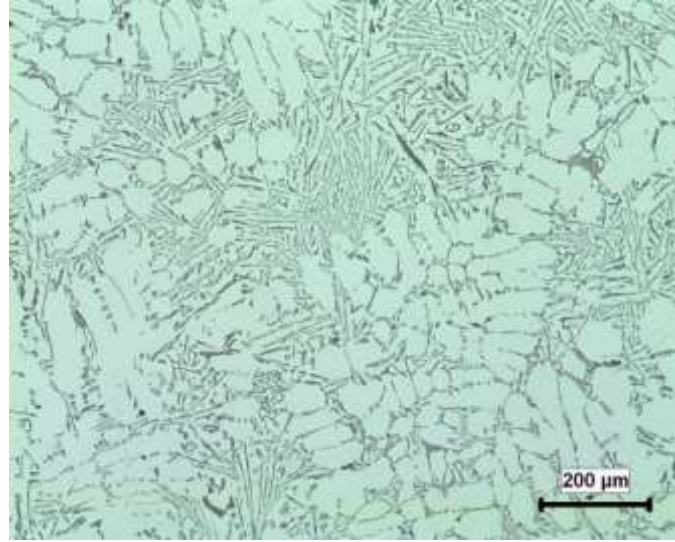


Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli

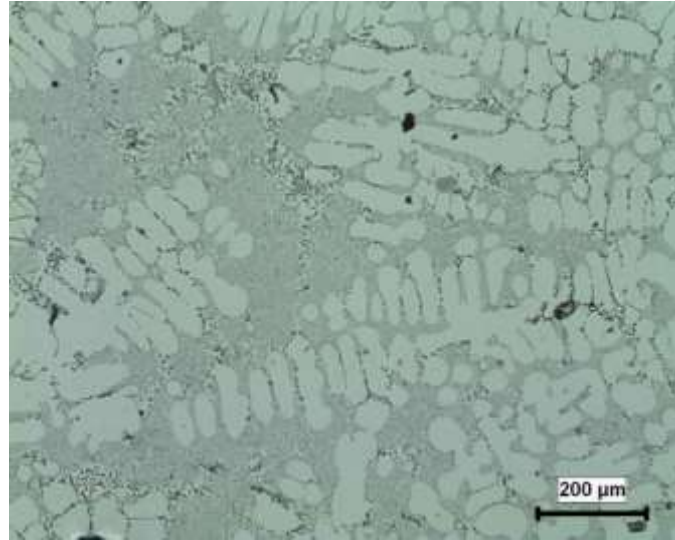
Şekil 4.71. Etial 160 alaşımlarının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.



İlavesiz

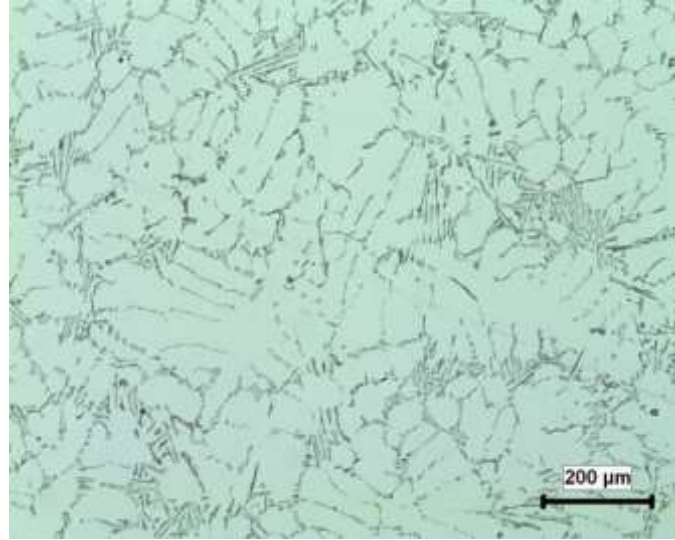


Al5Ti1B tane inceltici ilaveli

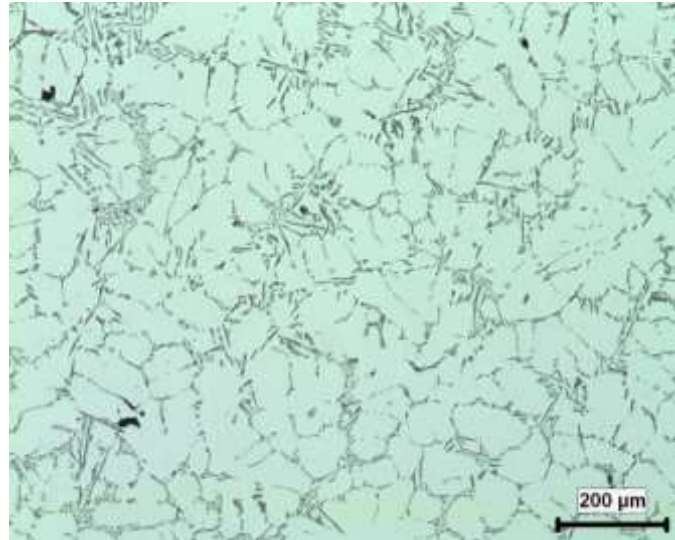


Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli

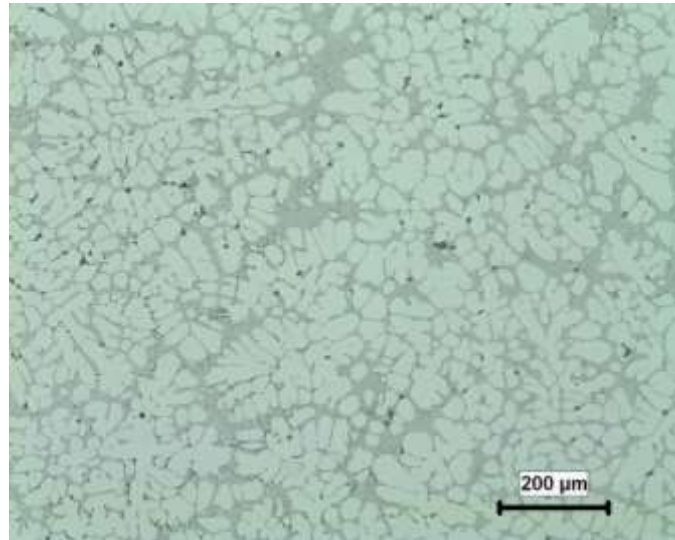
Şekil 4.72. Etial 171 alaşımlarının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.



İlavesiz

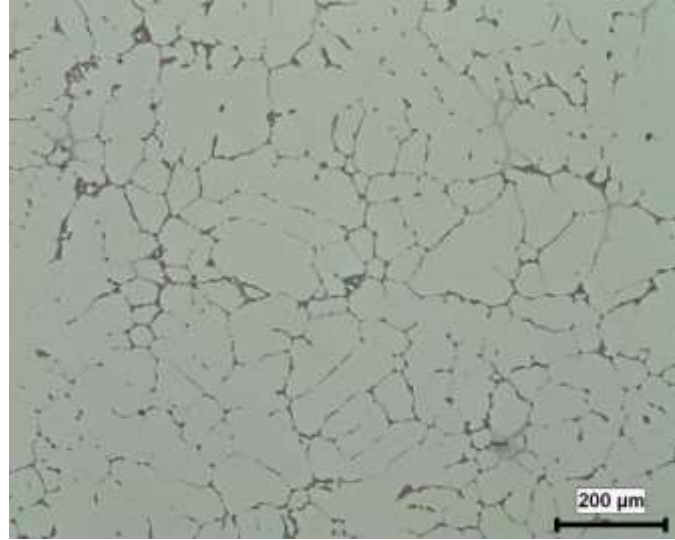


Al5Ti1B tane inceltici ilaveli

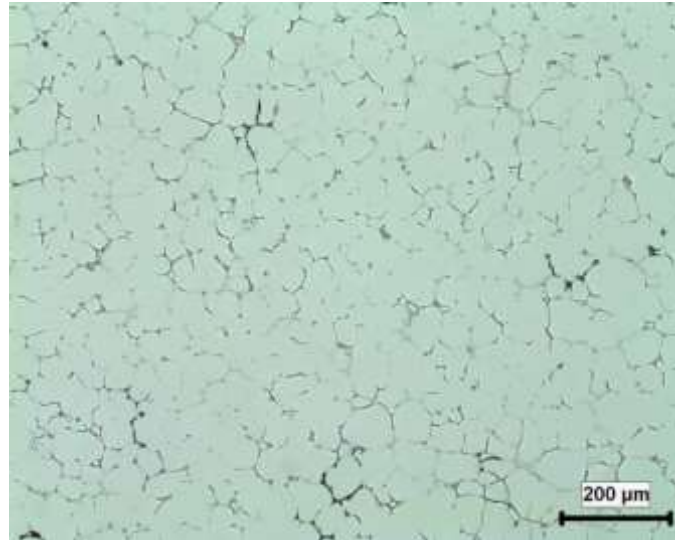


Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli

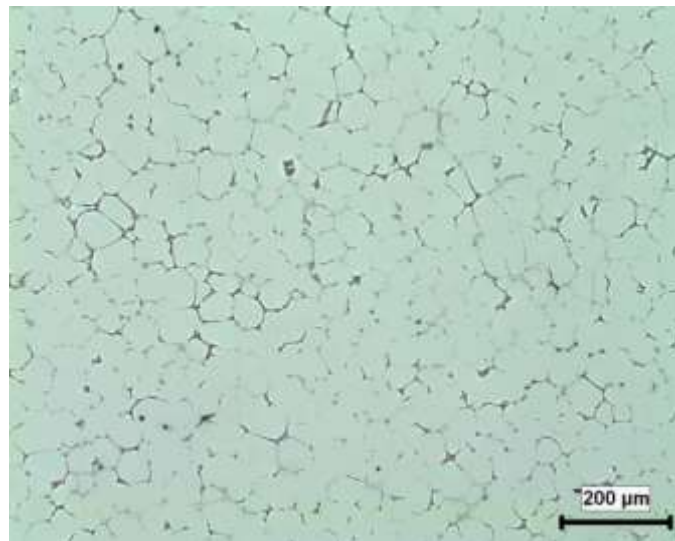
Şekil 4.73. Etial 177 alaşıımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.



İlavesiz



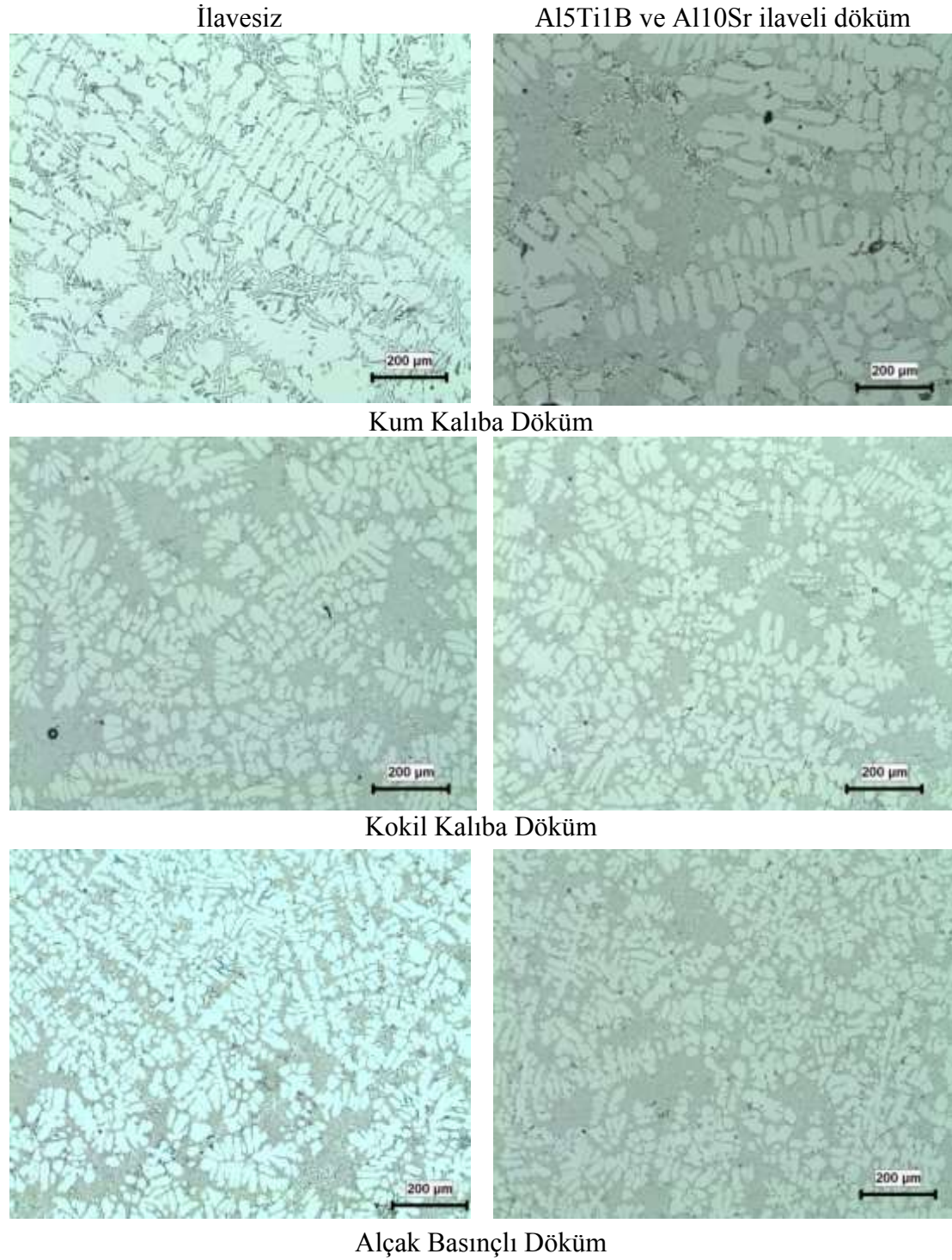
Al5Ti1B tane inceltici ilaveli



Al5Ti1B ve Al10Sr ilaveli

Şekil 4.74. Etial 220 alaşıımının kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ilavesinin mikroyapı üzerine etkisi.

Şekil 4.75’de döküm yöntem farkının döküm içyapısı üzerinde incelenmesi için Etial 171 alaşımına tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek dökümü yapılan numunelere ait mikro yapı resimleri verilmiştir. Mikro yapı resimleri 50X büyütmede çekilmiştir.



Şekil 4.75. Etial 171 alaşımının dökümünde alaşım elementi ilavesi ve döküm yönteminin mikroyapıya etkisi.

Şekil 4.75’de verilen resimler incelendiğinde kokil kalıp ve alçak basınçlı döküm yönteminde de kum kalıba döküm yönteminde olduğu gibi tane inceltici ve modifiye edici döküm iç yapısını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Kokil kalıp ve alçak basınçlı döküm yönteminde numunenin katılaşması için geçen süre kum kalıba döküm yöntemine göre daha kısa olduğundan döküm içyapıları daha ince taneli oluşmuştur. Ayrıca alçak basınçlı döküm yönteminde kokil kalıpta hızlı katılaşmanın yanı sıra katılaşma esnasında uygulanan basıncın da etkisiyle döküm mikro yapısında çok kaba taneli dentritlere rastlanmamaktadır.

4.8. Döküm Simülasyon Sonuçları Üzerinden Gözenek Oranlarının Belirlenmesi

Solid Cast döküm simülasyon yazılımında farklı KKO oranlarında (CFS) modellemeler yapıldıktan sonra ortaya çıkan gözenek miktarı deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi belirlenmiştir. Kum kalıba döküm yönteminde her bir alaşım için KKO 30 ile KKO 60 arasında 5’er sayı artırılarak modellemeler yapılmıştır. Tablo 4.12’de kum kalıba döküm deneyleri için yapılan modellemelerden elde edilen gözenek değerleri mevcuttur.

Tablo 4.12. Kum kalıba döküm modellemelerinde simülasyon üzerinden belirlenen % porozite değerleri.

Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	2,336	1,956	1,892	1,726	1,691	1,439	0,980
Etial 140	3,142	2,764	2,267	2,018	1,605	1,093	0,915
Etial 160	3,139	2,781	2,473	2,264	2,049	1,651	1,212
Etial 171	2,614	2,364	2,151	1,819	1,688	1,324	1,077
Etial 177	2,656	2,407	1,933	1,741	1,536	1,098	0,687
Etial 220	2,463	2,113	1,807	1,558	1,365	1,072	0,885

Modelleme programından elde edilen gözenek değerleri ile gerçek döküm değerleri eşleştirilerek gereken aralıklarda tekrar KKO değeri 1’er sayı artırılarak gerçek deney şartlarındaki en uyumlu KKO değeri tespit edilmiştir. Tablo 4.13’de kum kalıba döküm deneylerinde her bir alaşım ve deney şartlarına bağlı olarak belirlenen KKO değeri ve porozite miktarları mevcuttur.

Tablo 4.13. Modelleme programı ile gerçek döküm değerlerinin eşleştirilmesi.

Gerçek Döküm Şartları			Modelleme Sonuçları	
Alaşım Çeşidi	Deney Şartları	% Gözenek	% Gözenek	%KKO Değeri
E110	İlave Yok	2,04	2,032	34
E110	TiB ilavesi	1,67	1,691	50
E110	TiB+Sr ilavesi	1,23	1,239	57
E140	İlave Yok	3,10	3,142	30
E140	TiB ilavesi	1,95	1,907	46
E140	TiB+Sr ilavesi	1,09	1,093	55
E160	İlave Yok	3,01	2,997	31
E160	TiB ilavesi	2,04	2,049	50
E160	TiB+Sr ilavesi	1,33	1,299	58
E171	İlave Yok	2,50	2,514	32
E171	TiB ilavesi	1,63	1,688	50
E171	TiB+Sr ilavesi	1,22	1,231	57
E177	İlave Yok	2,59	2,607	31
E177	TiB ilavesi	1,41	1,449	51
E177	TiB+Sr ilavesi	1,02	1,016	56
E220	İlave Yok	2,27	2,253	33
E220	TiB ilavesi	1,34	1,307	51
E220	TiB+Sr ilavesi	1,32	1,307	51

Kokil kalıba döküm deneyleri için modelleme programında farklı sıcaklık ve KKO oranlarında SolidCast döküm simülasyon programında modellemeler yapılmıştır. KKO oranı değeri ilk modelleme çalışmalarında 5'er aralıklarla artırılarak yapılmıştır. Elde edilen %gözenek değerlerine göre gerçek döküm yoğunluk ölçüm sonuçları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 4.14'de modelleme programından alınan % gözenek sonuçları verilmiştir.

Modelleme programından elde edilen % gözenek sonuçları, kokil kalıba döküm yönteminde taguchi metoduna göre yapılan deneylerle karşılaştırılarak KKO oranları belirlenmiştir.%30 ile %60 arasında 5 sayı basamağı ile artırılarak yapılan modellemelerde gerçek döküm sonuçları ile eşleşmeyen durumlarda KKO değeri 1 sayı basamağı ile artırılarak modellemeler yapılmıştır. SolidCast döküm simülasyon programında gerçek döküm değerine en yakın değerler eşleştirilmiştir. Tablo 4.15'de Taguchi yöntemine göre yapılan dökümlerle modelleme programından belirlenen KKO değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.14. Kokil kalıba döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % porozite değerleri.

Kokil Kalıba Döküm 200°C Ön Isıtma Sıcaklığında Modelleme Programından Alınan % porozite							
Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	1,928	1,842	1,749	1,663	1,577	1,341	0,971
Etial 140	3,045	2,663	2,272	1,981	1,686	1,632	1,567
Etial 160	2,568	2,313	2,284	2,162	2,039	1,556	1,437
Etial 171	2,692	2,382	2,168	1,996	1,972	1,528	1,326
Etial 177	2,752	2,497	2,356	2,236	2,092	1,755	1,458
Etial 220	2,427	1,922	1,762	1,655	1,516	1,345	1,082
Kokil Kalıba Döküm 300°C Ön Isıtma Sıcaklığında Modelleme Programından Alınan % porozite							
Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	1,834	1,714	1,587	1,460	1,333	0,978	0,921
Etial 140	2,931	2,448	2,185	1,922	1,522	1,173	1,061
Etial 160	2,452	2,161	2,082	2,024	1,926	1,552	1,347
Etial 171	2,538	2,224	2,096	1,943	1,862	1,582	1,237
Etial 177	2,576	2,212	1,956	1,742	1,524	1,304	1,086
Etial 220	2,376	1,812	1,752	1,612	1,502	1,331	1,084
Kokil Kalıba Döküm 400°C Ön Isıtma Sıcaklığında Modelleme Programından Alınan % porozite							
Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	1,812	1,651	1,485	1,318	1,153	0,997	0,881
Etial 140	2,864	2,408	2,134	1,882	1,520	1,158	1,032
Etial 160	2,341	1,941	1,908	1,826	1,712	1,505	1,292
Etial 171	2,482	2,222	1,782	1,716	1,638	1,364	1,142
Etial 177	2,453	2,172	1,938	1,693	1,468	1,173	0,982
Etial 220	2,224	1,745	1,647	1,542	1,428	1,206	0,989

Tablo 4.15. Kokil kalıba döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % porozite değerleri.

Gerçek Döküm Şartları				Modelleme Sonuçları	
Alaşım Çeşidi	Master Alaşım İlavesi	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Ortalama Gözenek Sonuçları (%)	% Gözenek	% KKO Değeri
Etial 110	İlave yok	200	1,83	1,825	36
Etial 110	TiB ilavesi	300	1,12	1,124	53
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	400	0,89	0,881	60
Etial 140	İlave yok	300	2,45	2,448	35
Etial 140	TiB ilavesi	400	1,81	1,823	46
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	200	1,65	1,647	53
Etial 160	İlave yok	400	1,92	1,916	38
Etial 160	TiB ilavesi	200	1,93	1,935	52
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	300	1,54	1,534	57
Etial 171	İlave yok	200	2,46	2,458	33
Etial 171	TiB ilavesi	300	1,67	1,668	52
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	400	1,32	1,321	58
Etial 177	İlave yok	300	2,25	2,221	34
Etial 177	TiB ilavesi	400	1,36	1,361	52
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	200	1,89	1,884	53
Etial 220	İlave yok	400	1,67	1,678	37
Etial 220	TiB ilavesi	200	1,51	1,516	50
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	300	1,46	1,451	52

Alçak basınçlı döküm modellemeleri gerçek basınçlı döküm deneylerinde olduğu gibi 300 °C ön ısıtma sıcaklığında farklı basınç ve kritik katı oranı değerlerinde yapılmıştır. SolidCast döküm simülasyon programında, alçak basınçlı döküm yönteminde basınç değeri doğrudan tanımlanamamaktadır. Bu sebeple programda basınç değeri etkisi dolum süresinin değiştirilmesi ile simüle edilmiştir. Kum ve kokil kalıba döküm deneylerinde olduğu gibi modelleme çalışmalarında kritik katı oranı değeri minimum ve maksimum aralık olarak belirlenen % 30 ile % 60 arasında 5 sayı basamağı artırılarak yapılmıştır. Tablo 4.16’da SolidCast yazılımından farklı modelleme şartlarında belirlenen % gözenek değerleri verilmiştir.

Tablo 4.16. Alçak basınçlı döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % gözenek değerleri.

Alçak Basınçlı Döküm 250 mbar(16 sn) Basınçta Modelleme Programından Alınan % poroziteler							
Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	1,768	1,656	1,432	1,324	1,166	1,082	0,981
Etial 140	2,426	2,162	1,856	1,647	1,462	1,292	1,118
Etial 160	2,456	2,125	1,862	1,646	1,532	1,482	1,064
Etial 171	2,286	1,762	1,702	1,657	1,645	1,314	1,058
Etial 177	2,456	2,168	1,987	1,836	1,604	1,498	1,104
Etial 220	2,014	1,641	1,559	1,426	1,302	1,131	1,022
Alçak Basınçlı Döküm 500 mbar(8 sn) Basınçta Modelleme Programından Alınan % poroziteler							
Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	1,742	1,638	1,412	1,312	1,162	1,042	0,911
Etial 140	2,386	2,084	1,824	1,623	1,415	1,204	1,023
Etial 160	2,324	2,084	1,828	1,632	1,521	1,476	1,042
Etial 171	2,124	1,682	1,603	1,554	1,527	1,291	1,023
Etial 177	2,397	2,126	1,963	1,821	1,585	1,465	1,092
Etial 220	1,985	1,546	1,314	1,278	1,127	1,093	0,982
Alçak Basınçlı Döküm 1000 mbar(2 sn) Basınçta Modelleme Programından Alınan % poroziteler							
Alaşım	KKO 30	KKO 35	KKO 40	KKO 45	KKO 50	KKO 55	KKO 60
Etial 110	1,715	1,614	1,384	1,296	1,143	1,016	0,886
Etial 140	2,256	2,045	1,816	1,619	1,398	1,221	0,994
Etial 160	2,188	1,986	1,726	1,615	1,512	1,415	1,012
Etial 171	2,016	1,668	1,572	1,423	1,345	1,274	1,018
Etial 177	2,216	2,045	1,921	1,794	1,562	1,432	1,026
Etial 220	1,961	1,452	1,091	1,064	1,032	0,992	0,924

Tablo 4.17’de alçak basınçlı döküm yönteminde Taguchi istatistiksel deney tasarım metoduna uygun olarak yapılan döküm şartları ve kritik katı oranı değerlerinin eşleştirmesi verilmiştir.

Tablo 4.17. Alçak basınçlı döküm modellemelerinde SolidCast yazılımından belirlenen % porozite değerleri.

Gerçek Döküm Şartları				Modelleme Sonuçları	
Alaşım Çeşidi	Master Alaşım İlavesi	Basınç Değeri (mbar)	Ortalama Gözenek Sonuçları (%)	% Gözenek	% KKO Değeri
Etial 110	İlave yok	250	1,42	1,432	40
Etial 110	TiB ilavesi	500	1,04	1,043	55
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	1000	0,88	0,878	61
Etial 140	İlave yok	500	2,02	2,008	37
Etial 140	TiB ilavesi	1000	1,24	1,245	54
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	250	1,29	1,292	55
Etial 160	İlave yok	1000	1,72	1,723	40
Etial 160	TiB ilavesi	250	1,54	1,538	53
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	500	1,06	1,067	59
Etial 171	İlave yok	250	1,75	1,753	36
Etial 171	TiB ilavesi	500	1,47	1,462	54
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	1000	1,02	1,016	58
Etial 177	İlave yok	500	2,07	2,074	37
Etial 177	TiB ilavesi	1000	1,44	1,432	55
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	250	1,37	1,365	56
Etial 220	İlave yok	1000	1,08	1,091	40
Etial 220	TiB ilavesi	250	1,16	1,161	54
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	500	1,12	1,041	57

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması yapılmış ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalarla kıyaslanarak tutarlılığı incelenmiştir. Değişen döküm yöntemleri ve şartlarında döküm içerisindeki gözenek oranı sonuçları ve değişimin sebepleri değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Taguchi istatistiksel deney tasarım yöntemine göre elde edilen sonuçlar bu bölümde değerlendirilerek sonuçları tartışılmıştır.

5.1. Taguchi Deneysel Tasarım Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı deney koşullarında deney sayılarını minimize etmek üzere Taguchi deneysel tasarım kullanılmıştır. Taguchi deneysel tasarım metodunda ortogonal özellikten faydalanılarak, deney tasarımında çok sayıda faktörün az sayıda deneyle incelenmesi imkanı doğmaktadır. Ortogonal özellik bir faktörün seviyelerinin diğer faktörlerin aynı sayıdaki farklı seviyeleri ile eşleştirilmesi imkanı sağlamaktadır.

Döküm deneylerinde, döküm yöntemine göre farklılık gösterse de parametreler; alaşım çeşidi, master alaşım ilavesi, kalıp sıcaklığı ve kalıp doldurma basınç seviyesi olarak seçilmiştir.

5.1.1. Kum kalıba döküm sonuçlarının analizi

Kum kalıba döküm yönteminde kullanılan deney parametreleri; alaşım çeşidi ve master alaşım ilavesidir. Deney parametre ve faktörleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Her bir deney 3 kez tekrarlanarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Tablo 5.1. Kum kalıba döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.

Faktörler	Seviyeler					
	I	II	III	IV	V	VI
A: Alaşım Çeşidi	Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220
B: Alaşım İlavesi	İlave yok	TiB ilaveli	TiB + Sr ilaveli	-	-	-

Tanımlanan parametreler Minitab programında seçilen dizine uygun şekilde girilmiştir. Bu dizi deney şartları ve seçilen parametrelerin durumuna göre belirlenmiştir. Programa uygun olarak, kum kalıba döküm deneyleri için Taguchi yöntemi karışık $L_{18}(1^6 \times 1^3)$ ortogonal dizisinin kullanımı uygun bulunmuştur. Bu diziye uygun olarak oluşturulan dizi, yapılması gereken kum kalıba döküm deneyleri ve döküm şartları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kum kalıba döküm yönteminde yapılması gereken döküm deneyleri için hazırlanan $L_{18}(1^6 \times 1^3)$ dizisi.

L₁₈ Deneyler	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3
10	4	1
11	4	2
12	4	3
13	5	1
14	5	2
15	5	3
16	6	1
17	6	2
18	6	3

Faktör tanımlarının ve deney sonuçlarının seçilen L_{18} ortogonal dizine uygun olarak Minitab programına girilişi Tablo 5.3’de verilmiştir. Minitab programına girilen faktörlerden sonra Taguchi analizine geçilerek, etkileşimler, sinyal/gürültü oranları ve analiz opsiyonları seçilmiştir.

Tablo 5.3. Faktörlerin ve deney sonuçlarının programa girilişi.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C : Ortalama Gözenek Sonuçları (%)
Etial 110	İlave yok	2,04
Etial 110	TiB ilavesi	1,67
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	1,22
Etial 140	İlave yok	3,10
Etial 140	TiB ilavesi	1,96
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	1,08
Etial 160	İlave yok	3,01
Etial 160	TiB ilavesi	2,04
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	1,33
Etial 171	İlave yok	2,50
Etial 171	TiB ilavesi	1,63
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	1,22
Etial 177	İlave yok	2,57
Etial 177	TiB ilavesi	1,41
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	1,02
Etial 220	İlave yok	2,29
Etial 220	TiB ilavesi	1,34
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	1,31

Tablo 5.3’de yapılan on sekiz farklı deney parametresine sahip dökümlerde porozite dağılımı %1,02 ile %3,10 arasında dağılım sergilediği ve en düşük porozitenin Etial 177 alaşımına tane inceltici ve modifiye edici ilave edilen 15 numaralı dökümde olduğu görülmektedir.

Taguchi deneysel metodunda kalite karakteristiğini ifade eden sinyal/gürültü oranı bir performans ölçütüdür. Örneğin deneysel durum için alınan 5 adet gözenek sonucu tek bir S/N oranı ile ifade edilebilir [163]. Döküm deneyleri için uygun olan Taguchi analiz metodu en küçük en iyi (Smaller is better) durumudur. Çalışmada bu duruma göre analizler yapılmıştır. Yapılan Taguchi analizi metodunda seçilen performans karakteristiğinin, en küçük en iyi durumunun sinyal gürültü oranları verilmiştir.

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (1) \quad (5.1)$$

n : gözlem sayısı

y_i : gözlem değeri

Faktör tanımlarına göre döküm parçaların gözenek oranlarının S/N oranları Tablo 5.4’de verilmiştir. Tabloda değerler hazırlanan diziye uygun olarak karşılıklı yazılmıştır.

Tablo 5.4. Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları.

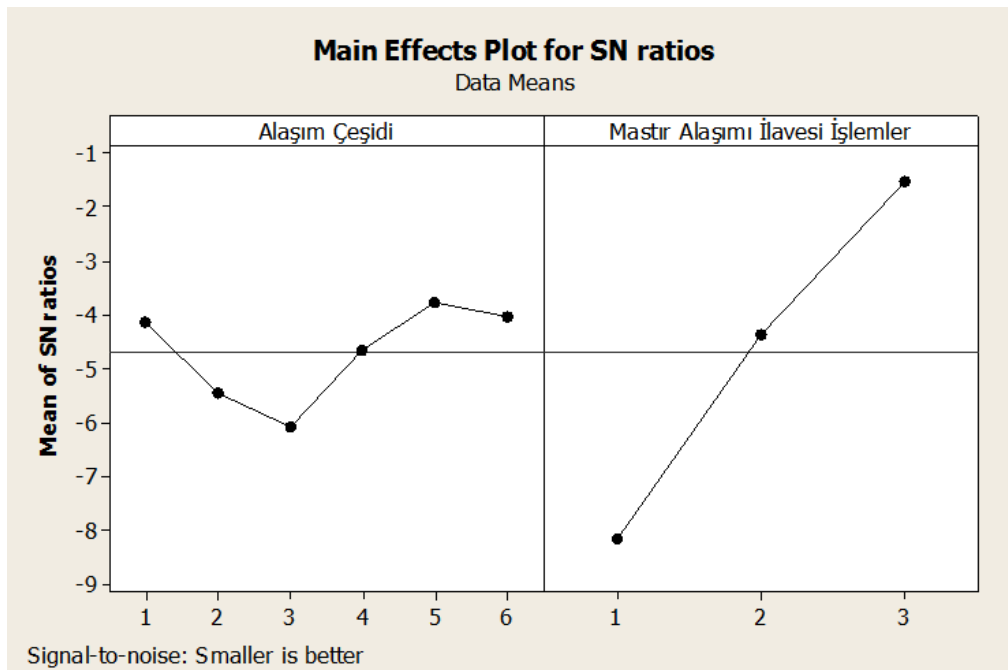
A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	Ortalama Gözenek Sonuçları (%)	S/N Oranı
Etial 110	İlave yok	2,04	-6,19
Etial 110	TiB ilavesi	1,67	-4,45
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	1,22	-1,73
Etial 140	İlave yok	3,10	-9,83
Etial 140	TiB ilavesi	1,96	-5,85
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	1,08	-0,67
Etial 160	İlave yok	3,01	-9,57
Etial 160	TiB ilavesi	2,04	-6,19
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	1,33	-2,48
Etial 171	İlave yok	2,50	-7,96
Etial 171	TiB ilavesi	1,63	-4,24
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	1,22	-1,73
Etial 177	İlave yok	2,57	-8,20
Etial 177	TiB ilavesi	1,41	-2,98
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	1,02	-0,17
Etial 220	İlave yok	2,29	-7,20
Etial 220	TiB ilavesi	1,34	-2,54
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	1,31	-2,35

Taguchi analizinde faktörlerin seviyelerine göre S/N oranları Tablo 5.5’de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi alaşım çeşidinin beşinci, master alaşım ilavesinin üçüncü seviyesi en küçük en iyi sonuçtur. Buna göre Etial 177 alaşımı ile tane inceltici ve modifiye edici ilavesi ile yapılan kum kalıba döküm deneylerinde en düşük gözenek oranları elde edilmiş olması gerekir.

Tablo 5.5. Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları.

Seviye	A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi
1	-4,125	-8,158
2	-5,447	-4,377
3	-6,080	-1,520
4	-4,643	-
5	-3,785	-
6	-4,028	-
Delta	2,295	6,638
Rank	2	1

Yapılan çalışmada alüminyum alaşımlarının kum kalıba dökümde alaşım çeşidi ve master alaşımı ilavesinin porozite oluşumu üzerine etki eden faktörlerinin optimizasyonu amacı ile Şekil 5.1’de faktör seviyelerinin ortalama S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış “faktörlerin grafiksel gösterimi” yer almaktadır. Minimum porozite eldesi için optimum faktör seviyelerinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan grafikte, optimum deney şartlarının A_5B_3 olduğu görülmektedir. Buna göre minimum porozite seviyesi için Etial 177 alaşımına, tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek döküm yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.1. Faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafiksel gösterimi.

Alüminyum alaşımlarının kum kalıba döküm deneylerinde oluşan porozite üzerine kritik katı oranının etkisinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan ANOVA tablosu Tablo 5.6’da verilmiştir. “Smaller is better” karakteristiği için hesaplanan S/N oranları dikkate alınarak hazırlanan ANOVA istatistiksel tablosunda, Alüminyum alaşımlarında porozite oluşumu mekanizması üzerinde en etkili faktörün “master alaşımı ilavesi” olduğu görülmektedir. Gözenekleşme üzerine alaşım çeşidinin etkisinin daha az olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5.6. Kum kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri için ANOVA tablosu.

Faktörler	Serbeslik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SST)	Varyans (V)	F Değeri	F Tablo Değeri	P Değeri
A: Alaşım Çeşidi	5	12,254	2,4508	1,98	-	7,77
B: Master Alaşım İlavesi	2	133,041	66,5205	53,8	7,559 ^a	84,4
Hata	10	12,365	1,2365			
Toplam	17	157,66				

^a %99 güven aralığı

5.1.2. Kokil kalıba döküm Taguchi deneysel sonuçları

Kokil kalıp deney tasarımı için döküm deney faktör ve parametreleri Tablo 5.7’de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 5.7. Kokil kalıba döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.

Faktörler	Seviyeler					
	I	II	III	IV	V	VI
A: Alaşım Çeşidi	Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220
B: Master Alaşım İlavesi	İlave yok	TiB ilaveli	TiB + Sr ilaveli	-	-	-
C: Kalıp Sıcaklığı (°C)	200	300	400			

Tanımlanan parametrelerin Minitab programında seçilen diziye uygun şekilde girilmesi için programa uygun olarak, kokil kalıba döküm deneyleri için Taguchi yöntemi karışık $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal dizisinin kullanımı uygun bulunmuştur. Bu diziye uygun olarak oluşturulan dizi, yapılması gereken kokil kalıba döküm deneyleri ve döküm şartları Tablo 5.8’de verilmiştir.

Taguchi yöntemi karışık $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal dizisine uygun olarak oluşturulan dizi, yapılması gereken kokil kalıba döküm deneyleri ve döküm şartları, faktör tanımlarına göre ortalama gözenek ve S/N sonuçları Tablo 5.9’da verilmiştir. Her dökümden 3’er adet yapılarak elde edilen sonuçların ortalaması değerlendirilmiştir.

Tablo 5.8. Kokil kalıba döküm yönteminde yapılması gereken döküm deneyleri için hazırlanan $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ dizisi.

L₁₈ Deneyler	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2
10	4	1	1
11	4	2	2
12	4	3	3
13	5	1	2
14	5	2	3
15	5	3	1
16	6	1	3
17	6	2	1
18	6	3	2

Tablo 5.9. Kokil kalıba döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri, gözenek ve S/N oranı sonuçları

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C : Kalıp Sıcaklığı (°C)	Ortalama Gözenek Sonuçları (%)	S/N Oranı
Etial 110	İlave yok	200	1,83	-5,25
Etial 110	TiB ilavesi	300	1,12	-0,98
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	400	0,89	1,01
Etial 140	İlave yok	300	2,45	-1,78
Etial 140	TiB ilavesi	400	1,81	-5,15
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	200	1,65	-4,35
Etial 160	İlave yok	400	1,92	-5,67
Etial 160	TiB ilavesi	200	1,93	-5,71
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	300	1,54	-3,75
Etial 171	İlave yok	200	2,46	-7,82
Etial 171	TiB ilavesi	300	1,67	-4,45
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	400	1,32	-2,41
Etial 177	İlave yok	300	2,25	-7,04
Etial 177	TiB ilavesi	400	1,36	-2,67
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	200	1,89	-5,53
Etial 220	İlave yok	400	1,67	-4,45
Etial 220	TiB ilavesi	200	1,51	-3,58
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	300	1,46	-3,29

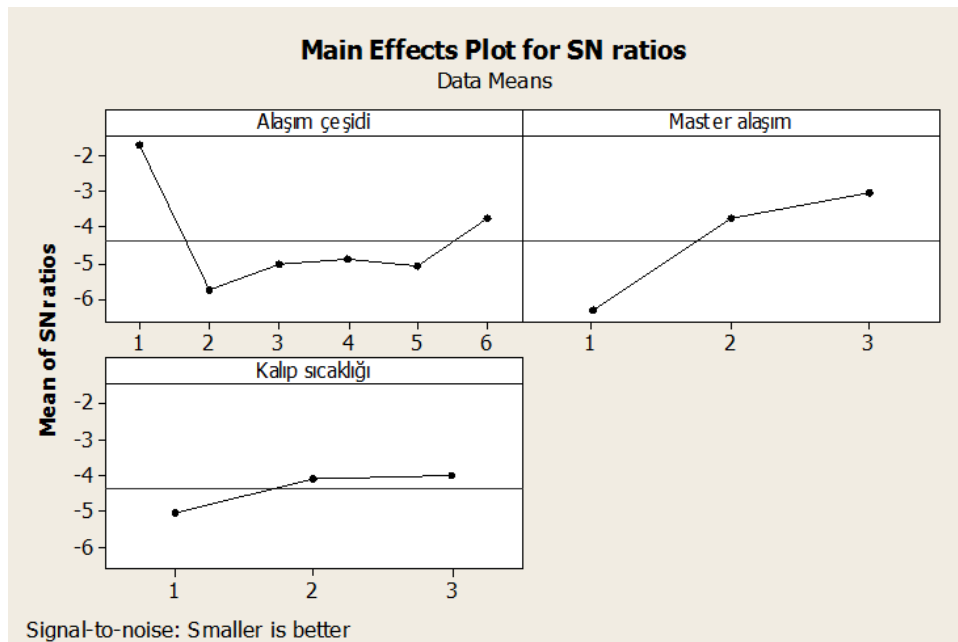
Çalışmada yapılan on sekiz farklı deney parametresine sahip dökümlerde ortalama % gözenek dağılımı %0,89 ile %2,46 arasında dağılım sergilediği ve en düşük porozitenin Etial 110 alaşımına tane inceltici ve modifiye edici ilave edilen ve 400°C kalıp sıcaklığındaki, 3 numaralı dökümde olduğu tespit edilmiş, bu sebeple ayrıca bir doğrulama deneyi yapmaya gerek kalmamıştır.

Taguchi analizinde faktörlerin seviyelerine göre S/N oranları Tablo 5.10'da özetlenmiştir. Tablo 5.10'da da görüldüğü gibi alaşım çeşidinin (A) birinci, master alaşım ilavesinin (B) üçüncü, kalıp sıcaklığının (C) üçüncü seviyesi en düşük en iyi sonuçtur. Etial 110 alaşımı ile, tane inceltici ve modifiye edici master alaşımının ilavesi ve 400 °C ön ısıtma sıcaklığına kokil kalıplara yapılan dökümlerde en düşük gözenek oranları elde edilecektir.

Tablo 5.10. Kokil kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları.

Seviye	A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C: Kalıp Sıcaklığı
1	-1,740	-6,336	-5,058
2	-5,762	-3,759	-4,091
3	-5,043	-3,053	-3,999
4	-4,895	-	
5	-5,081	-	
6	-3,774	-	
Delta	4,022	3,283	1,059
Rank	1	2	3

S/N oranlarının daha iyi anlaşılabilmesi için grafik şeklinde gösterimi Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.2'de görüldüğü alaşımlara tane inceltici ve modifiye edici master alaşımı ilavesi ile gözenek değerleri düşmekte ve kalıp sıcaklığının artması da ortalama % gözenek miktarının azalmasına olumlu katkı yapmaktadır. Alaşımlar içerisinde en düşük gözenek miktarı Etial 110 alaşımında tespit edilmiştir.



Şekil 5.2. Kokil kalıba döküm deneyleri için faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafik gösterimi.

Alüminyum alaşımlarının kokil kalıba döküm deneylerinde oluşan gözenek üzerine kritik katı oranının etkisinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan ANOVA tablosu Tablo 5.11’de verilmiştir. “Smaller is better” karakteristiği için hesaplanan S/N oranları dikkate alınarak hazırlanan ANOVA istatistiksel tablosunda, Alüminyum alaşımlarında porozite oluşumu mekanizması üzerinde en etkili faktörün “master alaşımı ilavesi işlemleri” olduğu görülmektedir. İkinci olarak alaşım çeşidinin etkisi gözlenirken en az etkiye sahip faktör ise kalıp sıcaklığı olmuştur.

Tablo 5.11. Kokil kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri için ANOVA tablosu.

Faktörler	Serbeslik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SST)	Varyans (V)	F Değeri	F Tablo Değeri	P Değeri
A: Alaşım Çeşidi	5	31,324	6,2648	3,35	-	36,3
B: Master Alaşım İlavesi	2	35,838	17,919	9,58	8,649	41,6
C: Kalıp Sıcaklığı	2	4,128	2,064	1,1	-	4,79
Hata	8	14,959	1,86988			
Toplam	17	86,249				

^a %99 güven aralığı

Minumun gözenek eldesi için optimum faktör seviyelerinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan grafikte, optimum deney şartlarının A1B3C3 olduğu görülmektedir. Buna göre minimum porozite seviyesi için Etial 110 alaşımına, 400 °C ön ısıtma sıcaklığına sahip kokil kalıp içerisinde, tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek döküm yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

5.1.3. Alçak basınçlı döküm yöntemi Taguchi deney sonuçları

Alçak basınçlı döküm deney tasarımı için döküm deney faktör ve parametreleri Tablo 5.12’de verildiği gibi belirlenmiştir. Kalıp ön ısıtma sıcaklığının etkisi kokil kalıba döküm yönteminde incelendiği için kalıp sıcaklığı döküm öncesinde 300 °C olarak sabit alınmış ve ayrı bir faktör olarak değerlendirilmemiştir.

Tanımlanan parametrelerin Minitab programında seçilen diziye uygun şekilde girilmesi için programa uygun olarak, kokil kalıba döküm deneylerinde olduğu gibi Tablo 5.8’de verilen Taguchi yöntemi karışık $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal dizisinin kullanımı

uygun bulunmuştur. Alçak basınçlı döküm deneylerinde yapılması gereken döküm deneyleri ve döküm şartları, faktör tanımlarına göre ortalama gözenek ve S/N sonuçları Tablo 5.13’de verilmiştir. Her dökümden 3’er adet yapılarak elde edilen sonuçların ortalaması değerlendirilmiştir.

Tablo 5.12. Alçak basınçlı döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.

Faktörler	Seviyeler					
	I	II	III	IV	V	VI
A: Alaşım Çeşidi	Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220
B: Master Alaşım İlavesi	İlave yok	TiB ilaveli	TiB + Sr ilaveli	-	-	-
C: Basınç Değeri (mbar)	250	500	1000			

Tablo 5.13. Alçak basınçlı döküm yöntemi için yapılan döküm deneyleri, gözenek ve S/N oranı sonuçları.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C : Basınç Değeri (mbar)	Ortalama Gözenek Sonuçları (%)	S/N Oranı
Etial 110	İlave yok	250	1,42	-3,05
Etial 110	TiB ilavesi	500	1,04	-0,34
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	1000	0,88	1,11
Etial 140	İlave yok	500	2,02	-6,11
Etial 140	TiB ilavesi	1000	1,24	-1,87
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	250	1,29	-2,21
Etial 160	İlave yok	1000	1,72	-4,71
Etial 160	TiB ilavesi	250	1,54	-3,75
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	500	1,06	-0,51
Etial 171	İlave yok	250	1,75	-4,86
Etial 171	TiB ilavesi	500	1,47	-3,35
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	1000	1,02	-0,17
Etial 177	İlave yok	500	2,07	-6,32
Etial 177	TiB ilavesi	1000	1,44	-3,17
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	250	1,37	-2,73
Etial 220	İlave yok	1000	1,08	-0,67
Etial 220	TiB ilavesi	250	1,16	-1,29
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	500	1,12	-0,98

Tablo 5.13’de yapılan on sekiz farklı deney parametresine sahip dökümlerde gözenek dağılımı %0,88 ile %2,07 arasında dağılım sergilediği ve en düşük porozitenin Etial 110 alaşımına tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek, 1000 mbar basınç şiddetinde doldurularak dökülen 3 numaralı dökümde olduğu tespit edilmiştir.

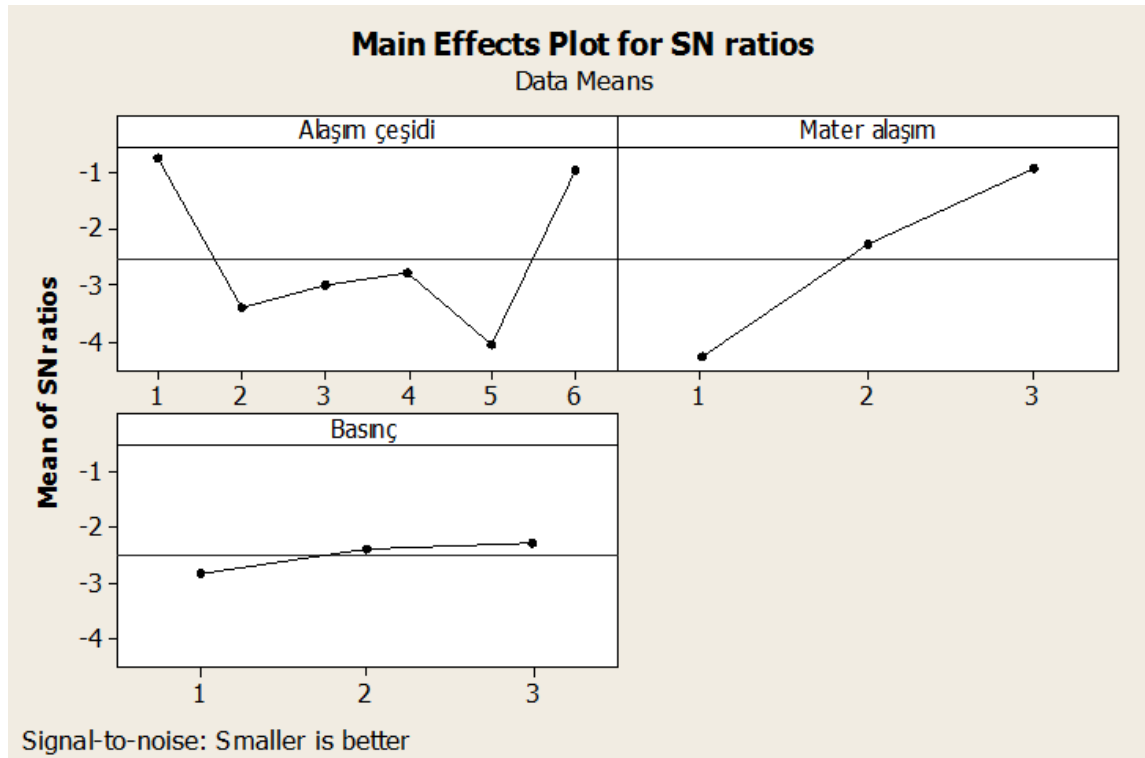
Taguchi analizinde faktörlerin seviyelerine göre S/N oranları Tablo 5.14’de özetlenmiştir. Tablo 5.14’de görüldüğü gibi alaşım çeşidinin (A) birinci, master alaşım ilavesinin (B) üçüncü, basınç şiddetinin (C) üçüncü seviyesi en düşük en iyi

sonuçtur. Etial 110 alaşımı ile tane inceltici ve modifiye edici master alaşımının ilavesi ve 1000 mbar basınç şiddetinde yapılan dökümlerde en düşük gözenek oranları elde edileceği anlaşılmaktadır.

Tablo 5.14. Alçak basınçlı kokil kalıba döküm deneylerinde gözenek değerleri S/N oranları.

Seviye	A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C: Kalıp Sıcaklığı
1	-0,7587	-4,2853	-2,8381
2	-3,3958	-2,2937	-2,3992
3	-2,9890	-0,9164	-2,2581
4	-2,7930	-	-
5	-4,0737	-	-
6	-0,9807	-	-
Delta	3,3150	3,3689	0,5801
Rank	2	1	3

Şekil 5.3’de S/N oranlarının grafik şeklinde gösteriminde de görüldüğü alaşımlara tane inceltici, modifiye edici alaşımı ilavesi ve basınç şiddetinin artışının ortalama %gözenek miktarının azalmasına olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Alaşımlar içerisinde en düşük gözenek miktarı kokil kalıba döküm yönteminde de olduğu gibi Etial 110 alaşımında tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. Alçak basınçlı döküm deneyleri için faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafik gösterim.

Alçak basınçlı döküm deneylerinde oluşan gözenek miktarının belirlenmesi amacı ile hazırlanan ANOVA tablosu Tablo 5.15’de verilmiştir. “Smaller is better” karakteristiği için hazırlanan istatistiksel tabloda, Alüminyum alaşımlarında gözenek oluşumu mekanizması üzerinde en etkili faktörün “master alaşımı ilavesi işlemleri” olduğu, ikinci olarak alaşım çeşidinin etkisi ve en az etkiye sahip faktör ise basınç şiddeti olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5.15. Alçak basınçlı döküm deneylerinde gözenek değerleri için ANOVA tablosu.

Faktörler	Serbeslik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SST)	Varyans (V)	F Değeri	F Tablo Değeri	P Değeri
A: Alaşım Çeşidi	5	26,833	5,3666	3,19		35,4
B: Master Alaşım İlavesi	2	34,427	17,2135	10,22	8,649 ^a	45,4
C: Kalıp Sıcaklığı	2	1,098	0,549	0,33		1,45
Hata	8	13,47	1,68375			
Toplam	17	75,828				

^a %99 güven aralığı

Minumun gözenekli döküm için optimum faktör seviyelerinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan grafikte, optimum deney şartlarının A1B3C3 olduğu görülmektedir. Buna göre minimum gözenek seviyesi için Etial 110 alaşımına, 1000mBar basınçta doldurulan kalıp içerisinde, tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek döküm yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ancak bu şartlarda yapılmış rutin bir deney zaten mevcut olduğundan fazladan bir doğrulama deneyi yapılmasına gerek kalmamıştır.

5.1.4. Döküm yönteminin gözenekliliğe etkisi Taguchi deney sonuçları

Kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde döküm yönteminin etkisinin belirlenmesi için, Tablo 5.16’da verildiği gibi deney tasarımı için faktör ve parametreleri belirlenmiştir. Deneylerde kokil kalıba döküm yöntemi için 300°C kalıp sıcaklığında, alçak basınçlı döküm yöntemi için 300 °C kalıp sıcaklığı, 1000 mbar basınç şiddeti şartlarında yapılan dökümler değerlendirilmiştir.

Döküm deney farkının etkisinin belirlenmesi için kokil ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde olduğu gibi Tablo 5.8’de verilen Taguchi yöntemi karışık $L_{18}(1^6 \times 2^3)$ ortogonal dizisinin kullanımı uygun bulunmuştur. Yapılması gereken döküm deneyleri ve döküm şartları, faktör tanımlarına göre ortalama gözenek ve S/N sonuçları Tablo 5.17’de verilmiştir.

Tablo 5.16. Döküm yöntemi farkının etkisi için döküm deneyleri faktör ve seviyeleri.

Faktörler	Seviyeler					
	I	II	III	IV	V	VI
A: Alaşım Çeşidi	Etial 110	Etial 140	Etial 160	Etial 171	Etial 177	Etial 220
B: Master Alaşım İlavesi	İlave yok	TiB ilaveli	TiB + Sr ilaveli	-	-	-
C: Döküm Yöntemi	Kum Kalıp	Kokil Kalıp	Alçak Basınç			

Tablo 5.17. Döküm yöntemi farkı etkisinin belirlenmesi için yapılan döküm deneyleri, gözenek ve S/N oranları.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C : Döküm Yöntemi	Ortalama Gözenek Sonuçları (%)	S/N Oranı
Etial 110	İlave yok	Kum Kalıp	2,04	-6,19
Etial 110	TiB ilavesi	Kokil Kalıp	1,12	-0,98
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	Alçak Basınç	0,88	1,11
Etial 140	İlave yok	Kokil Kalıp	2,45	-7,78
Etial 140	TiB ilavesi	Alçak Basınç	1,24	-1,87
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	Kum Kalıp	1,08	-0,67
Etial 160	İlave yok	Alçak Basınç	1,72	-4,71
Etial 160	TiB ilavesi	Kum Kalıp	2,04	-6,19
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	Kokil Kalıp	1,54	-3,75
Etial 171	İlave yok	Kum Kalıp	2,50	-7,96
Etial 171	TiB ilavesi	Kokil Kalıp	1,67	-4,45
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	Alçak Basınç	1,02	-0,17
Etial 177	İlave yok	Kokil Kalıp	2,25	-7,04
Etial 177	TiB ilavesi	Alçak Basınç	1,44	-3,17
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	Kum Kalıp	1,02	-0,17
Etial 220	İlave yok	Alçak Basınç	1,08	-0,67
Etial 220	TiB ilavesi	Kum Kalıp	1,34	-2,54
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	Kokil Kalıp	1,46	-3,29

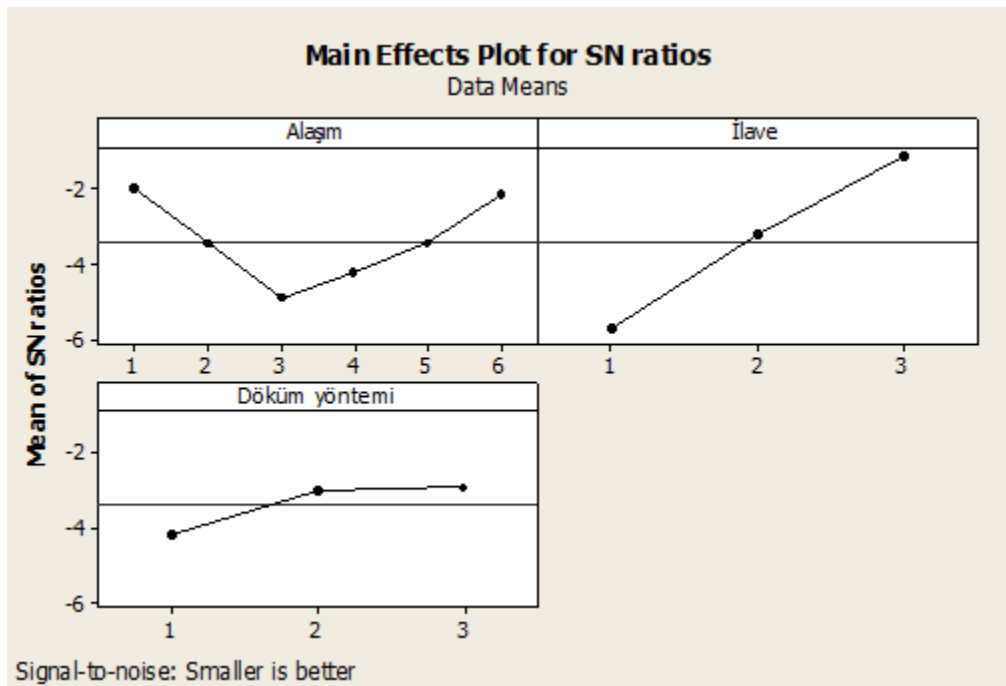
Tablo 5.17’de yapılan on sekiz farklı deney parametresine sahip dökümlerde gözenek dağılımı %0,88 ile %2,50 arasında dağılım sergilediği ve en düşük porozitenin Etial 110 alaşımına tane inceltici ve modifiye edici ilave edilerek, alçak basınçlı döküm yönteminde olduğu tespit edilmiştir. Taguchi analizinde faktörlerin seviyelerine göre S/N oranları Tablo 5.18’de de görüldüğü gibi alaşım çeşidinin (A) birinci, master alaşım ilavesinin (B) üçüncü, döküm yönteminin (C) üçüncü seviyesi en düşük en iyi sonuçtur. Etial 110 alaşımı ile, tane inceltici ve modifiye edici master alaşımının

ilavesi ile alçak basınçlı döküm yönteminde yapılan dökümlerde en düşük gözenek oranları elde edileceği anlaşılmaktadır.

Tablo 5.18. Döküm yöntemi farkının belirlenmesi için yapılan deneylerde gözenek değerleri S/N oranları

Seviye	A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C: Döküm Yöntemi
1	-2,022	-5,726	-4,149
2	-3,440	-3,202	-3,011
3	-4,885	-1,157	-2,924
4	-4,195	-	-
5	-3,461	-	-
6	-2,166	-	-
Delta	2,862	4,570	1,225
Rank	2	1	3

Şekil 5.4’de S/N oranlarının grafik şeklinde gösteriminde de görüldüğü gibi alaşımlara tane inceltici, modifiye edici alaşım ilavesi ile gözenek miktarı düşmektedir. Döküm yöntemleri arasında en fazla gözenek kum kalıba döküm yönteminde olurken, kalıp ısı iletim katsayısı daha yüksek olan kokil kalıba dökümde gözenek miktarı azalmakta ve en az gözenek miktarı ise kokil kalıba dökülen basıncın etkisiyle alçak basınçlı döküm yönteminde olmuştur. Alaşımlar içerisinde en düşük gözenek miktarı kokil kalıba döküm yönteminde de olduğu gibi Etial 110 alaşımında tespit edilmiştir.



Şekil 5.4. Döküm yöntemi farkının gözenek etkisi için faktör ve seviyelerine ait ortalama S/N oranlarının grafiği.

Döküm yöntemi farkının oluşan gözenek miktarına etkisinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan ANOVA tablosu Tablo 5.19’da verilmiştir. “*Smaller is better*” karakteristiği için hazırlanan istatistiksel tabloda, Alüminyum alaşımlarında gözenek oluşumu mekanizması üzerinde en etkili faktörün “master alaşımı ilavesi işlemleri” olduğu, ikinci olarak alaşım çeşidinin etkisi ve en az etkiye sahip faktör ise döküm yöntemi olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5.19. Döküm yöntemi farkının gözenek değerlerine etkisi için ANOVA tablosu.

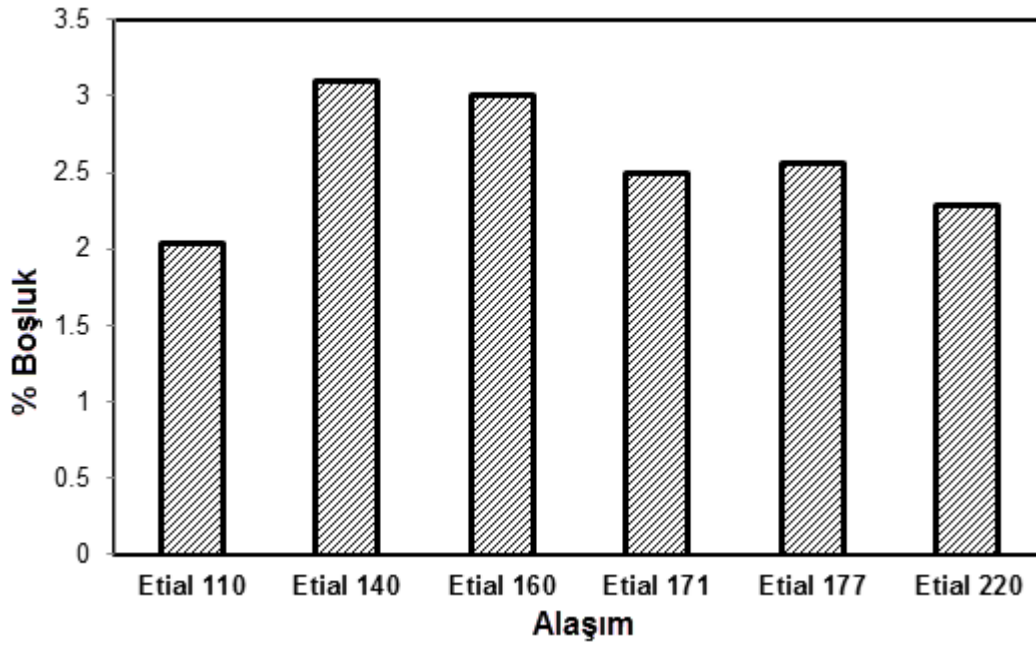
Faktörler	Serbeslik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SST)	Varyans (V)	F Değeri	F Tablo Değeri	P Değeri
A: Alaşım Çeşidi	5	18,761	3,7522	0,6		13,7
B: Master Alaşım İlavesi	2	62,875	31,4375	5,07	4,459 ^a	45,9
C:Döküm Yöntemi	2	5,607	2,8035	0,45		4,1
Hata	8	49,642	6,20525			
Toplam	17	136,884				

^a %95 güven aralığı

5.2. Alaşım Çeşidi Değişiminin Gözenek Oluşumu Üzerinde Etkisi

Döküm deneylerinde, farklı kimyasal bileşimlere sahip ve döküm endüstrisinde yaygınca kullanılan standart alüminyum döküm alaşımları seçilmiştir. Bu alaşımların termal ve fiziksel özellikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Şekil 5.5’de kum kalıba dökümlerin yoğunluk ölçümleri sonucu elde edilen gözenek oluşumunun etkisinin grafik olarak gösterilmiş toplu sonuçları verilmiştir.

Aynı geometri ve döküm şartlarında yapılan dökümlerde, alaşım değişimi Şekil 5.5’deki grafikte de görüldüğü gibi farklı oranda gözenek oluşumuna sebep olmaktadır. Alaşımların içeriğindeki elementlerin ve miktarlarının değişiminden dolayı alaşımların katılaşma aralıkları ve besleme özellikleri değişmektedir. En fazla boşluk oluşumu % 3,1 ile ötektik bileşime sahip Etial 140 alaşımında gözlenirken, en az boşluk oluşumu da yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucu katılaşma aralığı en geniş olan Etial 110 alaşımında ölçülmüştür. Katılaşma aralığının dökümler üzerindeki gözenek oluşumuna etkisi üzerine yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir [120-126, 164].



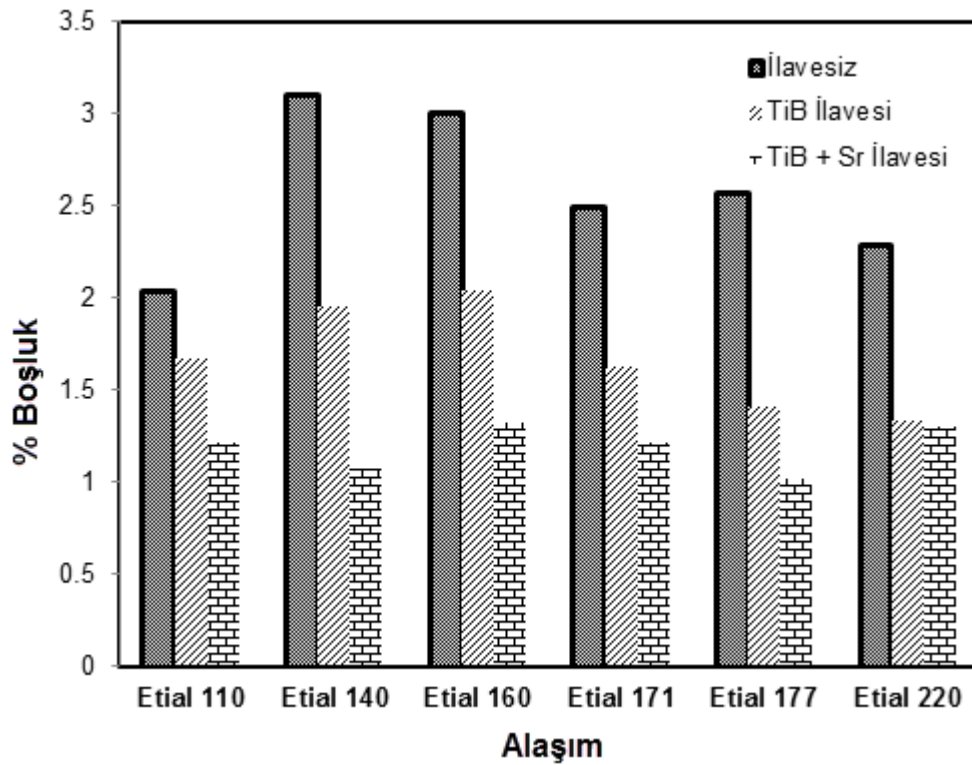
Şekil 5.5. Master alaşımı ilavesiz olarak yapılan dökümlerde alaşım çeşidinin boşluk oluşumu üzerine etkisi.

Kimyasal bileşimleri birbirine yakın Etial 171 ve Etial 177 alaşımlarına ait sonuçlar karşılaştırıldığında gözenek sonuçlarının birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Alaşım elementlerinin beslenme üzerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada Si içeriğinin artması ile birlikte, oluşan gözenek miktarının azaldığı ve beslenebilirlik özelliklerinin arttığı tespit edilmiştir [165]. Aynı çalışmada benzer şekilde Cu oranının artmasıyla birlikte gözenek miktarında azalma olduğu anlaşılmaktadır. Ancak döküm yapısındaki gözenek miktarı bileşimde yer alan bütün elementlerden etkilenmektedir. Manas ve arkadaşları [121] tarafından yapılan bir çalışmada alaşım elementlerinin yapıda oluşturduğu intermetalik bileşiklerinde beslenebilirlik ve döküm yapısında oluşan gözenek miktarı üzerinde etkili olduğu vurgulanmaktadır [121].

5.3. Tane İnceltici ve Modifiye Edici İlavesinin Gözenek Oluşumuna Etkisi

Alüminyum alaşımlarının dökümünde sıvı metal içerisine tane inceltici ve modifiye edici ilavesiyle döküm içerisinde oluşan gözenek miktarının değişiminin belirlenmesi için yapılan deneylere ait gözenek ölçüm sonuçları, kum kalıba döküm için Şekil 5.6'da kokil kalıba döküm için Şekil 5.7'de ve alçak basınçlı döküm yöntemi için Şekil 5.8'de sırasıyla verilmiştir. Şekil 5.6'da da kum kalıba döküm deney

sonuçlarında görüldüğü gibi bütün alaşımlarda sıvı metale tane inceltici ilavesiyle döküm içerisindeki gözenek miktarı azalma göstermiştir. Tane inceltici ile birlikte modifiye edici ilavesi de döküm içerisindeki gözenek miktarının azalmasına olumlu yönde katkı sağlamaktadır. İlavesiz olarak yapılan dökümlerde ortaya çıkan boşluk değeri % 3 seviyelerine kadar ulaşırken, tane inceltici ilavesi ile boşluk değeri % 2 seviyelerinin altına kadar inmiştir. Modifiye edici ilavesi de bu etkiye olumlu yönde katkı yaparak toplam gözenek miktarını % 1,5 seviyelerinin altına kadar çekmiştir.



Şekil 5.6. Kum kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumuna etkisi.

Elde edilen deney sonuçlarından tane inceltici ve modifiye edicinin dökümlerin beslenebilirliğini artırarak oluşan gözenek miktarını azalttığı anlaşılmaktadır. Sıvı metale tane inceltici ilavesiyle sıvı metal içerisinde çok sayıda $TiAl_3$, TiB_2 ve AlB_2 gibi çekirdeklenme merkezi oluşturacak partiküller bulunmaktadır [40, 41]. Sıvı içerisinde dağılmış durumdaki bu küçük partiküller heterojen çekirdeklenme merkezlerini oluşturarak ilavesiz dökümlere göre çok daha ince taneli bir döküm yapısı sağlanmaktadır [34]. Ancak tane inceltici ilavesi olmadığı durumda çekirdeğin oluşup katılaşmanın başlaması için daha yüksek bir alt soğuma oluşması gerekmektedir [166, 167]. Ayrıca tane inceltici ilavesiz durumda çekirdeklerin

oluşması için ısıнын kalıp duvarından dışarıya atılması ve gerekli alt soğuma için gerekli süre daha uzun olacağından katılaşmanın tamamlanması daha geç olmaktadır. Bu sebeplerle oluşan dentritler büyümek için zaman bulacak ve besleme daha az katı oranlarında iken sonlanacaktır. Konuyla ilgili yapılan çalışmalarda tane inceltici ilavesiyle dökümlerde gözenek miktarının azaldığı, tane inceltme ile dentritlerin ve tane boyutunun küçüldüğü ve dentritler arasında kalan sıvının beslemesinin tane inceltmesiz dökümlere kıyasla daha uzun süre devam ettiği rapor edilmiştir [30, 63-65, 88, 141-142]. Tane inceltme işlemi ile dökümlerde beslemenin devam edebileceği kritik katı oranını artmaktadır. Kritik katı oranının yüksek olması döküm parçanın daha uzun süre beslenebileceği anlamına gelmektedir. İnce, eş eksenli ve homojen taneli bir yapıda kendilerine taneler arasında yer bulan gözeneklerin boyutları da tane boyutunun küçülmesine bağlı olarak daha küçük boyutlu ve homojen bir dağılım sergiledikleri rapor edilmiştir [32-39].

Sıvı metal içerisine tane incelticiye ilave olarak katılan modifiye edici master alaşımı ilavesiyle döküm içerisindeki ötektik Si yapısının lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüşümü sağlanmıştır. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'deki kum, kokil ve alçak basınçlı döküm deney sonuçlarında görüldüğü gibi özellikle tamamen ötektik Si içeren Etial 140 alaşımı başta olmak üzere modifikasyon işlemi ile döküm yapısındaki gözenek oluşumu azalmıştır. Etial 220 alaşımı kimyasal bileşimi dikkate alındığında içerisinde Si elementi içermemesinden dolayı Al10Sr modifiye edici ilavesinden etkilenmemiştir. Diğer alaşımlar içerdikleri Si içeriğine bağlı olarak farklı seviyelerde modifikasyon işleminden gözenegin azalması yönünde etkilendiği anlaşılmaktadır. Bu durumun modifiye edilmiş ve edilmemiş alaşımların katılaşmasındaki temel farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Modifiye edilmemiş ve yavaş soğuma hızlarında silisyum levhalar şeklinde katılaşırken, modifikasyon ile silisyum levhasal yapıdan çubuk yapıya dönüşür. Modifikasyon işlemi ile ötektik içindeki silisyum kristallerinin büyümesini yavaşlatarak, silisyum-alüminyum büyüme hızlarını dengeler ve bu şekilde ince bir lamel yapı oluşturur [66, 72].

Modifiye işleminin alaşımın katılaşma şartlarına ve gözenek oluşumuna etkisinin araştırıldığı bir çalışmada ise modifiye edici ilave edilmemiş yapılarda oluşan gözeneklerin küçük, düzensiz ve dentritler arası bölgelerde salkımlı şekilde olduğu

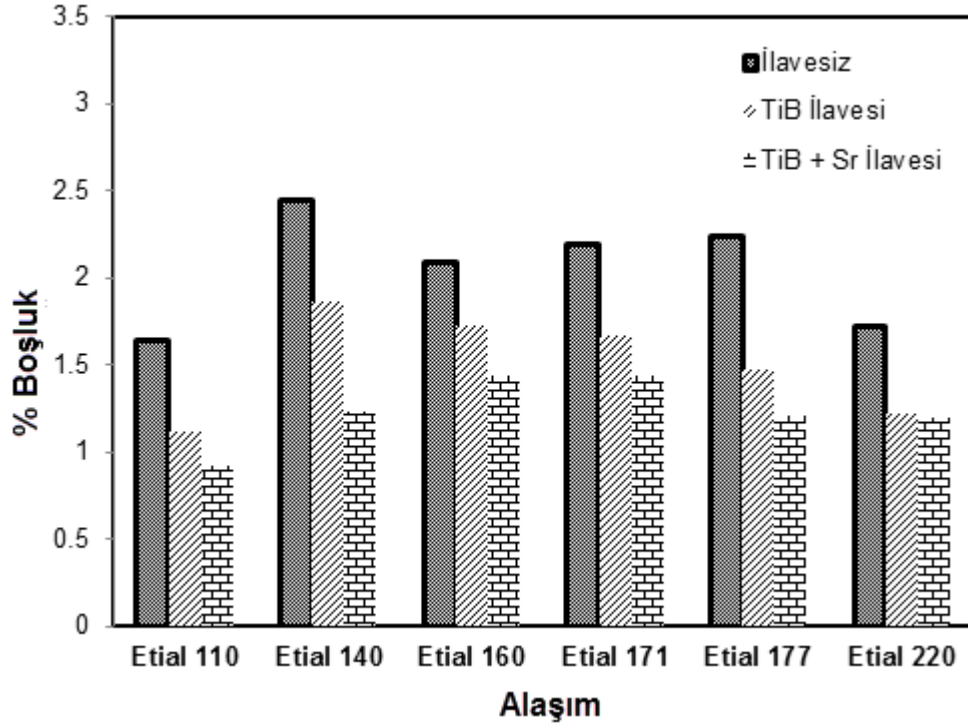
gözenlenmiştir [68]. Fakat modifiye işlemi uygulanmış yapıda gözeneklerin daha çok yuvarlak biçimli ve dentritler arası bölgelerde olduğu belirtilmiştir [69]. Ayrıca farklı bir çalışmada, Na ve Sr ilaveleri ile porozite ve döküm kusurlarının azaldığı tespit edilmiştir [75].

Şekil 5.7’de kokil kalıba döküm yönteminde tane inceltici ve modifiye edici ilavelerin gözenek oluşuma etkisi için döküm numunelerden Arşimet prensibine göre yapılan yoğunluk ölçüm sonuçları verilmiştir. Sonuçlar kum kalıba döküm yönteminde de olduğu gibi bütün alaşımlarda tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumunun azalmasına olumlu etkisine işaret etmektedir. Ölçülen değerler incelendiğinde kum kalıba nazaran kokil kalıp döküm deney sonuçlarının daha az gözenek içerdiği görülmektedir. Bu durum, kokil kalıp ısı iletim katsayısının kum kalıba kıyasla daha fazla olmasından dolayı katılaşmanın daha kısa sürede tamamlanmasından kaynaklanmaktadır. Katılaşmanın başlaması ve büyümenin devam edebilmesi için sıvı metal ısını kalıp duvarlarından atmosfere aktarmakta ve kalıp malzemesinin ısı iletim katsayısının fazla olması daha hızlı katılaşma sağlamaktadır. Hızlı katılaşma çekirdeklenmeyi kolaylaştırmakta ve dolayısıyla metalik kalıplarda alaşıma tane inceltici ilave edilmese bile kum kalıba döküme göre daha ince taneler meydana gelmesine yardımcı olmaktadır [166, 167]. Hızlı katılaşma şartlarında döküm yapısı daha ince taneli bir yapı ile sonuçlanmaktadır. Bu durumda dentritler arası besleme bölgesindeki sıvı akışı kolaylaşmakta ve daha kısa dentritik örgü oluşmaktadır. Böylece dentritler arasında sıvı akış mesafesini kısalarak, beslenebilirlik kapasitesi artmakta ve gözenek oluşumu azalmaktadır.

Şekil 5.7’deki kokil kalıba döküm deneyi sonuçları incelendiğinde tane inceltici ve modifiye edici ilavesinin gözenek miktarının azaltmasından kum kalıpta olduğu kadar etkili olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi ise kokil kalıpta ilavesiz döküm şartlarında, kum kalıba göre daha ince taneli yapının olmasıdır. Bu durumu Kısaoglu [131] kokil kalıba ve kum kalıba döküm deneyleri sonuçlarıyla karşılaştırarak rapor etmiştir.

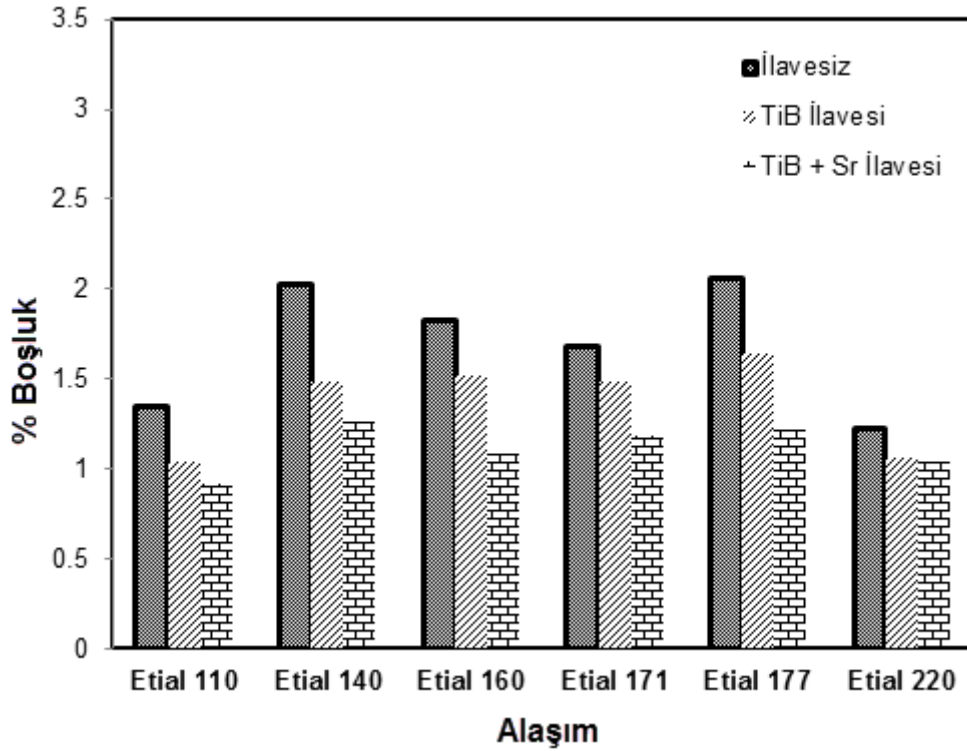
Modifiye edici ilavesinin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, Sr ilavesinin sadece Si kristallerinin ötektik dönüşüme etkileri dışında α - Al

dentritlerinin yapısını da olumlu yönde değiştirdiği ve daha da artan soğuma hızlarında etkinin daha fazla olduğu rapor edilmiştir [70].



Şekil 5.7. Kokil kalıba döküm deneylerinde tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumuna etkisi.

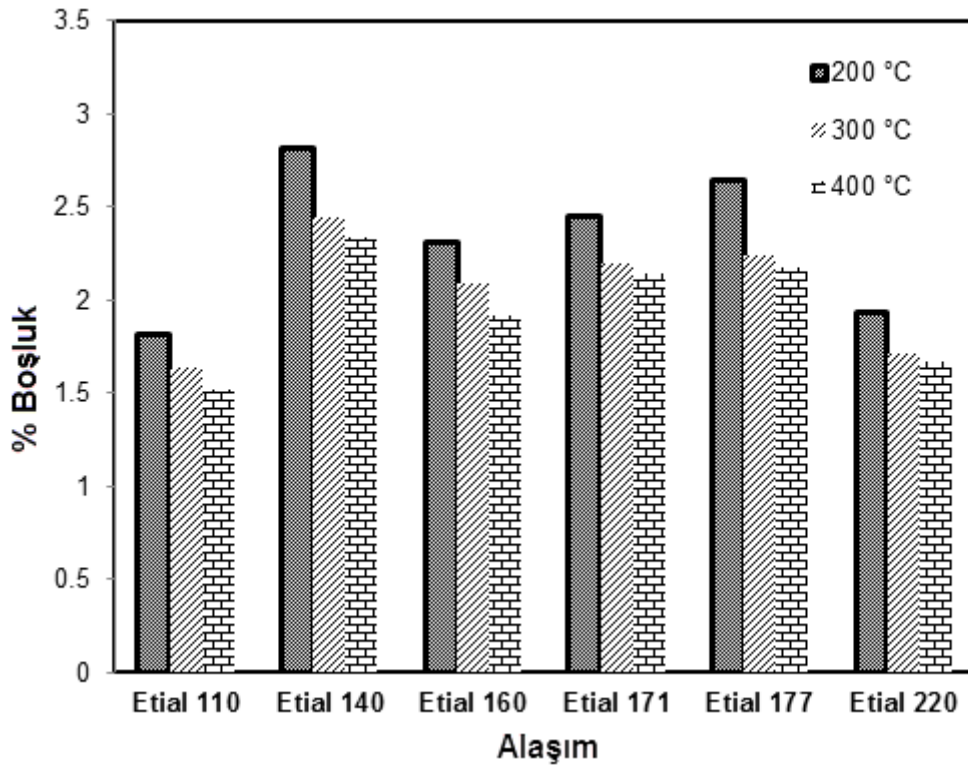
Şekil 5.8’de alçak basınçlı döküm yöntemi ile yapılan deneylerde tane inceltici ve modifiye edicinin etkisi görülmektedir. Sonuçlar diğer döküm yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla uyumludur. Tane inceltici ve modifiye edici ilavesiyle dökümlerde alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak değişen oranlarda gözenek değerlerinde azalma mevcuttur. Alçak basınçlı döküm yönteminde kokil kalıbın ısı transfer katsayısına bağlı olarak ve uygulanan basıncın etkisiyle diğer döküm yöntemlerine göre daha az gözenek değerleri ölçülmüştür.



Şekil 5.8. Alçak basınçlı döküm deneylerinde tane inceltici ve modifiye edicinin gözenek oluşumuna etkisi.

5.4. Kokil Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığının Gözenek Oluşumu Üzerinde Etkisi

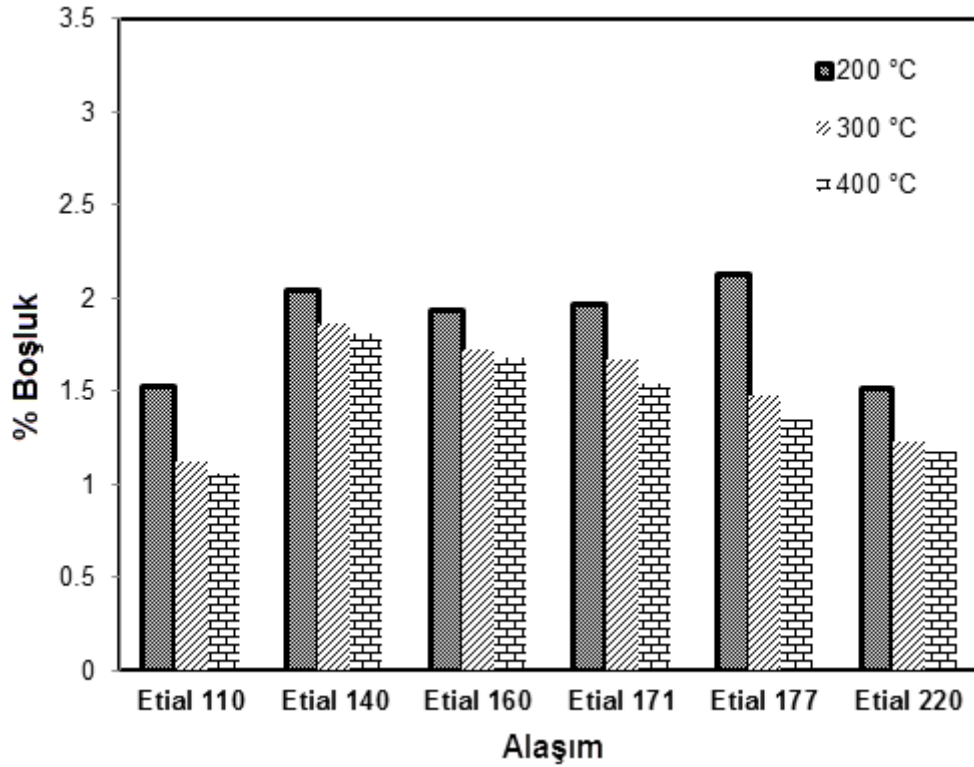
Kokil kalıba döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etkisinin incelenmesi için yapılan deneylerden alınan sonuçlar Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekil 5.9’da tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz dökümlere ait sonuçlar mevcuttur. Şekil 5.9’daki şekilde de görüldüğü gibi, kalıp ön ısıtma sıcaklığının artırılmasıyla birlikte dökümlerdeki gözenek miktarı azalmaktadır. 200 °C kalıp sıcaklığında en fazla gözenek içeren Etial 140 alaşımı kalıp sıcaklığının artmasıyla birlikte gözenek miktarı sırasıyla % 2,84’den %2,29 seviyelerine kadar düşmüştür. Ancak bu azalma miktarı daha düşük gözenek seviyelerinde oransal olarak azalmaktadır. Etial 110 alaşımında 200 °C kalıp ön ısıtma sıcaklığında % 1,82 gözenek mevcutken, kalıp sıcaklığı 400°C’de yapılan dökümlerde gözenek miktarı %1,52 olarak ölçülmüştür. Ayrıca şekil 5.9’da dikkat çeken bir diğer husus da kalıp sıcaklığının 200 °C’den 300 °C’ye artırılmasıyla dökümdeki toplam gözenek miktarı ortalama % 0,3 seviyelerinde azalırken, 300 °C’den 400 °C’ye sıcaklık artışında daha az etki tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz olarak kokil kalıba döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etkisi.

Şekil 5.10’da tane inceltici ilavesiyle kokil kalıba yapılan dökümlerde kalıp sıcaklığının etkisiyle gözenek oluşumu değişimi verilmiştir.

Kalıp sıcaklığının gözenek oluşumu üzerine etkisi tane inceltici ilave edilerek dökülen deney numuneleri ve ilavesiz olarak yapılan deneylere ait sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Kalıp sıcaklığının artmasıyla birlikte döküm içlerindeki gözenek miktarı azalma göstermektedir. Elde edilen gözenek miktarları tane inceltici ilavesine de bağlı olarak 200 °C kalıp sıcaklığında dökülen Etial 110 alaşımında %1,53 iken 400 °C de gözenek miktarı %1,06 seviyelerine kadar düşmüştür. Diğer alaşımlarda da Şekil 5.10’da görüldüğü gibi kalıp sıcaklığının artmasına bağlı olarak gözenek miktarı azalma göstermiştir.

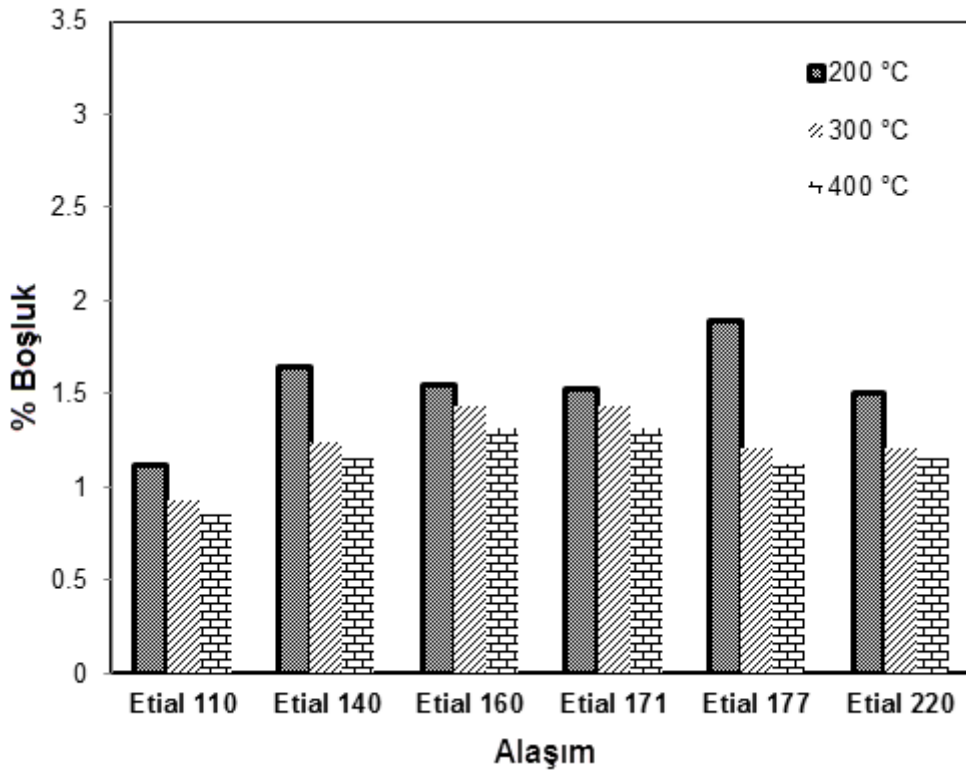


Şekil 5.10. Tane inceltici ilaveli kokil kalıba döküm deneylerinde ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etki.

Şekil 5.11’de tane inceltici ve modifiye edici ilavesiyle kokil kalıba dökümü yapılan alaşımların kalıp ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşum üzerinde etkisine ait sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ilavesiz ve sadece tane inceltici ilavesiyle yapılan dökümlerde olduğu gibi kalıp sıcaklığının artırılması az da olsa gözenek oluşumunun azalmasına etki etmiştir. Ölçülen gözenek miktarı ortalama %0,3 seviyesinde bir azalmaya sebep olmuştur.

Kalıp sıcaklığının artması ile birlikte besleme kabiliyetinin artması ve döküm parçalarda ölçülen gözenek miktarının azalması besleme yolunun daha uzun süre açık kalması ile ilişkilendirilebilir. Artan kalıp sıcaklıklarında besleme yolu daha uzun süre açık kalarak besleyicideki sıvı metalin döküm parçaya ulaşmasına yardımcı olmaktadır. Bu sebeple gözenek miktarı azalmıştır. Kalıp malzemesinin metal olması ve ısı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı katılaşma hızlı bir şekilde ilerlemiş ancak sıcaklık artışına bağlı olarak besleme yolu daha uzun süre açık kaldığı düşünülmektedir. Kalıp sıcaklığının döküm içerisinde oluşan gözenek oluşumuna etkisini incelemek için yapılan çalışmada Kısaoglu kalıp sıcaklığının artması ile gözenek miktarının azaldığını tespit etmiştir [130]. Ayrıca Şekil 4.60’da

döküm kesit yüzey resimlerinden de görüleceği üzere kalıp sıcaklığının artmasına bağlı olarak döküm içerisinde oluşan gözenegin yeri besleme boğazına yaklaşmıştır. Bu da besleme boğazının daha geç katılaştığının bir göstergesidir. Bilindiği gibi çekme boşlukları en son katılaştan bölgelerde oluşmaktadır [168].



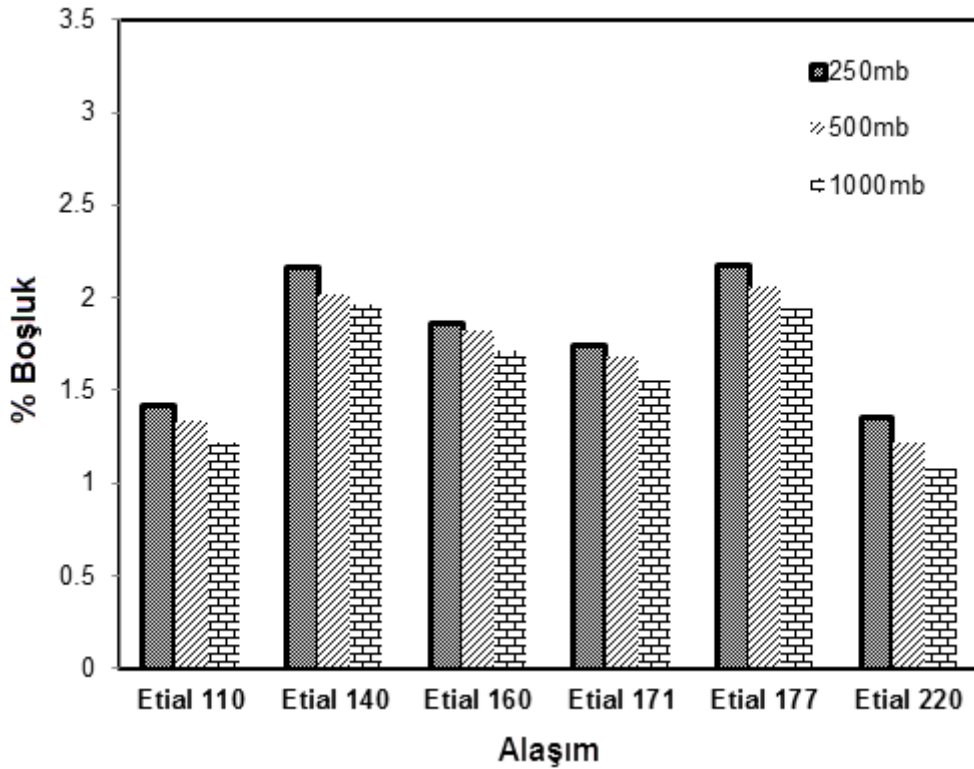
Şekil 5.11. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli olarak kokil kalıba döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumuna etkisi.

5.5. Kalıp Dolum Basıncının Gözenek Oluşumu Üzerinde Etkisi

Alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının döküm gözenek yapısı üzerine etkisini incelemek için yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de verilmiştir. Şekil 5.12’de tane inceltici ve modifiye edici ilavesiz dökümlere ait sonuçlar mevcuttur.

Alçak basınçlı döküm parçalara ilavesiz, tane inceltici ilaveli ve tane inceltici ile birlikte modifiye edici ilaveli olarak yapılan deney sonuçları incelendiğinde bütün alaşımlar için doldurma basıncının artması ile birlikte gözenek miktarının da azaldığı tespit edilmiştir. Azalma miktarı ortalama % 0,2 civarında olduğu anlaşılmaktadır.

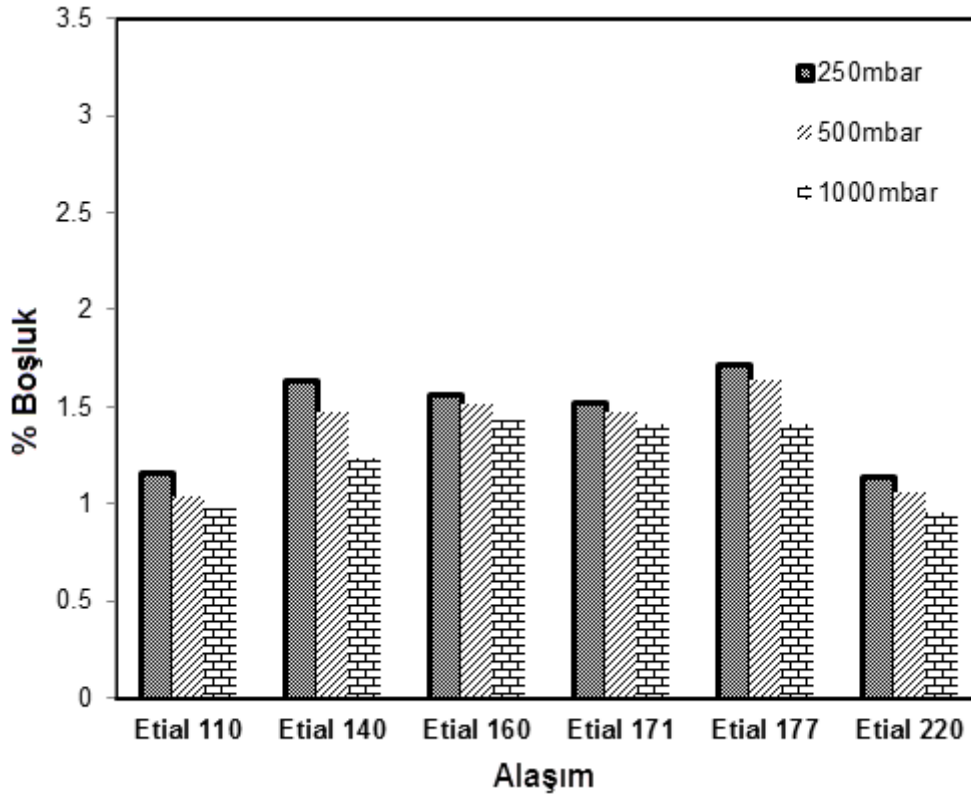
Etial 140 alaşımında 250 mbar basınçta %2,16 gözenek mevcutken basıncın artırılmasıyla gözenek miktarı %1,96 seviyesine kadar düşmüştür. Etial 140 alaşımı için Şekil 5.12’de görüldüğü gibi tane inceltici ilavesiyle 1000 mbar basınçta %1,24 gözenek tespit edilirken, modifiye edicinin de ilavesiyle bu değer %1,16 seviyelerine kadar azalmıştır. Bütün alaşımlar için bu durum paralellik göstermektedir. Şekil 5.13’de tane inceltici ilavesiyle yapılan alçak basınçlı döküm deneylerinde basınç etkisinin gözenek oluşumuna etkisi için ölçülen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5.12. Master alaşımı ilavesiz olarak dökülen alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının gözenek oluşumuna etkisi.

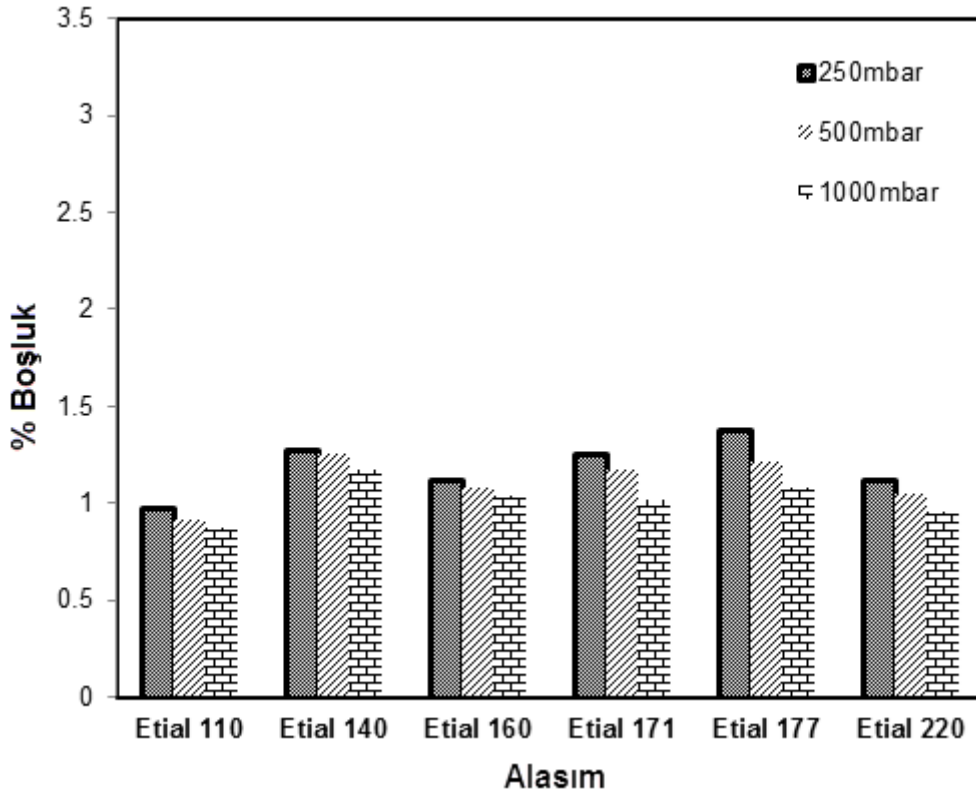
Şekil 5.13’de verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi basınç artışı beslemenin daha uzun süre devam etmesine neden olduğu için gözenek oluşum miktarını azalmıştır. Bunun sebebinin ise; beslemenin kesileceği kritik katı oranı noktası değerinin uygulanan basınç etkisiyle daha da gecikmesi olduğu düşünülmektedir. Katılaşma; sıvı metalin kalıp duvarlarına ısısını iletmesi ve tane inceltici ilavesiyle oluşan heterojen çekirdek merkezlerinde çekirdeklenme oluşur ve dentritlerin büyümesiyle devam eder. Dentritlerin büyüyerek kararlı hale geldiği kritik katı oranı noktasına kadar besleme devam eder. Basınç etkisiyle büyüyen dentritler dejenere olarak

kararlı hale gelmesi gecikir. Böylece daha uzun süre dentritlerin kararlı hale gelip sıvı akışına müsaade etmediği kritik noktaya ulaşılması gecikir ve besleme daha uzun süre devam eder. Katılaşma esnasında oluşan dentritlerin dejenere olması sonucu daha iyi beslenme ve daha ince taneli yapının oluştuğu tespit edilen çalışmalar mevcuttur [169].



Şekil 5.13. Tane İnceltici ilaveli olarak dökülen alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının gözenek oluşumuna etkisi.

Şekil 5.14’de tane inceltici ve modifiye edicinin birlikte ilave edilerek yapılan alçak basınçlı döküm deneylerinde basınç etkisinin gözenek oluşumuna etkisi verilmiştir. Şekil 5.14’de ki sonuçlar master alaşım ilavesiz ve sadece tane inceltici ilavesi ile dökülen numunelere ait sonuçlarla uyum göstermektedir. Basıncın artmasıyla beslemenin daha uzun süre devam ettiği anlaşılmaktadır. Alaşımlara ait bütün döküm sonuçları değerlendirildiğinde en az gözenek miktarına tane inceltici ve modifiye edici ilavesi ile yapılan alçak basınçlı döküm deneylerinde ulaşıldığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise kokil kalıbın ısı iletim katsayısının yüksek olması ve basıncın etkisiyle bozulan dentritik yapıdan dolayı daha ince taneli yapının oluşmasıdır.



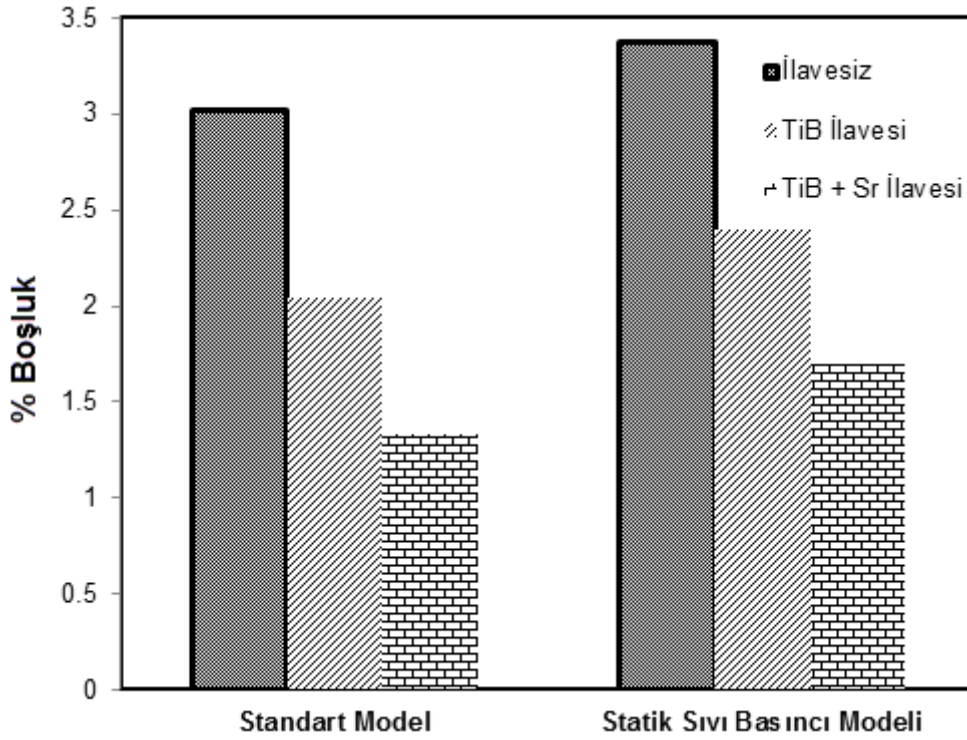
Şekil 5.14. Tane inceltici ve modifiye edici ilaveli olarak dökülen alçak basınçlı döküm deneylerinde dolum basıncının gözenek oluşumuna etkisi.

5.6. Statik Sıvı Basıncı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Statik sıvı basıncının döküm içyapısında porozite oluşumuna etkisinin incelenmesi için yapılan deneylerden elde edilen gözenek ölçüm sonuçları Şekil 5.15’de verilmiştir. 3.Bölümde, Deneysel çalışmalarda da anlatıldığı gibi statik sıvı basıncı için tasarım yapılırken döküm deneylerindeki model esas alınmış ve bu modelle karşılaştırma yapılacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15’de Etial 160 alaşımı ile kum kalıba dökülen model tasarımı ve statik sıvı basıncı modeli döküm numune sonuçlarına ait gözenek sonuçları mevcuttur.

Şekil 5.15’de verilen sonuçlardan görüldüğü gibi, standart model tasarımı ile tane inceltici ilavesiz olarak yapılan dökümlerde döküm numunede %3,01 gözenek ölçülürken statik sıvı basıncı modeli ile yapılan dökümlerde %3,37 değerinde gözenek tespit edilmiştir. Tane inceltici ilavesi sonrası gözenek oranları benzer oranlarda azalmıştır. Standart model tasarımı için gözenek miktarı %2,04 iken statik sıvı basıncı modelinde bu değer % 2,39 seviyesindedir. Modifiye edici ilavesi ile

gözenek miktarı bir miktar daha azalarak standart model de %1,33 ve statik model döküm numunelerinde ise %1,69 seviyelerine kadar düşüş göstermiştir. Her iki model tasarımında da tane inceltici ve modifiye edici ilavesi gözenek miktarının azalmasını sağlamıştır. Bu durum, katılaşma esnasında tane boyutunun küçülerek besleme yolunun daha uzun süre beslemeye izin vermesi ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

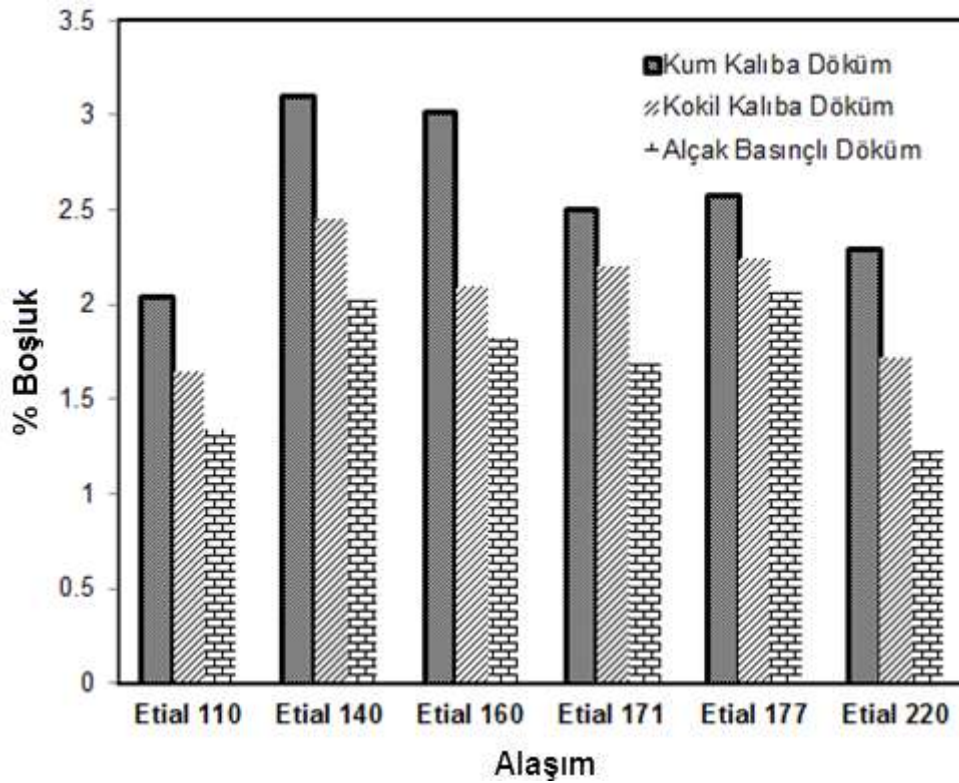


Şekil 5.15. Etial 160 alaşımı ile statik sıvı basıncı deneyi için kum kalıba döküm numuneleri gözenek ölçümü.

Etial 160 alaşımı ile aynı deney şartlarında statik sıvı basıncı modeli ile yapılan döküm numune sonuçları ile karşılaştırıldığında standart modele nazaran daha fazla porozite ortaya çıktığı dikkat çekmektedir. Bunun sebebinin besleyicinin daha yüksek olmasından dolayı model üzerinde döküm olarak adlandırılan bölgenin sıcak noktasına daha zor ulaşması ve besleme yolunun daha uzun olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kum kalıba döküm yönteminde olduğu gibi mastır alaşımları ilavesiyle porozite miktarı azalmasına rağmen aynı şartlardaki döküm numuneler karşılaştırıldığında statik sıvı basıncı modeli numunesinde daha fazla porozite çıkmıştır.

5.7. Döküm Yöntemi Farkının Porozite Üzerine Etkisi

Kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde döküm yönteminin etkisinin belirlenmesi için deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.16'da mastır alaşımı ilavesiz olarak dökülen alaşımlara ait gözenek ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.16. Döküm yöntemi farkının gözenek oluşumu üzerinde etkisi.

Şekil 5.16'da, kokil kalıba döküm yöntemi için 300°C kalıp sıcaklığında, alçak basınçlı döküm yöntemi için 300 °C kalıp sıcaklığı, 500 mbar basınç şiddeti şartlarında yapılan döküm gözenek sonuçları verilmiştir. Döküm numunelere ait gözenek sonuçları incelendiğinde, % 3,1 ile %1,22 arasında değişen değerlerde dağılım tespit edilmiştir. Her bir alaşım için en yüksek gözenek değerleri kum kalıba döküm deneylerinde gözlenirken, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm deneylerinde gözenek miktarının azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum kalıp malzemesinin ısı transfer katsayısının metal kalıpta, kum kalıba nazaran daha fazla

olması ve hızlı katılaşmadan dolayı daha ince taneli yapı elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Hızlı katılaşma sonucu daha ince taneli yapıya sahip dökümlerde besleme yolu daha uzun süre açık kalarak parçanın daha uzun süre beslenmesini sağlamaktadır [166, 167]. Alçak basınçlı döküm yönteminde hem kalıp malzemesinin metal olması hem de basıncın etkisiyle gözenek miktarı minimum seviyelere düşmektedir. Bunun sebebinin ise; uygulanan basınç etkisiyle dentritlerin kararlı hale gelip beslemenin kesileceği noktanın gecikmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.8. Model Kriter Çalışmaları

Alüminyum alaşımlarının katılaşmasında yarı katı bölge geçirgenliğinin tespit edilmesi üzerine yapılan deneyler sonucunda parametre ve seviyelerinin farklı olmasından dolayı her bir döküm yöntemi için ayrı model kriterler geliştirilmiştir. Model kriterler deneylerden elde edilen verilerin minitab programına girilmesi ve programda regresyon analizleri yardımıyla elde edilmiştir.

5.8.1. Kum kalıba döküm için model kriter belirlenmesi

Kum kalıba döküm deneylerinde deney parametreleri, alaşım çeşidi ve master alaşımı ilave çeşidi şeklinde belirlenmişti. Bu deney parametre ve faktör seviyelerine bağlı olarak Minitab programından belirlenen regresyon analizine bağlı olarak model kriter geliştirilmiştir. Kum kalıp için geliştirilen kriter eşitlik 5.2’de verilmiştir.

$$\text{Ortalama \%KKO değeri} = 22,1889 - 0,0857143 \alpha + 11,9167 \beta \quad (5.2)$$

α = Alaşım çeşidi β = Master alaşım ilavesi

Alaşım çeşidi için;

Etial 110 = 1

Etial 140 = 2

Etial 160 = 3

Etial 171 = 4

Etial 177 = 5

Etial 220 = 6

Master Alaşım ilavesi;

İlavesiz döküm = 1

Tane inceltici ilavesi = 2

Tane inceltici ve modifiye edici ilavesi = 3 değerleri girilecektir.

Bölüm 3.Deneyel Çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi, döküm deneylerinden elde edilen numunelerden yapılan ölçümlerle numuneye ait % gözenek miktarı belirlenmişti. Değişen KKO oranı değerlerinde yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen gözenek değerlerine göre Tablo 4.12’de verildiği gibi deney şartlarına ait KKO değerleri tespit edilmişti. Tablo 5.20’de Taguchi deneysel tasarım metoduna uygun olarak yapılan kum kalıba döküm deney parametrelerinde deneysel olarak belirlenen ve model kriter ile hesaplanan KKO değerleri verilmiştir.

Tablo 5.20. Kum kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	KKO Değerleri (%)		
		Deneysel Belirlenen	Kriter ile Hesaplanan	Sapma
Etial 110	İlave yok	34	33,25	0,75
Etial 110	TiB ilavesi	50	45,17	4,83
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	57	57,08	0,08
Etial 140	İlave yok	30	32,39	2,39
Etial 140	TiB ilavesi	46	44,31	1,69
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	55	56,22	1,22
Etial 160	İlave yok	31	31,53	0,53
Etial 160	TiB ilavesi	50	43,45	6,55
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	58	55,37	2,63
Etial 171	İlave yok	32	30,68	1,32
Etial 171	TiB ilavesi	50	42,59	7,41
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	57	54,51	2,49
Etial 177	İlave yok	31	29,82	1,18
Etial 177	TiB ilavesi	51	41,74	9,26
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	56	53,65	2,35
Etial 220	İlave yok	33	28,96	4,04
Etial 220	TiB ilavesi	51	40,88	10,12
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	51	52,80	1,80

Tablo 5.20’de verilen KKO değerleri eşleştirildiğinde kriterde bazı uyumsuzluklar tespit edilmiştir. Özellikle TiB ilavesi ile yapılan deney sonuçlarındaki uyumsuzluk oldukça dikkat çekmektedir. Bilindiği gibi Taguchi deneysel tasarımında faktörlerinden master alaşım seviyesi ilavesiz, TiB ilavesi ve TiB ile Sr elementlerinin ilavesinin birlikte yapıldığı 3 seviyede gerçekleştirilmiştir. Ancak deney sonuçları incelendiğinde bu seviyelerin etkilerinin kriter formülde belirtildiği gibi orantılı olarak değişmediği TiB ilavesinin KKO oranı üzerine Sr ilavesine nazaran daha fazla etki ettiği anlaşılmaktadır.

Tablo 5.20’de ilavesiz ve TiB ile Sr elementlerinin birlikte ilave edildiği deney sonuçlarındaki uyumsuzlukların sebebinin alaşım çeşidine bağlı değişen sabit sayılardan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Taguchi deneysel tasarımında alaşımlar kodlarına göre sıralanmış ve termal özellikleri göz ardı edilmiştir. Ancak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda KKO değerinin değişiminde alaşımın katılma aralığı değişiminin en önemli faktör olduğu gözlenmişti. Bu sebeple alaşımlara ait kodlar katılma aralıkları baz alınarak 0 ile 5 arasında kademeli olarak revize edilmiştir. Bu revizyonlara göre Eşitlik 5.2’de verilen kriterde alaşım ve master alaşımı seviyeleri için belirlenen sabitler aşağıdaki gibi revize edilmiştir.

Alaşım çeşidi için;

$$\text{Etial 110} = 1$$

$$\text{Etial 140} = 5$$

$$\text{Etial 160} = 2$$

$$\text{Etial 171} = 3$$

$$\text{Etial 177} = 2$$

$$\text{Etial 220} = 1$$

Master Alaşım ilavesi;

$$\text{İlavesiz döküm} = 1$$

$$\text{Tane inceltici ilavesi} = 2,4$$

$$\text{Tane inceltici ve modifiye edici ilavesi} = 3 \text{ değerleri girilecektir.}$$

Tablo 5.21’de revize edilen sabit sayılara göre deneysel olarak belirlenen ve model kriter ile hesaplanan KKO değerleri verilmiştir.

Tablo 5.21. Revize değerlere göre kum kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	KKO Değerleri (%)		
		DeneySEL Belirlenen	Kriter ile Hesaplanan	Sapma
Etial 110	İlave yok	34	33,25	0,75
Etial 110	TiB ilavesi	50	49,93	0,07
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	57	57,08	0,08
Etial 140	İlave yok	30	29,82	0,18
Etial 140	TiB ilavesi	46	46,50	0,50
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	55	53,65	1,35
Etial 160	İlave yok	31	32,39	1,39
Etial 160	TiB ilavesi	50	49,07	0,93
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	58	56,22	1,78
Etial 171	İlave yok	32	31,53	0,47
Etial 171	TiB ilavesi	50	48,22	1,78
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	57	55,37	1,63
Etial 177	İlave yok	31	32,39	1,39
Etial 177	TiB ilavesi	51	49,07	1,93
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	56	56,22	0,22
Etial 220	İlave yok	33	33,25	0,25
Etial 220	TiB ilavesi	51	49,93	1,07
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	51	57,08	6,08

Tablo 5.21’de verilen deneysel olarak belirlenen ve Eşitlik 5.2’de verilen kritere göre hesaplanan KKO değerleri karşılaştırıldığında mükemmele yakın uyum olduğu görülmektedir. Ancak Etial 220 alaşımının TiB ve Sr ilavesi deneyinde uyumsuzluk söz konusudur. Bu durum Etial 220 alaşımında ötektik silisyum bulunmaması ve Sr elementi ile modifikasyon işleminden etkilenmemesinden kaynaklanmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda Etial 220 alaşımının Sr modifikasyonu uygulamasının olmamasından dolayı bu durum problem teşkil etmemektedir.

5.8.2. Kokil kalıba döküm için model kriter belirlenmesi

Kokil kalıba döküm deneylerinde parametreler alaşım çeşidi, master alaşım seviyesi ve kalıp ön ısıtma sıcaklığıdır. Bu parametre ve faktör seviyelerine bağlı olarak geliştirilen kriter Eşitlik 5.3’de verilmiştir.

$$\text{Ortalama \%KKO değeri} = 27,9111 - 0,371429 \alpha + 10 \beta + 0,3333 \gamma \quad (5.3)$$

α = Alaşım çeşidi
 β = Master alaşım ilavesi
 γ = Kalıp ön ısıtma sıcaklığı

Eşitlik 5.3’de verilen kriterde; α = alaşım çeşidi, β = master alaşım ilavesi ve γ = kalıp ön ısıtma sıcaklığı için girilmesi gereken sabit değerler aşağıda verilmiştir. Bu sabit değerlerin kum kalıba döküm için model kriter geliştirilmesi çalışmalarında açıklandığı gibi revize edilmesi gerekmiş ve aşağıda revize sonrası değerler verilmiştir.

Alaşım çeşidi için;

Etial 110 = 1	Etial 140 = 5	Etial 160 = 2
Etial 171 = 3	Etial 177 = 2	Etial 220 = 1

Master Alaşım ilavesi;

İlavesiz döküm = 1

Tane inceltici ilavesi = 2,4

Tane inceltici ve modifiye edici ilavesi = 3

Kalıp Ön ısıtma sıcaklığı;

200 °C = 1 300 °C = 2 400 °C = 3 değerleri girilecektir.

Tablo 5.22’de Taguchi deneysel tasarım metoduna uygun olarak yapılan kokil kalıba döküm deney parametrelerinde deneysel olarak belirlenen ve revize edilen sabit sayılara göre model kriter ile hesaplanan KKO değerleri verilmiştir.

Tablo 5.22’de verilen karşılaştırmalarda göre deneysel olarak belirlenen ve kriter göre hesaplanan KKO değerlerin oldukça uyumlu sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Kum kalıp döküm kriter çalışmalarında olduğu gibi Etial 220 alaşımının TiB ve Sr ilavesi deneyindeki uyumsuzluk ilgili alaşımda Sr elementi ile modifikasyon işleminin etki etmemesinden kaynaklanmaktadır. Bunun haricinde maksimum %2,50 oranında farkla uyumlu sonuçlar görülmektedir.

Tablo 5.22. Revize değerlere göre kokil kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C : Kalıp Sıcaklığı (°C)	KKO Değerleri (%)		
			Deneyisel Belirlenen	Kriter ile Hesaplanan	Sapma
Etial 110	İlave yok	200	36	37,87	1,87
Etial 110	TiB ilavesi	300	53	52,21	0,79
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	400	60	58,54	1,46
Etial 140	İlave yok	300	35	36,72	1,72
Etial 140	TiB ilavesi	400	46	48,05	2,05
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	200	53	54,39	1,39
Etial 160	İlave yok	400	38	38,17	0,17
Etial 160	TiB ilavesi	200	52	51,50	0,50
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	300	57	57,83	0,83
Etial 171	İlave yok	200	33	35,13	2,13
Etial 171	TiB ilavesi	300	52	51,46	0,54
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	400	58	57,80	0,20
Etial 177	İlave yok	300	34	35,83	1,83
Etial 177	TiB ilavesi	400	52	52,17	0,17
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	200	53	55,50	2,50
Etial 220	İlave yok	400	37	38,54	1,54
Etial 220	TiB ilavesi	200	50	51,87	1,87
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	300	52	58,21	6,21

5.8.3. Alçak Basıncılı Döküm İçin Model Kriter Belirlenmesi

Alçak basınçlı döküm deneylerinde parametreler alaşım çeşidi, master alaşım seviyesi ve kalıp doldurma basınç şiddetidir. Bu parametre ve faktör seviyelerine bağlı olarak geliştirilen kriter Eşitlik 5.4’de verilmiştir.

$$\text{Ortalama \%KKO değeri} = 31,4889 - 0,219048 \alpha + 9,6667 \beta + 0,13162 \Delta \quad (5.4)$$

α = Alaşım çeşidi

β = Master alaşım ilavesi

Δ = Kalıp doldurma basıncı

Eşitlik 5.4’de verilen kriterde; α = alaşım çeşidi, β = master alaşım ilavesi ve Δ = kalıp doldurma basıncı için girilmesi gereken revize sonrası sabit değerler aşağıda verilmiştir.

Alaşım çeşidi için;

Etial 110 = 1

Etial 140 = 5

Etial 160 = 2

Etial 171 = 3

Etial 177 = 2

Etial 220 = 1

Master Alaşım ilavesi;

İlavesiz döküm = 1

Tane inceltici ilavesi = 2,4

Tane inceltici ve modifiye edici ilavesi = 3

Kalıp Ön ısıtma sıcaklığı;

200 °C = 1

300 °C = 2

400 °C = 3 değerleri girilecektir.

Tablo 5.23’de Taguchi deneysel tasarım metoduna uygun olarak yapılan alçak basınçlı kokil kalıba döküm deney parametrelerinde deneysel olarak belirlenen ve revize edilen sabit sayılara göre model kriter ile hesaplanan KKO değerleri verilmiştir.

Tablo 5.23’de verilen karşılaştırmalarda alçak basınçlı döküm yöntemi için geliştirilen kriterden elde edilen KKO değerlerinin deneysel sonuçlardan belirlenen değerlerle genelde uyumlu olduğu belirlenmiştir. Kum kalıba döküm ve kokil kalıba döküm yöntemleri için geliştirilen kriter çalışmalarında olduğu gibi Etial 220 alaşımının TiB ve Sr ilavesi deneyindeki uyumsuzluk ilgili alaşımda Sr elementi ile modifikasyon işleminin etki etmemesinden kaynaklanmaktadır. Tablo 5.23’de verilen karşılaştırma sonuçlarına göre Etial 140, Etial 171 ve Etial 177 alaşımlarının master alaşımı ilavesiz yapılan dökümlerinde KKO değerlerinin kriter ile deneysel sonuçları arasında %1 - 3,50 arasında farklar tespit edilmiştir. Bunun haricinde deneysel olarak belirlenen ve kriter ile hesaplanan KKO değerleri arasında %1 altında sapma ile farkla uyumlu sonuçlar görülmektedir.

Tablo 5.23. Revize değerlere göre kokil kalıba döküm deneyi KKO değerleri karşılaştırması.

A: Alaşım Çeşidi	B: Master Alaşım İlavesi	C : Basınç Değeri (mbar)	KKO Değerleri (%)		
			Deneyisel Belirlenen	Kriter ile Hesaplanan	Sapma
Etial 110	İlave yok	250	40	41,07	1,07
Etial 110	TiB ilavesi	500	55	54,73	0,27
Etial 110	TiB + Sr ilavesi	1000	61	60,66	0,34
Etial 140	İlave yok	250	37	39,32	2,32
Etial 140	TiB ilavesi	500	54	53,99	0,01
Etial 140	TiB + Sr ilavesi	250	55	57,53	2,53
Etial 160	İlave yok	1000	40	41,11	1,11
Etial 160	TiB ilavesi	250	53	54,38	1,38
Etial 160	TiB + Sr ilavesi	500	59	60,31	1,31
Etial 171	İlave yok	250	36	38,63	2,63
Etial 171	TiB ilavesi	500	54	54,31	0,31
Etial 171	TiB + Sr ilavesi	1000	58	60,23	2,23
Etial 177	İlave yok	500	37	39,98	2,98
Etial 177	TiB ilavesi	1000	55	54,65	0,35
Etial 177	TiB + Sr ilavesi	250	56	58,18	2,18
Etial 220	İlave yok	1000	40	41,33	1,33
Etial 220	TiB ilavesi	250	54	54,60	0,60
Etial 220	TiB + Sr ilavesi	500	57	60,53	3,53

Kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı kokil kalıba döküm yöntemleri için geliştirilen kriterlerden hesaplanan KKO değerlerinin ticari dökümlerde kullanılması mümkündür. Ayrıca geliştirilen model kriterin KKO değerlerinin hesaplanması için SolidCast ve diğer ticari simülasyon yazılımlarına girilerek kullanılmasına uygundur.

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Etial 110, Etial 140, Etial 160, Etial 171, Etial 177 ve Etial 220 alüminyum döküm alaşımlarının katılaşması sırasında değişik döküm koşullarında yarı katı bölgenin besleme davranışı ve kritik katı oranı (KKO) olarak tanımlanan besleme eşiği incelenmiştir. Çalışmada, döküm deneyleri için özel tasrlanmış döküm kalıpları ve kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve alçak basınçlı kokil kalıba döküm yöntemleri kullanılmıştır. Her bir döküm için KKO değerleri gerçek dökümlerden ölçülen gözenek değerlerinin 3B modelleme teknikleri (simülasyon) ile elde edilen verilerin eşleştirilmesi ile bulunmuştur. Dökümler her bir alaşımın külçe analizi, TiB ilave edilmiş hali ve TiB+Sr ilave edilmiş hali olmak üzere üç farklı versiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Kokil kalıba dökümlerde üç farklı kalıp ön ısıtma sıcaklığı kullanılmıştır. Değişken sayısını sınırlı tutmak amacı ile alçak basınçlı kokil döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığı sabit tutularak üç farklı kalıp doldurma basıncı kullanılmıştır. Bu çalışmanın genel sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1- Dökümlerde tane inceltme işleminin etkisinin kontrolü ve uygunluğunun tespit edilebilmesi için ALCAN standart tane inceltme testleri uygulanmıştır. Test sonuçları en iyi tane inceltme etkisinin alaşımlara ağırlıkça % 0,2 Ti ilavesi ve 20 dk bekletme süresi ile elde edilebildiğini göstermiştir.

2- Döküm deneylerinde modifiye edici olarak ağırlıkça %10 Sr içeren Al10Sr mastır alaşımı kullanılmıştır. Ötektik silisyum içeren döküm alaşımlarında en iyi sonucun alaşımlara ağırlıkça % 0,2 Sr ilavesi ile elde edildiği tespit edilmiştir.

3- Döküm kesitlerinde oluşan gözeneklerin sadece çekinti kaynaklı oluşması ve gaza dayalı porozite oluşumunun minimize edilmesi amacı ile sıvıda en etkili gaz giderme işleminin yöntem ve biçiminin belirlenmesi için ön deneyler yapılmıştır. Vakum

altında katılaştırma (RPT) ve Arşimet yoğunluk ölçümleri en etkili gaz gidermenin azot gazının grafit lans yardımı ile 5 dakika boyunca sıvı metale verilmesi ile elde edildiğini göstermiştir. Alınan sonuçlar ticari gaz giderme tabletlerinin azot ile yıkama kadar etkili olmadığını göstermiştir.

4- Dökümlerde gözenek ölçümleri ve hesaplamaları, X-ray radyografi, Arşimet yoğunluk ölçümü ve kesitten inceleme yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tüm dökümlerde besleme yetersizliğine dayalı çekinti boşluklarının oluştuğunu göstermiştir. Genel olarak, aynı döküm yönteminde ilavesiz alaşım ile üretilen döküm numunelerde gözenek oranı en yüksek değerde iken TiB +Sr ilave edilen alaşımlar ile üretilen numunelerde gözenek değeri en az olarak ölçülmüştür. Sadece TiB ilave edilen dökümlerde ki gözenek oranı ise bu değerlerin arasında ölçülmüştür. Bu sonuç, tane inceltirilmiş dökümlerde tane inceltilmemiş olanlara göre yarı katı bölge üzerinden beslenebilirliğin daha uzun sürede gerçekleştiğini göstermiştir.

5- Uygulanan döküm yöntemlerine göre aynı alaşım ile elde edilen çekinti boşluğu değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek çekinti oranının kum kalıba dökülen dökümlerde ve en düşük çekinti boşluğunun ise alçak basınçlı kokil döküm ile elde edilen dökümlerde olduğu gözlenmiştir. Kokil kalıba döküm yöntemi elde edilen çekinti değerlerinin ise alçak basınçlı kokil döküm değerlerine daha yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, kokil kalıplarda döküm üzerinde oluşan yüksek soğuma hızlarının ve buna bağlı olarak yarı katı bölgede gelişen yüksek ısıl gradyanın yarı katı mesafesini ve beslemeyi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

6- Gözenek ölçüm sonuçları dökümlerde oluşan gözenek oranının alaşımın katılma aralığı ile ters orantılı ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur. En yüksek gözenek oranı en dar katılma aralığına sahip Etial 140 (ötektik Al-Si) alaşımı ile yapılan dökümlerden ölçülmüştür. Bunu karşılık en düşük gözenek değerleri ise kullanılan alaşımlar içinde en yüksek katılma aralığına sahip Etial 110 alaşımı ile yapılan dökümlerden ölçülmüştür.

7- Kokil kalıba yapılan döküm deneylerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının artmasının döküm içyapısında gözenek oranını azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum daha sıcak

kalıplara yapılan dökümlerde kalıp-döküm ara yüzey temasının daha yüksek olması ve buna bağlı olarak ara yüzey ısı transferinin daha yüksek değerde gerçekleşmiş olabileceği ve yüksek soğuma hızı ve yüksek gradyan etkisi ile besleme etkisinin daha uzun süre devam etmesi ile ilişkilendirilmiştir.

8- Alçak basınçlı kokil döküm yöntemi ile elde edilen gözenekleşme, normal kokil dökümlere kıyasla bir miktar daha az çıkmıştır. Bunun en muhtemel nedeninin alçak basınçlı dökümde metal akışının daha sakin ve yavaş olmasından dolayı türbülans ve oksit inklüzyonlarının olumsuz etkilerinin daha az olması olarak değerlendirilmiştir.

9- Statik sıvı metal basıncı değişiminin, döküm içyapısında gözenek oluşumuna ve kritik katı oranı üzerindeki etkisini incelemek üzere, farklı basınç oluşturacak şekilde model ve kalıp tasarımı yapılarak Etial 160 alaşımı ile kum kalıba döküm deneyleri yapılmıştır. Ancak, yüksek statik sıvı basıncının döküm içerisinde oluşan porozite miktarına olumlu bir etkisi gözlenmemiştir. Bunun sebebinin besleyicinin daha yüksek olmasından dolayı model üzerinde döküm olarak adlandırılan bölgenin sıcak noktasına daha zor ulaşması ve besleme yolunun daha uzun olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

10- Bu çalışmada döküm içyapısında oluşan gözenek oranlarından çok bu gözenekleşme üzerinden hesaplanan KKO değerlerinin hesaplanması hedeflenmiştir. Bu nedenle SolidCast döküm simülasyon yazılımı ile fiziksel dökümler için farklı KKO oranları girilerek modellemeler yapılmış ve modelleme sonuçlarından elde edilen gözenek değerleri gerçek dökümlerden ölçülen gözenek değerleri ile eşleştirilmiştir. Böylece her bir döküm şartı için geçerli bir KKO değeri bulunmuştur.

11- Kum kalıba döküm deneylerinde kullanılan alaşımlar için KKO değerleri %30 ile %58 arasında değişim göstermiştir. İlavesiz olarak yapılan dökümlerde KKO değerleri %30-34 civarında iken tane inceltici ilavesiyle bu oran % 46-51 seviyelerine kadar yükselmiştir. Tane inceltici ilavesi ile birlikte modifiye edici master alaşımı da ilave edildiğinde bütün alaşımlarda %55-58 KKO değeri ile maksimum seviyeye çıkmıştır.

12- Kokil kalıba döküm deneylerinde kullanılan alaşımlar için KKO değerleri % 33 ile % 60 arasında değişim göstermiştir. İlavesiz alaşımlar ile yapılan dökümlerde KKO değerleri % 33-38 civarında iken tane inceltici ilavesiyle % 46-53 seviyelerine kadar yükselmiştir. Tane inceltici ilavesi ile birlikte modifiye edici master alaşımı da ilave edildiğinde KKO değeri bütün alaşımlarda % 55-60 oranı ile maksimum seviyeye çıkmıştır.

13- Alçak basınçlı döküm deneyleri için tespit edilen KKO değerlerinin %37 ile %61 arasında değiştiği gözlenmiştir. İlavesiz olarak yapılan dökümlerde KKO değerleri %37-40 civarında iken tane inceltici ilavesiyle %53-55 seviyelerine kadar yükselmiştir. Tane inceltici ilavesi ile birlikte modifiye edici master alaşımı da ilave edildiğinde bütün alaşımlarda KKO değeri %58-61 ile maksimum seviyeye çıkmıştır. Kalıp ön ısıtma sıcaklığının 300 °C de sabit tutularak yapılan deneylerde doldurma basıncının da beslemenin daha uzun süre devam etmesinde etkili olduğu ve KKO oranındaki değişimin basınç artışına bağlı olarak %1-3 arasında artış gösterdiği tespit edilmiştir.

14- Yarı katı bölge geçirgenliğinin (Besleme zamanı veya KKO değeri) her bir döküm yöntemi ve alaşım kondüsyonu için değişimini hesaplamak üzere regresyon analizleri yardımıyla aşağıda verilen model kriterler geliştirilmiştir.

a-Kum kalıba döküm yöntemi için alaşım çeşidi ve master alaşım seviyesine bağlı olarak geliştirilen kriter aşağıdaki gibidir;

$$\text{Ortalama \% KKO değeri} = 22,1889 - 0,0857143\alpha + 11,9167\beta$$

α = Alaşım çeşidi

β = Master alaşım ilavesi

b- Kokil kalıba döküm yöntemi için, alaşım çeşidi, master alaşım seviyesi ve kalıp ön ısıtma sıcaklığına bağlı olarak geliştirilen kriter aşağıdaki gibidir;

$$\text{Ortalama \% KKO değeri} = 27,9111 - 0,371429\alpha + 10\beta + 0,3333\gamma$$

α = Alaşım eşidi
 β = Master alaşım ilavesi
 γ = Kalıp n ısıtma sıcaklığı

c- Alçak basınçlı döküm yöntemi için, alaşım çeşidi, master alaşım seviyesi ve kalıp doldurma basıncına bağlı olarak geliştirilen kriter aşağıdaki gibidir;

$$\text{Ortalama \% KKO değeri} = 31,4889 - 0,219048\alpha + 9,6667\beta + 0,13162\Delta$$

α = Alaşım eşidi
 β = Master alaşım ilavesi
 Δ = Kalıp doldurma basıncı

15- Döküm geometrilerinin modellemesi ve KKO değerlerinin tespiti için bu çalışmada ticari bir simülasyon paketi olan SolidCast döküm simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan alüminyum döküm alaşımları ve döküm yöntemleri için hesaplanan KKO değerlerinin diğer ticari dökümlerde model kriter olarak kullanılması mümkündür. Elde edilen KKO değerlerinin de benzer şekilde diğer ticari simülasyon yazılımlarına girilerek kullanılması mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] CAMPBELL, J., Castings Practice The 10 Rules of Castings, Butterworth Heinemann, Oxford., United Kingdom, 9-113, 2004.
- [2] GALLO, R., Circumstances of the Automotive Industry Impact on Aluminium Foundries, American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, paper 10.004, page 1 of 17, AFS Proceedings, 2010.
- [3] ALAN, S., Alüminyum Raporu, Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği, s. 30, 2008.
- [4] AYDIN, B., AA2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşleminin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, s: 129, 2002.
- [5] DWIGHT, J., Aluminium design and construction, Taylor and Francis, ABD, 2002.
- [6] CHEN, W.F., LUI, E.M., Handbook of structural engineering, CRC Press, ABD, 2005.
- [7] <http://www.afsa.org.za/aluminium-and-alloys.asp>, Erişim Tarihi : 16.05.2014
- [3] BROOKS, C.R., Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, ASM, Ohio, USA, 115-137, 1984.
- [9] YILMAZ, M., Türkiye Alüminyum Sektörünün 2023 Projeksiyonu, Türk Döküm Dergisi, Sayı 29, Sayfa, 62-69, Ekim-Kasım-Aralık 2013.
- [10] MAYR, E., Global Aluminium FRP Industry, 4th Aluminium Outlook Conference, Chicago 2011.
- [11] Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği Raporu, 2011.
- [12] Metals Handbook, Vol.2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM International Handbook Committee, 400, Metals Park, OH, ASM International, 1990.

- [13] KISSEL J.R., Ferry, R.L., Aluminum structures, a guide to their specifications and design, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [14] <http://www.etialuminyum.com/>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [15] HIGGINS R.A., Engineering metallurgy part I: applied physical metallurgy, 6th ed., Arnold, Bristol, 1999.
- [16] WANG E.R., HUI, X.D., WANG, S.S., ZHAO, Y.F., CHEN, G.L., Improved mechanical properties in cast Al-Si alloys by combined alloying of Fe and Cu, Materials Science and Engineering A, 527, 7878-7884, 2010.
- [17] SVERDLIN, A., Introduction to aluminum, Editors: Totten G. E., Mackenzie D. S., Handbook of aluminum, volume 1, physical metallurgy and processes, Marcel Dekker Inc., New York, 1-31, 2003.
- [18] LIA, R.X., LIA, R.D., ZHAOB, Y.H., HEC, L.Z., LIA, C.X., GUANC, H.R., HU, Z.Q., Age-hardening behavior of cast Al-Si base alloy, Materials Letters, 58, 2096-2101, 2004.
- [19] WARMUZEK, M., Aluminum silicon casting alloys atlas of microfractographs, ASM International, Ohio, 2004.
- [20] BAKER, H., Introduction to alloy phase diagrams, Editor: Kottcamp E. H., ASM metals handbook volume 3, alloy phase diagrams, 6th ed., ASM International, Ohio, 25-383, 1992.
- [21] SUN, Y., Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, s. 89, 1998.
- [22] DAVIS, J.R., Aluminum and aluminum alloys. ASM International, ABD, 1993.
- [23] HAN, N.R., BIAN, X.F., LI, Z.K., MAO, T., WANG, C.D., Effect of Si on the microstructure and mechanical properties of the Al-4.5%Cu alloys, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 19, 405-410, 2006.
- [24] ZOLOTOREVSKY, V.S., BELOV, N.A., GLAZOFF, M.V., Casting aluminum alloys, Elsevier, London, 2007.
- [25] LI, J.F., ZIQIAO, Z., NA, J., CHENGYU, T., Localized corrosion mechanism of 2xxxseries Al alloy containing S(Al₂CuMg) and (Al₂Cu) precipitates in 4.0% NaCl solution at pH 6.1, Materials Chemistry and Physics, 91, 325-359, 2005.

- [26] KARAKULAK, E., Al-Si-xCu Alaşımların Dökümü ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, s.126, 2013.
- [27] SMITH, W.F. , Çeviri, Kınıkoğlu, N. G., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayıncılık Dağıtım, (sf: 109 – 158), İstanbul, 2001.
- [28] ASKELAND, D.R. , Çeviri, Erdoğan, M. , Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1, Nobel Yayın Dağıtım, (sf: 128 - 154), Ankara, 1998.
- [29] ARAN, A., Metal Döküm Teknolojisi, Birsen Yayınevi, (90 - 100), İstanbul, 1999.
- [30] ÇOLAK, M., Etial 160 Alaşımının Dökümünde Makro Ve Mikro Porozite Oluşumunun Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya, s.110, 2009.
- [31] LONDON & Scandinavian Metallurgical Co. “A Guide To Melt Treatment in the Alluminium Foundry”, 1998.
- [32] BIROL, Y., Grain refining aluminium foundry alloys, Proc. IIAC, p. 1-12, 2012.
- [33] BIROL, Y., Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme, 6.Uluslararası Döküm Kongresi, İstanbul, 13 Eylül 2012.
- [34] SIGWORTH, G.K., KUHN, T.A., Refinement of Aluminium Casting Alloys, AFS Transactions, Vol.115, pp.1-12, 2007.
- [35] FAN, Z., WANG, Y., ZHANG, Y., QIN, T., ZHOU, X.R., THOMPSON, G.E., PENNYCOOK, T., HASHIMOTO, T., Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system, Acta Materialia 84, 292-304, 2015.
- [36] WANG, X., LIU, Z., DAI, W., HAN, Q., On the Understanding of Aluminum Grain Refinement by Al-Ti-B Type Master Alloys, Metallurgical and Materials Transactions B, DOI: 10.1007/s11663-014-0252-3, 2014.
- [37] IBARRA, D.G., Control of Grain Refinement of Aluminum-Silicon Alloys by Thermal Analysis, Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, Montreal Canada 1-38, 1999.
- [38] LONDON & Scandinavian Metallurgical Co., Recent Advances in Understanding the Mechanism of Alluminium Grain Refinement by TiBAl Master Alloys, 1996.

- [39] LONDON & Scandinavian Metallurgical Co., Grain Refinement of Aluminium - Silicon Foundry Alloys, 1998.
- [40] CIBULA, A., The Mechanism of Grain Refinement of Sand Castings in Aluminum Alloys, J. Inst. Met. Vol. 76, p. 321-360, 1949.
- [41] MURTY, B.S., KORI, S.A., CHAKRABORTY, M., Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying, Int. Mater. Rev. 47, 3-29, 2002.
- [42] MCCARTNEY, D.G., Grain refining of aluminium and its alloys, Int. Mater. Rev. Vol. 34, p. 247-260, 1989.
- [43] HARDMAN, A., HAYES, F.H., Al-Ti-B Grain refining alloys from Al, B₂O₃ and TiO₂, Mater. Sci. Forum Vol. 217-222, p. 247, 1996.
- [44] SIGWORTH, G. K., The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System, Metallurgical Transactions, Vol. 15A, pp. 277-282, 1984.
- [45] DAHLE, A.K., Nucleation and grain refinement, Mater. Sci. Forum, Vol. 619, p. 287-293, 2010.
- [46] Nonferrous Materials Technology Development Centre Kanchanbagh Hyderabad "Grain Refinement of Light Alloys" 500, India, 2008.
- [47] BACKERUD, L., How Does a Good Grain Refiner Work?, Light Metal Age, pp. 6-12, 1983.
- [48] EASTON, M.A., STJOHN, D.H., The Partitioning of Titanium During Solidification of Aluminum Alloys, Mater. Sci. Technol., Vol. 16 (9), pp. 993-1000, 2000.
- [49] FLEMINGS, M.C., Solidification Processing, McGraw-Hill Series In Materials Science and Engineering, New York, 219-229, 1974.
- [50] BİROL, Y., Effect of solute Mg on grain size of aluminium alloys, Mater. Sci. Tech. Vol. 28, p. 924-927, 2012.
- [51] ÇOLAK, M., KAYIKCI, R., AlTiB Master Alaşımı İlavesinin Etial160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009.
- [52] BİROL, Y., AlB₃ Master Alloy to Grain Refine AlSi10Mg and AlSi12Cu, Materials Institute, Marmara Research Centre, TUBITAK, Kocaeli, 2011.

- [53] COLE, G.S., Cissé, J., KERR, H.W., BOLLING, G.F., Grain Refinement in Aluminum and Aluminum Alloys, AFS Trans, Vol.80, pp. 211-218, 1972.
- [54] BIROL, Y., Performance of AlTi5B1 and AlB3 in Grain Refining Aluminium Foundry Alloys Materials Institute, Marmara Research Centre, TUBITAK, Kocaeli, 2011.
- [55] LU, H.T., WANG, L.C., KUNG, S.K., Grain Refining in A356 Alloys, J. Chinese Foundrymen's Association, Vol. 29, pp. 10-18, 1981.
- [56] SIGWORTH, G.K., GUZOWSKI, M.M., Grain refining of Hypoeutectic Al-Si Alloys, AFS Transactions, Vol 93, pp. 907-12, 1985.
- [57] PASCIAK, K., SIGWORTH, G.K., Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy, AFS Transactions, Vol. 109, pp. 567-577, 2001.
- [58] KORI, S.A., MURTY, B.S., CHAKRABORTY, M., Development of an Grain Refiner for Al-7Si Alloy and its Modification with Strontium, Materials Science and Engineering, A283 94-104, 2000.
- [59] MOHANTY, P.S., GRUZLESKI, J.E., Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys, Acta Metall. Mater. Vol. 44, p. 3749-3760, 1996.
- [60] QIU, D., TAYLOR, J.A., ZHANG, M.-X., KELLY, P.M., A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys, Acta Mater. Vol. 55, p. 1447-1456, 2007.
- [61] KORI, S.A., MURTY, B.S., CHAKRABORTY, M., Influence of Si and Mg on the grain refining response of Al, Mater. Sci. Technol. Vol. 15, p. 986-992, 1999.
- [62] Metals Handbook, Vol.15. casting, Ed. ASM International Handbook Committee, 743-770, Metals Park, OH, ASM International, 1989.
- [63] GIOCAI, C., Dendrite Coherency During Equiaxed Solidification in Aluminum Alloys, Chemical Communications, Stockholm University, 83 pages, 1994.
- [64] KAYIKCI, R., ÇOLAK, M., Kuma Dökülen Etial160 Alüminyum Alaşımında Tane İnceltmenin Beslenebilirlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009.
- [65] KIM, J., CHOI, J., LEE, C., YOON, E., A Study on The Variation of Solidification of A356 Aluminum Alloys with Sr Addition, Kluwer Academic Publishers, Pp 1395-1397, 2000.

- [66] KAUFMANN, J.G., ROOY, E.L., Aluminum Alloy Castings, Properties, Processes, and Applications, ASM International, American Foundry Society, USA, 2005.
- [67] SIGWORTH, G.K., Theoretical and partical aspects of the modification of aluminium-silicon alloys, A.F.S. Transactions 66, 1983.
- [68] KANANI, N., ABBASCHICAN, G.R., GAINESUILLE, F.L., Modification of –aluminium silicon alloys, Aluminium, 8, 505, 1984.
- [69] NOGITA K., MCDONALD S.D., DAHLE A.K., Aluminium phosphide as a eutectic grain nucleus in hypoeutectic Al-Si alloys, Mater. Trans. 45, 323–326. 2004.
- [70] CHEN, Z., ZHANG, R., Effect of strontium on Primary Dentrte and Eutectic Temperature of A357 Aluminium Alloy, China Foundry Vol 7 No:2,149-152, 2010.
- [71] SHABESTARI, S.G., SHAHRI, F., Influence of Modification, Solidification Conditions and Heat Treatment on The Microstructure and Hechanical Properties of A356 Aluminum alloy, Kluwer Academic Publishers, pp 2023-2032, 2004.
- [72] LU, L., DAHLE, A.K., Grain refinement efficiency and mechanism of Aluminium Carbide in Mg-Al Alloys, Scripta Materialia, Volume 53, Issue 5, 517-522, 2005.
- [73] GRUZLESKI, J.E., CLOSSET, B.M., The Treatment of Liquid Aluminum Silicon Alloys, The American Foundrymen’s Society, Inc., USA, 1990.
- [74] PAN, E.N., CHIOU, H.S., LIAO, G.J., Effects of Modification and Solidification Conditions on the Feedeing Behaviour of A356 Al Alloy, AFS Transactions, Vol.99, pp605-621, 1991.
- [75] LUA, L., NOGITA, K., DAHLE, A.K., Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al Si foundry alloys, Materials Science and Engineering A 399, 244–253, 2005.
- [76] ARDA, İ., KAYIKCI, R., ‘Döküm simülasyonu nedir? Ne değildir?’, Metal Dünyası, Mart 2006.
- [77] KAYIKCI, R., AKAR, N., Bilgisayar Destekli Döküm Tasarım Prensipleri, DTS, 2011.
- [78] KAYIKCI, R., Büyük kütleli bir çelik parçanın dökümünde klasik ve bilgisayar destekli mühendislik yöntemlerinin karşılaştırılması, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Cilt 23, No 2, 2008.

- [79] KAYIKCI, R., AKAR, N., Farklı kesit kalınlıklarına sahip büyük hacimli bir çelik dökümün simülasyon teknikleri ile tasarlanması, *Politeknik Dergisi*, 10-4, s.219-227, 2007.
- [80] STEFANESCU, D.M., Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings – review, *International Journal of Cast Metals Research*, vol 18, no 3, 129 145, 2005.
- [81] HSU, F.Y., JOLLY, M.R., CAMPBELL, J., Vortex-gate design for gravity casting, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol 19, No 1, 38-46, 2006.
- [82] SABAU, A.S., VISWANATHAN, S., Microporosity Prediction in Aluminum Alloy Castings, *Metallurgical And Materials Transactions B*, Volume 33b, 243-255, April 2002.
- [83] SAVAŞ, Ö., Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarında Mikro Porozite Oluşumuna Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, 2005.
- [84] KAYIKCI, R., Use of Computer Modelling In Predicting Microporosity In A Commercial Aluminum Casting, 66.World Foundr Congress, İstanbul, 7-9 September 2004.
- [85] CHIESA, F., MAMMEN, J., Correlating Microporosity to Local Solidification Conditions and RPT in Aluminum A356 Castings, *AFS Transactions*, Vol.107, pp103-111, 1999.
- [86] NIYAMA, E., UCHIDA, T., SAITO, S., Predicting shrinkage in large steel castings from temperature gradient calculations. *J Cast metals*, 16, p: 16–23, 1981.
- [87] LEE, Y.W., CHANG, E., CHIEU, C.F., Modelling of feeding behaviour of solidifying Al–7Si–0.3Mg alloy. *Metall Trans 21B*:715–22, 1990.
- [88] KAO, S.T., CHANG, E., Feeding efficiency criteria for porosity formation in A356 alloy sand plate castings. *AFS Trans* 104:545–9, 1996.
- [89] ATWOOD, R.C., LEE, P.D., A Three-Phase Model of Hydrogen Pore Formation during the Equiaxed Dendritic Solidification of Aluminium-Silicon Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 33: 209-221, 2002.
- [90] ATWOOD, R.C., Lee, P.D., Simulation of the Three-Dimensional Morphology of Solidification Porosity in an Aluminium-Silicon Alloy, *Acta Materialia.*, 5447-5466, 2003.

- [91] ATWOOD, R. C., SRIDHAR, S., ZHANG, W., LEE, P.D., Diffusion-Controlled growth of Hydrogen Pores in Aluminium-Silicon Casting: In situ Observation and Modelling, *Acta Materialia*, 48: 405-417, 2008.
- [92] BIANCHI, M.V.A., VISKANTA, R., Gas segregation during solidification processes, *Int.J.Heat Mass Trasnfer.*, 40, 2035-2043, 1997.
- [93] LAPHAM, D.P., SCHWANDT, C., HILLS, M.P., KUMAR, R.V., FRAY, D.J., The Detection of Hidrogen in Molten Alüminium, *Ionics*, 391-401, 2002.
- [94] CHIESA, F., REGIMBAL, P., Distinguishing Microporosity from Macroshrinkage When Modelling Solidificaiton of A356 Castings, *AFS Transactions.*, 109: 347-357, 2001.
- [95] REIKHER, A., BARKHUDAROV, M.R., Casting: An Analytical Approach, Springer-Verlag London Limited., USA, 3-41, 2007.
- [96] NYAHUMWA, C., GREEN, N.R., CAMPBELL, J., Influence of Casting Technique and Hot Isostatic Pressing on the Fatigue of an Al-7Si-Mg Alloy, *Metallurgical And Materials Transactions A*, 32: 349-358, 2001.
- [97] ANSON, J.P., GRUZLESKI, J.E., Effect of Hydrojen Content on Relative Shrinkage and Gas Porosity in Microporosity in Al-7%Si Casting, *AFS Transactions*, pp. 135-140, 1999.
- [98] CAMPBELL, J., Casting (Second Edition), Butterworth-Heinemann, Oxford., United Kingdom, 17-98, 2003.
- [99] STEFANESCU, D.M., Science and Engineering of Casting Solidification, Springer, New York, 1-3, p. 75-125, 2009.
- [100] SHIVKUMAR, S., WANG, L., APELIANI, D., Molten Metal Processing of Advanced Cast Aluminum Alloys, In *Journal of Metals*, 43, 26-32, 1991.
- [101] LIU, L., SAMUEL, F.H., Effects of Inclusions on The Tensile Properties of Al-7% Si-0.35%Mg (A356.2) Aluminum Casting Alloy, *J. Materials Science*, Vol.33, pp 2269-2281, 1998.
- [102] HSU, F-H., LIN, H-J., A Diffusing Runner for Gravity Casting, *Metallurgical And Materials Transactions B*, 40: 833-842, 2009.
- [103] CAMPBELL, J., Entrainment Defects, *Materials Science and Technology.*, (22)-2, 127-145, 2006.

- [104] CAMPBELL, J., An Overview of Effects of Bifilms on the Structure and Properties of Cast Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37: 857-863, 2006.
- [105] FUOCA, R., CORREA, R., The Effect of Gating System Design on The Quality of Aluminum Gravity Castings, IPT – Technological Research Institute, Sao paulo, Brasil, 2009.
- [106] DIVANDARI, M., CAMPBELL, J., The mechanism of bubble damage in castings, 1st International Conference on Gating, Filling and Feeding of Aluminum Castings AFS Society., 49–63, 1999.
- [107] DAI, X., YANG, X., CAMPBELL, J., Wood, J., Effect of Runner System Design on The Mechanical Strength of Al-7Si-Mg Alloy Casting, *Materials Science Engineering A*, 315-325, 2003.
- [108] PAVLAK, L., Effect of Filling Conditions on The Quality of Cast Aluminum Cylinder Heads, Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 31-39, 2008.
- [109] DISPINAR, D., CAMPBELL, J., Determining Aluminium Melt Quality, Proc., 66. World Foundry Congress, Istanbul, Vol.1, pp 45-58, 6-9 September 2004.
- [110] DISPINAR, D., CAMPBELL, J., Critical Assessment of Reduced Pressure Test. Part 1: Porosity Phenomena, *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 17(5), s280–286, 2004.
- [111] DISPINAR, D., CAMPBELL, J., Use of Bifilm Index as an Assessment of Liquid Metal Quality, *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 19 (1), s.5-17, 2006.
- [112] DISPINAR, D., CAMPBELL, J., Proc. Shape Casting: The 2nd Symposium, (Ed. P. N. Crepeau et al.), Orlando, FL, TMS, s.11–18, 2007.
- [113] YILMAZ, F., Al-Si alaşımlarında çiftfilm ve modifikasyon teorilerine eleştirel bakış, *Alüminyum sempozyumu*, İstanbul, 411–423, 2009.
- [114] MAKAROV, S., APELIAN, D., LUDWIG, R., Inclusion Removal and Detection in Molten Aluminium: Mechanical, Electromagnetic and Acoustic Techniques, *AFS Transactions*, 727-735, 1999.
- [115] MI, J., HARDING, R.A., WICKINS, M., CAMPBELL, J., Entrained Oxide Films in TiAl Castings, *Intermetallics*, 377-385, 2003.
- [116] DIVANDARI, M., CAMPBELL, J., Mechanisms of Bubble Trail Formation in Castings, *AFS Transactions*., 109: 433-442, 2001.

- [117] DISPINAR, D., CAMPBELL, J., Alüminyum ve alaşımlarının döküm kalitesinin belirlenmesi, Alüminyum sempozyumu, İstanbul, 394–404, 2009.
- [118] DISPINAR, D., NORDMARK, A., DI SABATINO, M., ARNBERG, L., Alüminyum ve alaşımlarının dökümü sırasında gaz giderme işlemi ve döküm kalitesi üzerine etkileri, Alüminyum sempozyumu, İstanbul, 405–410, 2009.
- [119] DISPINAR, D., CAMPBELL, J., Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings, Materials Science and Engineering A 528, 3860–3865, 2011.
- [120] <http://www.foseco.com/tr/end-markets/foundry>, Erişim Tarihi: 13.05.2014
- [121] DASH, M., MAKHLOUF, M., Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum–silicon casting alloys, Journal of Light Metals, 1 pp. 251-265, 2001.
- [122] CAMPBELL, J., Feeding mechanisms in casting, AFS Cast Metals, Research Journal 5, pp.1–8, 1999.
- [123] DISPINAR, D., Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys, School of Metallurgy and Materials The University of Birmingham, Doctor of Philosophy, UK, 16-25, 2005.
- [124] KARAYAZI, A., KAYIKCI, R., ÇOLAK, M., YURTSEVEN, Y., Etial 110 Alüminyum alaşımının Dökümünde Tane İnceltmenin Besleme Etkinliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, 5. Alüminyum Sempozyumu, 13-14 Ekim 2011.
- [125] SCHMIDT, D.C., CFS Settings, Finite Solutions Inc Slinger WI, February 8, 2010.
- [126] REIS, A., HOUBAERT, Y., XU, Z., Modeling of shrinkage defects during solidification of long and short freezing materials, Journal of Materials Processing Technology Volume 202, Vol. 1-3, pp. 428-434, 2008.
- [127] DARCY, H., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris, 1856.
- [128] CHEN, O., RAVINDRAN, C., A study of thermal parameters and Interdendritic Feeding Foam Casting, JMEPEG, 9: 386-395, 2000.
- [129] GEIGER, G.H., POIRIER, D.R., Addison-Wesley Reading, Transport Phenomena in Metallurgy, 1973.

- [130] DANYLO, B.O., DOĞAN, Ö.N., An examination of effects of solidification parameters on permeability of a mushy zone in castings, *Journal of Materials Science*, 43, pp.1471–1479, 2008.
- [131] LEE, P. D., HUNT, J. D., Hydrogen Porosity in Directional Solidified Aluminium-Copper Alloys: In-situ Observation, *Acta Materialia*, Vol. 45(10), s.4155–4169, 1997.
- [132] HONG, C.H.P., UCHIDA, T., KIMURA, Y., Solidification Simulation of Shaped Castings by the Boundary Element Method and the Prediction of Shrinkage Cavity, Vol. 59-2, s. 61-68, 1987.
- [133] PEGUET, C.H., GREMAUD, M., RAPPAZ, M., Modeling of Microporosity, Macroporosity, and PipeShrinkage Formation during the Solidification of Alloys Using a Mushy-Zone Refinement Method: Applications to Aluminum Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions*, VOLUME 33A, 2095-2016, 2002.
- [134] ARNBERG, L., BACKERUD, L., CHAI, G., Solidification Characteristics of aluminum alloys Volume 3: Dendrite coherency, *American Foundrymens Society*, Edt. Thomas S.P. Illinois, USA, 1996.
- [135] NIELSEN, Ø., OLSEN, S.O, Experiment for Quantification of Feedability and Permeability in Industrial Aluminium Alloys, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol.19, No.1, s.32-37, 2006.
- [136] CHAI, G. BACKERUD, L., ROLLAND, T., ARNSBERG, L., Dendrite Coherency during equiaxed solidification in Binary Aluminium Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 26A, April, 1995-1996.
- [137] DJURDJEVIC, M. B., SOKOLOWSKI, J. H., ODANOVIC, Z., Determination of dendrite coherency point characteristics using first derivative curve versus temperature, *J. Therm Anal Calorim*, 109, 875–882, DOI 10.1007/s10973-012-2490-4, 2002.
- [138] VELDMAN, N.L.M, DAHLE, A.K., JOHN, D.H., ARNSBERG, L., Dendrite Coherency of Al-Si-Cu Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 32A, January 2001-2002.
- [139] EMADI, D. WHITING, L.V., Determination of Solidification characteristic of solidification characteristics of Al-si alloys by thermal analysis, *Transactions of the American Foundry Society V 110 Paper No 02-033 P 285-296*, 2002.

- [140] FARAHANY, S., OURDJINI, A., Effect of cooling rate silicon refiner/modifier on solidification pathways of Al-11.3Si-2Cu-0.4FeAlloy, Materials and Manufacturing Process, 28; 657-663, 2013.
- [141] KARAYAZI, A., Etial110 Alaşımının Dökümünde Makro ve Mikro Porozite Oluşumunun Modellenmesi, Y.L. Tezi, SAÜ-FBE Ocak 2009.
- [142] YURTSEVEN, Y., Etial177 Alaşımının Dökümünde Makro ve Mikro Porozite Oluşumunun Modellenmesi, Y.L. Tezi, SAÜ-FBE, Ocak 2009.
- [143] KISAOĞLU, A.K, Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Kritik Katı Oranı Faktörünün Katılaşma Hızına Bağlı Olarak Modellenmesi, Y.L. Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2011.
- [144] YANG, W.H., TARNG, Y.S., Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, Journal of materials processing technology, 84:122–129, 1998.
- [145] KIRBY, E.D., ZHANG, Z., CHEN, J.C., CHEN, J., Optimizing surface finish in a turning operation using the Taguchi parameter design method, Int J Adv Manuf Technol, 30: 1021–1029, 2006.
- [146] SAVAŞKAN, M., YAPTIK, Y., ÜRGEN, M., Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu, İTÜ Dergisi/D mühendislik, Cilt: 3, Sayı: 6, 117–128, Aralık 2004.
- [147] TAGUCHI, T., ELSAYED, E., HSIANG, T., Quality Engineering In Production Systems, McGraw-Hill International Editions, Engineering Series, 1989.
- [148] ROSS, P.J., In: Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. New York: McGraw-Hill Inc., 1988.
- [149] İZGİZ, S., Deney Tasarımı ve Taguchi Metodu Ürün ve Proseslerinin Optimizasyonu, Federal Mogul Yayınlar, Maşukiye, Şubat 1999.
- [150] LOCHNER, R.H., MATAR, J.E. , Designing For Quality: An Introduction To The Best Of Taguchi And Western Methods Of Statistical Experimental Design, Chapman And Hall, London, Newyork, Tokyo, Melbourne, Madras, 1990.
- [151] <http://www.foseco.com/tr/end-markets/foundry/urunler/seramik-olmayan-filtreler/>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [152] <http://www.alteams.com/alteams-tech-centre/design-assistance/cast-aluminium-properties.html>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [153] <http://www.matweb.com/index.aspx>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.

- [154] ÇOLAK, M., Döküm endüstrisinde ergitme, endüksiyon ocakları ve spektral analiz hesaplamaları, Demir Çelik Store, Temmuz 2011.
- [155] <http://www.teknometal.com.tr/Productsub.aspx>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [156] AALUMİNUM ASSOCIATION, Standard Test Procedure for Aluminum Alloy Grain Refiners: TP-1, (The Aluminium Association, Washington DC). (1987)
- [157] BIROL, Y., The effect of holding conditions in the conventional halide salt process on the performance of Al–Ti–B grain refiner alloys. Journal of Alloys and Compounds, 427(1-2), 142–147. doi:10.1016/j.jallcom.2006.03.002. (2007).
- [158] VANDER, V., GEORGE, F., Metallography, Principles and Practice, ASM International, p. 197, ISBN 978-0-87170-672-0, 1999.
- [159] <http://www.siltas.com.tr/detay.php>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [160] <http://www.burcteknik.com/kurubuz.asp>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [161] TAYLOR, R.P., MCCLAIN, S.T., BERRY, J.T., Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle. Int J Cast Met, 11:247–57, 1999.
- [162] <http://www.onatus.com/yazilim/Pages/jmatpro.aspx>, Erişim Tarihi: 18.06.2014.
- [163] KAPSIZ, M., Segman Silindir Yüzeylerinde Bor Dop Edilmiş Kaplamanın Motor Sürtünme Kayıplarına Etkisinin İncelenesi, Doktora Tezi, SAÜ-FBE Ekim 2011.
- [164] REIS, A., XU, Z. A., DUARTE, J.F., SANTOS, A.D., HOUBEART, Y., MAGALHAES, A.B., A Model for Prediction of Shrinkage Defects in Long and Short Freezing Range Materials, International Journal of Cast metal Research, 20-3, 171-175, 2007.
- [165] SHAFYEI, A., MOUSAVI, S.H.A., BAHRAMI, A., Prediction of porosity percent in Al–Si casting alloys using ANN, Materials Science and Engineerng A, 431, 1-2, 206-210, 2006.
- [166] KURZ, W., FISHER, D. J., Fundamentals of solidification, Trans Tech Publications, Third edition, Switzerland-Germany-UK-USA, 21-33, 1989.
- [167] PORTER, D. A., EASTERLING, K. E., Phase transformations in metals and alloys, Chapman and Hall, UK, 193-195, 1990.

- [168] RAVI, B., Metal Casting: Computer aided designe and analysis, PHI, India 42-43, 2005.
- [169] ÇOLAK, M., KAYIKCI, R., A356 Döküm Alaşımında Elektromanyetik Karıştırmanın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi ,Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences, PAJES) , 15, 1 - 5, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Murat ÇOLAK, 16.03.1981 de Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 1998 yılında Fatih Anadolu Teknik Lisesi, Elektronik bölümünden mezun oldu. 2000 yılında başladığı ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Döküm Öğretmenliği programını 2004 yılında bitirdi. Vatani görevini 301.dönem yedek subay olarak Şırnak Gülyazı'da tamamladı. 2005-2006 yıllarında döküm sektöründe çeşitli firmalarda laboratuvar sorumlusu ve vardiya amiri olarak çalıştı. Şubat 2007 tarihinden itibaren Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi bölümünde 2007 yılında başladığı Yüksek Lisans eğitimini 2009 yılında tamamladıktan sonra aynı yıl Doktora eğitimine başladı halen burada eğitime devam etmektedir.